UNIVERSITÉ DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE : Sciences de la Société : Territoires, Economie et Droit – SSTED

ÉQUIPE DE RECHERCHE : UMR 7324 CNRS CITERES Dynamique et Actions Territoriales et Environnementales (DATE)

UNIVERSITÉ DE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH

FORMATION DOCTORALE : Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable - RNE2D

Laboratoire de Géosciences de l'Environnement et Risques Naturels

THÈSE EN COTUTELLE

Présentée par :

Kaoutar MOUNIR

Soutenue le : **26 Septembre 2023**

pour obtenir le grade de :

Docteur de l'Université de Tours

Discipline/ Spécialité : Géographie

Et

Docteur de l'Université de Sidi Mohamed Ben Abdellah

Discipline/ Spécialité : Géosciences de l'environnement et risques naturels

Analyse et modélisation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha (Maroc)

Jury :

Pr. OUARHACHE Driss	Professeur des universités, Faculté des Sciences Dhar Mahraz – Fès, Maroc	Président
Pr. BENAABIDATE Lahcen	Professeur des universités, Faculté des Sciences et Techniques de Fès, Maroc	Rapporteur
Pr. EL AMRANI Mohamed	Professeur des universités, École Nationale d'Agriculture de Meknès, Maroc	Rapporteur
Pr. EL KHANCHOUFI Abdesalam	Professeur des universités, Faculté des Sciences Dhar Mahraz – Fès, Maroc	Directeur de thèse
Pr. HANCHANE Mohamed	Professeur des universités, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Dhar El Mehraz de Fès, Maroc	Examinateur
Dr. LA JEUNESSE Isabelle	Maître de conférences HDR, Faculté De Droit, Economie Et Sciences Sociales, Tours, France	Directrice de thèse
Pr. LUDWIG Ralph	Professeur des universités, Université Ludwig-Maximilian de Munich, Allemagne	Rapporteur
Pr. SELLAMI Haykel	Professeur des universités, Centre de Recherche et des Technologies des Eaux (CERTE), Tunisie	Examinateur

“Water is the most critical resource issue of our lifetime and our children’s lifetime. The health of our waters is the principal measure of how we live on the land.”

— Luna Leopold

Remerciements

La réalisation de la présente thèse a été possible grâce à la présence et à la bienveillance de plusieurs personnes. Ce projet n‘aurait vu le jour sans la sagesse, la confiance et la patience de mes directeurs de thèse.

Je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude envers ma directrice de thèse. Votre soutien indéfectible, vos précieux conseils et surtout, votre confiance en moi ont été d'une aide inestimable pour atteindre mes objectifs académiques et professionnels. Je suis particulièrement reconnaissante pour l'opportunité que vous m'avez offerte de poursuivre un doctorat en cotutelle à l'échelle internationale, ce qui m'a permis d'entamer la carrière de mes rêves en tant qu'enseignant-chercheur en enseignant à l'Université de TOURS et en participant à deux grands projets de recherche européens - "NEXOGENESIS" et "ARSINOE". Votre disponibilité, votre attention et votre soutien m'ont beaucoup aidée à surmonter la distance avec ma famille et à faire face à toutes les difficultés que j'ai rencontrées tout au long de mon parcours.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse Abdessalam EL KHANCHOUFI pour sa contribution inestimable à la réalisation de ma thèse. Grâce à son accompagnement constant, son encouragement à entreprendre une cotutelle internationale et sa disponibilité sans faille. Ses commentaires constructifs et ses conseils éclairés ont été d'une grande aide pour moi tout au long de ce projet, en m'aidant à améliorer mes compétences de recherche et à repousser mes limites. Sa connaissance approfondie du terrain d'étude a également été précieuse pour moi. Je suis particulièrement reconnaissante pour son aide dans la gestion des procédures administratives liées à ma thèse, qui m'a permis de me concentrer sur mes recherches sans souci. Encore une fois, merci infiniment pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Enfin, vos encouragements ont été pour moi une source constante de motivation et je suis très reconnaissante pour tout ce que vous avez fait pour moi. Je ne saurai jamais assez vous remercier pour votre contribution inestimable à ma formation et à ma réussite professionnelle et j'espère que notre collaboration se poursuivra à l'avenir.

J'adresse mes sincères remerciements et ma vive reconnaissance à Monsieur Haykel SELLAMI pour son soutien précieux tout au long de ma recherche. Ses conseils éclairés, son suivi attentif et ses encouragements ont été d'une importance capitale pour la réussite de mon travail. Je tiens

également à souligner sa générosité envers moi en accordant du temps précieux à mes questions et préoccupations. Je suis particulièrement reconnaissante d'avoir bénéficié de plusieurs formations en modélisation hydro-climatique grâce à son expertise. Sa contribution scientifique dans cette partie de ma thèse a grandement enrichi mon travail et m'a permis d'acquérir de nouvelles compétences dans ce domaine.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail :

- Monsieur BENAABIDATE Lahcen, Professeur au Département de l'Environnement à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc
- Monsieur EL AMRANI Mohamed de l'École Nationale d'Agriculture de Meknès, Maroc
- Monsieur HANCHANE Mohamed Enseignant-Chercheur au département de Géographie, Faculté Des Lettres Et Des Sciences Humaines Dhar El Mehraz, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc
- Monsieur LUDWIG Ralph Professeur d'université à l'Université Ludwig-Maximilian de Munich, Allemagne
- Monsieur SELLAMI Haykel Enseignant-Chercheur au Centre de recherche et des technologies des eaux (CERTE), Tunisie

Je tiens également à remercier Madame Nora SEMMOUD, Directrice de l'UMR CITERES 7324 CNRS pour les conditions d'accueil et de travail dans les locaux respectifs. Je remercie également les personnels de ces institutions pour la disponibilité, la bienveillance, la gentillesse et le professionnalisme avec lesquels ils ont toujours fait face à mes demandes. Je pense particulièrement à Madame Christèle GAUDRON et Madame Bénédicte RICHARD (de l'ED SSTED), Madame Séverine FROMIAU, Madame Patricia GRENECHE, Madame Jennifer LOULLIER (de UMR CITERES).

Mes vifs remerciements s'adressent également aux amis doctorants de mes deux laboratoires d'accueil pour tous les moments de joie passés ensemble.

Je pense aussi et surtout à la famille. Vous aurez compris le risque d'oublier certaines personnes tout aussi importantes. Qu'elles se reconnaissent et qu'elles trouvent également l'expression de mes sincères remerciements.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....**1**

PARTIE I : CONTEXTE ET METHODOLOGIE.....**9**

CHAPITRE 1 : CONTEXTE CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA.....**10**

CHAPITRE 2 : CONTEXTE PHYSIQUE ET TERRITORIAL.....**19**

PARTIE II : EVALUATION ET GESTION DES ENJEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA.....**40**

CHAPITRE 3 : L'ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DE L'OCCURRENCE DE LA SECHERESSE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA.....**41**

CHAPITRE 4 : LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA : DEFIS ET OPPORTUNITES POUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE.....**69**

PARTIE III : L'EVOLUTION HYDRO-CLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA88

CHAPITRE 5 : ÉVALUATION DES INCERTITUDES DANS LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA.....**89**

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DE LA VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA DANS LE CADRE DES PROJECTIONS FUTURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....**103**

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....**126**

Résumé

L'objectif de cette thèse est d'étudier les défis liés à la gestion des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha, situé dans le nord du Maroc, à l'aide de modèle hydro-climatique et de l'analyse géostatistique. La thèse vise l'atteinte de trois objectifs : (i) évaluer les tendances à la sécheresse par le développement de modèles spatiaux de l'occurrence de la sécheresse, (ii) quantifier les impacts du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant, et (iii)évaluer en conséquence les défis de la gestion de l'eau dans le bassin versant de l'Ouergha.

D'abord, les tendances en matière de sécheresse ont été évaluées en combinant les données de l'indice d'oscillation nord-atlantique (NAOi), de l'indice d'oscillation ouest-méditerranéenne (WeMOi), l'indice météorologique (SPI), l'indice hydrologique (SDI) et de l'imagerie satellitaire pour calculer l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et l'indice d'humidité par différence normalisée (NDMI). Ensuite, les impacts du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de l'Ouergha ont été quantifiés à l'aide du modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) combiné aux projections climatiques multi-modèles EURO-CORDEX pour les périodes de référence (1979-2005) et futures (2041-2080). Les défis et les opportunités de la gestion de l'eau dans le bassin versant d'Ouergha ont été évalués en adoptant une approche mixte, comprenant une analyse documentaire, des entretiens et un questionnaire pour les agriculteurs. Enfin,

Les résultats montrent des tendances à la sécheresse détectées dans le bassin versant de l'Ouergha à l'aide d'analyses statistiques. Les tests de corrélation de Pearson et de Mann-Kendall ont indiqué une tendance à l'augmentation de l'intensité de la sécheresse. Pendant les périodes de sécheresse, la couverture végétale et l'humidité ont été maintenues grâce à la présence des réserves des barrages. Cela souligne la nécessité d'une approche holistique et intégrée de la gestion des ressources en eau, impliquant une coordination entre les différentes parties prenantes, telles que les autorités locales, les agriculteurs et les organisations de la société civile. L'étude souligne l'importance de mettre en œuvre des stratégies de gestion de l'eau efficaces et durables qui tiennent compte des besoins socio-économiques, des défis environnementaux et des facteurs climatiques. La région méditerranéenne prévoit des conditions climatiques plus sèches à l'avenir. L'étude réalisée prévoit des diminutions de 14 %, 13 % et 15 % des précipitations, du débit et de la teneur en eau du sol, respectivement, dans le bassin hydrographique d'Ouergha. En outre, l'évapotranspiration devrait augmenter de 12 %. Ces résultats suggèrent un risque plus élevé de sécheresse.

La thèse contribue au corpus de connaissances sur les impacts du changement climatique sur les ressources en eau et la production agricole dans le bassin versant de l'Ouergha. Des mesures urgentes d'adaptation et d'atténuation sont nécessaires pour préserver les ressources en eau et la production agricole. L'approche holistique et intégrée de la gestion des ressources en eau est importante, impliquant une coordination entre les parties prenantes et prenant en compte les besoins socio-économiques, les défis environnementaux et les facteurs climatiques.

Mots clés : Changement climatique, Sécheresse, Eau, modèle SWAT, Euro-CORDEX, Bassin versant de l'Ouergha (Région méditerranéenne)

Abstract

The objective of this thesis is to study the challenges related to water resource management in the Ouergha catchment, located in northern Morocco, using a hydro-climatic model and geostatistical analysis. The thesis aims to achieve three objectives: (i) evaluate drought trends through the development of spatial models of drought occurrence, (ii) quantify the impacts of climate change on the hydrology of the catchment, and (iii) assess the water management challenges in the Ouergha catchment accordingly.

First, drought trends were evaluated by combining data from the North Atlantic Oscillation Index (NAOi), West Mediterranean Oscillation Index (WeMOi), Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Discharge Index (SDI), and satellite imagery to calculate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Moisture Index (NDMI). Then, the impacts of climate change on the hydrology of the Ouergha catchment were quantified using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model combined with multi-model EURO-CORDEX climate projections for reference (1979-2005) and future (2041-2080) periods. The water management challenges and opportunities in the Ouergha catchment were assessed through a mixed approach, including documentary analysis, interviews, and a questionnaire for farmers.

The results show drought trends detected in the Ouergha catchment using statistical analyses. Pearson correlation and Mann-Kendall tests indicated a trend towards increased drought intensity. During drought periods, vegetation cover and moisture were maintained through the presence of dam reservoirs. This highlights the need for a holistic and integrated approach to water resource management, involving coordination among various stakeholders such as local authorities, farmers, and civil society organizations. The study emphasizes the importance of implementing effective and sustainable water management strategies that consider socio-economic needs, environmental challenges, and climate factors. The Mediterranean region is projected to experience drier climatic conditions in the future. The study predicts decreases of 14%, 13%, and 15% in precipitation, streamflow, and soil moisture content, respectively, in the Ouergha watershed. Additionally, evapotranspiration is expected to increase by 12%. These results suggest a higher risk of drought.

The thesis contributes to the body of knowledge on the impacts of climate change on water resources and agricultural production in the Ouergha catchment. Urgent adaptation and mitigation measures are needed to preserve water resources and agricultural production. The holistic and integrated approach to water resource management is important, involving coordination among stakeholders and considering socio-economic needs, environmental challenges, and climate factors.

Keywords: Climate change, Drought, Water, SWAT model, Euro-CORDEX, Ouergha catchment (Mediterranean region)

Liste des figures

Figure 1. *Les pays confrontés à un stress hydrique extrêmement sévère (WRI, 2019)* *3*

Figure 2. *Visualisation du réseau bibliométrique sur la sécurité de l'eau dans le monde. (Aalirezaei, 2021)* *5*

Figure 3. *La série temporelle en composante principale (PC) de l'EOF principale des anomalies annuelles (A) et mensuelles (B) de la PSL sur le secteur Atlantique (20-80N, 90W-40E) sert d'indice alternatif (Hurrell (1995,2003).* *14*

Figure 4. *SOI optimal Tahiti moins Darwin [T-D] (en haut), Estimations du bruit [T+D] (en bas)* *15*

Figure 5. *Indice d'Oscillation de la Méditerranée occidentale pendant la phase positive (hiver) et la phase négative (été).* *16*

Figure 6. *Localisation du bassin versant de l'Ouergha* *20*

Figure 7. *Carte géologique du bassin versant de l'Ouergha (Suter, 1980)* *22*

Figure 8. *Carte des sols du bassin versant de l'Ouergha (1994) (DREFLCD, 1995)* *23*

Figure 9. *Carte des précipitations par la méthode des isohyètes dans le bassin versant de l'Ouergha* *25*

Figure 10. *Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'Ouergha (2018) (Source : Auteur)* *30*

Figure 11. *Découpage administratif dans le bassin versant de l'Ouergha* *31*

Figure 12. *Superficies cultivées des principales céréales par province en 2020 (HCP, 2020)* *37*

Figure 13. *Effectif du cheptel par province en 2020 en milliers de têtes* *38*

Figure 14. *Moyenne annuelle des précipitations dans le bassin versant de l'Ouergha pour 33 ans* *46*

Figure 15. *Moyenne annuelle des débits dans le bassin versant de l'Ouergha pour 33 ans* .. *46*

Figure 16. *Organigramme du cadre général de la méthodologie adoptée* *49*

Figure 17. *Courbes de probabilité de dépassement pour des stations sélectionnées de précipitations (à gauche) et de débit (à droite) dans le bassin versant.* *54*

Figure 18. *Valeurs temporelles du SPI et du SDI de 1984/85-2016/17 ..... 55*

Figure 19. *Corrélogramme des coefficients de corrélation de Pearson entre le SPI et les indices d'oscillation atmosphérique à l'échelle mensuelle de 1985-2017 à un niveau de signification alpha = 0,05. Corrélation forte : valeurs comprises entre ± 0,50 et ± 1 ; corrélation moyenne : valeurs comprises entre ± 0,30 et ± 0,49 ; corrélation faible : valeurs inférieures à + 0,29 .. 57*

Figure 20. *Corrélogramme des coefficients de corrélation de Pearson entre SPI et SDI à l'échelle mensuelle de 1985-2017 à un niveau de signification alpha = 0,05. Corrélation forte : valeurs comprises entre ± 0,50 et ± 1 ; corrélation moyenne : valeurs comprises entre ± 0,30 et ± 0,49 ; corrélation faible : valeurs inférieures à + 0,29 ..... 57*

Figure 21. *Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 1993 ..... 61*

Figure 22. *Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 1995 ..... 62*

Figure 23. *Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 1999 ..... 63*

Figure 24. *Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 2005 ..... 63*

Figure 25. *Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 2007 ..... 64*

Figure 26. *Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 2016 ..... 65*

Figure 27. *Organisation du secteur de l'eau au Maroc 77*

Figure 28. *Acteurs et instituts impliqués dans le système d'irrigation de l'eau dans le bassin versant d'Ouergha 81*

Figure 29*. Débits mensuels dans le bassin versant de l'Ouergha (calibration, validation) ... 99*

Figure 30. *Comparaison du comportement de la courbe de durée de débit observé (Noir) et simulé (Bleu) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de calibration (A) et de validation (B) 100*

Figure 31. *Précipitations mensuelles (PCP) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et futures (2041-2080) 111*

Figure 32. *Température mensuelle (TMP) (°C) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)* *111*

Figure 33. *Indicateur de débit (Q) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)* *112*

Figure 34. *Indicateur de la teneur en eau du sol (SWC) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)* *113*

Figure 35. *Indicateur d'évapotranspiration potentielle (ETP) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)* *114*

Figure 36. *Variations des débits extrêmes minimums et maximums pour différentes durées dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)* *115*

Figure 37. *Le calendrier annuel des débits minimum et maximum sur 1 jour, 30 jours et 90 jours dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et futures (2041-2080)* *116*

Liste des tableaux

Tableau 1. *Relation entre le changement climatique et certains indicateurs d'instabilité politique (Sofuoğlu, 2020)* *11*

Tableau 2. *Le réseau fonctionnel des stations climatiques (ABHS, 2018)* *26*

Tableau 3. *Analyse des tendances fondamentales des précipitations mensuelles pour la moyenne des stations de l'Ouergha (ABHS, 2018)* *26*

Tableau 4*. Le réseau de stations hydrologiques fonctionnelles (ABHS, 2018)* *27*

Tableau 5*. Test de détection de la rupture météorologique, R=Refusé A=Accepté (Source : Auteur)* *28*

Tableau 6. *Test de détection de la rupture hydrologique, R=Refusé A=Accepté (Source : Auteur)* *29*

Tableau 7*. Population recensée en 2014 et projetée en 2030 dans le bassin versant de l'Ouergha (HCP, 2014)* *32*

Tableau 8. *Taux de chômage selon les communes en 2014 dans le bassin versant de l'Ouergha (HCP, 2014)* *33*

Tableau 9. *Activité des unités industrielles et Mâasras pour l'année 2020* *34*

Tableau 10. *Situation hydraulique des barrages hydroélectriques (ABHS, 2018)* *35*

Tableau 11*. Evolution de la production d'eau superficielle par centres (Production en* m^3*) (ABHS, 2018)* *35*

Table 12. *Evolution de la production nette d'électricité de l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable* *36*

Tableau 13. *Ventes d'électricité selon les provinces et préfectures en millions de Kwh (HCP, 2020)* *36*

Tableau 14. *Les caractéristiques du capteur Landsat (http://landsat.gsfc.nasa.gov/)* *48*

Tableau 15. *Les bandes spectrales du capteur Landsat 5 TM (http://landsat.gsfc.nasa.gov/)* *48*

Tableau 16. *Les bandes spectrales du capteur Landsat 8 OLI (http://landsat.gsfc.nasa.gov/)* *49*

Tableau 17. *Classification des valeurs SPI et SDI (Tsakiris, et al., 2009)* *51*

Tableau 18. *La tendance du SPI des 10 stations climatiques du le bassin versant de l'Ouergha à différentes échelles de temps, pour un niveau de signification de 0,05. Les couleurs du tableau indiquent : Bleu : Les scores Z supérieurs ou égaux à 1,96 indiquent une tendance significative dans les données. Vert : Les scores Z compris entre 1,0 et 1,96 indiquent une tendance faible. Gris : les valeurs inférieures à 1,0 indiquent une absence de tendance. + : valeur positive ; - : valeur négative.* *59*

Tableau 19. *La tendance du SDI des 8 stations hydrométriques du bassin versant de l'Ouergha à différentes échelles de temps, pour un niveau de signification de 0,05. Les couleurs du tableau indiquent : Bleu : Les scores Z supérieurs ou égaux à 1,96 indiquent une tendance significative dans les données. Vert : Les scores Z compris entre 1,0 et 1,96 indiquent une tendance faible. Gris : les valeurs inférieures à 1,0 indiquent une absence de tendance. + : valeur positive ; - : valeur négative.* *60*

Tableau 20. *Caractéristiques des barrages de l'Ouergha (ABHS, 2018)*..... *73*

Tableau 21. *Chronologie institutionnelle des secteurs de l'eau au Maroc (Tanouti, 2017 modifié)*..... *76*

Tableau 22. *Matrice des instruments de gouvernance de l'irrigation de l'eau du Bassin versant de l'Ouergha* *79*

Tableau 23. *Données disponibles utilisées pour la mise en place de SWAT sur le bassin versant de l'Ouergha* *92*

Tableau 24. *Caractéristiques des sous-bassins de Ouergha* *93*

Tableau 25. *Les paramètres les plus sensibles du modèle SWAT* *95*

Tableau 26. *Classement des paramètres les plus sensibles dans la simulation de l'écoulement* *98*

Tableau 27. *Évaluation de la performance du modèle SWAT dans la calibration et la validation des simulations de ruissellement mensuel*..... *100*

Tableau 28. *Indicateurs hydrologiques sélectionnés pour l'évaluation de l'impact du changement climatique*..... *109*

Tableau 29. *Valeurs moyennes du débit Q (m^3/s), des précipitations PCP (mm), et des températures maximale (Tmax) et minimale (Tmin) (°C) dans le bassin versant de l'Ouergha* *110*

Introduction générale

1. Eau et sécurité environnementale

La gestion des ressources en eau douce est un grand défi pour la population mondiale. Ce défi est dû aux changements climatiques et à la surexploitation anthropique des eaux, en particulier dans les bassins méditerranéens, hot spot climatiques (IPCC, 2014). La sécurité hydrique de demain est celle qui garantira une quantité et une qualité d'eau suffisantes pour la santé, la production, les écosystèmes et le maintien des propriétés de fonctionnalités de l'écosystème et le développement économique.

Dans les années 90, plusieurs études ont été menées sur les liens entre "accès à l'eau" et "développement". Ces études comprennent celles menées par le Conseil mondial de l'eau, le Partenariat mondial de l'eau, le Panel mondial sur le financement des infrastructures de l'eau et le 3ème Forum mondial de l'eau à Kyoto (The World Bank, 1992). Les résultats de ces études ont montré une forte sensibilité aux changements des régimes hydrologiques, une pénurie croissante des ressources en eau ainsi que des menaces pour la disponibilité et la gestion de l'eau (IPCC, 2014).

Cependant, la compréhension des impacts du changement climatique est encore incomplète, notamment en raison des incertitudes actuelles dans les prévisions climatiques et de la nécessité de parvenir à une échelle spatiale adaptée à l'étude des impacts (IPCC, 2014). En effet, le manque de données régionales et l'inadaptation des échelles spatiales et temporelles utilisées par différentes perspectives scientifiques sont des obstacles pour la prise de décisions liées à l'eau (Frieler, 2015).

En outre, les études existantes montrent que la quantité réelle de ressources en eau disponibles et exploitables est inférieure aux calculs basés uniquement sur les données hydrologiques. Cette différence est causée par une variété de facteurs liés à la gestion et aux politiques environnementales dans chaque territoire qui affectent les ressources en eau (Döll, et al., 2010).

Pour établir des relations avec les représentants politiques et les parties prenantes au niveau de l'Union Européenne et des pays méditerranéens et voisins, le groupe de recherche CLIWASEC (Climate change Impacts on Water and Security) a été conçu conjointement avec le projet de recherche CLICO (Climate Change, Hydro Conflicts and Human Security), qui aborde plusieurs questions de recherche techniques en ce qui concerne les impacts du

changement climatique sur les ressources en eau menaçant la sécurité hydrique et environnementale de manière intégrée (Ludwig, et al., 2016; WRI, 2019).

En revanche, certains scientifiques ont déclaré que les États privilégient encore les préoccupations économiques plutôt qu'aux préoccupations de santé publique, alors que le problème est systémique et ancré dans l'approche de la sécurité de l'eau. Le changement climatique a également un impact sur les infrastructures de l'eau qui menace leur durabilité (Brubaker, et al., 2014).

Selon le World Resources Institute (WRI), il a été constaté qu'un quart de la population mondiale vit dans des régions où le stress hydrique est extrêmement élevé (Figure 1), indiquant une forte compétition pour les ressources en eau. Les experts du WRI ont averti que l'augmentation du stress hydrique pourrait entraîner une multiplication des "jours zéro", c'est-à-dire des périodes où la pénurie d'eau devient imminente et dangereuse (WRI, 2019).

Il est important de souligner que douze des 17 pays les plus touchés par le stress hydrique se trouvent au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (MENA), parmi lesquels figure le Maroc. En raison du climat chaud et sec de la région, l'approvisionnement en eau est déjà limité, mais la demande croissante a conduit ces pays à une situation de stress extrême (WRI, 2019).

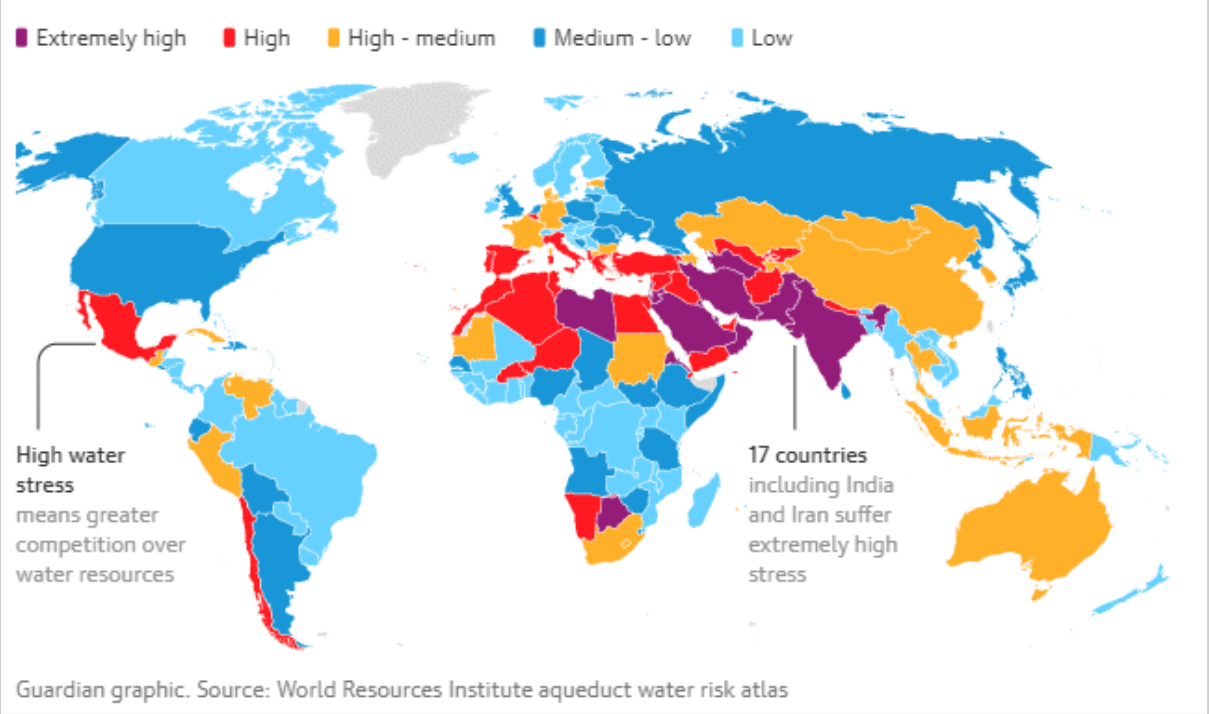


Figure 1. Les pays confrontés à un stress hydrique extrêmement sévère (WRI, 2019)

2. La crise de l’eau en Méditerranée

Les changements puissants du climat actuel et futur devraient agir directement sur l'intensité du cycle hydrologique, en termes de disponibilité des ressources en eau, l'occurrence et la gravité des événements météorologiques et hydrologiques (les sécheresses, les tempêtes et les inondations). Les quantifications de ces impacts ont été réalisées par l'utilisation combinée de modèles climatiques et hydrologiques (IPCC, 2007; Navarra, 2013; Piras, et al., 2016). Les évaluations ont mis l'accent sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et les sécheresses évaluées à des échelles de temps mensuelles, saisonnières ou annuelles (Vicente-Serrano, 2014 ; Piras, et al., 2016; Hänsel, 2019), mais ont moins étudié l'impact du changement climatique sur la fréquence future des événements hydrométéorologiques extrêmes (Piras, et al., 2016; Hermoso, 2021; Zittis, 2021).

L'évolution des conditions climatiques et météorologiques enregistrées dans la région méditerranéenne et surtout dans la dernière décennie, influence négativement les systèmes hydrologiques, économiques et sociaux (Grey, et al., 2013; La Jeunesse, et al., 2016). L'instabilité des facteurs climatiques continue à être une source importante de difficultés économiques locales. En particulier, la sécheresse peut avoir un impact négatif sur la demande en eau et les réserves d'eau souterraine (Döll, et al., 2010; IPCC, 2014).

L'analyse des différentes interventions en termes de crise de l'eau et/ou de sécurité hydrique, intègre différents indicateurs. Ces indicateurs visant à garantir la durabilité, l'accessibilité, la bonne qualité et le mode de gestion de la ressource en tenant compte de nouvelles nuances climatiques. Dans la figure 2, il apparaît clairement que la problématique du changement climatique est la plus dominante de toutes les autres problématiques traitées. Par ailleurs, la sécurité hydrique est moins importante que les autres problématiques, ce qui révèle un manque d'études et de recherches (Aalirezaei, 2021).

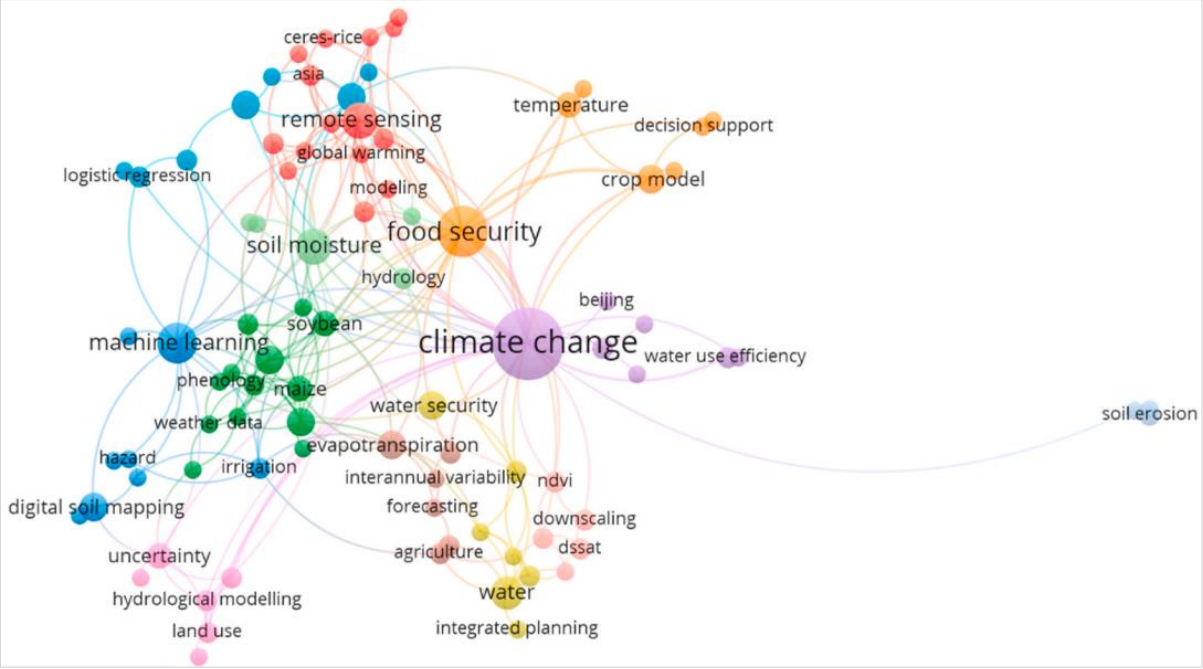


Figure 2. Visualisation du réseau bibliométrique sur la sécurité de l'eau dans le monde. (Aalirezaei, 2021)

Par conséquent, la gestion durable des ressources en eau et le renforcement des capacités d'adaptation et d'atténuation restent une obligation pour combler les lacunes existantes dans la mise en évidence des impacts climatiques sur l'eau et la sécurité dans la région méditerranéenne. Cela est illustré par les approches interdisciplinaires actuelles, basées sur les résultats des projets de recherche CLIMB (Climate Induced Changes on the Hydrology of Mediterranean Basin), WASSERMed (Water Availability and Security in Southern Europe and the Mediterranean), qui ont été financés par le FEDER (Fonds européen de développement régional). Ces projets ont été menés dans le cadre du septième programme-cadre de recherche et de développement technologique (Bird, 2015; Piras, et al., 2016).

3. Problématique au niveau du bassin versant de l'Ouergha

Le bassin versant de l'Ouergha, situé dans le Nord-Ouest du Maroc, est principalement composé de terrains imperméables, bien que certaines zones puissent renfermer des poches d'eau souterraine. En conséquence, sa principale source d'approvisionnement en eau provient des ressources en eaux de surface et des réserves stockées dans les barrages. Ce bassin est doté de quatre barrages importants qui ont été construits pour stocker les eaux de pluie et les eaux de ruissellement, pour alimenter les systèmes d'irrigation et pour générer de l'électricité. La gestion efficace de ces barrages est cruciale pour assurer la sécurité de l'eau et une utilisation efficace des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha.

Le choix du Bassin versant de l'Ouergha pour cette étude de thèse est justifié par plusieurs raisons :

- Premièrement, le bassin versant de l'Ouergha est un bassin important pour les ressources en eau et agricoles au Maroc. Il est un lieu de production céréalière et d'irrigation important, et est donc clé pour la sécurité alimentaire du pays. En effet, le secteur agricole occupe une position socio-économique centrale au Maroc, représentant environ 11 à 15 % du PIB, bien que cette contribution puisse varier considérablement selon les conditions climatiques (11,7 % en 2020) (CMConjoncture, 2021). De plus, l'agriculture demeure le principal pourvoyeur d'emplois, englobant environ 40 % de la population active et générant près de 70 % des emplois en milieu rural. En 2021, les importations de produits alimentaires au Maroc ont atteint un montant total de 27,19 milliards de dirhams, tandis que les exportations se sont élevées à 44,02 milliards de dirhams (Comtrade, 2021).
- Deuxièmement, le bassin versant de l'Ouergha est largement affecté par la sécheresse, qui est un phénomène récurrent dans la région et qui a des impacts sur les ressources en eau et agricoles. Il est donc important de mieux comprendre les tendances et les variations des ressources en eau dans ce bassin pour développer des solutions pour atténuer les impacts de la sécheresse.
- Troisièmement, le changement climatique est prévu pour avoir un impact significatif sur les ressources en eau dans la région, il est donc crucial de comprendre comment les ressources en eau seront affectées par les changements climatiques pour élaborer des stratégies d'adaptation efficaces.

La présente thèse a pour objectif d'étudier l'impact du changement climatique et de la sécheresse sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha, comme étape préliminaire à l'adaptation de la gestion de la ressource en conséquence. Cette recherche s'articule autour de plusieurs objectifs : tout d'abord, analyser les tendances et les variations de la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha, pour explorer l'impact de ces sécheresses sur les ressources en eau. Ensuite, explorer la gestion de l'eau d'irrigation en milieu rural dans le bassin versant de l'Ouergha afin d'évaluer sa capacité à faire face à la sécheresse. Enfin, examiner les impacts du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de l'Ouergha en quantifiant les changements dans les conditions hydro-climatiques simulées par le modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) et en analysant les projections de

l'ensemble de multi-modèles climatiques de l'EURO-CORDEX pour les périodes de référence (1979-2005) et futures (2041-2080).

Cette thèse cherche à identifier des indicateurs hydrologiques pertinents qui peuvent être utilisés pour évaluer le régime d'écoulement et ses effets sur le bilan hydrique menaçant la sécurité de l'eau à l'échelle du bassin versant. Les résultats sont conçus pour être utilisés dans l'élaboration de stratégies d'adaptation pour la sécurité en eau et alimentaire associées.

4. Difficultés liées à la pandémie

L'accès a été contraint de l'impossibilité de faire beaucoup de terrain en raison de la pandémie pour recueillir les données et obtenir des entretiens avec les acteurs. Ceci a pénalisé le travail, notamment celui concernant l'étude de la gestion des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha.

L'année de la pandémie a eu un impact sur l'avancement des travaux, entraînant le blocage des formations internationales, et l'éloignement de mon travail de terrain prévu avec les acteurs locaux.

5. Enoncé du plan

La thèse est construite en 3 parties :

- Après l'introduction du premier chapitre qui présente le contexte général de la recherche, l'état de l'art des études sur le changement climatique et l'impact hydrologique dans le bassin méditerranéen, le deuxième chapitre est consacré à la description du bassin versant de l'Ouergha et à la présentation des données disponibles.
- Le troisième chapitre consiste à évaluer la variabilité climatique en mettant en évidence les oscillations atmosphériques qui affectent le climat du site d'étude. En outre, les analyses spatio-temporelles des événements de sécheresse sont évaluées et les liens entre les différents types de sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha sont analysés. Le quatrième chapitre tend à explorer la gestion de l'eau en tant que concept clé pour étudier la gestion de l'irrigation de l'eau en milieu rural par les acteurs et les institutions dans différentes approches, en mettant en relation différentes perceptions des caractéristiques socio-économiques, politiques, environnementales et techniques.

- Le cinquième chapitre traite de l'application et de la calibration du modèle SWAT. Les analyses de sensibilité et d'incertitude des paramètres sont présentées et analysées dans ce chapitre. Les résultats du modèle hydrologique sont également évalués et l'effet de l'incertitude des paramètres et du débit sur les résultats du modèle est évalué. Le sixième chapitre se concentre sur le développement de projections futures des différents paramètres hydrologiques de la région sur la base d'ensembles de modèles climatiques RCP4.5, et sur l'identification d'indicateurs hydrologiques pertinents qui peuvent être utilisés pour évaluer le régime d'écoulement et ses effets sur le bilan hydrique menaçant la sécurité de l'eau à l'échelle du bassin versant de l'Ouergha.

Partie I : Contexte et méthodologie

Chapitre 1 : Contexte climatique du bassin versant de l'Ouergha

1. La gestion de l'impact du changement climatique sur la stabilité sociale, économique et politique

Le changement climatique est devenu un facteur déterminant dans l'émergence de l'insécurité alimentaire à travers le monde. Les perturbations des conditions météorologiques et climatiques ont un impact direct sur la production agricole et la disponibilité des ressources alimentaires. L'instabilité socio-économique et politique découle également de cette situation préoccupante (Forsyth, 2013). L'insécurité alimentaire résultant du changement climatique peut provoquer des tensions sociales, des conflits et une instabilité politique, aggravant ainsi les disparités socio-économiques et fragilisant les institutions en place (La Jeunesse, et al., 2016; Sofuoğlu, 2020). Forsyth et Schomerus (2013) ont identifié plusieurs processus montrant la relation entre les impacts du changement climatique et certains indicateurs d'instabilité politique. Ces impacts se traduisent par des restrictions des besoins humains essentiels tels que l'eau, la nourriture, l'énergie, l'éducation et la santé., comme illustré dans le tableau 1.

Tableau 1. Relation entre le changement climatique et certains indicateurs d'instabilité politique (Sofuoğlu, 2020)

Changement climatique Température Concentration en CO_2 Radiation solaire Vent, nuages Climats extrêmes Courants océaniques Fontes des glaces Augmentation des niveaux de mers	Ressources naturelles Sols Eau Ecosystèmes Forêt Pêches Biodiversité Océan/ littoral Glacier/glace	Besoins humains Eau Nourriture Énergie Santé Travail/revenu Transport Education Mode de vie Communauté	Instabilité sociale Démonstrations Émeutes Immigration Pauvreté Manque de légitimité Faiblesse des institutions Criminalité/violence urbaine Troubles civils Coups d'État Rébellions armées Terrorisme Conflit ethnique/racial Conflit environnemental
Stress	**Impact**		**Réponse**

Les impacts sur l'environnement peuvent être contrôlés par les conditions météorologiques. Cela se traduira par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de précipitations extrêmes, ce qui pourrait avoir des impacts négatifs sur le ruissellement de surface et la recharge des nappes souterraines (Fonseca, 2019). Ces impacts peuvent être liés à divers facteurs tels que les fortes températures, l'évapotranspiration et l'humidité du sol (Hattermann, 2015; Fonseca, 2019).

Plusieurs études ont montré une diminution significative de la disponibilité des ressources en eau et une augmentation de la fréquence des événements secs dans la région méditerranéenne (Meehl, et al., 2005; Sellami, et al., 2015; Fonseca, 2019; Torma, 2019; Rocha, 2020; Martínez-Salvador, 2021; Marras, et al., 2021). Les récentes sécheresses ont entraîné des pertes de revenus importantes pour les personnes dont les moyens de subsistance proviennent du secteur agricole en Afrique du Nord (Adoho, 2014). Par ailleurs, Sofuoğlu (2020) a montré que le Maroc est sujet à l'instabilité économique et politique en raison des changements dans les précipitations.

2. Le rôle des modes de fluctuation climatique sur le climat méditerranéen

Le changement climatique à long terme implique des variations des paramètres climatiques et des ressources naturelles dans le temps et l'espace. Cela comprend l'élévation du niveau de la mer, les sécheresses prolongées, les inondations dévastatrices, les vagues de chaleur extrêmes, les tempêtes violentes, les changements dans les régimes de précipitations, la fonte accélérée des glaciers et des calottes glaciaires, ainsi que l'acidification des océans (IPCC, 2007). La variabilité du climat à court terme est généralement associée à des modes de circulation atmosphérique couplées (phénomènes océaniques et atmosphériques), telles que El Niño (ENSO) et l'oscillation nord-atlantique (NAO). Bien que l'oscillation méridionale ENSO affecte la variabilité du temps et du climat dans le monde entier, la NAO est naturellement la plus dominante dans la région de l'Atlantique Nord.

De nombreuses études se sont intéressées aux systèmes hydrologiques des grands bassins versants pour observer les changements climatiques et environnementaux mondiaux. Dans les enregistrements historiques de débit, Labat (2004; 2006) a établi un lien entre l'augmentation du ruissellement global et le réchauffement climatique. Il a également exposé la relation entre les oscillations du cycle hydrologique continental et les "forçages" climatiques tels que ENSO ("El Niño Southern Oscillation") et NAO ("North Atlantic Oscillation").

Depuis le début des années 1980, la région sud de la Méditerranée a connu une série d'années sèches (Senoussi, 1999). Ces événements ont perturbé le système océan-atmosphère dans l'hémisphère nord (Lotsch, 2005). Les pays du sud et de l'est de la Méditerranée sont particulièrement vulnérables à la variabilité du climat, car ils sont exposés à des événements extrêmes tels que la désertification, l'aridité des sols et la pénurie d'eau, en plus de la demande accrue en eau et de la croissance démographique (Zamrane, 2018).

La variabilité des conditions hydrologiques de part et d'autre de l'océan Atlantique (Afrique du Nord, Nord-Ouest de la France et USA) et leur relation avec les fluctuations internes du système climatique ont été étudiées (Laignel, 2010) et mis en évidence le lien potentiel entre la variabilité hydrologique et les indices climatiques tels que NAOi (indice d'Oscillation de l'Atlantique Nord), Soi (indice d'oscillation australe) et WeMoi (indice d'oscillation de la Méditerranée occidentale.

2.1. Indice d'oscillation de l'Atlantique Nord

Les régimes NAO (Oscillation de l'Atlantique Nord) quantifient les variations de pression au niveau de la mer (Psea) entre les latitudes subtropicales et subpolaires (typiquement entre les Açores et l'Islande). Ils correspondent ensuite aux changements des vents d'ouest à travers l'Atlantique Nord vers l'Europe.

L'indice NAO mesure le suivi des mouvements saisonniers de la dépression islandaise et de l'anticyclone des Açores. Il est défini à partir de la différence des anomalies de pression de surface entre divers endroits du nord et du sud. Les valeurs positives de l'indice NAO sont généralement associées à des vents d'ouest plus forts que la moyenne sur les latitudes moyennes, à des systèmes météorologiques plus intenses sur l'Atlantique Nord et à un temps plus humide/mauvais sur l'Europe occidentale (Figure 3).

Dans cette étude, nous avons utilisé l'indice de l'Oscillation de l'Atlantique Nord (NAO) basé sur les composantes principales, considéré comme la représentation idéale de l'ensemble des modèles spatiaux du NAO. Il est dépendant des faiblesses inhérentes à l'ensemble de données source et à son schéma de maillage (NCAR, 2020).

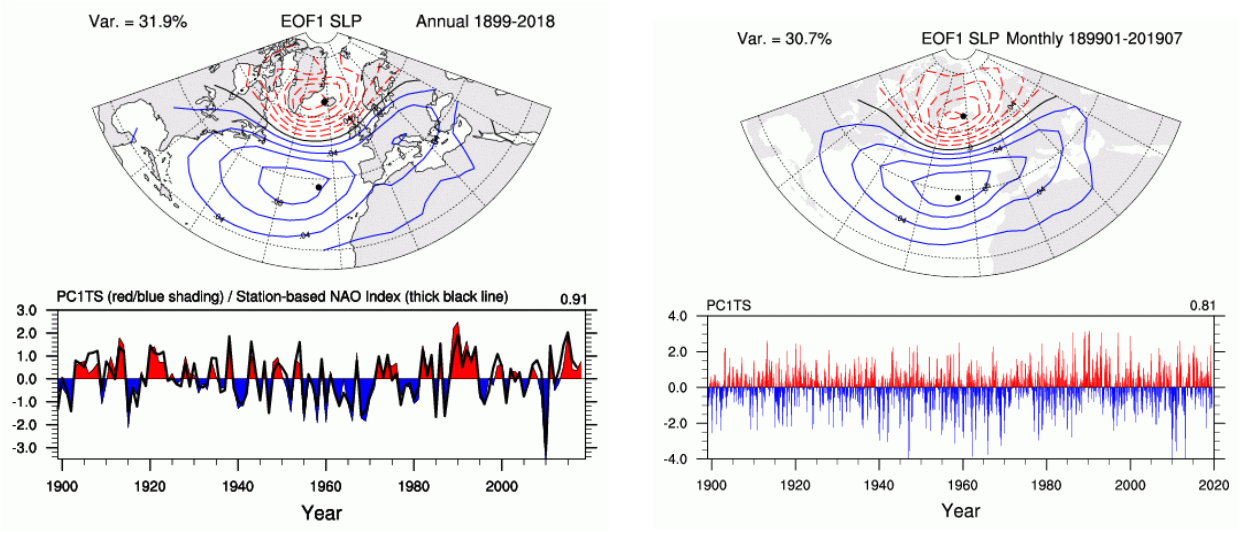


Figure 3. La série temporelle en composante principale (PC) de l'EOF principale des anomalies annuelles (A) et mensuelles (B) de la PSL sur le secteur Atlantique (20-80N, 90W-40E) sert d'indice alternatif (Hurrell (1995,2003).

2.2. Indice d'oscillation australe

ENSO est un phénomène climatique important sur terre. Il est responsable du changement du mode de circulation atmosphérique globale. On peut prédire plusieurs saisons à l'avance l'arrivée et l'intensité d'ENSO sur le climat. Pour représenter l'oscillation australe, de nombreux indices ont été développés, tels que l'indice Niño 3.4 et l'indice Oceanic Niño (ONI), ainsi que l'indice d'oscillation australe (SOI) utilisé pour décrire les schémas de pression au niveau de la mer (SLP) à grande échelle dans le Pacifique tropical.

Dans cette étude, le SOI est utilisé pour représenter la partie SO (oscillation australe) du phénomène ENSO en raison de sa variabilité à grande échelle des TSM tropicales (température de surface de la mer). Les périodes prolongées de Soi négatif correspondent aux événements El Nino, caractérisés par des TSM chaudes dans le Pacifique tropical oriental et central (Figure 4). L'indice d'oscillation australe (SOI) est une série chronologique utilisée comme pression moyenne mensuelle du niveau de la mer à Tahiti [T] et Darwin [D]. Un SOI idéal peut être construit et basé sur [T-D] qui est une mesure des phénomènes à grande échelle, tandis que [T+D] est une mesure des phénomènes à petite échelle et/ou transitoires qui ne font pas partie de l'oscillation australe à grande échelle. Le SOI est utilisé dans cette étude en raison de son long historique, de sa qualité supérieure et de la grande corrélation avec la version complète du SOI (Tahiti-Darwin).

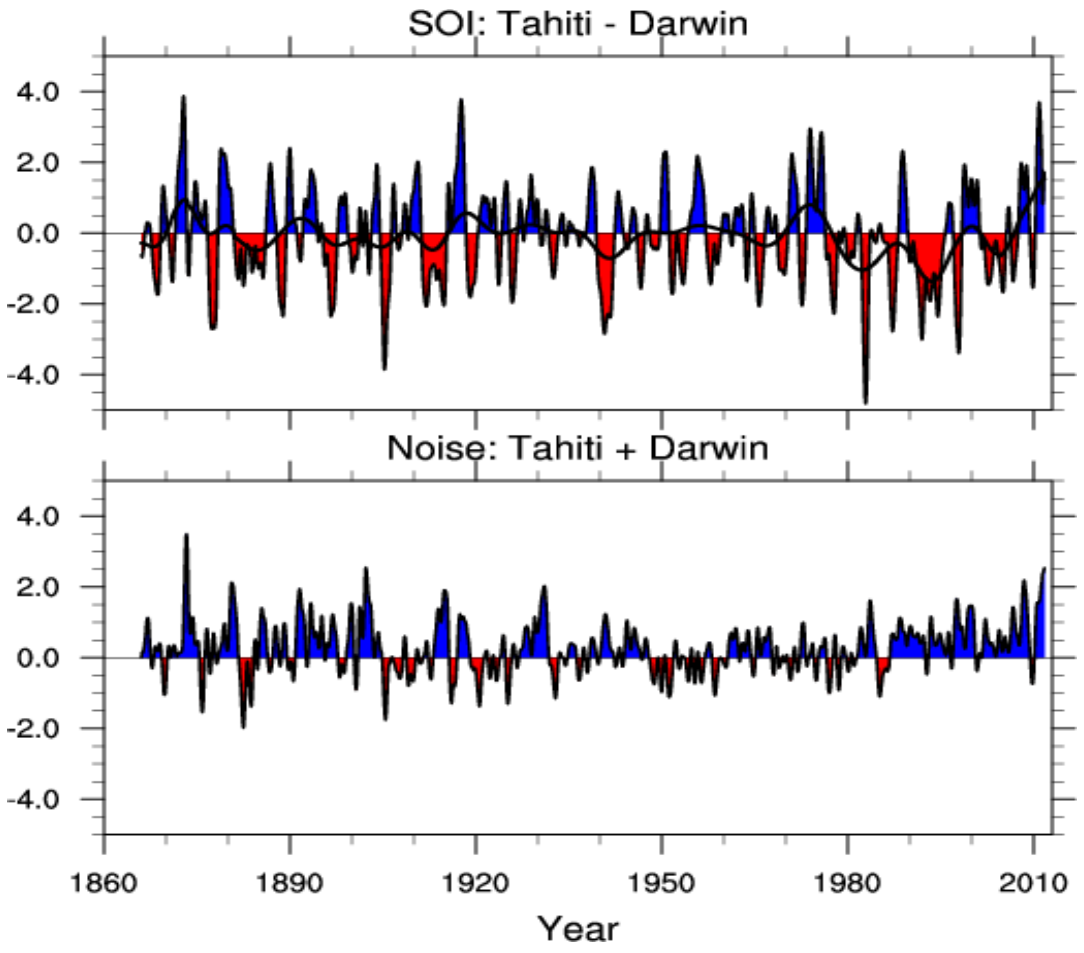


Figure 4. SOI optimal Tahiti moins Darwin [T-D] (en haut), Estimations du bruit [T+D] (en bas)

2.3. Indice d'oscillation de la Méditerranée occidentale

La WeMO est définie comme la connexion atmosphérique entre le sud-ouest de l'IP (San Fernando) et la vallée du Pô (Padoue). On constate que la fenêtre synoptique 30º-60ºN - 15ºW-20ºE représente le mieux les phases de la WeMO. La phase positive de la WeMO correspond à l'anticyclone des Açores et à la dépression de Gênes (Figure 5, gauche) ; sa phase négative coïncide avec un anticyclone situé sur l'Europe intérieure et une dépression sur le golfe de Cadix (Figure 5, droite) (Lemus-Canovas, 2019).

L'indice WeMO (WeMOi) est utilisé pendant les mois d'automne comme outil de prédiction des pluies torrentielles (Martin-Vide, et al., 2006). Cet indice est calculé à partir des données de pression de surface du modèle GFS et est mis à jour avec les sorties du modèle à 00h et 12h et jusqu'à 144h.

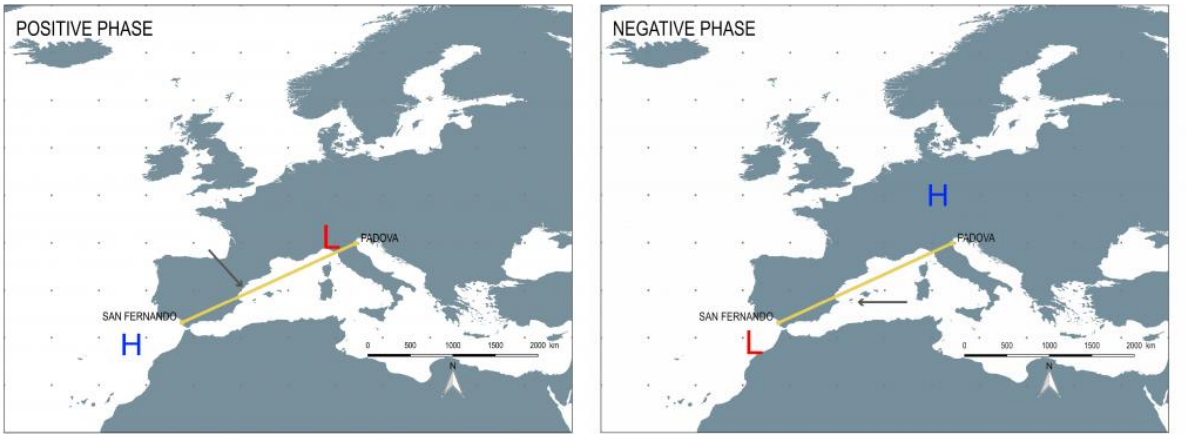


Figure 5. Indice d'Oscillation de la Méditerranée occidentale pendant la phase positive (hiver) et la phase négative (été).

3. L'impact du changement climatique sur l'agriculture

L'impact du stress hydrique sur l'agriculture en région méditerranéenne est un sujet de préoccupation croissante. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la région méditerranéenne est particulièrement vulnérable aux effets du stress hydrique en raison de la dépendance de l'agriculture à l'irrigation, des hausses de température et des diminutions de précipitations (FAO, 2010).

Une étude du CIHEAM a montré que les températures pourraient augmenter de 2,5 à 4 °C d'ici la fin du siècle dans la région méditerranéenne, ce qui aurait un impact négatif sur les rendements des cultures et entraînerait une réduction de la production de céréales de 20%. Les précipitations pourraient également diminuer de 20 à 30% dans certaines régions, entraînant des pénuries d'eau pour l'irrigation.

Le changement climatique peut affecter la quantité d'eau disponible et les besoins en eau des cultures. Les exigences en eau des cultures font référence à la quantité d'eau dont une culture a besoin pour une croissance normale. Lorsque les besoins en évapotranspiration sont inférieurs aux besoins en précipitations, il y a un déficit. Le déficit peut être comblé par de l'eau dans certaines situations. Dans le cadre du changement climatique, les cultures pluviales peuvent nécessiter davantage d'irrigation pour maintenir leur productivité. Les cultures irriguées peuvent avoir un besoin d'irrigation plus ou moins important.

Le stress hydrique peut également entraîner une augmentation des coûts d'irrigation et une diminution de la qualité des produits agricoles. Il peut également causer des problèmes de

salinisation des sols et de dégradation des écosystèmes, affectant ainsi les populations rurales qui dépendent de l'agriculture pour leur subsistance.

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2005), l'agriculture est responsable de 70% de l'utilisation mondiale de l'eau, et l'irrigation représente environ 90% de cette utilisation. Pour faire face à ces défis, les agriculteurs de la région méditerranéenne doivent utiliser des pratiques d'irrigation plus efficaces et des cultures résistantes à la sécheresse. Il est également important de mettre en place des politiques pour protéger les populations rurales les plus vulnérables.

4. Enjeux et objectifs dans le bassin versant de l'Ouergha

Le changement climatique est une préoccupation croissante pour le Maroc, car il affecte déjà divers domaines, tels que l'agriculture, l'eau et la santé. Dans le cas de l'eau, la banque mondiale (2014) a noté que le sud du pays connaît de graves pénuries d'eau, tandis que les plaines côtières sont inondées. Les ressources en eau renouvelables du pays ont diminué de 60 % depuis 1960 en raison de divers facteurs tels que l'urbanisation, l'expansion de l'irrigation et le développement du tourisme et des zones industrielles. En outre, l'augmentation des températures et l'irrégularité des précipitations ont entraîné la réduction du débit des rivières et l'envasement des barrages de stockage. Le changement climatique devrait également accroître la demande d'irrigation, qui consomme actuellement 90 % de l'eau disponible dans le pays (Singla, 2010).

Le bassin de Sebou, qui s'étend sur 40 000 km², est l'une des régions les plus densément peuplées du Maroc. Il compte désormais 6,3 millions d'habitants, soit 21 % de la population totale du pays. D'ici 2030, on s'attend à ce qu'il compte 9 millions d'habitants (ABHS, 2015). Son économie industrielle et agricole contribue de manière significative à l'économie nationale du pays. Ce bassin contient environ un tiers des eaux de surface du pays. Il est divisé en cinq ensembles correspondant à l'importance des précipitations. Son principal affluent, l'Ouergha, draine une superficie d'environ 6190 km² et alimente le plus grand barrage du royaume (Al Wahda) (ABHS, 2018).

Le bassin versant de l'Ouergha est suffisamment hétérogène en superficie pour être représentatif d'une grande variété de situations tels que le risque d'augmentation de la fréquence et de l'intensité de sécheresse, les inondations, le stress hydrique, et l'envasement des barrages.

L'objectif général de cette thèse est d'évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha, et de proposer des recommandations afin d'être utilisée pour élaborer de stratégies d'adaptation aux impacts du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de l'Ouergha. Cela est réalisé en utilisant une combinaison d'analyse de données, de modélisation hydro-climatique, et d'analyse de gestion et de politique de l'eau d'irrigation à l'échelle du bassin.

Les objectifs spécifiques de la thèse consistent à (i) évaluer la variabilité spatio-temporelle des sécheresses météorologiques et hydrologiques à différentes échelles de temps, (ii) examiner la gestion de l'eau d'irrigation dans le bassin sur les plans politique, social, économique et administratif, et (iii) évaluer la pertinence du modèle hydrologique sélectionné pour la prédiction du débit, et à étudier la réponse hydrologique du bassin sous les projections de changement climatique.

Les objectifs spécifiques de la thèse consistent à (i) évaluer les tendances et les schémas spatiaux de la sécheresse à différentes échelles de temps, à (ii) examiner la gestion de l'eau d'irrigation dans le bassin sur les plans politique, social, économique et administratif, et à (iii) évaluer la pertinence du modèle hydrologique sélectionné pour la prédiction du débit, et à étudier la réponse hydrologique du bassin sous les projections de changement climatique.

Afin atteindre les objectifs évoqués ci-dessus, plusieurs questions scientifiques spécifiques pertinentes sont abordées :

- Comment peut-on évaluer les tendances et les schémas spatiaux de la sécheresse à différentes échelles de temps dans le bassin versant de l'Ouergha ?
- -En quoi consiste la gestion de l'eau d'irrigation dans le bassin versant de l'Ouergha sur les plans politique, social, économique et administratif ?
- Est-ce que le modèle hydrologique sélectionné est approprié pour la prédiction du débit dans le bassin versant sélectionné ?
- Quelle est la réponse hydrologique du bassin versant méditerranéen sous les projections de changement climatique ?

Chapitre 2 : Contexte physique et territorial

1. Situation géographique

Le bassin versant de l'Ouergha est situé entre 34°20'N et 35°10'N et 3°55'W et 5°20'W (Figure 6). Au nord, il est délimité par la crête rifaine qui passe par Ketama, Bab Berred et Bab Taza, à environ 30 km de la méditerranée. À l'est, il est délimité par le Rif Oriental (Aknoul). À l'ouest, il est délimité par le bassin versant du Loukkous (Mokhrisset, Zoumi) qui se trouve à environ 100 km de l'Atlantique. Au sud, il est délimité par la vallée de l'Ouergha. Le bassin couvre environ 6 190 km² et comprend une partie nord du Rif avec des pentes raides et un pré-Rif sud, une région de collines marneuses très cultivées. La topographie du bassin est caractérisée par un niveau élevé de précipitations et une grande partie de maquis et forêts. Le bassin versant de l'Ouergha est le principal affluent du bassin du Sebou et alimente "Al Wahda", le plus grand barrage du Maroc, qui a une capacité de stockage annuelle de 3,7 Mm^3 (Senoussi, 1999). Le bassin versant est situé sur le versant Sud et Atlantique de l'Arc Rifain, une chaîne de montagne alpine qui borde au Nord du Maroc la méditerranée en continuation des massifs Sud hispaniques.

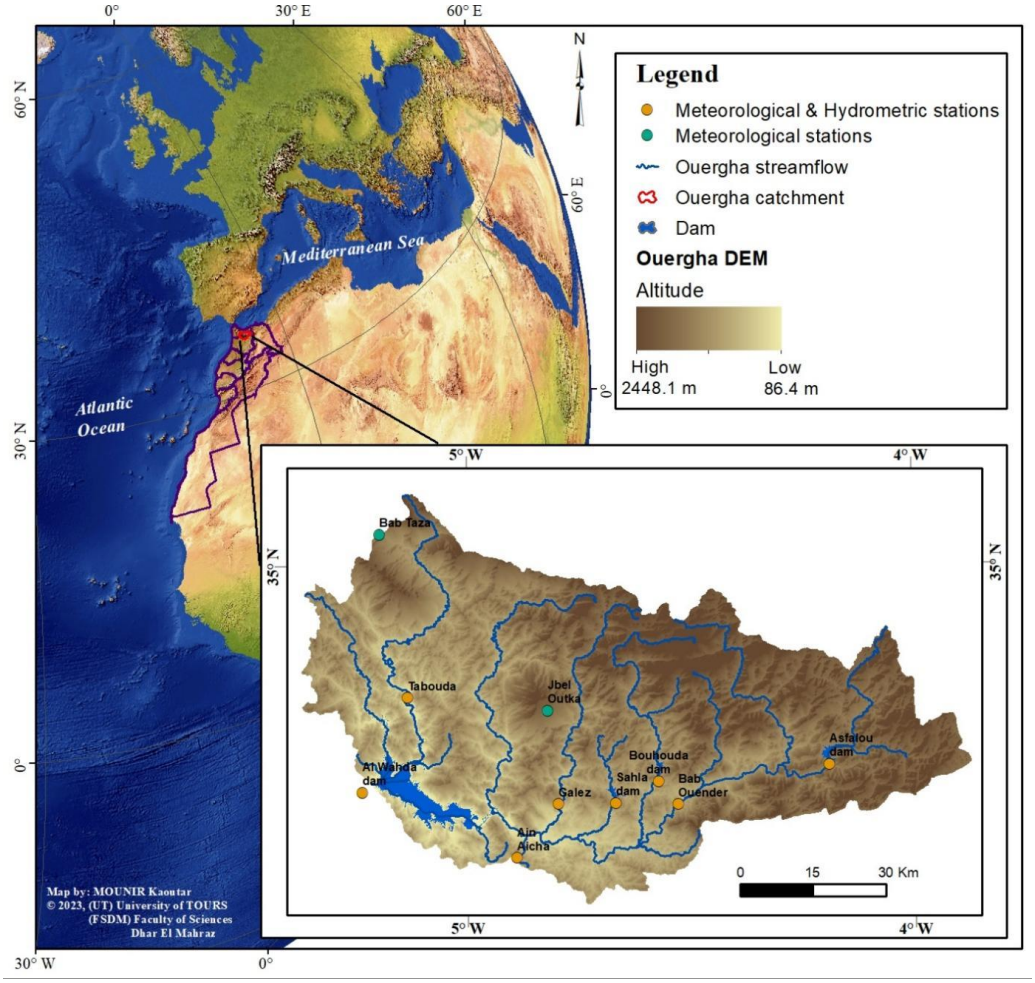


Figure 6. Localisation du bassin versant de l'Ouergha

2. Géologie

Le Maroc se situe géologiquement à la triple jonction entre le continent africain, l'océan Atlantique et la zone de collision de la plaque active du système alpin. Cela résulte en une topographie accidentée avec un large éventail de terrains affleurants, ainsi que divers systèmes tectoniques (Michard, et al., 2008). La chaîne rifaine est située dans le système de chaînes de montagnes de la Méditerranée occidentale. Elle est une composante importante du système orogénique de la ceinture alpine, dont elle s'étend le long de la côte nord-africaine, et se poursuit vers l'est à partir de la Sicile et de la Calabre, dans le sud de l'Italie (Mesrar, 2016).

Cette région est également connue comme le flanc sud de l'arc de Gibraltar. Elle présente une topographie très accidentée et montagneuse. Trois principaux domaines structuraux forment l'Arc de Gibraltar, on distingue du Nord au Sud, les zones internes, ou le domaine d'Alboran, les flyschs maghrébins, et les zones externes (Michard, et al., 2008). Chaque domaine est constitué de complexes tectoniques d'unités empilées ou de nappes avec des lithologies similaires au sein d'un complexe donné, mais contrastée d'un complexe à l‘autre.

Les zones internes (Dorsale calcaire, Ghomarides paléozoïques, Sebtides métamorphiques), constituent une partie d'un Terrain d'Alboran qui s'étend au-delà du détroit de Gibraltar dans les Cordillères bétiques (Malaguides, Alpujarrides). Ces zones qui constituent le socle de la mer d'Alboran font partie des chaînes Malaguides et Alpujarrides (Frizon de Lamotte, et al., 1991). Elles sont composées d'un empilement de couches avec deux grands ensembles litho-structurels : le complexe des Sebtides et le complexe des Ghomarides (Didon, et al., 1973). La jonction entre le domaine externe et interne montre une disposition structurale spécifique : les Ghomarides et la crête calcaire sont verticales et reposent sur les unités externes (Favre, 1995). De plus, les zones internes sont constituées d'unités continentales ayant été déplacées vers l'ouest sur plusieurs centaines de kilomètres (Mesrar, 2016).

Le bassin versant de l’Ouergha (Figure 7) comprend deux unités. La première unité au nord (unités pré-rifaines) est occupée essentiellement par des formations crétacées, et composée de flyschs, de roches détritiques et de laves en coussins. La deuxième unité (unité méso-rifaine) au sud est formée par des marnes qui sont surmontées par une formation molassique composée de roches et de conglomérats (Jaouda, 2019). Ces unités sont souvent représentées en structure anticlinale, ce qui correspond à des fenêtres en position autochtone relative appelée Intra-rifaine (Mesrar, 2016). Le bassin versant est formé essentiellement de plus de 50% de formations crétacées.

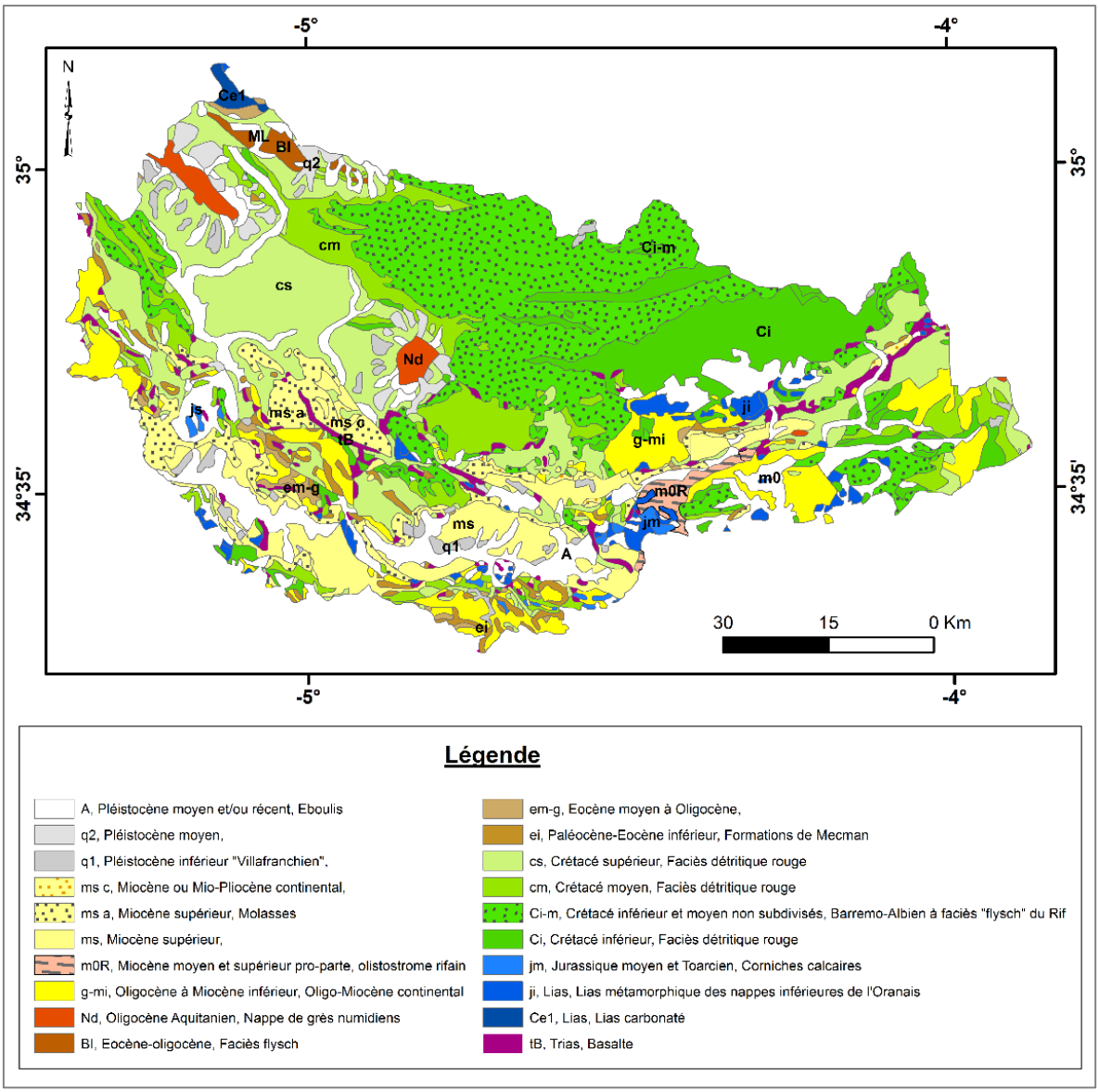


Figure 7. Carte géologique du bassin versant de l'Ouergha (Suter, 1980)

3. Pédologie

En 1995, la Direction Régionale des Eaux et Forêts de Taounate (DREFLCD, 1995) avait lancé un projet d'aménagement anti-érosif du bassin versant de l'Ouergha en amont du barrage d'Al Wahda, qui a permis la réalisation de la carte pédologique (1/100000) (Figure 8), ainsi que l'exécution d'analyses granulométriques sur l'ensemble du bassin versant de l'Ouergha.

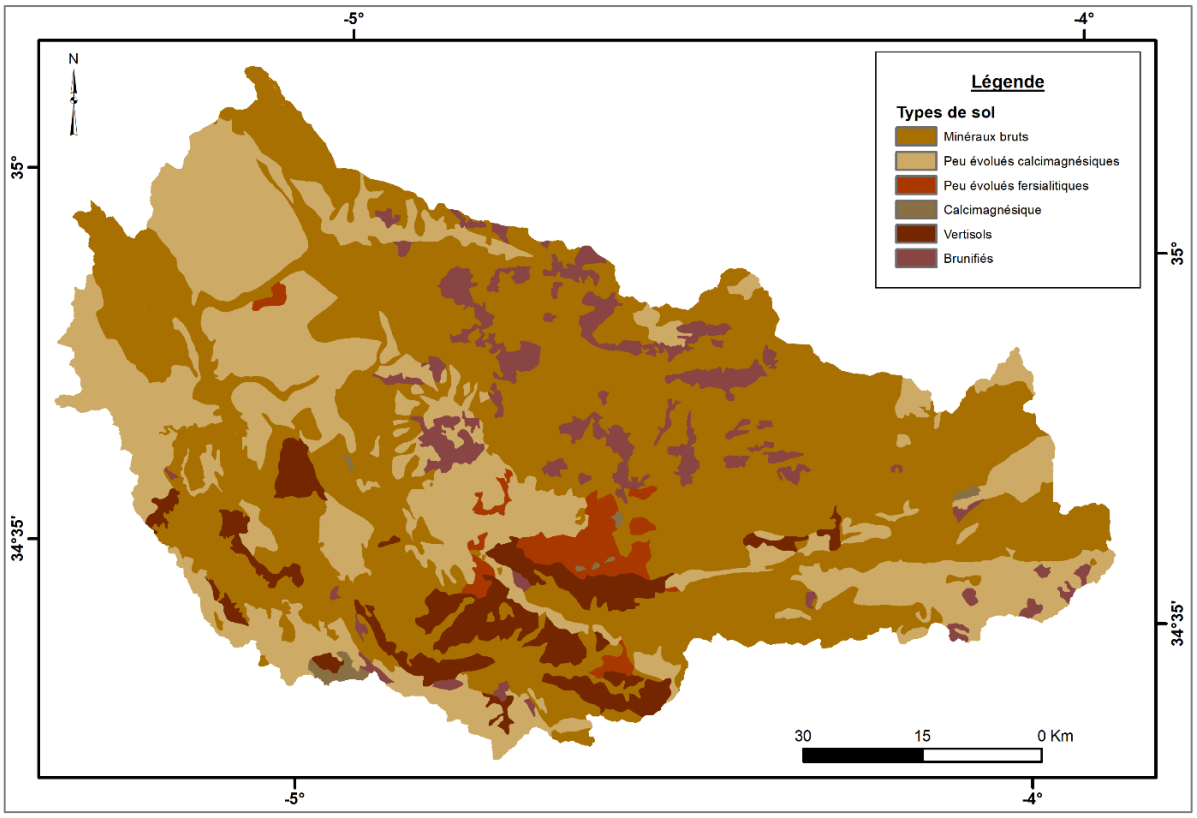


Figure 8. Carte des sols du bassin versant de l'Ouergha (1994) (DREFLCD, 1995)

On distingue les types de sols suivants :

- Les minéraux bruts : trois unités de sols minéraux ont été identifiées. Il s'agit des lithosols qui sont des affleurements de massifs calcaires-dolomitiques du Lias et du Jurassique moyen après érosion, des litho-régosols qui sont exposés en surface et des régosols qui correspondent aux affleurements d'argiles rouges du Jurassique supérieur, de marnes du Miocène supérieur et de pélites du Trias.
- Les sols peu évolués sont caractérisés par une faible altération chimique, dont l'origine est l'érosion. Ils sont jeunes et se caractérisent par une faible altération des minéraux et une faible teneur en matière organique, qui se superpose généralement au substrat minéral sans former de complexes organo-minéraux. Ils sont caractérisés par des pentes et soumis à une érosion continue. Les matériaux les plus fins et la matière organique disparaissent rapidement.
- Les vertisols sont soumis à des mouvements verticaux déterminés par le retrait et le gonflement des argiles qui les constituent.

- Les sols fersiallitiques sont issus d'une altération géochimique dominante. Les sols fersiallitiques sont des sols rouges très riches en oxydes de fer et en oxydes d'alumine. Ils se forment sous couvert forestier et en climat méditerranéen où le mode d'altération est la fertilisation. Ces sols sont généralement riches et fertiles, avec un humus stable, ou peu mobilisable. Mais ce sont des sols fragiles, particulièrement sensibles à l'érosion hydrique, surtout si le couvert végétal est dégradé après un incendie ou à cause du surpâturage. L'érosion réduit ces sols à des sols squelettiques autour de croûtes calcaires stériles.
- Les sols calcimagnésiques et brunifiés : Les sols calcimagnésiques et brunifiés, sont issus d'une altération biochimique dominante. Ces sols sont très fins. Cependant, les arbres ne peuvent pas y pousser.
- Les sols brunis sont caractérisés par un humus de type mull, résultant principalement de l'insolubilisation par du fer libre suffisamment abondant et formant un pont ferrique avec les argiles.

- Les sols calcimagnésiques se forment essentiellement sur des roches calcaires ou dolomitiques en place, avec de fortes pentes. En effet, les roches calcaires ou magnésiennes, lorsqu'elles libèrent suffisamment de calcaire actif, sont à l'origine des sols calcimagnésiques.

4. Climatologie et hydrologie

4.1. Précipitation

Les variations temporelles sont liées aux caractéristiques climatiques de la saison et aux facteurs géographiques tels que l'altitude, la latitude et la couverture du sol. Au cours du 20ème siècle, le climat observé à l'échelle du Maroc a été plus chaud et plus sec. Depuis les années 1970, il y a eu une diminution substantielle des précipitations avec une augmentation significative des températures. Des études antérieures sur le bassin versant de l'Ouergha ont montré que la quantité de précipitations annuelles a diminué entre 1970/71 et 2007/08, entraînant un déficit pluviométrique de 3,75mm/an et un déficit de débit de 15,35m^3 (Senoussi, 1999).

Indépendamment du manque accru de données, la figure 9 montre que les précipitations moyennes varient entre 1566 mm à Jbel Outka et 20 mm au barrage de Sahla. La plupart des stations ont une moyenne de 500 à 800 mm de précipitations annuelles. Toutefois, les précipitations annuelles extrêmes dépassent les 1000 mm dans la plupart des stations, atteignant

même les 3508.1 mm à Jbel Outka en 2016/2017. En période de sécheresse extrême, la plupart des stations reçoivent moins de 300 mm de précipitations.

La base de données disponible des 16 stations existantes (Figure 9, Tableau 2) avec des périodes d'enregistrement différentes, qui ont évolué avec le temps. Le premier réseau de stations, qui comprenait 20 stations en 1950 et 26 stations en 1966, a été fermé depuis 1960. Il avait fonctionné pendant plus de 30 ans (de 1931/39 à 1966/67) et était équipé de 3 stations climatiques (Mjaara, Rhafsai et Tafrant) qui ne fonctionnent plus aujourd'hui. Le deuxième réseau de stations couvre approximativement 96 ans, de 1933/34 à 2009/10. Le nombre de stations a augmenté au fil des années pour atteindre 14 stations de 1981/82 à 1995/96, avant de chuter à 9 stations en 2008-2009 (Hanchane, et al., 2019). Actuellement, le bassin versant de l'Ouergha compte 16 stations fonctionnelles avec des périodes d'enregistrement variables. La station de Jbel Outka a la période d'enregistrement la plus longue.

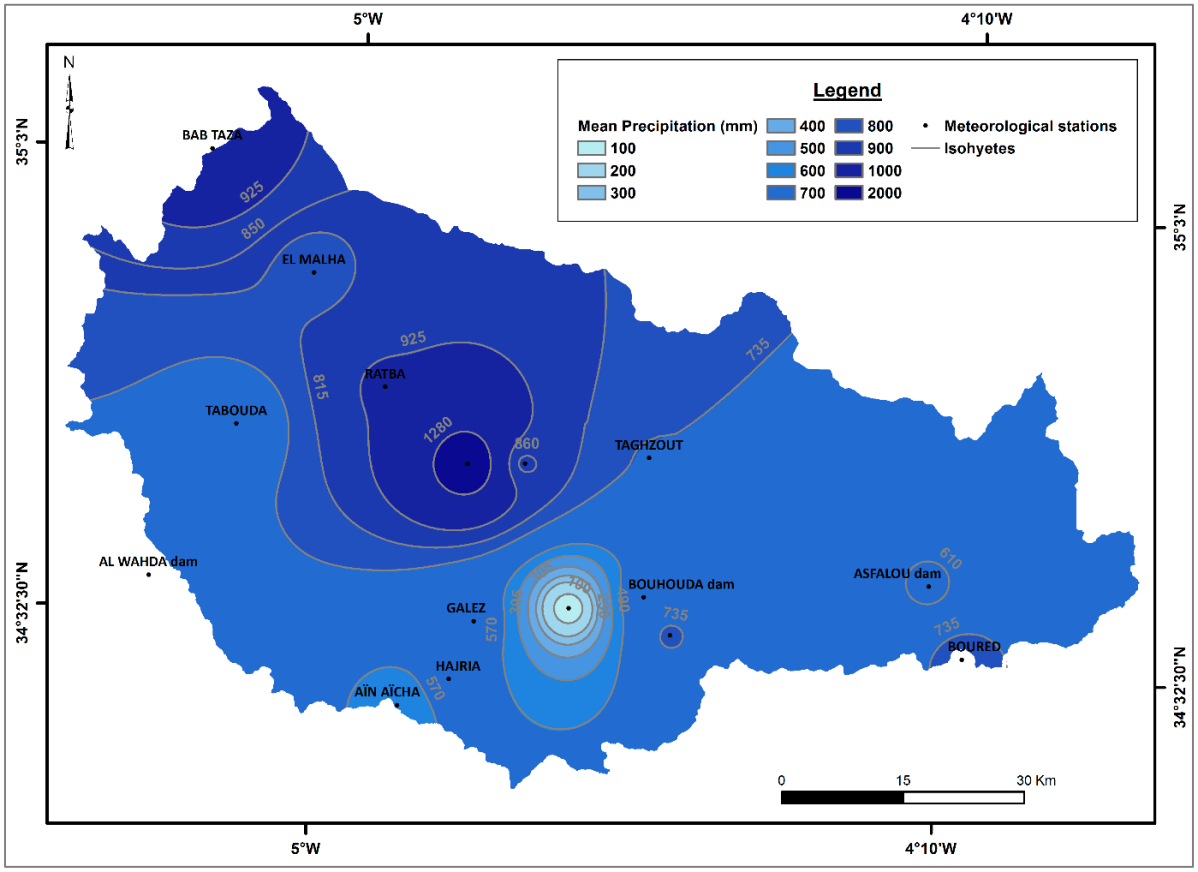


Figure 9. Carte des précipitations par la méthode des isohyètes dans le bassin versant de l'Ouergha

Tableau 2. Le réseau fonctionnel des stations climatiques (ABHS, 2018)

Stations	Lac	X(m)	Y(m)	Z (m)	DMS	SBV (km²)
Aïn aïcha	OUERGHA	546.800	428.800	230	1980	2420
Bab ouender		579.500	440.100	312	1956	1710
Hajria		552.850	432.500	200	1996	2780
Jbel oudka	-	553.000	459.000	1115	1978	Pluviométrie
Bab taza	AOUDOUR	518.500	495.000	902	1979	Pluviométrie
Tabouda		524.250	461.600	201	1978	861
El malha		532.200	480.850	340	1998	320
Galez	AMZAZ	555.325	439.850	214	1973	440
Boufellou		560.000	459.650	790	2001	327
Barrage de Bouhouda	S'RA	575.900	444.500	400	1998	478
Taghzout		575.150	461.600	34	1998	412
Boured	BOURED	615.500	440.100	815	1998	268
Barrage d'asfalou	ASSFALOU	610.723	448.723	760	1939	560
Barrage Al Wahda	OUERHGA	515.060	442.200	120	1939	6190
Barrage de Sahla	SAHLA	566.800	442.400	380	1939	122
Ratba	AOULAI	542.100	467.600	300	1999	490

DMS : Début de Mise en Service

Les valeurs moyennes mensuelles maximales (Tableau 3) sont enregistrées en décembre et novembre tandis que les valeurs minimales sont enregistrées en juillet et août. L'écart-type le plus élevé est enregistré en décembre, le coefficient de variation varie entre 0,25 et 50% pour juillet et août respectivement.

Tableau 3. Analyse des tendances fondamentales des précipitations mensuelles pour la moyenne des stations de l'Ouergha (ABHS, 2018)

Mois	Moyenne	Médiane	SD	CV (%)	Max
Janvier	**87.21**	**92.72**	**11.66**	0.13	**98.63**
Février	77.59	82.19	8.70	0.11	84.39
Mars	64.33	62.76	6.97	0.11	71.08
Avril	59.19	56.63	7.26	0.12	70.39
Mai	34.87	34.87	2.87	0.08	37.69
Juin	6.86	6.83	1.26	0.18	8.02
Juillet	**1.03**	0.87	0.51	**0.50**	1.84
Août	**2.31**	2.16	0.58	**0.25**	3.32
Septembre	16.73	18.16	2.40	0.14	18.90
Octobre	54.97	56.49	4.28	0.08	59.87
Novembre	**101.72**	**107.05**	**10.08**	0.10	**109.09**
Décembre	**102.51**	**106.64**	**11.87**	0.12	**111.68**

D S : Déviation Standard, **CV** : Coefficient de variation, **Max** : Maximum

4.2. Hydrologie

Les changements de température et de précipitations affectent considérablement le cycle de l'eau en Méditerranée (humidité du sol, ruissellement, débits, niveaux des lacs, etc.) (FAO, 2010; Sellami, et al., 2015; De Girolamo, et al., 2022). Le Maroc, avec un climat aride à semi-aride, souffre de problèmes de gestion des ressources en eau qui deviennent de plus en plus limitées et difficiles à exploiter. Toutes ces ressources sont conditionnées par une pluviométrie très irrégulière dans le temps et dans l'espace (Riad, 2003; El Orfi, 2020).

Les ressources en eau de surface au Maroc sont évaluées à une moyenne annuelle de 18 M/m^3, variant de 5 à 50 M/m^3 (Singla, 2010). Les résultats de l'étude ont montré une diminution globale des débits annuels et des débits à partir de 1970, ce qui coïncide avec la sécheresse qui a touché tout le Maroc entre 1958 et 2000. Les débits ont également connu des tendances à la baisse de 3,5m^3 /s par an attribuées à la diminution des précipitations. (Bouaicha, 2010; Singla, 2010).

Une ligne de crête, orientée nord-sud, entre Jbel Tidrhine et Kaf El Ghar, divise le bassin entre un secteur Ouest plus arrosé que le secteur Est. En effet, les flux atmosphériques perturbés en provenance de l'ouest ou du sud-ouest apportent plus de pluie au secteur ouest, qui représente près des ¾ du bassin et comprend la plupart des affluents de l'Oued Ouergha (Figure 6, Tableau 4). Le bassin versant de l'Ouergha est formé essentiellement d'argiles et de marnes qui empêchent le développement de plans d'eau. Ainsi, il rend les eaux de surface exposées à plusieurs contraintes et à la rareté.

Tableau 4. Le réseau de stations hydrologiques fonctionnelles (ABHS, 2018)

Stations hydrométriques	**Types**	**P.F.**	**Moy (m^3/s)**	**Min (m^3/s)**	**Max (m^3/s)**
Ain Aicha	Lac	1980 - 1981	23.59	328.72	0
Bab Ouender		1951 - 1952	16.70	0	339.86
Galaz		1982 - 1983	8.89	0	100.13
Tabouda		1980-1981	11.53	0	199.06
Taghzout		2000 - 2001	3.90	1.40	7.75
Al Wahda	Barrage	1939 - 1940	86.41	0	1554
Asfalou		1939 - 1940	2.81	0	40.65
Bouhouda		1939 - 1940	10.06	0	140
Sahla		1939 - 1940	1.82	0	63.50

P.F. : Période de fonctionnement, **Moy** : Moyenne, **Min :** Minimum, **Max** : Maximum

4.3. Tests de détection de rupture météorologique et hydrologique

Pour analyser les séries temporelles de précipitations et de débit sur l'ensemble des stations climatiques et hydrologiques du bassin versant de l'Ouergha, nous avons appliqué différents tests de détection de rupture à l'aide de Khronostat 1.01. Les tests de Buishand, Pettitt, la méthode de Lee et Heghinian déterminent une seule rupture, à l'exception de la méthode de segmentation de Hubert, qui propose plusieurs dates de rupture. Ces tests ont été largement utilisés dans les études mondiales pour fournir des informations sur les tendances pluviométriques dans la région donnée. Cependant, toutes les données des stations utilisées n'ont pas la même période de démarrage.

Les stations climatiques et hydrologiques du bassin versant de l'Ouergha présentent plusieurs dates de rupture qui sont similaires pour certaines stations. Cette date varie entre fin 1970, mi 1990, début 2000 et fin 2010 (Tableau 5 & 6).

Tableau 5. Test de détection de la rupture météorologique, R=Refusé A=Accepté (Source : Auteur)

Stations climatique	P.E.	Buishand	Pettitt	L&H	S.H.
Ain Aicha	1982-2017	A	A	0,0917 en 2014	-
Bab Ouender	1957-2017	R	R (1979)	0,1473 en 1979	1971, 1979
Bab Taza	1978-2017	A	A	0,2084 en 2014	-
Boufellou	2001-2017	A	A	0,1049 en 2007	-
El Malha	2000-2017	A	A	0,1787 en 2014	-
Galez	1980-2017	R (90%)	A	0,1621 en 1995	1995, 1996, 1997
Hajria	1997-2017	A	A	0,1529 en 2007	-
J Outka	1961-2017	A	A	0,0672 en 2014	-
Ratba	1999-2017	A	A	0,1413 en 2014	-
Tabouda	1979-2017	A	A	0,0909 en 2014	-
Al wahda Dam	1960-2017	A	A	0,0583 en 1960	-
Barrage d'Asfalou	1984-2017	R	R (1995)	0,2799 en 1995	1986, 1995, 2009, 2010, 2011
Barrage de Bouhouda	1984-2017	R	R (2000)	0,4520 en 2000	2000, 2001
Barrage de Sahla	1984-2017	R	R (1995)	0,6394 en 1995	1995, 1996

P.E. : Période de l'étude, **L.&H.** : Lee & Heghinian, **S.H. :** Segmentation de Hubert

Tableau 6. Test de détection de la rupture hydrologique, R=Refusé A=Accepté (Source : Auteur)

Stations hydrologiques	P.E.	Buishand	Pettitt	L.&H.	S.H.
Ain Aicha	1984-2017	A	A	0,0794 en 2007	-
Bab Ouender	1952-2017	R	R (1979)	0,4053 en 1979	1962, 1963, 2009, 2010, 2011
Galez	1984-2017	A	A	0,0570 en 1994	-
Tabouda	1981-2017	A	A	0,0732 en 2014	-
Al wahda Dam	1940-2017	R	R (1979)	0,2304 en 1979	1940-1979, 1980-2017
Barrage d'Asfalou	1940-2017	R	R (1979)	0,2754 en 1979	1979, 2009, 2010, 2011
Barrage de Bouhouda	1940-2017	R (90%)	A	0,1509 en 2007	1972, 1973-2008, 2009
Barrage de Sahla	1940-2017	R (90%)	R 90% (1979)	0,5196 en 2007	2008, 2010, 2011

P.E. : Période d'étude, **L.&H.** : Lee & Heghinian, **S.H. :** Segmentation de Hubert

Dans le cadre d'un test de rupture, l'indication "Accepté" signifie que les données ou les résultats du test mettent en évidence l'existence d'une rupture ou d'un changement significatif dans la série temporelle à un point précis. En d'autres termes, le test a réussi à détecter une modification ou un événement important dans les données. À l'inverse, lorsque le résultat est "Refusé", cela signifie que le test n'a pas réussi à repérer de rupture ou de changement significatif dans la série temporelle. Cette issue peut s'expliquer par l'absence de preuves statistiques convaincantes d'une rupture à un moment donné, ou encore par une sensibilité insuffisante du test pour déceler une rupture réelle.

5. Occupations des sols /couverture des terres

La situation géographique du bassin versant de l'Ouergha lui confère une flore riche et variée, avec une surface importante couverte de matorral et de forêts (Figure 10). La réalisation de la carte d'occupation des sols a été établie par NDVI, dont les corrections radiométriques et atmosphériques (FLAASH) ont été effectuées sur les images du satellite Landsat8, par ENVI 5.3.

La surface agricole utile et cultivée a atteint jusqu'à 70% du bassin versant total. L'irrigation a permis de cultiver 34% de la superficie (maraîchage, céréales, etc.), et la superficie occupée par l'arboriculture est de 36%. Ces dernières sont caractérisées par une variété de cultures, telles que les oliviers, les amandiers, les figuiers, les caroubiers, etc.

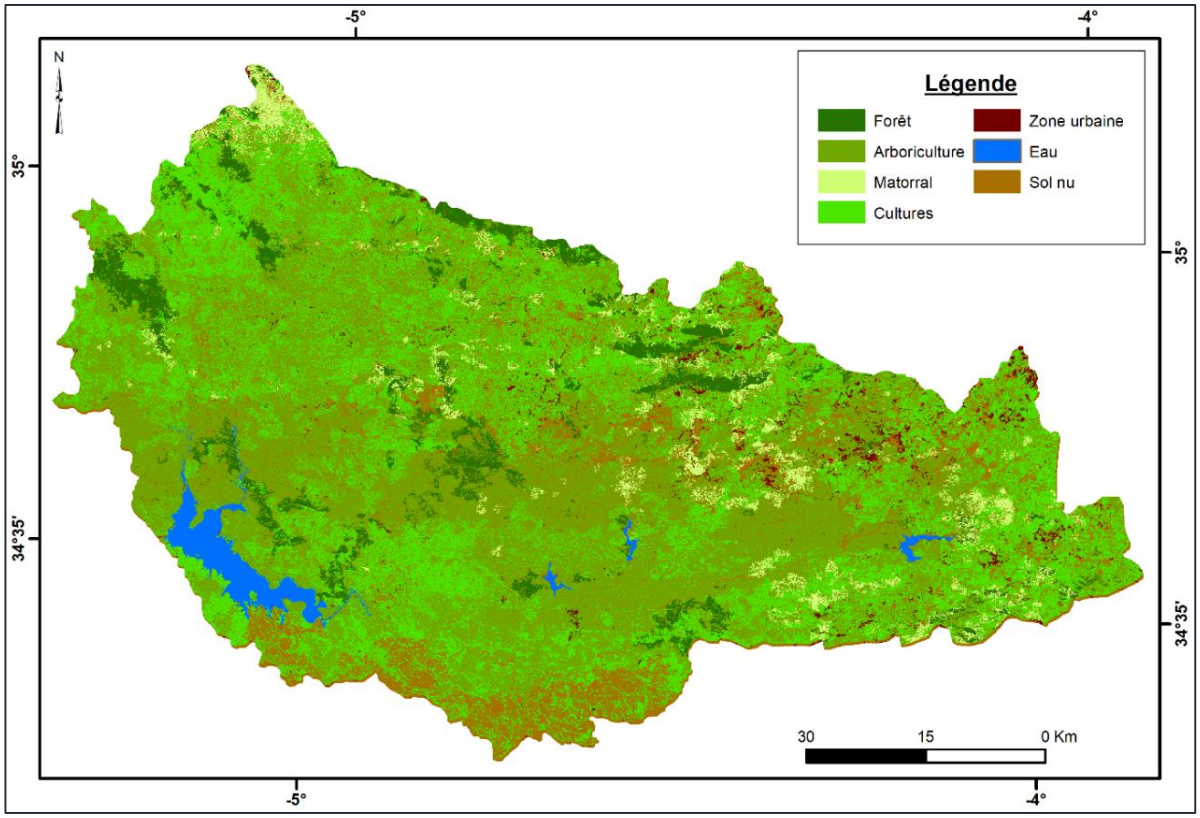


Figure 10. Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'Ouergha (2018) (Source : Auteur)

6. Découpage administratif

Le bassin versant de l'Ouergha est étalé partiellement sur la région de Fès-Meknès et la région de Tanger-Tétouan-Al-Hoceima. Les 5 provinces appartenant aux 2 régions sont : Chefchaouen, Ouezzane, Al Hoceima, Taza, Taounate. Le nombre de communes rurales et urbaines présent dans le bassin versant de l'Ouergha est de 63 (Figure 11) (Tableau 1, Annexe A) (HCP, 2017).

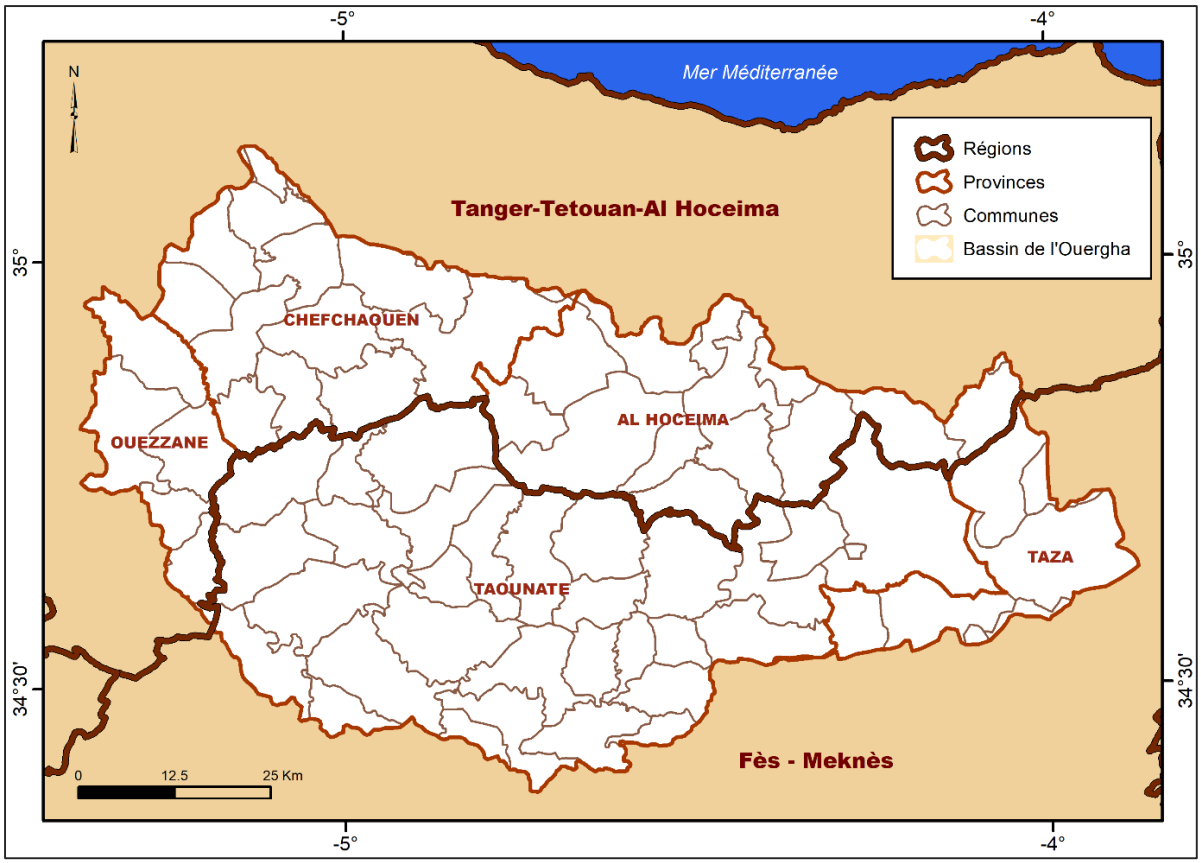


Figure 11. Découpage administratif dans le bassin versant de l'Ouergha

7. Activités socio-économiques et place de l'agriculture

7.1. Activités sociales

7.1.1. Population

Au niveau national, les régions Fès-Meknès et Tanger-Tétouan-Al-Hoceima comptent une population estimée à 13% et 11% (HCP, 2014). Selon les résultats du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) réalisé en 2014, la population de la région de Fès-Meknès était estimée à environ 7.722.957 habitants en 2014. Pour les provinces de Taza et de Taounate, la population était estimée à 1.134.971 en 2014. La population de la région de Tanger-Tétouan-Al Hoceima était évaluée à environ 4.476.937 en 2014. La population des provinces d'Al Hoceima, Ouezzane et Chefchaouen était estimée à environ 1.400.738 en 2014.

Selon le HCP, la population des communes constituant la zone d'étude a été comptée d'environ 857.565 habitants en 2014. Il est prévu que la population en 2030 atteindra 825.224 habitants. Les projections de population en 2030 montrent une diminution dans les provinces d'Al Hoceima et de Chefchaouen de 1,1% et 12,2%, respectivement. Parallèlement, une

régression est projetée dans les provinces de Ouezzane, Taza et Taounate de 2,4%, 34% et 8,5%, respectivement (Tableau 7).

Tableau 7. Population recensée en 2014 et projetée en 2030 dans le bassin versant de l'Ouergha (HCP, 2014)

Régions	Provinces	Communes	Populations			Taux d'accroissement (%)
			2014	2020	2030	
Tanger-Tétouan-Al-Hoceima	Al-Hoceima	12	130455	132034	131845	1,1
	Ouezzane	5	95451	95161	93124	-2,4
	Chefchaouen	12	189394	198693	212540	12,2
Fès-Meknès	Taza	7	65948	56919	43541	-34,0
	Taounate	27	376317	363834	344174	-8,5
Total		63	857565	846641	825224	-3,8

7.1.2. Chômage et activités

Le taux de chômage et le taux d'activité représentent le rapport de la population en chômage et la population active (actifs occupés et chômeurs) âgée de 15 ans et plus à la population totale du même âge. Selon les données du RGPH 2014, le taux d'activité était de 47,6% au niveau national, 49,1% en milieu urbain et 45,1% en milieu rural. Selon le sexe, le taux d'activité des hommes est presque quatre fois supérieur à celui des femmes, avec respectivement 75,5% et 20,4%. Et 20,4%. Le taux d'activité cache également des disparités au niveau territorial (régional, provincial et communal) (Tableau 8).

Au niveau des communes présentes sur le territoire du bassin versant de l'Ouergha, le taux d'activité enregistré en 2014 est d'environ 47.7%.

Le taux d'activité enregistré en 2014 est d'environ 47.7% dans toutes les communes présentes dans le bassin versant de l'Ouergha. Le taux d'activité le plus élevé est enregistré dans les communes rurales de la commune Bni Bchir (61.7%) relevant de la province d'Al-Hoceima, tandis que le taux le plus faible est observé dans la commune de Zrizer (23%) relevant de la province de Taounate.

En ce qui concerne le chômage, les résultats du RGPH 2014 donnent un taux de chômage de la population active âgée de 15 ans et plus de 16,2%, 12,4% chez les hommes et 29,6% parmi les femmes actives. Selon le milieu de résidence, le taux de chômage des citadins est pratiquement le double des ruraux, soit respectivement 19,3% et 10,5%.

Au niveau des communes présentes dans le bassin versant de l'Ouergha la population active âgée de 15 ans et à la recherche d'un emploi dépasse les 10%. Le taux de chômage le plus élevé au près des communes du bassin versant de l'Ouergha a été la commune de Thar Essouk avec environ 24.8% de sa population relevant de la province de Taounate, tandis qu'en commune de Bni Salah il a été recensé un taux de chômage faible du taux de chômage 12% de sa population relevant de la province de Chefchaouen.

Tableau 8. Taux de chômage selon les communes en 2014 dans le bassin versant de l'Ouergha (HCP, 2014)

Province	Communes	Taux de chômage	Taux net d'activité
Ouezzane	5	11,6	43,9
Chefchaouen	12	7,3	49,1
Al Hoceima	12	11,8	54,0
Taza	7	18,4	45,9
Taounate	27	12,4	45,5

Dans le bassin versant de l'Ouergha, l'agriculture familiale joue un rôle essentiel en tant que source d'emploi et de revenus pour la population locale. Les agriculteurs familiaux participent activement à toutes les étapes de la production agricole, de la culture des terres à la commercialisation de leurs produits dans les communautés environnantes. Cette participation dynamise l'économie locale, créant ainsi des emplois et maintenant l'activité économique dans la région.

7.2. Activités économiques

7.2.1. Industrie

Les activités industrielles varient dans les provinces de Taounate, Taza, Chefchaouen, Al Hoceima et Ouezzane.

- La province de Taounate est principalement caractérisée par l'agriculture et l'élevage, mais il existe aussi une industrie minière qui est active dans la province. Il y a des mines de cuivre, de plomb et de zinc.
- La province de Taza est caractérisée par une industrie textile, chimique, alimentaire, de construction et électronique. Elle est considérée comme l'un des principaux pôles industriels du pays.
- La province de Chefchaouen est principalement caractérisée par le textile et l'artisanat et les activités agricoles telles que la production d'huile d'olive.

- Dans la province d'Al-Hoceima et de Ouezzane, les principales activités manufacturières sont le textile, l'agroalimentaire et l'artisanat.

Tableau 9. Activité des unités industrielles et Mâasras pour l'année 2020

Province	N.M.	C.N.T.(Tonne/Année)	N.U.I.
Fès + Taounate	2 879	205 000	84
Taza	1 815	18 700	16

N.M. : Nbre de Mâasras, **C.N.T.** : Capacité nominale de trituration, **N.U.I. :** Nombre d'unités industrielles

Les activités industrielles varient considérablement entre ces provinces et sont concentrées sur la transformation de l'olive (huile) et des fruits principalement dans les provinces de Taounate et de Taza. Il est important de noter que ces 5 provinces ont des potentiels différents en termes d'infrastructures, de main d'œuvre qualifiée et de ressources naturelles, ces facteurs ont un impact important sur les activités industrielles.

7.2.2. Eau et énergie

a. Eau

Le Maroc a mis en place des politiques pour augmenter l'accès à l'eau potable et améliorer la gestion de l'eau. Les provinces de Taounate, Taza, Chefchaouen, Al Hoceima et Ouezzane sont desservies par des réseaux d'eau potable et des systèmes d'irrigation modernes. Cependant, ces provinces font face à des défis en matière de gestion de l'eau, notamment en raison de la sécheresse et de la pression croissante sur les ressources en eau.

Au niveau du bassin versant de l'Ouergha, la capacité installée de la centrale d'Al Wahda représente 22% de la capacité totale du parc hydroélectrique (ABHS, 2018). Elle peut produire environ 400 millions de kilowattheures par an, ce qui équivaut à 16% de la production totale du parc. Cela permettra à la centrale de participer à la satisfaction des besoins énergétiques des clients, pendant les heures de pointe.

Selon la situation hydraulique des barrages hydroélectriques en 2018, le barrage Al Wahda possédait des réserves hydrauliques totales de 2142,72 millions de mètres cubes, représentant 57,73% des réserves totales (Tableau 10). Les réserves hydrauliques utiles sont de 852,42 millions de mètres cubes, soit 35,2% des réserves totales. En synthèse, le barrage Al Wahda dispose d'une réserve totale de 2142,72 millions de mètres cubes et d'une réserve utile de 852,42 millions de mètres cubes.

Tableau 10. Situation hydraulique des barrages hydroélectriques (ABHS, 2018)

Barrages hydroélectriques	R.H.T.		R.H.U.	
	Mm^3	**%**	**Mm^3**	**%**
Barrage Al Wahda	2142,72	57,73	852,42	35,2

R.H.T. : Réserves hydrauliques totales, **R.H.U. :** Réserves hydrauliques utiles

La production d'eau dans les centres de Taounate, Bouhouda et Ghafsai et Ourtzagh a varié au cours des années 2018, 2019 et 2020 (Tableau 11). Le centre de Taounate, alimenté par le barrage Sahla, a produit 1.109.058 m^3 d'eau en 2018, 1.110.923 m^3 d'eau en 2019 et 1.004.716 m^3 d'eau en 2020. Le centre de Bouhouda, alimenté par le barrage Bouhouda, a produit 138.058 m^3 d'eau en 2018, 221012 m^3 d'eau en 2019. Les centres de Ghafsai et Ourtzagh, alimentés par l'Oued Ouergha, ont produit 1.038.090 m^3 d'eau en 2018, 1.231.753 m^3 d'eau en 2019 et 1.343.233 m^3 d'eau en 2020.

Il est intéressant de noter que la production d'eau de Barrage Sahla a diminué de 106,907 m^3 d'eau de 2018 à 2020, tandis que les centres de Ghafsai et Ourtzagh ont augmenté de 305,143 m^3 d'eau sur la même période. Le centre de Bouhouda a eu aucune production en 2020.

Tableau 11. Evolution de la production d'eau superficielle par centres (Production en m^3) (ABHS, 2018)

Région	Province	Centres	Barrage/Oued/Canal	2018	2019	2020
Fès-Meknès	Taounate	Taounate	Barrage Sahla	1.109.058	1.110.923	1.004.716
		Bouhouda	Barrage Bouhouda	138.058	221012	-
		Ghafsai et Ourtzagh	Oued Ouergha	1.038.090	1.231.753	1.343.233

b. Energie

Le Maroc a mis en place des politiques pour augmenter sa production d'énergie renouvelable, notamment à travers l'énergie hydraulique, solaire et éolienne. Les provinces de Taza et Al Hoceima abritent des projets éoliens, tandis que la province de Taounate abrite des usines hydrauliques.

L'usine hydroélectrique Al Wahda a produit 392,9 kWh en 2018, 99,452 kWh en 2019 et 92,651 kWh en 2020 (Tableau 12). Il est intéressant de noter qu'il y a une baisse de 6,801 kWh

de production entre 2019 et 2020, soit une diminution de 6,8% de la production d'électricité de l'usine Al Wahda.

Table 12. Evolution de la production nette d'électricité de l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable

Usines hydrauliques	2018	2019	2020
Barrage Al Wahda	392,9	99,452	92,651

Selon les ventes d'électricité selon les provinces et préfectures en millions de Kwh (Tableau 13), en 2020, la région de Tanger-Tétouan-Al Hoceima a vendu 180,939 millions de Kwh dans la province d'Al Hoceima, 96,535 millions de Kwh dans la province de Chefchaouen et 83,509 millions de Kwh dans la province d'Ouezzane. En 2019, ces provinces ont vendu 183,627 millions de Kwh, 99,646 millions de Kwh, et 82,124 millions de Kwh respectivement. En 2018, ces provinces ont vendu 176,137 millions de Kwh, 93,315 millions de Kwh, et 80,418 millions de Kwh respectivement. La région de Fès-Meknès, dans les provinces de Taounate et Taza, a vendu 166,059 millions de Kwh en 2020, 161,091 millions de Kwh en 2019 et 153,968 millions de Kwh en 2018, respectivement, et 211,707 millions de Kwh en 2020, 206,15 millions de Kwh en 2019 et 199,573 millions de Kwh en 2018, respectivement.

Tableau 13. Ventes d'électricité selon les provinces et préfectures en millions de Kwh (HCP, 2020)

Régions	Provinces	2020	2019	2018
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Al Hoceima	180,939	183,627	176,137
	Chefchaouen	96,535	99,646	93,315
	Ouezzane	83,509	82,124	80,418
Fès - Meknès	Taounate	166,059	161,091	153,968
	Taza	211,707	206,15	199,573

7.2.3. Agriculture

Les 5 provinces appartenant au bassin versant de l'Ouergha sont des provinces du Maroc qui possèdent des caractéristiques économiques différentes malgré leur proximité géographique.

- La province d'Al Hoceima est principalement caractérisée par l'agriculture céréalière, fruitière et l'élevage. Elle est un important producteur de céréales (blé, orge, maïs), de

fruits (abricots, cerises, prunes) et d'agrumes (oranges, mandarines, citrons) et de bétail (ovins, caprins, bovins).

- La province de Chefchaouen est caractérisée par une agriculture céréalière et fruitière. Elle est un important producteur de céréales (blé, orge, maïs), de fruits (abricots, cerises, prunes) et d'agrumes (oranges, mandarines, citrons).
- La province d'Ouezzane, les principales activités agricoles sont la culture des olives, des fruits, des légumes et du liège.
- La province de Taounate est principalement caractérisée par l'agriculture céréalière et animale. Elle est un important producteur de céréales (blé, orge, maïs) et de légumes (pommes de terre, tomate, oignon). Elle est également un important producteur de bétail (ovins, caprins, bovins) et de produits laitiers.
- La province de Taza est également caractérisée par une agriculture diversifiée. Elle est un important producteur de céréales (blé, orge, maïs), de fruits (abricots, cerises, prunes) et d'agrumes (oranges, mandarines, citrons).

En effet, ces derniers ont des caractéristiques économiques différentes avec une activité agricole importante, mais avec des différences notables en termes de superficie agricole utile et de production (Figure 12). En plus, ces provinces sont connues pour leur potentiel agricole. Pourtant, il faut noter que la province de Taounate a cultivé la plus grande superficie de blé tendre (140,6 milliers d'hectares) et la plus grande superficie de fèves (25 milliers d'hectares) par rapport aux autres provinces. La province d'Ouezzane a cultivé la plus grande superficie de pois chiches (5,15 milliers d'hectares) par rapport aux autres provinces.

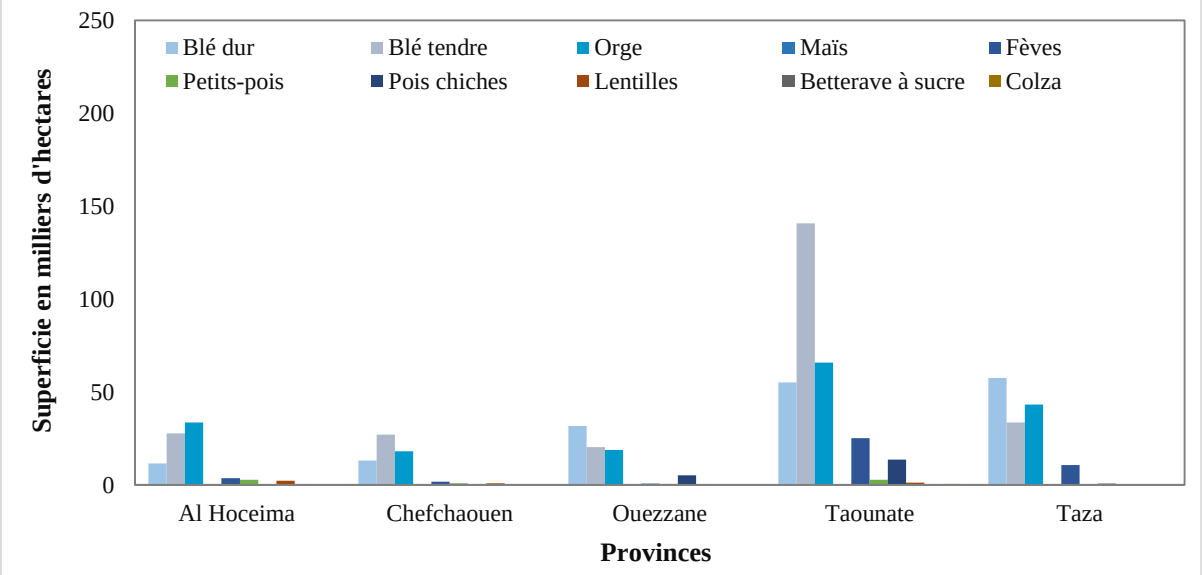


Figure 12. Superficies cultivées des principales céréales par province en 2020 (HCP, 2020)

Selon l'Effectif du cheptel par région et province en 2020 en milliers de têtes (Figure 13), les provinces de Tanger-Tétouan-Al Hoceima, Chefchaouen, Ouezzane, Taounate et Taza avaient un total de 781,922 milliers de têtes de caprins, 1,468,262 milliers de têtes d'ovins et 325,738 milliers de têtes de bovins en 2020.

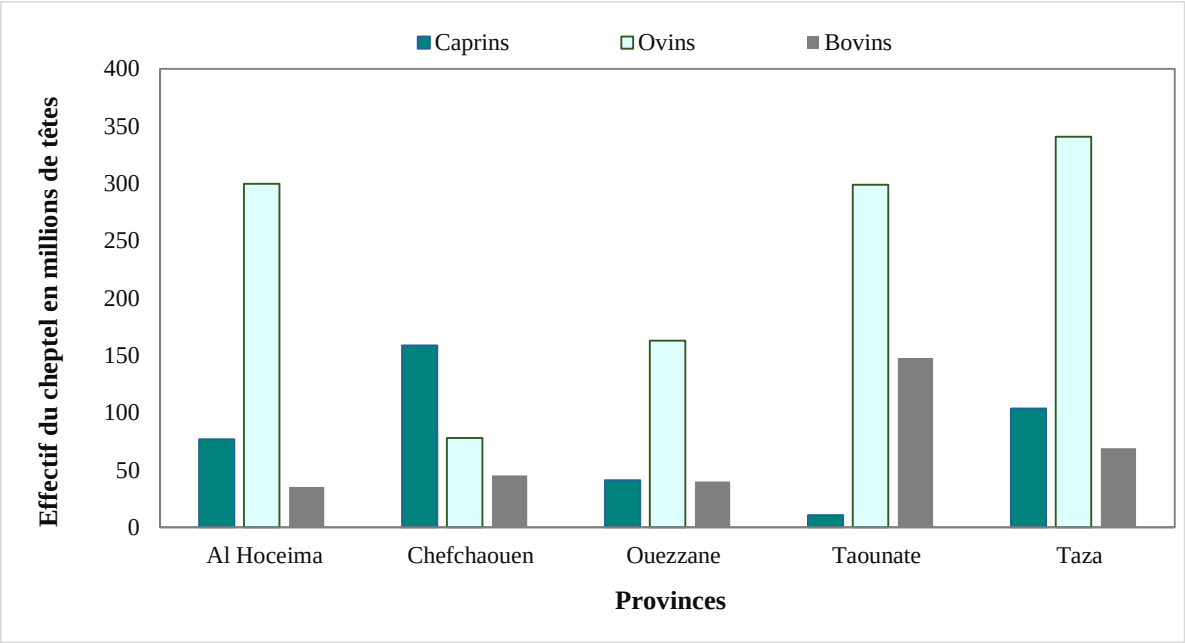


Figure 13. Effectif du cheptel par province en 2020 en milliers de têtes

Synthèse de la partie I

La première partie de cette thèse fournit un aperçu des bases essentielles, à savoir les contextes climatique, géo-physique et territorial, pour aborder de manière approfondie les enjeux climatiques et hydriques du bassin versant de l'Ouergha, une région d'une importance capitale dans le contexte marocain aussi dans le contexte méditerranéen. Comprendre les éléments clés exposés dans ces deux premiers chapitres est essentiel pour les sections ultérieures de cette étude, qui se pencheront sur des aspects spécifiques tels que la sécheresse spatio-temporelle, la gestion de l'eau ainsi que les changements prévus dans le régime d'écoulement du bassin versant de l'Ouergha en raison du changement climatique.

Le premier chapitre met en évidence l'impact du changement climatique sur la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale. En montrant comment les variations climatiques peuvent perturber la production agricole et la disponibilité des ressources alimentaires, ce chapitre évoque pourquoi le climat joue un rôle fondamental dans la stabilité sociale, économique et politique. De plus, les indicateurs d'instabilité politique liée au changement climatique présentés renforcent l'idée que le climat est un facteur critique à prendre en compte pour une gestion durable des ressources.

Le deuxième chapitre fournit des éléments complémentaires géographique, géologique, pédologique, climatologique et hydrologique nécessaires à notre étude. Ce chapitre met en lumière la diversité des sols, les variations des précipitations et la dépendance socio-économique à l'agriculture de la région, pour comprendre l'importance des ressources en eau peuvent être influencées par ces facteurs. En outre, les activités industrielles et énergétiques présentes dans la région soulignent l'importance de concilier la croissance économique avec la préservation des ressources naturelles.

Les deux premiers chapitres décrivent les éléments de description du site d'étude nécessaires à une analyse approfondie de l'impact des changements climatiques, y compris la sécheresse, sur des activités socio-économiques du bassin versant. Cette analyse vise à mieux comprendre comment ces changements climatiques interagissent avec la ressource en eau dans le bassin de l'Ouergha, une région méditerranéenne confrontée à des défis climatiques de plus en plus pressants.

Partie II : Evaluation et gestion des enjeux du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de l'Ouergha

Chapitre 3 : L'analyse spatio-temporelle de l'occurrence de la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha

Résultats publiés dans : Kaoutar MOUNIR, Isabelle LA JEUNESSE, Haykel SELLAMI, Abdessalam ELKHANCHOUFI. Spatiotemporal analysis of drought occurrence in the Ouergha catchment, Morocco[J]. AIMS Environmental Science, 2023, 10(3): 398-423. doi: 10.3934/environsci.2023023

1. Introduction

Les sécheresses sont parmi les plus importantes catastrophes naturelles touchant de grandes populations et ont des conséquences significatives sur l'économie, l'environnement et le développement de la société. Le changement climatique et l'utilisation des terres dans la région méditerranéenne sont susceptibles d'exacerber la fréquence et les impacts des sécheresses, en particulier dans les zones déjà exposées à des catastrophes liées aux conditions météorologiques (IPCC, 2021). Les sécheresses sont des catastrophes météorologiques complexes qui peuvent durer des mois voire des années, affectant négativement l'environnement et le développement socio-économique, et augmentant les conflits entre les acteurs politiques et économiques (Vogt, et al., 2000; La Jeunesse, et al., 2016). Du point de vue climatique, la sécheresse est définie comme une pénurie de précipitations persistante sur une période prolongée et caractérisée par son intensité, sa durée et son étendue. Ainsi, la caractérisation spatio-temporelle de la sécheresse est une étape clé dans la conception et la mise en œuvre de mesures adaptatives (Bressers, et al., 2016).

Par ses caractéristiques climatiques et sa position géographique, le Maroc a connu de nombreuses sécheresses sévères au cours des dernières années, pouvant atteindre jusqu'à cinq années consécutives sans pluie. En raison de l'évolution défavorable des précipitations, les ressources en eau sont susceptibles de se détériorer dans l'avenir (Tramblay, et al., 2013; Driouech, et al., 2013; MDCE, 2016). Les projections du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) indiquent une forte tendance à la hausse des températures pour le Maroc. Depuis 1970, une augmentation de la température d'environ 3 à 7°C a été observée et devrait toucher le Maroc d'ici à 2100, en particulier pour les mois d'été (de juin à août). Les précipitations annuelles devraient diminuer de 10 à 30% pendant la saison humide (d'octobre à avril) et de 10 à 40% pendant la saison sèche (de mai à septembre).

Dans les années à venir, le Maroc sera davantage exposé à la sécheresse, si aucune mesure n'est prise. Ainsi, cette variabilité a des impacts négatifs sur l'agriculture, qui dépend principalement des pluies et est très vulnérable aux variations climatiques. La rareté de l'eau a rendu nécessaire une gestion des ressources pour adapter la politique des barrages pour stocker les apports des années humides en faveur des années sèches, ainsi que pour transférer de l'eau vers les régions déficitaires afin d'assurer la disponibilité de l'eau et la sécurité alimentaire à l'échelle nationale (IPCC, 2013; Verner, et al., 2018).

Plusieurs études ont utilisé différentes approches pour comprendre les impacts de la sécheresse et prédire son occurrence. L'une d'entre elles a consisté à analyser les interactions entre les indices d'oscillation océanique-atmosphérique et les indices de sécheresse météorologique et hydrologique dans des zones critiques dans le monde entier (Mera, et al., 2018; Vazifehkhah, et al., 2019; Mohammadrezaei, et al., 2020; Christensen, et al., 2020; Wei, et al., 2020). Une autre approche consiste à modéliser la sécheresse, ce qui peut aider à identifier les zones à risque, à prédire le moment et la gravité des sécheresses et à soutenir la prise de décision pour la réduction et la gestion de la sécheresse malgré les interactions complexes entre les processus atmosphériques et continentaux.

En outre, plusieurs chercheurs ont étudié, à l'aide d'approches statistiques, la manière dont les schémas de circulation atmosphérique conduisent à des pénuries de précipitations dans différentes régions du monde. Par exemple, Luppichini (2021) a étudié la corrélation entre l'indice d'oscillation nord-atlantique (NAOi) et les tendances de précipitations en Toscane, en Italie, et Lopez-Bustins (2020) a montré la relation spatio-temporelle entre l'influence de l'oscillation de l'ouest de la Méditerranée (WeMOi) et l'irrégularité des précipitations en Catalogne. À l'échelle du Maroc, Zamrane (2018) a révélé une corrélation significative entre la variabilité hydrologique et les fluctuations climatiques matérialisées par différents indices climatiques tels que le NAOi, l'indice d'oscillation australe (SOI) et le WeMOi. De plus, Driouech et al. (2020) ont évalué les relations entre les extrêmes climatiques au Maroc liés au NAOi en utilisant des indices de sécheresse et montrent que l'effet du NAOi sur les précipitations marocaines s'étend jusqu'à la période d'octobre à février. De plus, El Niño - oscillation australe (ENSO) n'affecte pas le Maroc; en ce qui concerne les télé-connexions autres que le NAO, l'Oscillation Méditerranéenne (MO) jouent un rôle important dans les zones humides et semi-arides du Maroc. Néanmoins, des recherches supplémentaires sont nécessaires sur les interactions entre ces télé-connexions et les effets des conditions topographiques à l'échelle locale (Verner, et al., 2018).

Le suivi de la sécheresse peut être basée sur une seule variable pour calculer la sécheresse météorologique et hydrologique, en utilisant, par exemple l'indice du pourcentage des précipitations normales (Hayes, 2006), l'indice des précipitations standardisé (SPI) (McKee et al., 1993), l'indice des niveau d'eau standardisé (Bhuiyan, 2004), et l'indice de sécheresse du débit (SDI) (Nalbantis, et al., 2009). Les indices de télédétection, tels que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), ont été largement utilisés pour caractériser les indices de sécheresse spatio-temporels à différentes échelles de temps (Rousse, et al., 1973). Les échelles

de 3, 6 et 12 mois sont généralement utilisées pour représenter les sécheresses à court, moyen et long terme, respectivement. De plus, les méthodes de calcul de la sécheresse par la circulation atmosphérique sont sujettes à des incertitudes (Kingston, et al., 2015).

Au Maroc, la plupart des études portant sur les tendances climatiques ont été menées soit à l'échelle nationale, soit au niveau des bassins versants. Plusieurs études ont été menées pour comprendre et traiter l'impact des sécheresses sur l'agriculture et les ressources en eau. Par exemple, Ezzine (2014) a développé un nouvel indice de sécheresse, l'indice d'eau standardisé (SWI), basé sur l'indice normalisé de l'eau (NDWI), qui a été comparé à d'autres indices. L'étude a révélé une forte corrélation entre le SWI et la production de céréales. Verner et al. (2018) ont évalué les effets des sécheresses sur le secteur agricole en utilisant des indices tels que ENSO, NAO et MO pour analyser l'impact des télé-connexions. L'étude a souligné l'importance d'une gestion efficace des sécheresses. En ce qui concerne des exemples d'études de cas spécifiques au Maroc, Boudad et al. (2018) ont analysé les caractéristiques des sécheresses météorologiques et hydrologiques dans le bassin de l'Inaouene, dans le nord du Maroc, sur différentes échelles de temps, en utilisant des indices tels que SPI et SDI pour évaluer les sécheresses. Les résultats ont montré que la fréquence des épisodes de sécheresse varie avec l'échelle de temps et qu'il existe une forte corrélation positive entre SPI et SDI à l'échelle de 12 mois. En outre, Hadri et al. (2021) ont analysé la relation entre l'activité végétale et la gravité de la sécheresse dans la plaine occidentale de Haouz au Maroc sur une période de 10 ans, en utilisant des images satellite et des indices tels que SPI et SWI. L'étude a mis en évidence une relation claire entre l'activité végétale et la sévérité de la sécheresse.

Les études antérieures offrent des perspectives précieuses sur les tendances de la sécheresse dans tout le Maroc, mais peu d'études se concentrent spécifiquement sur l'impact des modes de circulation atmosphérique sur la sécheresse dans le bassin versant de l’Ouergha. Ce bassin joue un rôle important dans la production agricole et la mobilisation de ses ressources en eau conventionnelles. En combinant les oscillations atmosphériques, les indices de sécheresse météorologiques (SPI) et hydrologiques (SDI), l'évaluation de la vulnérabilité du bassin de l'Ouergha à la sécheresse peut être améliorée.

L'objectif de cette étude était d'évaluer les tendances et les schémas spatiaux de l'occurrence de la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha en utilisant le SPI et le SDI, des données multi-sources provenant des enregistrements hydro-climatiques locaux, de la télédétection et des indices NAOi et WeMOi à grande échelle. Par conséquent, cet article évalue

les tendances des précipitations, du débit et des indices extrêmes à l'échelle du bassin versant de l'Ouergha en utilisant le SPI et le SDI dérivés de 10 stations climatiques et 8 stations hydrométriques couvrant toutes les principales zones climatiques du bassin. Ensuite, nous avons examiné la relation entre les indices de sécheresse et les indices NAOi et WeMOi pour évaluer l'utilité des indices de sécheresse (SPI et SDI). En plus d'évaluer les tendances détaillées à l'échelle du bassin, nous avons également effectué une analyse des tendances au niveau des stations. Enfin, nous présentons des cartes de distribution spatiale des indices de sécheresse, dérivées des valeurs temporelles de SPI et SDI, ainsi que des états d'humidité et de densité de la végétation pendant les événements de sécheresse. Ces cartes visent à démontrer la distribution spatiale de la sécheresse et ses effets sur l'utilisation des terres dans le bassin de l'Ouergha.

2. Données et méthodologie

2.1. Acquisition de données

2.1.1. Données hydro-climatiques locales

Les données sur les précipitations et le débit ont été obtenues auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou (ABHS), qui collecte des données à partir de stations climatiques et hydrométriques réparties sur l'ensemble du bassin versant de l'Ouergha. Malheureusement, toutes les stations n'ont pas été sélectionnées pour cette étude, certaines n'étant plus fonctionnelles ou ayant été mises en place récemment. Seules les stations ayant une durée d'enregistrement suffisante et cohérente ont été sélectionnées pour l'analyse, ce qui a conduit à l'utilisation de 10 stations climatiques et 8 stations hydrométriques, toutes couvrant une période de 33 ans d'octobre 1984/85 à septembre 2016/17.

La moyenne annuelle des précipitations pour les 10 stations climatiques sur 33 ans était de 587,1 mm (médiane de 554 mm) (Figure 14). Les précipitations variaient entre 286 mm (en 1998/99) et 1086 mm en 2009/10. La figure 14 montre une répartition déséquilibrée des précipitations moyennes au cours des 33 années, avec des quantités inférieures à la moyenne de 1986/87 à 1988/89, 1990/91 à 1994/95, 1998/99 à 1999/00, 2001/02, 2004/05 à 2007/08 et 2013/14 à 2016/17. Ces dernières périodes alternaient avec des périodes humides de deux à trois ans avec des précipitations dépassant 600 mm.

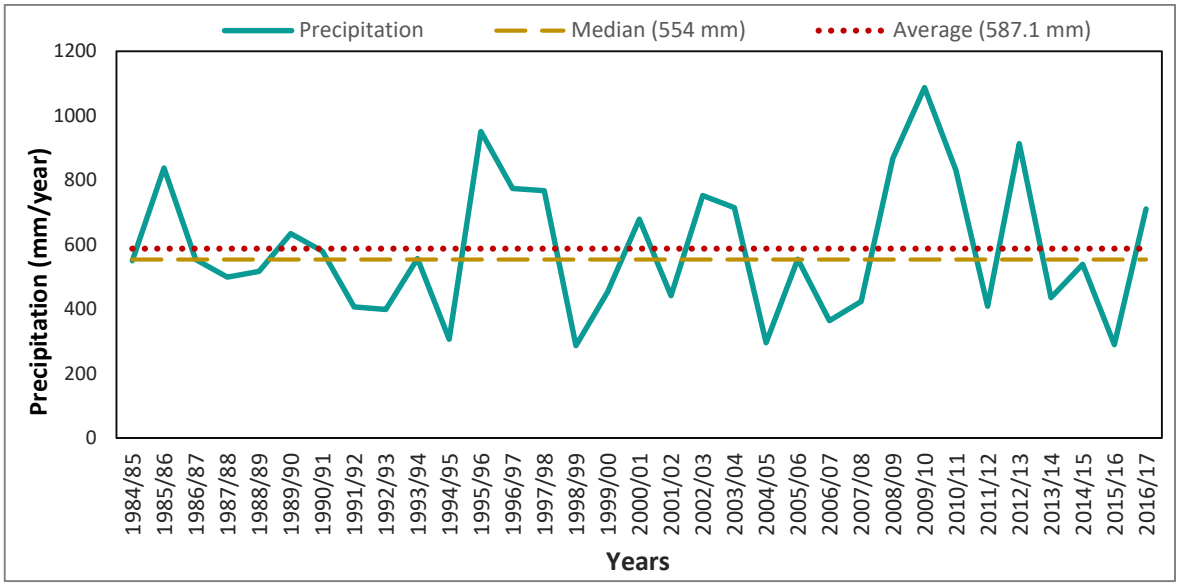


Figure 14. Moyenne annuelle des précipitations dans le bassin versant de l'Ouergha pour 33 ans

Le débit annuel moyen pour 8 stations hydrométriques pendant 33 ans était de 194,8 m^3/s (médiane de 115,2 m^3/s) (Figure 15). Le débit varie entre 11,5 m^3/s en 1994/95 et 763,3 m^3/s en 2009/10. Le graphique montre une répartition déséquilibrée des précipitations moyennes au cours des 33 ans, avec des quantités inférieures à la moyenne en 1984, de 1986/87 à 1988/89, de 1991/91 à 1994/95, 1998/99 à 1999/00, 2001/02, 2004/05 à 2007/08, 2011/12 et 2013/14 à 2016/17. Ces périodes ont alterné avec des périodes humides de deux à trois ans avec des débits allant de 208,1 m^3/s en 1990/91 à 763 m^3/s en 2009/10.

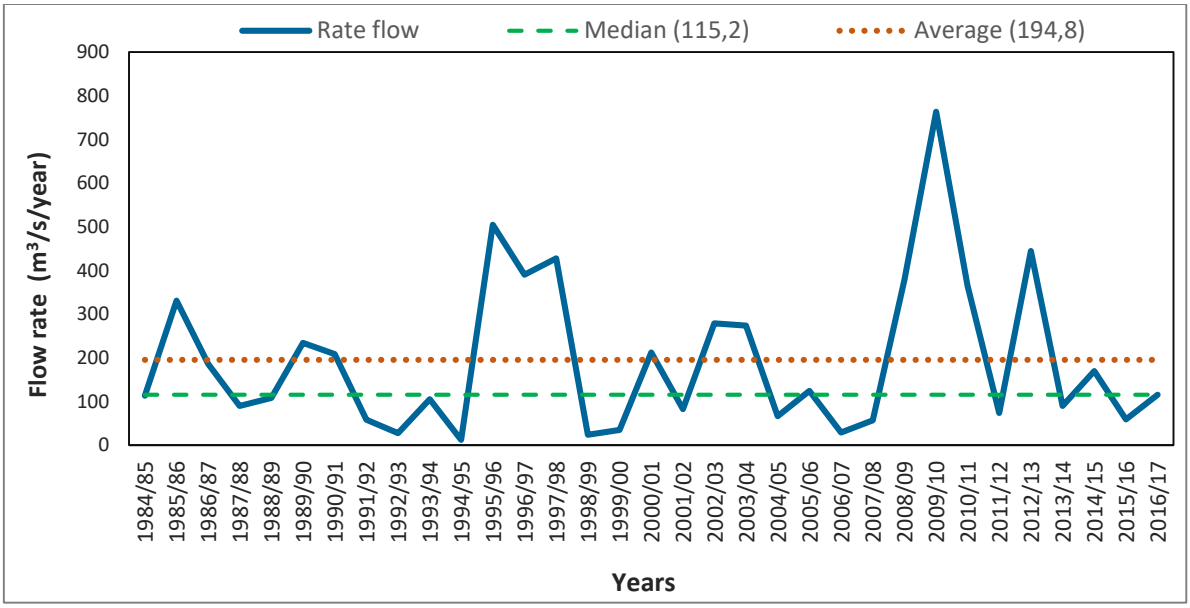


Figure 15. Moyenne annuelle des débits dans le bassin versant de l'Ouergha pour 33 ans

2.1.2. NAOi à grande échelle et WeMoi

Les données historiques mensuelles et annuelles du NAOi ont été obtenues à partir du site Web de l'Administration nationale océanique et atmosphérique des États-Unis. Le NAOi est la différence des anomalies de pression de surface entre différents emplacements du nord et du sud qui suit les mouvements saisonniers du minimum islandais et des anticyclones des Açores.

Les données enregistrées de WeMOi pour la période d'étude ont été acquises à partir du site Web du groupe de climatologie de l'Université de Barcelone (http://www.ub.edu/gc/wemo/). Le WeMOi est la connexion atmosphérique entre un point au sud-ouest de San Fernando et la vallée du Pô de Padoue (Martin-Vide, et al., 2006) et est calculée à partir des données de pression de surface du Global Forecast System (GFS), un modèle développé par les National Centers for Environmental Prediction (NCEP), une agence au sein de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis. Les données du WeMOi sont mises à jour avec les sorties du modèle à 0h et 12h, et couvrent jusqu'à 144 heures. Le WeMOi est utilisé pendant les mois d'automne comme outil prédictif pour les pluies torrentielles. De plus, NAOi et WeMOi couvrent la période de 1984/85 à 2016/17.

2.1.3. Données de télédétection

Les observations de la végétation par satellite fournissent une méthode complémentaire pour surveiller et analyser l'étendue spatiale et la variabilité de l'effet de la sécheresse sur les conditions de la végétation. La méthode la plus couramment utilisée pour surveiller la végétation est celle des ensembles de données à long terme et à l'échelle mondiale sur le couvert végétal, fondés sur des observations passives par satellite depuis les années 1970. Ces ensembles de données sont très appréciés par les chercheurs et les décideurs politiques car ils offrent des données cohérentes et à long terme sur la couverture végétale de vastes zones (Tucker, et al., 2005). Néanmoins, dans cette étude particulière, nous avons analysé l'impact de la sécheresse sur les conditions de végétation en utilisant des bandes de données des capteurs Landsat TM5 et Landsat OLI 8 (Tableau 16, Tableau 17, Tableau 18). Les images satellites utilisées dans l'étude provenaient généralement de la saison printanière, lorsque la végétation est plus dense, afin d'étudier le potentiel de croissance de la végétation en réponse aux niveaux d'humidité de l'eau et du sol. Ce choix de saison était particulièrement important car tout impact de la sécheresse sur la croissance de la végétation se refléterait dans l'indice de végétation, qui reflète la teneur en chlorophylle et la vitalité de la végétation en croissance.

Tableau 14. Les caractéristiques du capteur Landsat (http://landsat.gsfc.nasa.gov/)

<table>
<tr><td>Caractéristiques</td><td colspan="2">Landsat 5</td><td colspan="2">Landsat 8</td></tr>
<tr><td>Capteurs</td><td colspan="2">TM</td><td colspan="2">OLI</td></tr>
<tr><td>Lancement</td><td colspan="2">01-Mars-84</td><td colspan="2">11-Février-13</td></tr>
<tr><td>Fin de mission</td><td colspan="2">05-Juin-13</td><td colspan="2">Jusqu'à aujourd'hui</td></tr>
<tr><td>Altitude de l’orbite</td><td colspan="2">705 Km</td><td colspan="2">705 Km</td></tr>
<tr><td>Orbite</td><td colspan="2">Quasi-polaire héliosynchrone</td><td colspan="2">Quasi-polaire héliosynchrone</td></tr>
<tr><td>Champ de vision</td><td colspan="2">185 Km</td><td colspan="2">185 Km</td></tr>
<tr><td>Résolution moyenne générale</td><td colspan="2">Général: 30 m; infrarouge thermique: 120 m</td><td colspan="2">Général : 30 m ; Panchromatique : 15 m ;
Infrarouge thermique : 100 m</td></tr>
<tr><td>Couverture</td><td colspan="2">16 jours</td><td colspan="2">16 jours</td></tr>
<tr><td>Limitations</td><td colspan="2">Résolution spectrale limitée et arrêt de l'exploitation en 2013, ce qui rend ses données moins pertinentes pour les analyses récentes.</td><td colspan="2">La résolution spectrale limitée par rapport aux capteurs hyperspectraux et la couverture nuageuse peut entraver les observations dans certaines zones.</td></tr>
<tr><td rowspan="8">Dates des images utilisées</td><td>Image gauche</td><td>Image droite</td><td>Image gauche</td><td>Image droite</td></tr>
<tr><td>16/02/1993</td><td>25/02/1993</td><td rowspan="7">22/05/2016</td><td rowspan="7">15/05/2016</td></tr>
<tr><td>13/05/1995</td><td>19/03/1995</td></tr>
<tr><td>21/03/1999</td><td>30/03/1999</td></tr>
<tr><td>08/05/2005</td><td>17/05/2005</td></tr>
<tr><td>19/03/2007</td><td>29/04/2007</td></tr>
<tr><td>22/05/2016</td><td>15/05/2016</td></tr>
<tr><td>Source</td><td colspan="4">https://earthexplorer.usgs.gov/</td></tr>
</table>

Tableau 15. Les bandes spectrales du capteur Landsat 5 TM (http://landsat.gsfc.nasa.gov/)

Bandes	Bandes spectrales	Longueur d’ondes	Résolution spatiale
1	Bleu	0.45 - 0.52 µm	30m
2	Vert	0.52 - 0.60 µm	30m
3	Rouge	0.63 - 0.69 µm	30m
4	Proche-infrarouge	0.76 - 0.90 µm	30m
5	Moyen Infrarouge	1.55 - 1.75 µm	30m
6	Infrarouge-thermique	10.40 - 12.50 µm	120m
7	Moyen Infrarouge	2.08 - 2.35 µm	30m

Tableau 16. Les bandes spectrales du capteur Landsat 8 OLI (http://landsat.gsfc.nasa.gov/)

Bandes	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale
1	Aérosol	0,435 - 0,45 µm	30 m
2	Bleu	0,452 - 0,51 µm	30 m
3	Vert	0,533 - 0,59 µm	30 m
4	Rouge	0,636 - 0,67 µm	30 m
5	Proche infrarouge	0,851 - 0,87 µm	30 m
6	Moyen Infrarouge 1	1,566 - 1,65 µm	30 m
7	Moyen Infrarouge 2	2,107 - 2,29 µm	30 m
8	Panchromatique	0,503 - 0,67 µm	15
9	Cirrus	1,363 - 1,38 µm	30 m
10	Infrarouge thermique 1	10,60 - 11,19 µm	100 m
11	Infrarouge thermique 1	11,50 - 12,51 µm	100 m

2.2. Méthodes

Comme illustré dans l'organigramme du cadre général (Figure 16), on a procédé à plusieurs étapes pour évaluer les tendances et les schémas spatiaux de la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha.

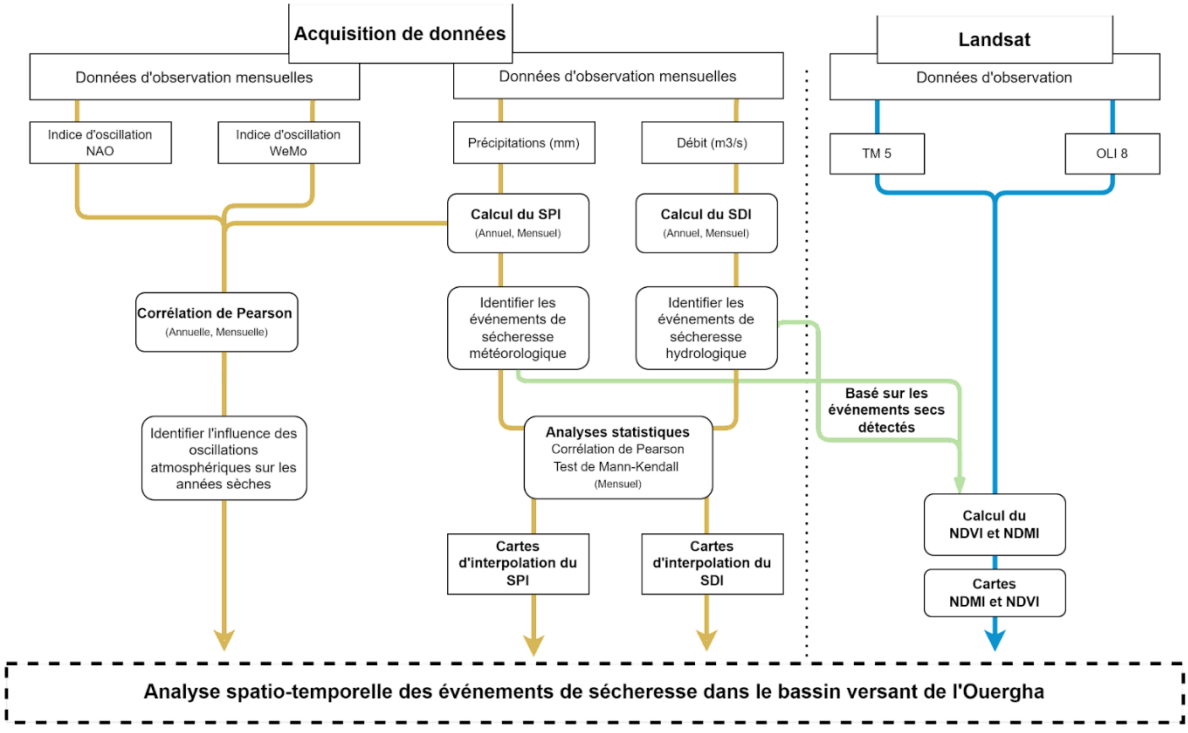


Figure 16. Organigramme du cadre général de la méthodologie adoptée

2.2.1. Indices de sécheresse

L'indice de précipitation standardisé (SPI) a été développé par McKee et al. (1993) comme une méthode permettant de définir et de surveiller les événements de sécheresse. C'est un indice simple (Akbari, et al., 2015; Boudad, et al., 2018) qui repose uniquement sur les données de précipitation et permet d'évaluer les périodes humides et sèches. Différentes échelles de temps peuvent être utilisées pour calculer le SPI, reflétant l'impact de la sécheresse sur différents types de ressources en eau. Le calcul du SPI pour un site spécifique est basé sur un enregistrement des précipitations à long terme, couvrant plus de 30 ans, et est ajusté à une distribution de probabilité, telle que la distribution Gamma. Le SPI est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$SPI_{i,k} = \frac{X_{i,k} - \overline{X_k}}{S_k} \quad i=1,2,3...., k=1,2,3,4 \qquad \textit{Equation 1}$$

Où : Xi,k est la quantité cumulative de précipitations pour la période de référence k de l'année hydrologique (i) ou du mois (k). N indique le nombre d'années hydrologiques. Sk est l'écart type des précipitations cumulatives de la période de référence k.

L'indice de sécheresse du débit (SDI), développé par Tsakiris et Nalbantis (2009), est utilisé pour évaluer la sécheresse hydrologique. Le SDI est basé sur le débit mensuel observé et offre l'avantage de surveiller la sécheresse hydrologique et l'approvisionnement en eau à court, moyen et long terme. L'indice est calculé sur la base du débit cumulé pour chaque période de référence au cours d'une année hydrologique donnée, en utilisant l'équation suivante :

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \overline{V_k}}{S_k} \quad i=1,2,3...., k=1,2,3,4 \qquad \textit{Equation 2}$$

Où : Vi,k est le débit cumulé pour la période de référence k de l'année hydrologique (i). N indique le nombre d'années hydrologiques. Sk est l'écart type des volumes d'écoulement cumulés pour la période de référence k.

Selon Tsakiris (2009) un épisode sec se produit lorsque l'indice atteint continuellement une intensité de -1,0 ou plus ; chaque épisode de sécheresse est marqué par une durée et une intensité notable. Le Tableau 17 présente l'état des classifications météorologiques et hydrologiques de la sécheresse (Tsakiris, et al., 2009).

Tableau 17. Classification des valeurs SPI et SDI (Tsakiris, et al., 2009)

Valeurs de l'indice	Classification
SPI (SDI) > 2	Extrêmement humide
1,5 < SPI (SDI) < 1,99	Très humide
1 < SPI (SDI) < 1.49	Modérément humide
-0,99 < SPI (SDI) < 0,99	Légèrement humide
-1 < SPI (SDI) < 0	Légèrement sec
-1,5 < SPI (SDI) < -1	Modérément sec
-2 < SPI (SDI) < -1.5	Gravement sec
SPI (SDI) < -2	Extrêmement sec

2.2.2. Indices de végétation

Les indices NDVI (Rousse, et al., 1973) et NDMI (Hunt, et al., 1989) sont importants dans les analyses de télédétection. Les mesures de la bande proche infrarouge (NIR), rouge (R) et infrarouge à ondes courtes (SWIR1) ont été obtenues à partir des bandes d'images satellites Landsat, qui ont été choisies en raison de leur grande disponibilité et de leur haute résolution spatiale et temporelle, les rendant adaptées à l'analyse de la télédétection (Tableau 14, Tableau 15, Tableau 16). Ces bandes ont été traitées à la fois par correction radiométrique et correction atmosphérique afin de corriger les variations de la réponse du capteur, s'assurer que les données d'image reflètent avec précision les propriétés de réflectance de la surface de la Terre et éliminer ou corriger les effets de l'absorption atmosphérique, tout comme la diffusion et d'autres facteurs qui peuvent avoir un impact sur les valeurs de radiance mesurées. Le processus de correction a été réalisé à l'aide du logiciel ENVI 5.3, et la correction atmosphérique a été spécifiquement effectuée à l'aide du module FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes).

Le NDVI est basé sur les caractéristiques contrastées de deux bandes d'un ensemble de données matricielles multispectrales représentées par l'absorption des pigments chlorophylliens dans la bande rouge (R) et la forte réflectivité des végétaux dans le canal proche infrarouge (NIR). Le NDVI est construit avec une combinaison des bandes R et NIR et s'exprime comme suit :

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR}-\mathrm{R}}{\mathrm{NIR}+\mathrm{R}} \qquad \textit{Equation 3}$$

Le NDMI (Hunt, et al., 1989) utilise deux bandes pour surveiller la sécheresse et indiquer le niveau d'humidité du couvert végétal et le niveau de combustible dans les zones sujettes aux incendies. L'indice est calculé à partir de la réflectance dans le proche infrarouge (NIR) et dans l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) (Tableau 15, Tableau 16) et est exprimé par l'équation suivante :

$$\mathrm{NDMI} = \frac{(\mathrm{NIR} - \mathrm{SWIR1})}{(\mathrm{NIR} + \mathrm{SWIR1})} \qquad \textit{Equation 4}$$

Le calcul du NDVI et du NDMI a été effectué à l'aide d'ArcMap, qui est le composant principal de la série ArcGIS. Les valeurs du NDVI et du NDMI varient entre -1 et 1. Généralement, les valeurs entre 0 et 1 indiquent des niveaux plus élevés de couverture végétale (NDVI) et d'humidité (NDMI), tandis que les valeurs entre 0 et -1 indiquent la présence d'eau.

2.2.3. Analyse des tendances

Cette étude a analysé la corrélation entre les indices NAOi, WeMOi, SPI et SDI sur différentes échelles de temps. Les corrélations de Pearson ont été utilisées pour analyser les variations annuelles et mensuelles des sécheresses météorologiques et hydrologiques. De ce fait, la valeur absolue du coefficient de corrélation (valeurs r) a été calculée à l'aide de l'équation 5, où r est compris entre -1 et +1, et la valeur r la plus élevée (positive ou négative) représente une corrélation plus forte. Le test a été calculé à un niveau de confiance de P < 5 %.

$$r(x_J y) = \frac{b.s_x}{s_y} = \frac{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \gamma_i\right) - \bar{x}\cdot\bar{\gamma}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2\right) - (\bar{x})^2} * \sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \gamma_i^2\right) - (\bar{\gamma})^2}} \qquad \textit{Equation 5}$$

Le test non paramétrique de Mann-Kendall (1975) a été utilisé pour détecter les tendances monotones dans les séries temporelles mensuelles, saisonnières et annuelles. Ce test est indépendant d'une distribution normale et compare les magnitudes relatives des données de l'échantillon plutôt que les valeurs des données elles-mêmes (Gilbert, 1987). Le test de tendance et la statistique de Mann-Kendall pour une série de données sont calculés selon les équations 6 et 7, respectivement :

$$S = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}-1} \sum_{j=i+1}^{N-1} Sign\,(yj - yi) \qquad \textit{Equation 6}$$

$$Sign\,(yj - yi) = \begin{cases} 1 & if \quad yj - yi > 0 \\ 0 & if \quad yj - yi = 0 \\ -1 & if \quad yj - yi < 0 \end{cases} \qquad \textit{Equation 7}$$

Où : S est la statistique du test de Mann-Kendall ; yi et yj sont les valeurs annuelles des années i et j (j>i), respectivement ; N est la longueur de la série de données, et Sign est le signe (+ ou -) de (yi - yj).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\sqrt{Var(S)}]^{\frac{1}{2}}} & if\ S > 0 \\ & if\ S = 0 \\ \frac{S+1}{[\sqrt{Var(S)}]^{\frac{1}{2}}} & if\ S < 0 \end{cases} \qquad \textit{Equation 8}$$

Le test statistique standard (Z) indique une tendance croissante avec des valeurs positives, et les valeurs négatives indiquent une tendance décroissante dans la série temporelle. Si |Z| > Z1-α/2, l'hypothèse de l'absence de tendance est rejetée, où |Z| et α indiquent respectivement la valeur absolue du coefficient de Mann-Kendall et le niveau de signification statistique.

En fonction du score Z, la tendance des données peut être classée comme significative, faible ou inexistante. Pour un niveau de signification de 0,05, si le score Z est supérieur ou égal à 1,96, cela indique une tendance significative dans les données, un score Z positif indiquant une tendance à la hausse et un score Z négatif indiquant une tendance à la baisse. Si le score Z est compris entre 1,0 et 1,96, cela indique une tendance faible dans les données. Enfin, si le score Z est inférieur à 1,0, cela suggère l'absence de tendance dans les données (Modarres, et al., 2007).

3. Résultats

3.1. Analyse des tendances de la sécheresse

Le bassin versant de l'Ouergha a connu des variations au niveau des précipitations et des débits, dont certaines années ont été caractérisées par de fortes précipitations et d'autres par de faibles précipitations (Figure 17). La probabilité de dépassement des précipitations (Figure 17a) a été générée pour 10 stations climatiques. Les stations de Jbel Outka (à une altitude de 1090 m) et Bab Taza (à une altitude de 880 m) ont enregistré des précipitations plus élevées avec des moyennes annuelles dépassant respectivement 1000 mm et 1500 mm. En revanche, les précipitations enregistrées à la station du barrage de Sahla (à une altitude de 321 m) étaient beaucoup plus faibles avec une moyenne de 20 mm. Les sept autres stations ont enregistré des précipitations annuelles moyennes compris entre 542 mm et 807 mm.

La courbe de durée d'écoulement (Figure 17b) est construite à partir des données de 8 stations hydrométriques. Chaque station a enregistré les débits les plus élevés et les plus faibles à différents moments, ce qui se traduit par une variation des débits d'écoulement entre les stations. La station du barrage Al Wahda, située en aval, présente le débit le plus élevé à 755 m^3/s. En revanche, les débits les plus faibles ont été détectés aux stations d'Asfalou et du barrage Sahla avec 26 m^3/s et 22 m^3/s respectivement. Les six autres stations ont un débit annuel moyen compris entre 96 m^3/s et 254 m^3/s.

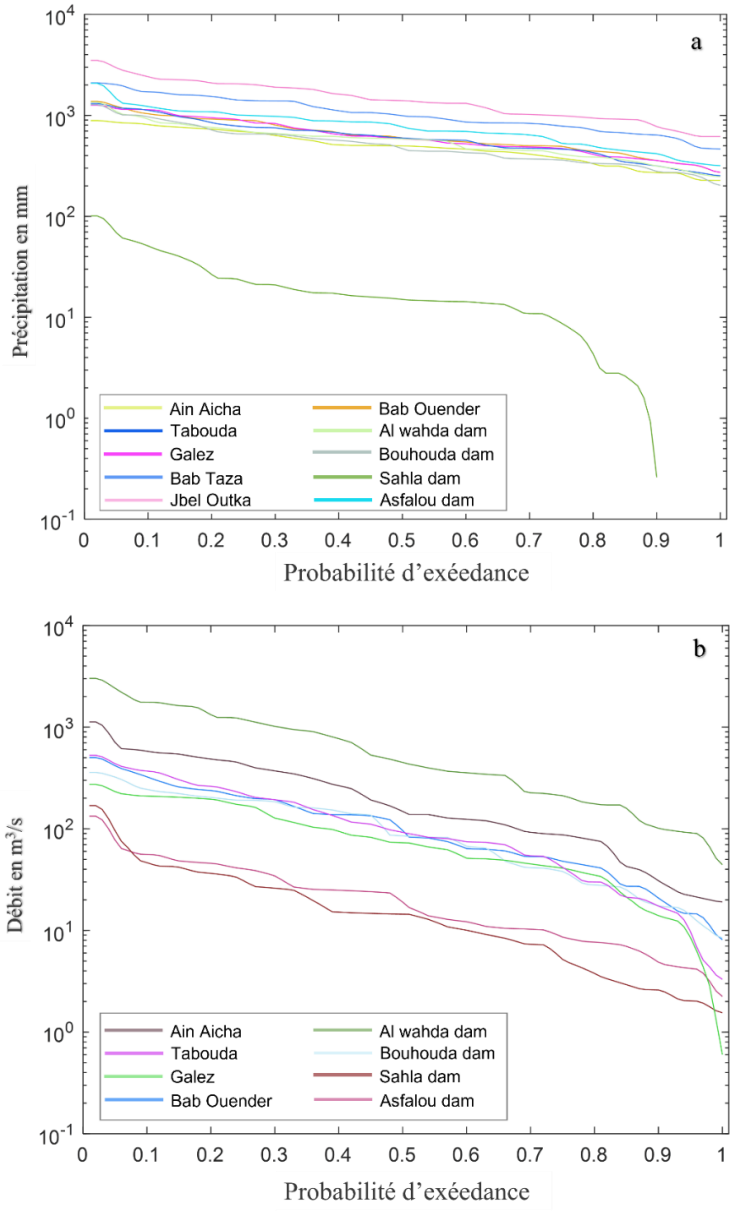


Figure 17. Courbes de probabilité de dépassement pour des stations sélectionnées de précipitations (à gauche) et de débit (à droite) dans le bassin versant.

Les données climatologiques varient considérablement dans la zone d'étude. Pour expliquer le manque d'eau pendant la période d'étude, on a utilisé la représentation graphique du SPI et du SDI calculés à partir de la moyenne des données de 10 stations climatiques et de 8 stations hydrologiques. (Figure 18) montre une variation presque similaire dans la succession des événements secs et humides. Le SDI et le SPI calculés correspondent à des événements secs lorsque l'indice est égal ou inférieur à 1 ; un événement humide est indiqué par des valeurs d'indice atteignant ou dépassant 1 (Tableau 17). Le SDI reflète les irrégularités des précipitations au cours de la période de 33 ans par des événements secs modérés à sévères (-1,5 < SPI (SDI) < -1) en 1992/93, 1994/95, 1998/99, 2004/05, 2006/07 et 2015/16. Le stress hydrologique le plus sévère au cours de la période de 33 ans a été observé en 1994/95, avec des précipitations annuelles moyennes de 368,4 mm.

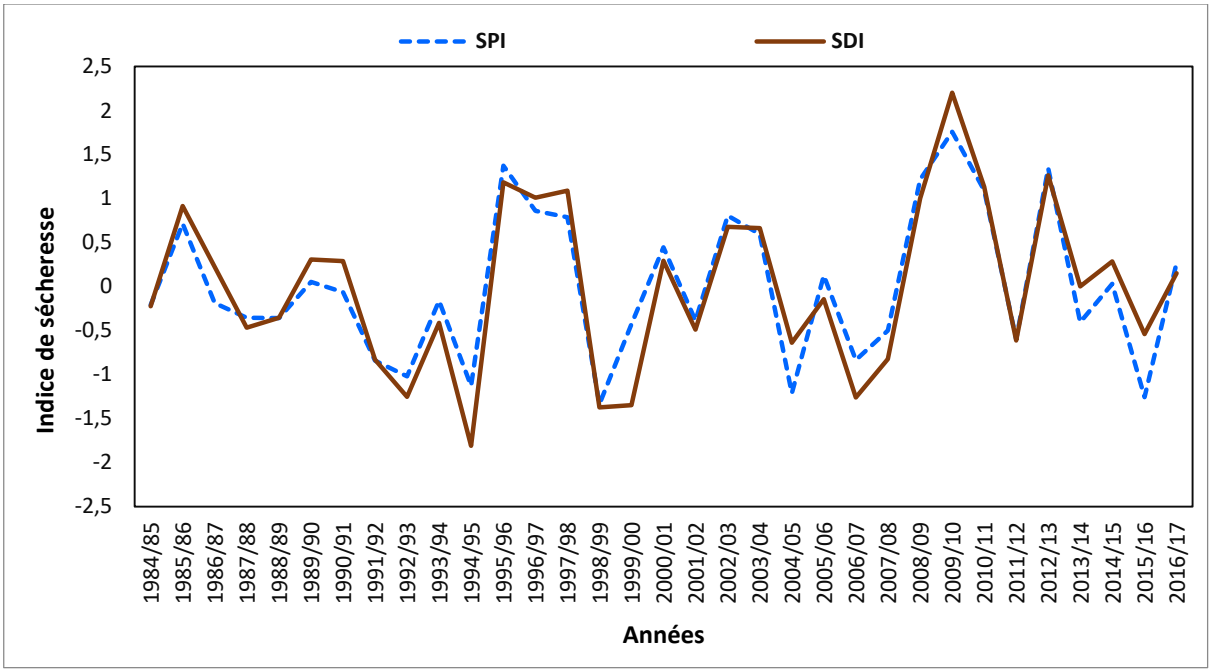


Figure 18. Valeurs temporelles du SPI et du SDI de 1984/85-2016/17

3.2. Corrélation de Pearson

Pour détecter la présence de linéarité et visualiser la relation entre les indices de circulation atmosphérique (NAOi et WeMOi) et l'indice de sécheresse météorologique (SPI) dans le bassin versant de l'Ouergha, nous avons appliqué le coefficient de corrélation de Pearson à l'échelle annuelle et mensuelle avec un niveau de signification de 5 %. Les coefficients de corrélation ont été compris entre -1 et +1 et mesurent la force de l'association entre deux variables. Une grande corrélation est observée pour les valeurs de coefficient entre ±0,5 et ±1. Une corrélation modérée est représentée par des valeurs comprises entre ±0,3 et

±0,5 ; et une faible corrélation se produit pour les valeurs entre +0,3 et 0,1 sont petites et si elles sont inférieures à 0,1 sont triviales (Cohen, 1988; Antonie, et al., 2004).

Les données de l'indice d'oscillation atmosphérique utilisées ont été ajustées sur une échelle de temps hydrologique pour correspondre aux modèles d'échelle de temps SPI et SDI. Pour l'échelle de temps annuelle, le SPI présente de fortes relations négatives avec le NAOi et le WeMOi de -0,62 et -0,69, respectivement. Ces relations négatives importantes montrent le lien entre les indices NAOi et WeMOi et l'indice SPI, mais n'indiquent pas si l'un ou l'autre exerce une influence majeure. Par conséquent, une corrélation mensuelle doit être testée (Figure 7). Les corrélations mensuelles ont été préférées aux corrélations saisonnières pour obtenir des résultats plus précis, étant donné que les indices des oscillations atmosphériques présentent une plus grande variabilité intra-saisonnière.

En général, la corrélation mensuelle entre le NAOi et le SPI indique une linéarité négative importante de novembre à mars (Figure 19a). La faible corrélation entre le SPI et le NAOi uniquement de décembre à mars peut s'expliquer par le fait que l'indice NAOi est fortement corrélé aux modèles climatiques hivernaux dans la région, alors qu'il n'a peut-être pas une influence aussi forte sur les régimes de précipitations pendant les autres saisons. D'autres facteurs, tels que la mousson africaine ou l'activité convective locale, peuvent jouer un rôle plus important dans la détermination des régimes de précipitations à d'autres moments de l'année. De plus, l'indice NAOi peut présenter moins de variabilité pendant d'autres saisons, ce qui le rend moins fortement corrélé avec les précipitations.

Ainsi, la corrélation entre WeMOi et SPI (figure 7b) présente une linéarité négative plus élevée à modérée pour tous les mois, à l'exception de mai et d'août, où la corrélation est faible. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que l'indice WeMoi n'est pas le seul facteur influençant les précipitations durant cette période. D'autres facteurs, tels que l’occupation des sols et la topographie, peuvent également jouer un rôle important dans la détermination des régimes de précipitations au cours de cette période. En outre, l'indice de WeMoi lui-même peut présenter une variabilité moindre au cours de ces mois, ce qui le rend moins fortement corrélé avec les précipitations.

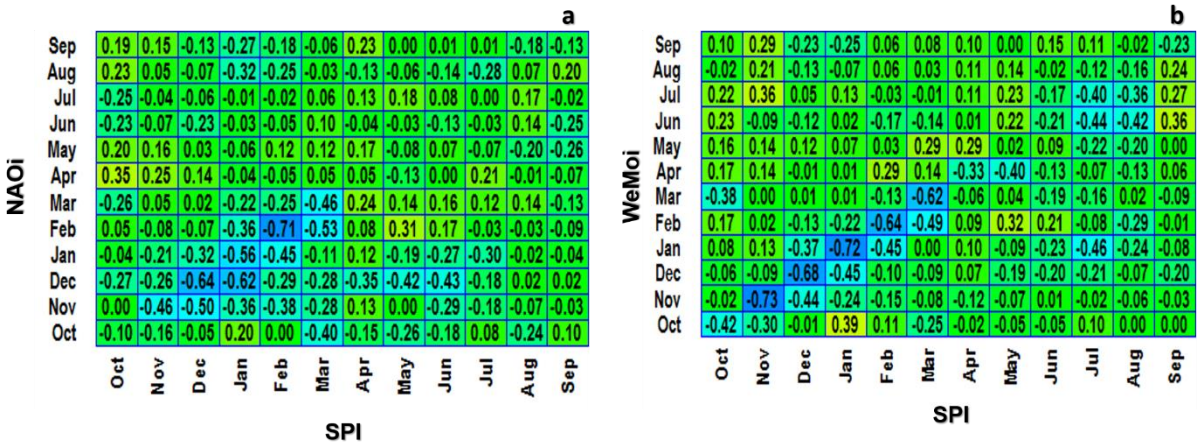


Figure 19. Corrélogramme des coefficients de corrélation de Pearson entre le SPI et les indices d'oscillation atmosphérique à l'échelle mensuelle de 1985-2017 à un niveau de signification alpha = 0,05. Corrélation forte : valeurs comprises entre ± 0,50 et ± 1 ; corrélation moyenne : valeurs comprises entre ± 0,30 et ± 0,49 ; corrélation faible : valeurs inférieures à + 0,29

Le SPI et le SDI ont été calculés en fonction de la moyenne des indices calculés pour chaque station climatique et hydrométrique. La corrélation entre les indices a montré une forte liaison positive pour presque chaque mois avec une linéarité positive (| r | > 0,60), sauf pour juillet et août (Figure 20). Par conséquent, la sécheresse météorologique a un impact direct sur le débit. La forte corrélation est due à la dépendance du débit des précipitations, qui peut également s'expliquer par l'imperméabilité et la très faible percolation de la surface du bassin versant où les eaux de ruissellement sont prédominantes.

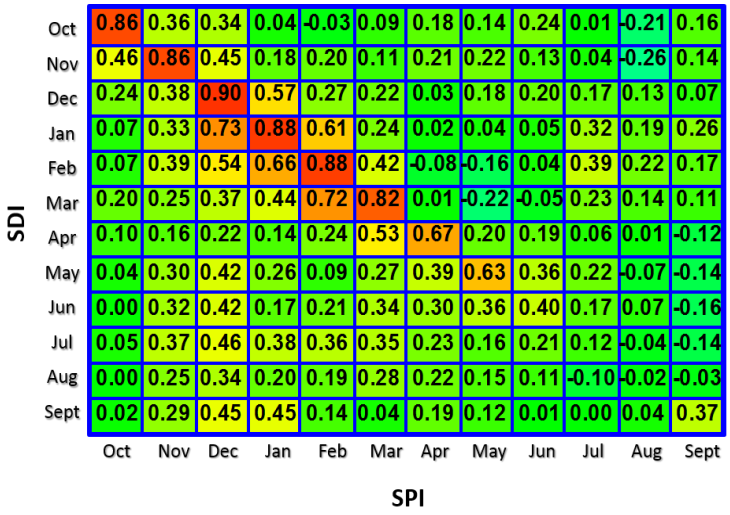


Figure 20. Corrélogramme des coefficients de corrélation de Pearson entre SPI et SDI à l'échelle mensuelle de 1985-2017 à un niveau de signification alpha = 0,05. Corrélation forte : valeurs comprises entre ± 0,50 et ± 1 ; corrélation moyenne : valeurs comprises entre ± 0,30 et ± 0,49 ; corrélation faible : valeurs inférieures à + 0,29

3.3. Test de Mann-Kendall

Les résultats du test de Mann-Kendall, représentés sous forme de Z-scores, ont été utilisés pour les SPI dans 10 stations climatiques et les SDI dans 8 stations hydrométriques. Le tableau 18 montre qu'il existe des tendances diverses dans les différentes stations et mois. Certaines stations indiquent des tendances significatives, positives ou négatives, tandis que d'autres ne montrent aucune tendance ou seulement des tendances faibles. Les tendances significatives sont importantes pour comprendre l'augmentation ou la diminution des conditions de sécheresse, tandis que les tendances faibles sont également utiles pour fournir des informations sur la tendance de la sécheresse.

Le tableau 18 montre des tendances significatives négatives en automne, tandis que des tendances significatives positives ont été observées en septembre et octobre à la station Galez, de septembre à novembre à la station Bab Taza et en novembre à la station Sahla Dam. Des tendances négatives faibles ont été identifiées à la station Bab Ouender en septembre, à la station Bouhouda Dam de septembre à octobre et à la station Asfalou Dam en octobre. En hiver, une tendance positive significative a été observée en décembre à la station Bab Ouender et de décembre à février à la station Sahla Dam. Des tendances négatives faibles ont été observées à la station Ain Aicha en février et à Jbel Outka en janvier, ainsi qu'à la station Asfalou Dam de janvier à février. Des tendances positives faibles ont été observées en janvier et février à Galez et en janvier à Bab Taza. Pendant le printemps, la station Bab Ouender a montré une tendance négative en mars, tandis que la station Bouhouda Dam avait des tendances positives en mars et en mai, et la station Sahla Dam a connu une tendance positive en mai. Des tendances positives faibles ont également été notées à Galez en mars, à Jbel Outka et Bouhouda Dam en avril et à la station Sahla Dam de mars à avril, tandis que des tendances faibles négatives ont été observées à Galez en avril, à Jbel Outka et à la station Al Wahda Dam en mars et à la station Asfalou Dam en avril et mai. Pendant l'été, la station Jbel Outka a indiqué des tendances négatives en juin et des tendances positives en août, tandis que la station Bouhouda Dam a connu une tendance négative en août. Des tendances faibles ont inclus une tendance positive à Tabouda en août et à Bouhouda en juin, tandis que des tendances négatives ont été observées à Bab Ouender en juin, à Bab Taza de juin à juillet, à la station Asfalou Dam en juin et juillet, et à la station Sahla Dam en août.

Tableau 18. La tendance du SPI des 10 stations climatiques du le bassin versant de l'Ouergha à différentes échelles de temps, pour un niveau de signification de 0,05. Les couleurs du tableau indiquent : Bleu : Les scores Z supérieurs ou égaux à 1,96 indiquent une tendance significative dans les données. Vert : Les scores Z compris entre 1,0 et 1,96 indiquent une tendance faible. Gris : les valeurs inférieures à 1,0 indiquent une absence de tendance. + : valeur positive ; - : valeur négative.

Date	Ain Aicha	Bab Ouender	Galez	Tabouda	Bab Taza	Jbel Outka	Al Wahda dam	Asfalou dam	Bouhouda dam	Sahla dam
Octobre	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+
Novembre	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+
Décembre	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+
Janvier	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+
Février	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+
Mars	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+
Avril	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+
Mai	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+
Juin	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-
Juillet	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+
Août	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Septembre	+	-	+	+	+	-	+	-	-	-

Le tableau 19 indique une seule tendance positive significative à la station Tabouda en août, tandis que les autres résultats montrent des tendances faibles ou nulles. Pendant l'automne, des tendances positives ont été détectées dans les stations de Bouhouda et Tabouda en septembre et à la station Tabouda en octobre.

En hiver, des tendances faibles négatives ont été observées à la station Bab Ouender en février, tandis que des tendances faibles positives ont été notées à la station du barrage de Bouhouda en décembre et janvier et aux stations de barrage Al Wahda, barrages Asfalou et barrage Sahla en janvier. Au printemps, des tendances faibles négatives ont été obtenues à la station Bab Ouender en mars et avril, tandis que les stations de Galez en mars, Tabouda en mai et Asfalou en avril ont montré des tendances faibles positives. En été, des tendances faibles négatives ont été observées à la station Ain Aicha en juin, à la station Bab Ouender en août, à la station Galez en juillet et à la station Tabouda en juin. À l'inverse, une tendance faible positive a été observée à la station du barrage de Bouhouda en juin et juillet.

Tableau 19. La tendance du SDI des 8 stations hydrométriques du bassin versant de l'Ouergha à différentes échelles de temps, pour un niveau de signification de 0,05. Les couleurs du tableau indiquent : Bleu : Les scores Z supérieurs ou égaux à 1,96 indiquent une tendance significative dans les données. Vert : Les scores Z compris entre 1,0 et 1,96 indiquent une tendance faible. Gris : les valeurs inférieures à 1,0 indiquent une absence de tendance. + : valeur positive ; - : valeur négative.

Date	Ain Aicha	Bab Ouender	Galez	Tabouda	Al Wahda dam	Asfalou dam	Bouhouda dam	Sahla dam
Octobre	-	-	+	+	+	-	+	+
Novembre	+	-	+	-	+	-	+	+
Décembre	+	-	+	-	+	+	+	+
Janvier	-	-	+	+	+	+	+	+
Février	+	-	+	+	-	+	+	-
Mars	+	-	+	+	+	+	+	+
Avril	-	-	+	-	+	+	+	+
Mai	-	+	+	-	-	+	+	+
Juin	-	-	-	-	-	+	+	-
Juillet	+	-	-	+	-	-	+	-
Août	+	-	-	+	-	-	+	-
Septembre	+	-	-	+	-	-	+	-

3.4. Détection spatiale de la sécheresse

La corrélation entre les indices d'oscillation atmosphérique et les indices de sécheresse a montré les effets importants de la circulation atmosphérique sur la distribution des précipitations dans le bassin versant de l'Ouergha, qui est également liée à la disponibilité des ressources en eau dans les rivières et les barrages. De plus, les calculs du SPI et du SDI ont fourni des résultats plus détaillés sur l'occurrence de la sécheresse en 1992/93, 1994/95, 1998/99, 2004/05, 2006/07 et 2015/16 (Figure 18).

Pour mieux analyser l'occurrence des événements de sécheresse et du stress hydrique dans le bassin versant de l'Ouergha, les modèles spatiaux basés sur le SPI, le SDI, le NDVI et le NDMI sont présentés en classes pour les niveaux de gravité supérieurs à la douce. Les images Landsat ont été utilisées pour visualiser et quantifier l'effet de la sécheresse en calculant le NDVI, qui montre l'évolution de la végétation et l'intensité de l'humidité à l'aide du NDMI.

La figure 21 montre l'occurrence de la sécheresse en 1993. Le niveau de sécheresse le plus élevé était de 23% dans la partie sud du bassin versant. Pour quantifier l'intensité de la

sécheresse dans différentes parties du bassin versant, nous avons utilisé le SDI, qui mesure la gravité de la sécheresse hydrologique. Notre analyse a montré que les valeurs du SDI étaient les plus élevées (environ 49%) dans les parties sud-ouest et est du bassin versant. Cette sécheresse grave a eu un impact significatif sur la densité de la végétation dans le bassin versant, en particulier dans les parties Est et Sud, où elle était faible. Cela peut s'expliquer par le fait que la sécheresse réduit l'humidité du sol et limite la croissance des plantes. De plus, la distribution spatiale de la végétation et du niveau d'humidité dans le bassin de l'Ouergha a montré que 88,31% du bassin avaient un niveau d'humidité de 43%. Ces indices fournissent des preuves supplémentaires de l'impact de la sécheresse sur la densité de la végétation dans le bassin versant.

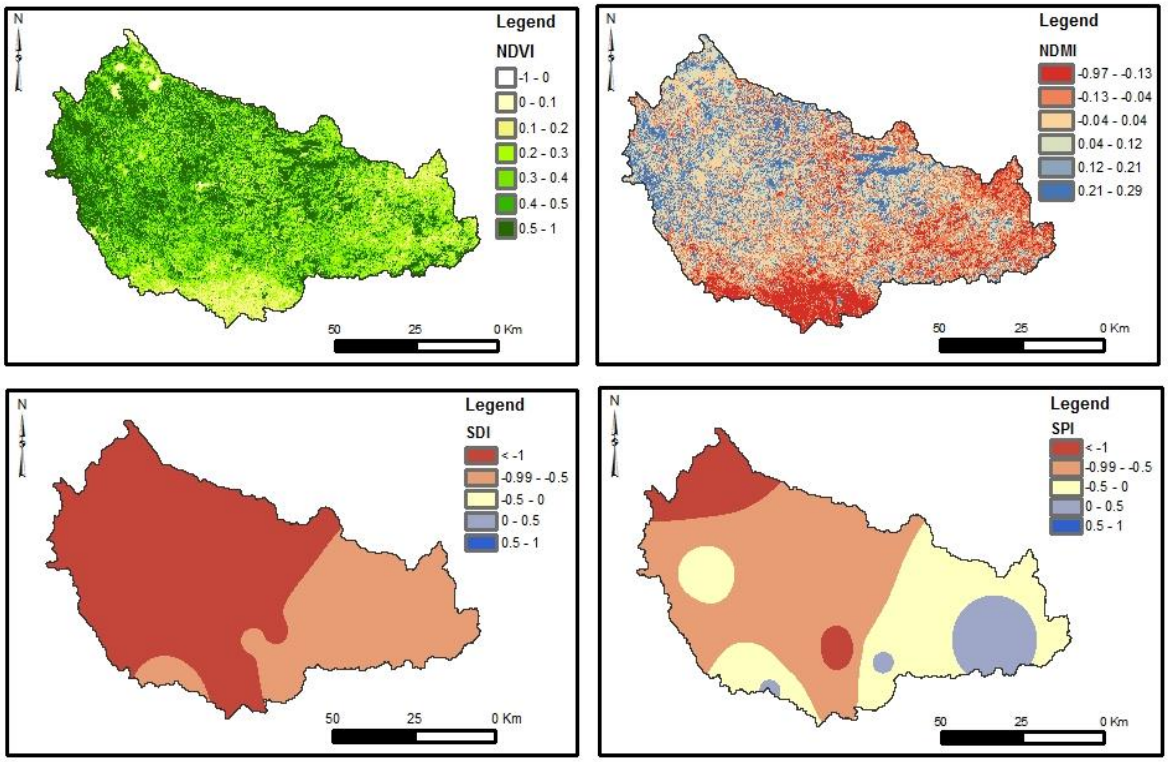


Figure 21. Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 1993

La mise en service du barrage de Sahla, le premier barrage dans le bassin versant de l'Ouergha, en 1994, a coïncidé avec le premier événement de sécheresse extrême en 1994/95 (Figure 22). La partie orientale du bassin a connu une sécheresse légère à modérée selon les valeurs de l'indice SPI, représentant environ 55% de la superficie totale du bassin. Les valeurs de l'indice SDI ont indiqué qu'un déficit hydrique sévère a affecté presque l'ensemble du bassin, avec des pourcentages de surfaces touchées par une sécheresse modérée et sévère d'environ 85% et 6%, respectivement.

Par conséquent, la végétation était plus dense et plus humide dans la partie nord du bassin, qui est une région montagneuse. La partie sud du bassin avait une faible couverture végétale et a connu une sécheresse sévère en 1995, comme le montre la carte NDVI de la Figure 24 ; les indices spatiaux pour le bassin ont montré des niveaux de végétation et d'humidité de 88,81% et 39%, respectivement.

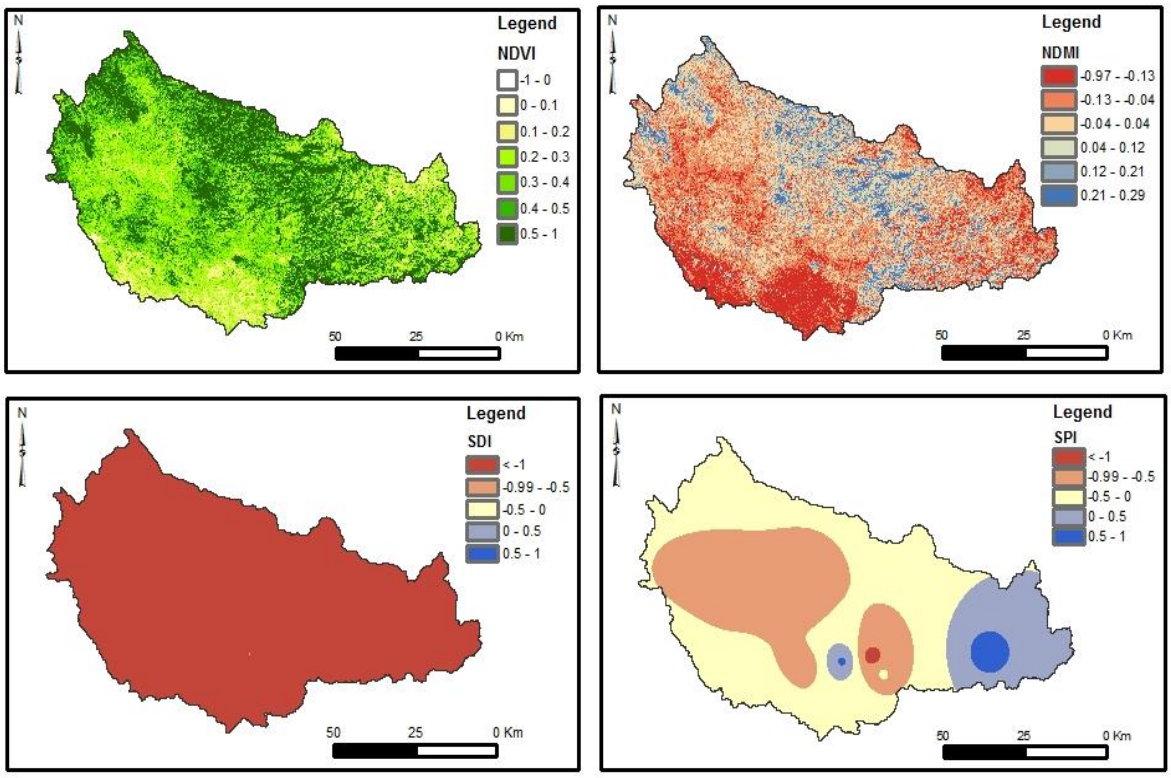


Figure 22. Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 1995

Les barrages Al Wahda (le deuxième plus grand barrage du Maroc), Bouhouda et Asfalou ont été lancés respectivement en 1996, 1998 et 1999. Les barrages ont été construits pour aider à fournir une protection contre l'envasement et un accès continu à l'eau potable, pour favoriser l'irrigation dans les terres agricoles adjacentes et pour faire face aux périodes de sécheresse futures. Cependant, les barrages n'ont pas aidé en 1999 (Figure 23), lorsque la sécheresse météorologique la plus sévère de l'histoire du bassin versant de l'Ouergha a impacté l'hydrologie et la végétation de l'ensemble du bassin. La densité de la végétation a diminué de 61,24%, et le niveau d'humidité a diminué jusqu'à 20,52%.

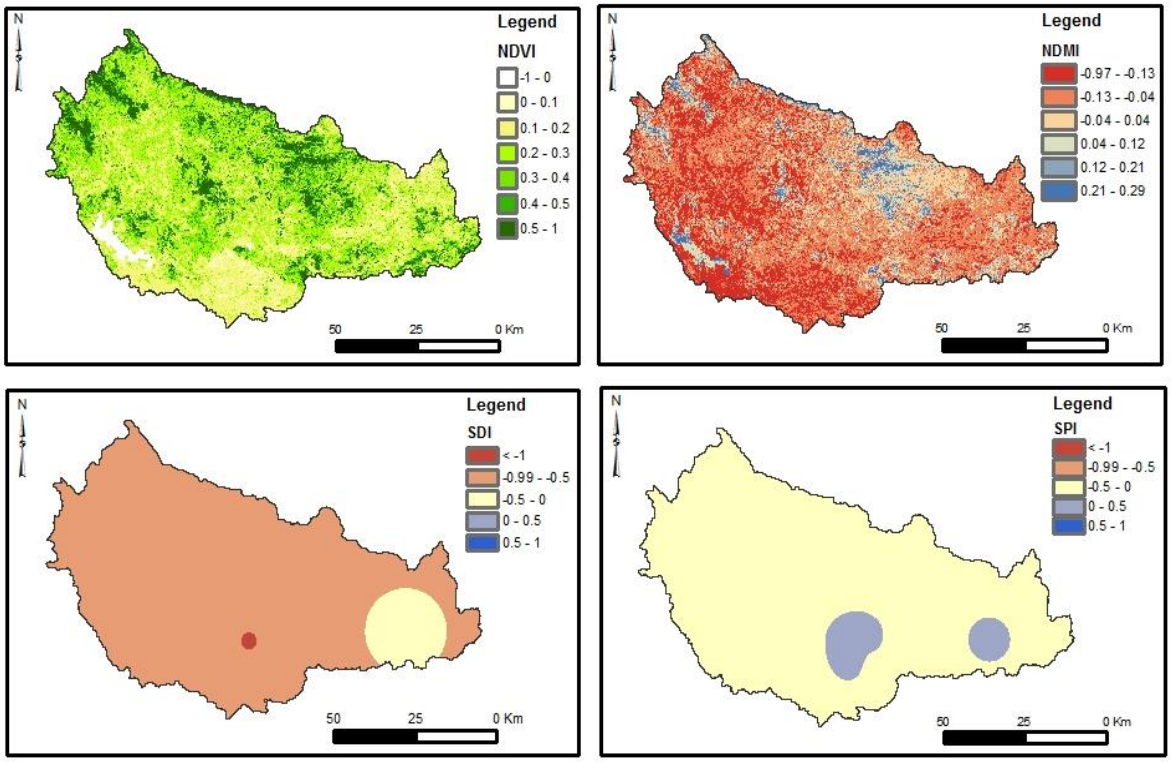


Figure 23. Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 1999

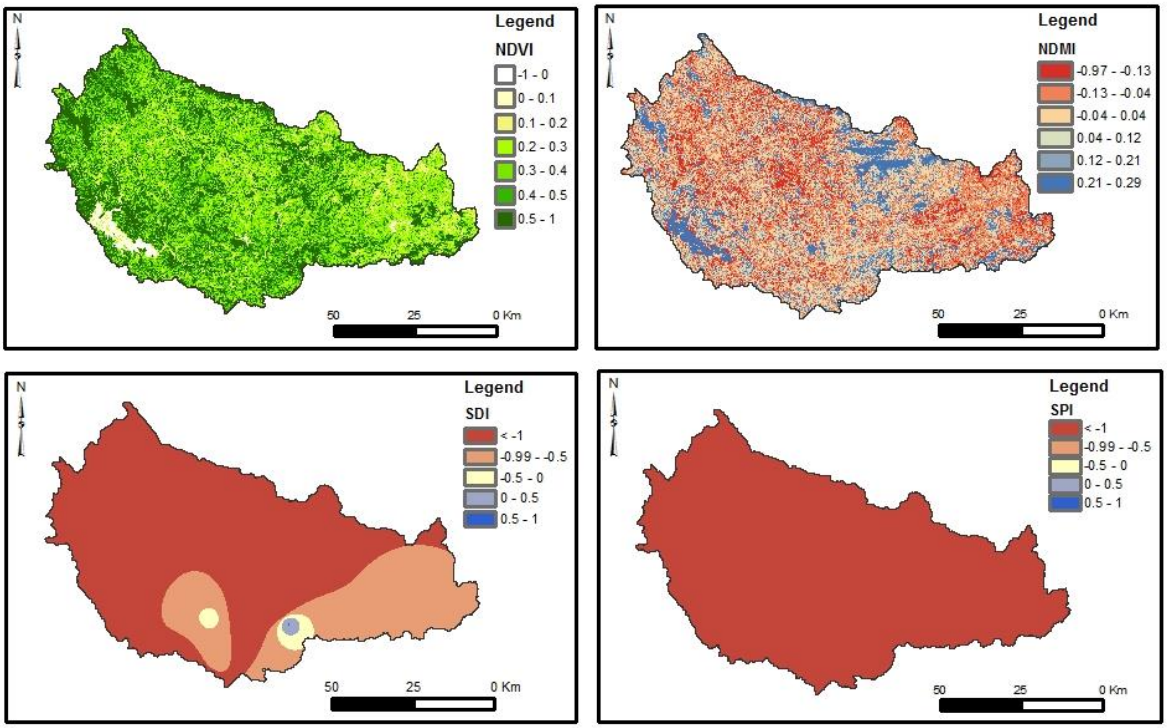


Figure 24. Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 2005

Figure 24 montre que la sécheresse météorologique était modérée à sévère dans environ 94 % et 4 % de la zone de captage, respectivement. Les valeurs de l'indice SDI ont indiqué des événements secs modérés dans l'ensemble de la zone de captage, sauf dans la partie orientale, qui a connu une sécheresse sévère. Néanmoins, la densité de végétation a connu une hausse en 2005 et le NDMI a montré un niveau d'humidité de 46%. La végétation la plus dense se trouvait dans les zones irriguées entourées de barrages.

La distribution spatiale du SPI dans la Figure 25 a indiqué une sécheresse modérée dans 51% de la partie orientale du bassin. De plus, une sécheresse hydrologique a affecté 51% de la zone touchée par une sécheresse modérée dans les parties inférieure et orientale du bassin. Cependant, la sécheresse météorologique et hydrologique n'a pas affecté la densité de végétation (93%) ni les niveaux d'humidité (niveau d'humidité = 68%). Cela pourrait être attribué à la présence de barrages qui fournissent de l'irrigation dans la région. Ces barrages ont joué un rôle dans le maintien de la densité de végétation et des niveaux d'humidité lors de l'événement sec de 2007, et contribuent à la préservation de la densité et de l'humidité de la végétation dans le bassin.

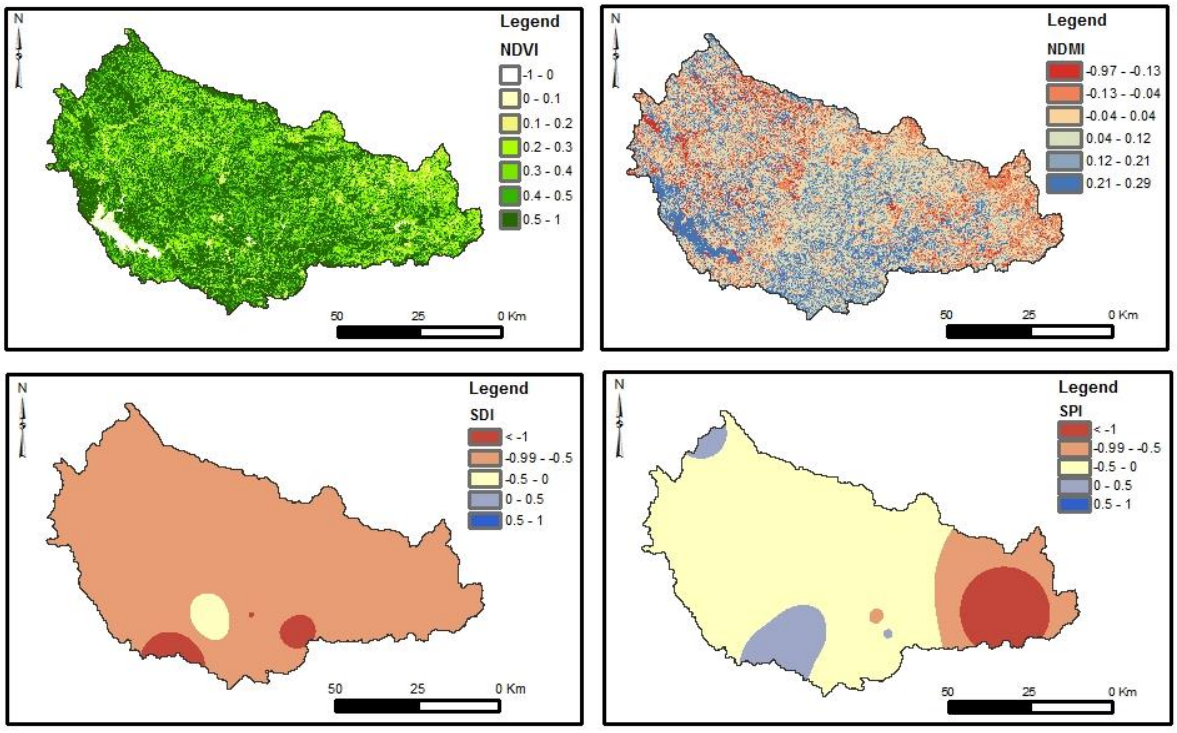


Figure 25. Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 2007

L'événement sec météorologique de 2016 (Figure 26) a été légère dans la partie Sud-Est du bassin versant et la sécheresse hydrologique était légère dans la partie est du bassin. Comparé au dernier événement sec (2007), la densité de végétation et l'humidité ont légèrement diminué, surtout dans la partie inférieure du bassin, avec des niveaux d'humidité et de densité de végétation de 90% et 62%, respectivement.

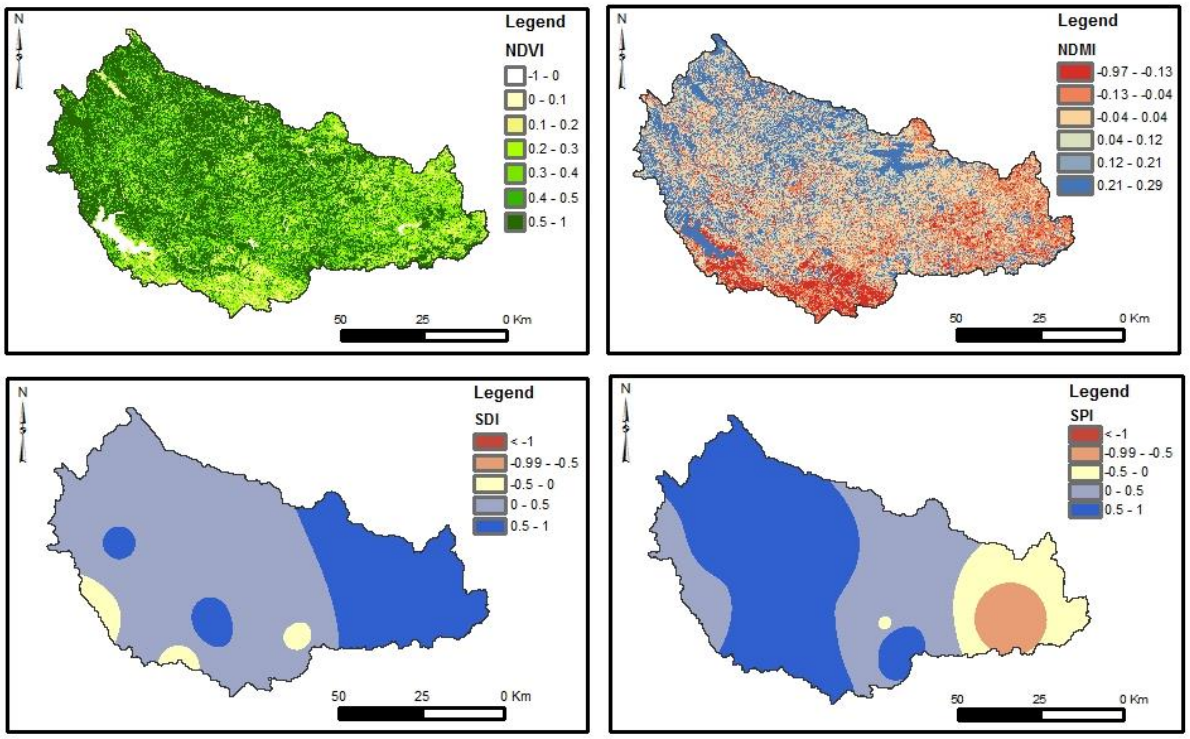


Figure 26. Cartes de distribution spatiale des variables environnementales et des indices de sécheresse en 2016

4. Discussions

Dans cette étude, nous avons examiné la relation entre les oscillations climatiques, les précipitations et la variabilité des débits, en comparant les indices NAO et WeMO des fluctuations climatiques dans le bassin versant de l'Ouergha avec le SPI et le SDI de 1984/85 à 2016/17. Nos résultats montrent que le bassin versant de l'Ouergha a été exposé à des sécheresses météorologiques et hydrologiques d'intensité variable, allant de modérée à sévère, en 1992/93, 1994/95, 1998/99, 2004/05, 2006/07 et 2015/16. L'analyse de la sécheresse a montré que pendant ces événements secs, les précipitations et le débit étaient inférieurs aux valeurs moyennes de 400 mm et 100 m^3/s, respectivement. Les valeurs de SPI montrent que la plus forte valeur de sécheresse pour la période totale de l'étude était de -1,32 en 1998/99. Le SDI a enregistré la plus forte valeur de sécheresse de -1,81 en 1994/95.

Les variations temporelles sont dominées par l'influence des oscillations atmosphériques. La phase positive de NAOi (NAOi+) est caractérisée par des précipitations plus faibles, contrairement à la phase négative (NAOi-) qui exprime des perturbations climatiques en faveur de périodes pluvieuses (Ilmen, 2016). De plus, la phase positive de WeMOi (WeMoi+) se manifeste par une pénurie de précipitations et des précipitations importantes pendant la phase négative (WeMoi-). Les corrélations résultantes entre SPI et NAOi ainsi qu'entre SPI et WeMOi ont une forte corrélation négative. Le consensus général approuve que la NAOi a une influence majeure sur la variabilité du climat au Maroc (Knippertz, et al., 2003; Driouech, 2013; Marchane, et al., 2016; Driouech, et al., 2020). Quant à l'influence de WeMoi sur les précipitations, Zamrane (2018) montre dans son étude que WeMoi a une influence sur la variabilité climatique, mais pas aussi importante que la NAOi.

Dans cette étude, on a constaté que NAOi et WeMoi influencent la variabilité climatique sur le bassin versant d'Ouergha. Cependant, le WeMoi est mieux corrélé que le NAOi avec le SPI calculé à l'échelle du bassin versant de l'Ouergha. Cette corrélation est plus forte sur la période d'octobre à mars, avec une valeur négative de $| r | < -0,60$, sauf pour les mois de juillet et août. De plus, une forte corrélation négative entre SPI et WeMoi peut s'expliquer par le fait que la sécheresse est principalement associée aux modèles du WeMoi. La corrélation entre les indices de sécheresse météorologique (SPI) et hydrologique (SDI) a révélé un lien linéaire fort. Ainsi, les sécheresses météorologique et hydrologique se produisent la même année. Ce résultat concorde avec des études précédentes dans différentes régions (Akbari, et al., 2015; Boudad, et al., 2018; Wei, et al., 2020). Contrairement à l'étude de Tsakiris et Nalbantis (2009), qui a montré un décalage d'un mois (lag 1) entre les indices de sécheresse SPI et SDI. Nous reconnaissons que la sécheresse hydrologique pourrait être liée à de nombreux facteurs tels que la caractérisation physique du bassin versant, la géologie et l'utilisation/occupation des sols (Boudad, et al., 2018). Il est donc impératif de mener des recherches supplémentaires pour élucider les facteurs sous-jacents à la corrélation entre la couverture végétale, les pratiques agricoles et leur influence sur la fonctionnalité du barrage. Cela permettra le développement de stratégies d'adaptation robustes pour atténuer l'impact du changement climatique.

De plus, avec l'accélération du changement climatique, il est fort probable que les barrages existants s'avèrent insuffisants pour répondre à la demande croissante en eau dans la région. Par exemple, des changements dans les schémas de précipitations et de température peuvent entraîner une réduction de la disponibilité de l'eau et une augmentation des taux d'évapotranspiration, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur le volume d'eau stockée et utile

dans le barrage. Bien que nous reconnaissions l'importance d'autres facteurs tels que la caractérisation physique du bassin, la géologie et l'utilisation/occupation des sols, il est essentiel de considérer l'impact potentiel du changement climatique sur l'utilité des barrages. La réponse des stations hydrométéorologiques à la sécheresse a été étudiée à l'aide du test de Mann-Kendall (à un niveau significatif de 0,05) au cours de la période de l'étude. Les résultats ont montré une tendance négative lors des événements de sécheresse, avec une intensité variable d'une station à l'autre. Les stations Les données climatologiques du bassin versant de l'Ouergha (sauf Asfalou, Bab Ouender et Jbel Outka) ont reçu moins de pluie pendant les mois de pluie. Toutes les stations, sauf Bab Ouender, seront probablement exposées à une sécheresse hydrologique à l'avenir. De plus, la sécheresse météorologique et hydrologique a permis de montrer l'impact sur la végétation et le développement agricole dans le bassin versant de l'Ouergha.

La distribution spatiale des indices de sécheresse pendant les événements secs montre une grande influence sur la couverture végétale et l'humidité (NDVI et NDMI) dans le bassin versant. Au cours de la période d'étude, la densité du couvert végétale a diminué de 27% en 1998/99. De plus, l'analyse spatiale du SPI et du SDI a montré que les événements de sécheresse ont principalement affecté les parties Est et Sud du bassin versant, tandis que la partie Ouest était moins vulnérable aux événements secs. Au cours des 10 dernières années, la présence des barrages a soutenu le couvert végétal, en particulier dans les zones irriguées voisines. De plus, la variabilité des précipitations a influencé la densité de la végétation.

Cependant, la régression des précipitations et du débit n'explique pas la diminution du couvert végétale, qui pourrait également être liée aux activités humaines. La couverture végétale est liée aux activités agricoles dans le bassin versant de l'Ouergha et est faible pendant les événements secs. Ainsi, les barrages fournissent suffisamment d'eau pendant les courts événements secs, mais pas pendant les sécheresses annuelles. Par conséquent, des études supplémentaires sont nécessaires dans le bassin versant de l'Ouergha pour explorer la relation entre la couverture végétale, les activités agricoles et leur impact sur le fonctionnement des barrages et pour développer des stratégies efficaces d'adaptation au changement climatique.

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer les tendances et les schémas spatiaux de la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha, au Nord du Maroc. Pour cela, nous avons utilisé diverses sources de données, telles que le NAOi, le WeMOi, le SPI, le SDI, le NDVI et le NDMI de 1984/85 à 2016/17.

Les résultats montrent que le bassin versant de l'Ouergha a connu des sécheresses météorologiques et hydrologiques modérées à sévères à différentes périodes au cours de la période d'étude. Ces sécheresses se caractérisaient par des précipitations et des débits faibles. Le NAOi et le WeMOi ont une influence importante sur la variabilité climatique dans le bassin versant de l'Ouergha, le WeMOi étant plus fortement corrélé avec le SPI, en particulier d'Octobre à Mars. La corrélation entre les indices de sécheresses météorologique (SPI) et hydrologique (SDI) était forte et linéaire. Les résultats du test de Mann-Kendall indiquent une tendance négative pendant les événements secs aux stations hydroclimatiques, avec des niveaux d'intensité variables.

La distribution spatiale des indices de sécheresse a montré que les parties Est et Sud du bassin versant de l'Ouergha étaient plus vulnérables aux événements secs, tandis que la partie Ouest était moins affectée. Cependant, la forte corrélation entre les sécheresses météorologiques et hydrologiques et leur impact négatif sur le couvert végétal montre la nécessité de stratégies efficaces de gestion de la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha.

Malgré la présence de barrages, qui ont contribué à maintenir la couverture végétale, le déclin de celle-ci ne peut être expliqué uniquement par les précipitations et la régression des débits et pourrait également être lié à des activités humaines, telles que les activités agricoles dans le bassin versant de l'Ouergha.

Chapitre 4 : La gestion des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha : Défis et opportunités pour le développement durable

1. Introduction

Au cours du 21ème siècle, des événements climatiques extrêmes récents se sont produits récemment dans des pays ayant des contextes climatiques différents, tels que des inondations désastreuses en Allemagne, en Belgique et en Russie, des pluies torrentielles en Inde et en Chine, des incendies et des vagues de chaleur dépassant 45° aux États-Unis, en Grèce, en Turquie, au Canada et au Maroc. En 2021, le 6ème rapport d'évaluation du GIEC (2021) a souligné dans des scénarios optimistes et pessimistes que le seuil de réchauffement de 1,5 degré sera atteint au début des années 2030, soit dix ans plus tôt que ce qui avait été estimé dans le rapport précédent. De ce fait, il est nécessaire d'établir une évaluation appropriée des formes possibles d'adaptation de nos approches de gestion des ressources en eau aux variations climatiques prévues et avoir une vrai - gouvernance de l'eau (La Jeunesse, et al., 2015).

La gestion des ressources en eau menacées par la pénurie entrave l'évolution des pays développés et des pays en développement dont l'économie repose principalement sur l'agriculture, comme le Maroc. En tant que pays du sud de la Méditerranée, le Maroc a connu de nombreuses périodes de sécheresse prolongées qui ont entraîné une baisse alarmante des ressources en eau et qui devraient être plus extrêmes à l'avenir (Driouech, 2013). Or, le développement économique et social du royaume dépend du secteur agroalimentaire, qui représente 21% du PIB et près de 39% des emplois (World Bank, 2022). En outre, les agriculteurs doivent s'assurer qu'ils disposent d'une ressource hydrique suffisante pour répondre à leurs besoins croissants dus à l'augmentation de la population et à l'amélioration de leurs techniques d'irrigation. L'amélioration des techniques d'irrigation est une solution pour optimiser l'utilisation des ressources en eau plutôt qu'une demande de plus, elle doit être intégrée dans la gouvernance espérée. Toutefois, la gestion des ressources en eau représente une tâche colossale pour les décideurs politiques et les chercheurs, qui doivent adopter une approche globale et coordonner efficacement tous les acteurs concernés.

Plusieurs études ont été menées sur les impacts du changement climatique sur la disponibilité de l'eau au Maroc (Marchane, et al., 2016; Lachgar, et al., 2021; Mahdaoui, et al., 2023). Certaines études se concentrent généralement sur les modèles climatiques qui sont ensuite utilisés pour générer des modèles hydrologiques afin de simuler les effets du changement climatique sur les réserves en eau. Tandis que d'autres études se sont concentrées sur l'étude de planification des usages de l'eau en se concentrant sur la politique de gestion et son application. Par exemple, Tanouti (2017) considère que la gestion de l'eau sous plusieurs

institutions comme " Mille-feuille " est plus difficile car les institutions qui la composent sont souvent animées par des enjeux et des objectifs contradictoires. En outre, plusieurs rapports sur la gestion de l'eau affirment qu'il existe plusieurs vulnérabilités dans la gestion de l'eau au Maroc, telles que l'absence d'une politique cohérente, des lacunes financières et techniques (Kadiri, et al., 2008; CESE, 2014; Akhmouch, et al., 2017; Tanouti, 2017). En conséquence, il est nécessaire d'établir une évaluation appropriée des formes possibles d'adaptation de nos approches de gestion des ressources en eau aux variations climatiques prévues, notamment en matière de gouvernance (La Jeunesse, et al., 2015).

Le consensus général admet que le problème de la crise mondiale de l'eau est principalement basé sur la gouvernance et que le problème va au-delà des questions techniques et matérielles (Akhmouch, et al., 2017; Tanouti, 2017; Nabiafjadi, et al., 2021). Les pratiques de gestion de l'eau sont difficiles à définir dans les institutions hiérarchiques en perpétuelle évolution. En effet, une tension sur la ressource entraîne généralement des conflits d'usage qui nécessitent une régulation par une gouvernance efficace (La Jeunesse, et al., 2016). Parmi les secteurs désormais identifiés comme prioritaires et vulnérables au changement climatique dans cette région, figurent l'agriculture, la distribution de l'eau d'irrigation et l'accès à l'eau potable.

A ce titre, le ministère délégué auprès du ministre de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, chargé de l'environnement, a réalisé en 2014 un diagnostic de la politique effective en matière de changement climatique au Royaume du Maroc (DEMEMEE, 2014). Le Maroc, étant situé dans la zone méditerranéenne, est particulièrement vulnérable au changement climatique. En effet, cela peut se traduire par des événements météorologiques extrêmes tels que des sécheresses prolongées ou des inondations, mais aussi par des perturbations socio-économiques et politiques.

Le bassin versant de l'Ouergha, est une région vitale en termes de ressources en eau pour le bassin de Sebou. Le bassin versant de l'Ouergha est un site d'étude précieux car il contribue largement à l'échelle nationale et locale à la production de divers produits agricoles essentiels et au développement économique, en assurant une main-d'œuvre importante dans les zones rurales (Tableau 8). Cependant, cette production agricole est fortement tributaire de l'approvisionnement en eau des barrages, particulièrement en période de sécheresse (Mounir, et al., 2023). Par conséquent, l'étude de la gestion de l'eau en milieu rural est considérée comme un concept clé pour examiner les différentes approches des acteurs et des institutions impliqués

dans le bassin versant de l'Ouergha. Cette approche relie différentes perceptions dans les sections socio-économiques, politiques, environnementales et techniques.

L'objectif principal de cette étude est d'approfondir notre compréhension de la gestion de l'eau dans le bassin versant de l'Ouergha, une région cruciale pour l'approvisionnement en eau pour le Maroc. Notre démarche se distingue par sa nature transdisciplinaire, combinant une analyse approfondie de la littérature existante avec des entretiens auprès d'acteurs locaux, notamment le chef de la division évaluation et planification des ressources en eau à la ABHS et le responsable des périmètres irrigués à la Direction Provinciale de l'Agriculture (DPA) de Taounate. Cette approche qualitative apporte un éclairage à la compréhension des problèmes de gestion de l'eau dans la région. En intégrant des données provenant de diverses sources, à savoir des articles scientifiques, des rapports officiels et des entretiens sur le terrain, notre étude offre une tentative d'approche holistique de la gestion de l'eau dans le bassin de l'Ouergha. Nous cherchons à identifier les atouts et les faiblesses de la gestion de l'eau au niveau des périmètres irrigués du bassin de l'Ouergha pour surmonter les défis auxquels cette région est confrontée dans le contexte de changement climatique. En mettant en lumière les problèmes de gouvernance, les enjeux socio-économiques et les préoccupations environnementales liés à la gestion de l'eau, nous visons à contribuer à identifier des leviers pour l'amélioration de la gestion de cette ressource vitale pour le développement économique et social du Maroc.

2. Contexte et analyse de l'étude

2.1. Données

Dans le cadre de cette étude, une revue bibliographique a été menée pour identifier les méthodes de gestion de l'eau dans le bassin versant de l'Ouergha. Les sites web du Ministère marocain de la Logistique et de l'Equipement du Transport Maritime, du Ministère marocain de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts, de l'Agence du Bassin Hydrographique du Sebou et de l'Office Régional de Développement du Gharb ont été consultés afin de recueillir des documents nationaux, régionaux et locaux pertinents.

Des enquêtes ont d'abord été menées auprès des agriculteurs. Ensuite, des entretiens ont été réalisés avec des acteurs locaux afin de valider les informations recueillies lors de la recherche bibliographique et des entretiens avec les agriculteurs sur leurs pratiques agricoles liées à l'eau dans le bassin versant de l'Ouergha, en particulier dans les zones irriguées situées à proximité des barrages existants (Tableau 20).

Ces enquêtes et entretiens ont permis de comprendre les pratiques formelles, stratégiques et discursives en matière de gestion de l'eau d'irrigation. Les objectifs de ces entretiens étaient de collecter des informations sur la gestion de l'eau dans le bassin versant de l'Ouergha, d'identifier les institutions impliquées dans la gestion de l'eau, de recueillir des données sur la participation des petits et grands agriculteurs à la gestion de l'eau d'irrigation, d'identifier la source d'irrigation de l'eau et d'évaluer l'allocation de l'eau et le recouvrement des coûts dans le bassin versant de l'Ouergha. Les questions des enquêtes destinées aux agriculteurs ont été regroupées dans le Tableau de l'Annexe 2.

Tableau 20. Caractéristiques des barrages de l'Ouergha (ABHS, 2018)

	Barrages existants			
Nom du barrage	Asfalou	Bouhouda	Sahla	Al Wahda
Capacité normale (Mm^3)	317	55.5	62	3714
Note de maintien normal (mNGM)	745	382	372	166
Volume non mobile (Mm^3)	13	8.5	10	1300
Cote de la fiche de la machine (m NGM)	680	360	350	140
Volume utilisable (Mm^3)	304	47	52	2414
Capacité maximale de réapprovisionnement (m^3/s)	34.4	20	16	0

2.2. Méthodes

La méthodologie utilisée dans cette étude a débuté par une étude approfondie de la littérature sur le rôle et la gestion du secteur de l'eau au niveau national, régional et provincial au Maroc. Les résultats de cette analyse ont permis de réaliser une enquête auprès de plus de 50 agriculteurs. Le questionnaire destiné aux agriculteurs est composé de 31 questions divisées en informations personnelles de l'agriculteur enquêté, identification de l'exploitation, système d'irrigation, et système de gestion de l'irrigation. Ensuite, un entretien a été mené avec le chef de la division évaluation et planification des ressources en eau à la ABHS, en se concentrant sur la gestion de l'eau des barrages. Enfin, un entretien a été mené à distance avec le responsable des périmètres irrigués à la Direction Provinciale de l'Agriculture (DPA) de Taounate.

La base de données collectée a permis de montrer le réseau actuel du système de gestion de l'eau d'irrigation du bassin versant de l'Ouergha. De plus, la matrice de gestion adoptée a été démontrée dans les études de Sarkki (2017) et Delgado (2021). Elle est basée sur quatre structures et processus de gouvernance de l'eau pour construire une vue externe détaillée de

l'approche multi-niveaux appropriée de la gestion de l'eau d'irrigation dans le bassin versant de l'Ouergha.

3. Résultats

3.1. Gouvernance et implication des institutions à la gestion de l'eau

La ressource en eau au Maroc a été considérée comme un outil de développement du Maroc et n'a jamais été envisagée comme un secteur principal (Tanouti, 2017). Cependant, la politique agricole a pris une grande importance depuis la période postindépendance, avec notamment l'essor de l'hydraulique agricole, où les investissements publics dans l'irrigation ont représenté plus de 40% du budget prévisionnel de construction des barrages. Ainsi, la construction de grands ouvrages est largement privilégiée, pour que la ressource stockée soit utilisée principalement pour l'agriculture, l'accès à eau potable et l'industrie.

La période 1960-1972 a connu la manifestation de la politique de développement socio-économique basée sur la modernisation de l'agriculture par l'introduction de l'agriculture irriguée (plan quinquennal, triennal, etc.). Cette période a vu la naissance de la politique des barrages, qui a permis d'augmenter le rendement de la production agricole dans de nombreuses régions du royaume. L'État s'est engagé dans de nouvelles réformes pour améliorer le secteur agricole, en considérant l'eau comme une ressource indispensable et limitée en période de sécheresse. C'est ainsi que fut promulguée la loi 10-95 sur l'eau, considérée comme une politique stratégique de gestion de l'eau au Maroc par bassins versants en intégrant la participation des usagers. Chaque dissociation du secteur de l'eau du Ministère de l'équipement était pour des raisons politiques, car le gouvernement voulait donner une inflexion à la politique de l'eau qui était basée sur l'offre (Tanouti, 2017).

La loi 10-95 au Maroc, énonce les principes fondamentaux de la gestion des ressources en eau dans le pays. Cette loi met l'accent sur la nécessité d'une gestion intégrée, planifiée, décentralisée, concertée et participative des ressources en eau, ainsi que sur les principes de "collecteur-payeur" et "pollueur-payeur" pour la gestion de l'eau. De plus, cette loi souligne l'importance de l'exploitation durable des ressources en eau et de la protection contre la pollution et la surexploitation. Malgré cela, l'eau au Maroc n'est devenue indépendante de l'irrigation et de l'environnement qu'en 2012, sous l'égide d'un secrétariat d'État chargé de l'eau au sein du ministère du développement territorial, de l'eau et de l'environnement. Depuis 2019, l'eau est reconnue comme un secteur stratégique et est rattachée au ministère de l'Agriculture, de la Pêche maritime, du Développement rural, des Eaux et Forêts sous la direction de

l'Irrigation et du Développement agricole, également rattachée au ministère de l'Equipement, des Transports, de la Logistique et de l'Eau. (Tableau 21).

Tableau 21. Chronologie institutionnelle des secteurs de l'eau au Maroc (Tanouti, 2017 modifié)

Période	Dénomination du Ministère de tutelle de l'eau	Direction
1969	Ministère des travaux publics	Administration de l'hydraulique
	Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire	Direction de mise en valeur
1992	Ministère des travaux publics de la formation professionnelle et de la formation des cadres	Administration de l'hydraulique
	Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire	Direction d'équipement rural
1995	Ministère des travaux publics	Direction générale de l'hydraulique
	Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole	Administration du génie rural
1997	Ministère de l'agriculture de l'équipement et de l'environnement	Direction générale de l'hydraulique Administration du génie rural / Ministère de l'environnement
1998	Equipement	Direction générale de l'hydraulique
	Ministère de l'agriculture du développement rural et de la pêche	Administration du génie rural
2002	Ministère de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement	Direction générale de l'hydraulique Ministère de l'environnement
	Ministère de l'agriculture du développement rural et de la pêche Maritime	Administration du génie rural
2007	Ministère des mines de l'énergie de l'eau et de l'environnement	Secrétariat d'Etat chargé de l'eau et de l'environnement.
	Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime	Direction de l'irrigation et de l'aménagement de l'espace agricole.
2012	Ministère des mines de l'énergie de l'eau et de l'environnement	Secrétariat d'Etat chargé de l'eau Secrétariat d'Etat chargé de l'environnement
	Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime	Direction de l'irrigation et de l'aménagement de l'espace agricole.
2017	Ministre de l'équipement, du Transport, de la Logistique et de l'eau	Secrétariat d'Etat chargé de l'eau
	Ministre de l'agriculture, de la pêche maritime, du développement rural et des eaux et forêts	Direction de l'irrigation et de l'aménagement de l'espace agricole.
	Ministre de l'Energie, des Mines et du Développement durable	Secrétariat d'Etat chargé du Développement durable
2019	Ministère de l'Agriculture, de la pêche maritime, du développement rural et des eaux et forêts	La Direction de l'irrigation et de l'aménagement de l'espace agricole
	Ministère de l'Equipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau	Secteur de l'eau

L'histoire de la politique de l'eau au Maroc montre que le secteur de l'eau est crucial pour le développement territorial, l'agriculture, les mines et l'énergie. C'est pourquoi il est difficile de trouver la bonne formule adaptée à la réalité et à la complexité des relations entre le secteur de l'eau et les autres secteurs. Depuis la période du protectorat, le Maroc a fait de l'eau un outil stratégique de développement économique en adoptant de nombreux plans pour le développement agricole, tels que le Plan Maroc Vert, Génération-Green, etc (Figure 27).

La gestion de l'eau au Maroc est complexe car de nombreuses institutions et gestionnaires privés et publics sont impliqués dans le secteur domestique, industriel et agricole. Cependant, cette implication risque de masquer la diversité réelle des usages tels que l'industrie, l'agriculture, l'énergie, etc., ce qui est souvent à l'origine des problèmes de gestion et de préoccupation de la ressource (Calvo-Mendieta, 2008).

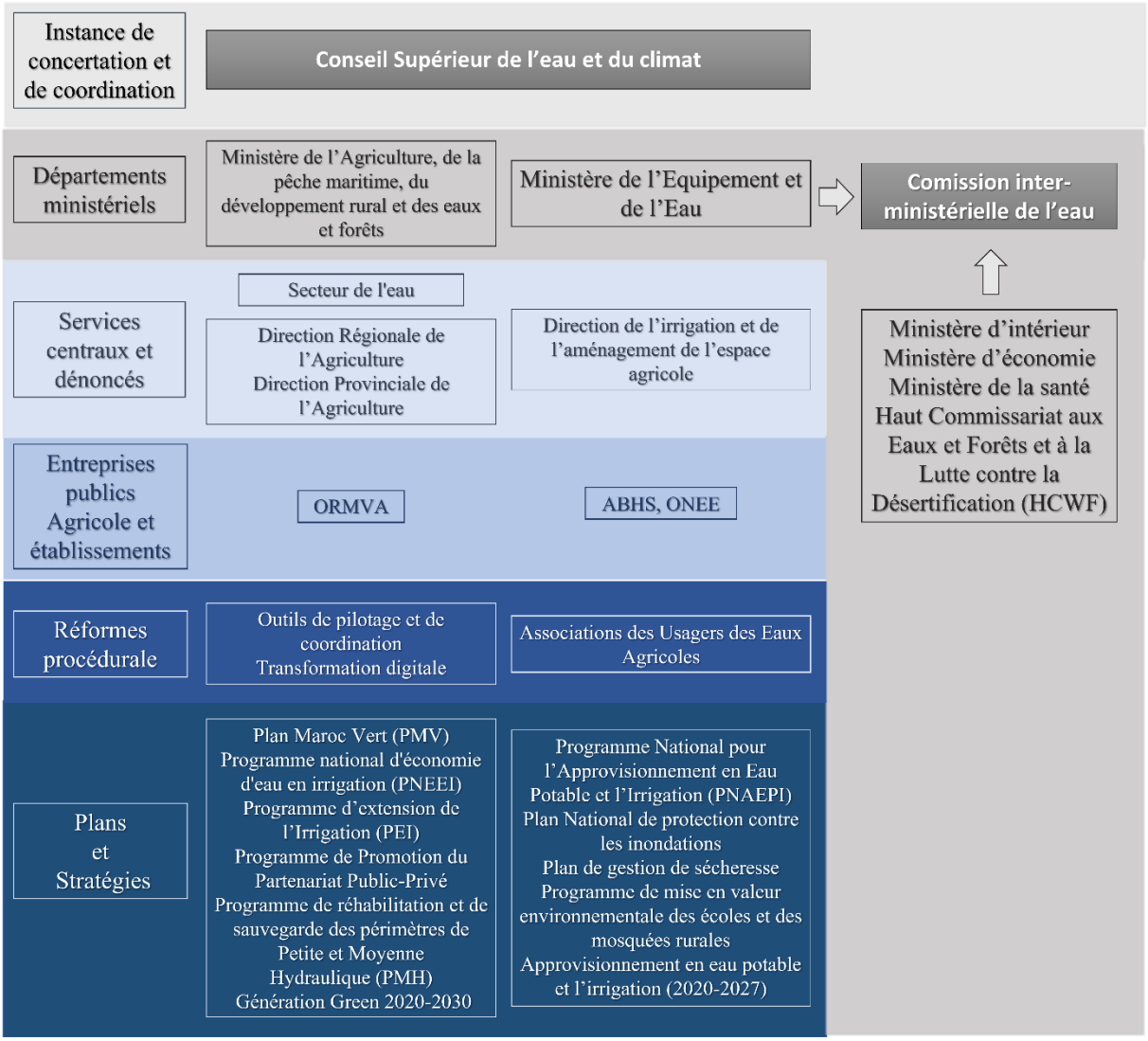


Figure 27. Organisation du secteur de l'eau au Maroc

Sarkki (2017) a proposé que la gouvernance de l'eau peut suivre quatre structures : hiérarchique, technocratique, stratégique et collaborative. Ces structures peuvent s'appliquer aux niveaux national, régional et provincial. Au Maroc, la structure hiérarchique liée à la gestion de l'eau est gérée par les ministères et elle est réglementée par deux lois (loi n°19-95 et loi n°36-15). La structure technocratique vise à généraliser les techniques d'irrigation économes en eau. La structure stratégique se concentre sur la construction de barrages et la mise en place de nouvelles techniques d'irrigation pour les terres agricoles. La structure collaborative est utilisée principalement dans les zones rurales et dépend de la mise en œuvre de la structure stratégique (Figure 27, Tableau 22).

Au Maroc, la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant diffère d'un bassin à l'autre en raison de sa situation géographique, de sa nature géologique, de son développement socio-économique, de l'avancement des projets financés, notamment dans les zones rurales. En outre, la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant de l'Ouergha ne se limite pas uniquement à l'irrigation. En effet, d'autres secteurs tels que l'approvisionnement en eau potable, l'industrie, l'énergie et l'environnement jouent également un rôle important dans la gestion de l'eau.

Le bassin versant de l'Ouergha est géré par l'ABHS, qui assure une gestion intégrée et participative basée sur les orientations de la loi 36-15 sur l'eau. Dans ce contexte, le comité de gestion se réunit au moins deux fois par an selon les besoins pour adopter les allocations de l'année en cours sur la base des demandes exprimées par les différents secteurs, des réserves des barrages et des directives de gestion des barrages (ABHS, 2018).

Dans les zones rurales, les Associations d'utilisateurs d'eau agricole (AUEA) sont responsables de l'approvisionnement en eau d'irrigation, leur objectif est la sécurisation et l'augmentation de la production agricole, l'exploitation des ressources en eau par l'équipement des parcelles en technique d'irrigation localisée plus efficace, l'amélioration de la rotation des cultures par l'intensification de la production végétale et animale et l'amélioration des revenus des agriculteurs.

Tableau 22. Matrice des instruments de gouvernance de l'irrigation de l'eau du Bassin versant de l'Ouergha

S : Structures P : Processus	**Gouvernance hiérarchique**	**Gouvernance technocratique**	**Gouvernance collaborative**	**Gouvernance stratégique**
Politique	S : Code de l'eau 10-95 & 36-15. P : Géré par les départements ministériels	S : programmes de protection des ressources en eau, de généralisation des techniques d'irrigation économes en eau et de valorisation des eaux agricoles. P : Subventions pour le matériel d'irrigation	S : Programmes de coopération nationaux et internationaux. P : Subventions pour la mise en place des infrastructures nécessaires.	S : Programme d'installation de barrages. Stratégies de développement rural. P : Dans les zones rurales
Marché	S : Allocation d'eau. P : Marché de l'eau.	Non trouvé	S : Allocation. P : l'accord du comité de gestion du bassin.	S : l'accord du comité de gestion du bassin P : Discussions sur les allocations.
Société civile	Non trouvé	Non trouvé	S : le comité de l'AUEA. P : Auto-organisation de l'approvisionnement en eau d'irrigation	S : La réunion des membres de l'AUEA. P : Distribution d'eau d'irrigation.
Science et production de connaissances	S : Institutions descendantes des départements ministériels et des ministères. P : Le site Web	S : Institutions descendantes des départements ministériels et des ministères. P : Le site Web	Non trouvé	Non trouvé

3.2. Gestion de l’irrigation et des ressources en eau

L'analyse de la gestion de l'eau s'est concentrée sur les zones rurales voisines des barrages existants dans le bassin versant de l’Ouergha. Les micro-agriculteurs disposant de parcelles de moins de 5 hectares représentent une grande proportion des exploitants agricoles dans cette région. Les agriculteurs dépendent principalement des précipitations pour leur production, mais ils utilisent également des techniques d'irrigation traditionnelles et modernes pendant les périodes de sécheresse prolongée. L'irrigation traditionnelle est effectuée via des canaux principaux reliés à des canaux secondaires, qui irriguent ensuite les champs individuels.

Depuis 2011, le Fonds de développement agricole (FDA) a accordé des subventions pour la mise en place d'infrastructures et d'équipements d'irrigation aux petits et grands agriculteurs de la zone d'étude. Cela a contribué à la préservation de la ressource en eau et à l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation en favorisant l'utilisation de l'irrigation localisée. Les subventions du FDA sont de 80% pour les agriculteurs dont la surface agricole dépasse 5 hectares et de 100% pour ceux de moins de 5 hectares (MAPMDREF, 2011). Les agriculteurs ont pu choisir la technique d'irrigation la plus adaptée à leurs besoins.

Les résultats montrent que les agriculteurs ayant adopté de nouvelles techniques ont obtenu une bonne qualité de rendement agricole et une meilleure gestion de l'eau. Cependant, certains agriculteurs préfèrent encore utiliser leurs anciennes techniques traditionnelles malgré les systèmes d'irrigation modernes disponibles. (El malki, 2021). Par ailleurs, le secteur de l'irrigation dans le bassin versant de l’Ouergha fait face à de nombreux défis en raison de la situation de développement de la région. Les agriculteurs, qu'ils soient petits ou grands exploitants, ont signalé plusieurs problèmes techniques avec les canaux d'irrigation lors des entretiens. Parmi ces problèmes, les fuites au niveau des tuyaux dues à des coupures d'eau imprévues.

Dans les périmètres irrigués de Sahla, les agriculteurs ont accès à l'eau trois jours consécutifs par semaine. Cependant, certains d'entre eux ont du mal à obtenir de l'eau car leurs terres sont éloignées des canaux principaux et secondaires. Ces problèmes créent des conflits et une perte de confiance entre les agriculteurs et les acteurs locaux, et peuvent conduire à l'abandon de terres agricoles. Bien que l’Association d'Usagers de l'Eau Agricole (AUEA) soit responsable de ces problèmes, ils sont gérés par la Direction provinciale de l'agriculture (DPA) (Figure 28).

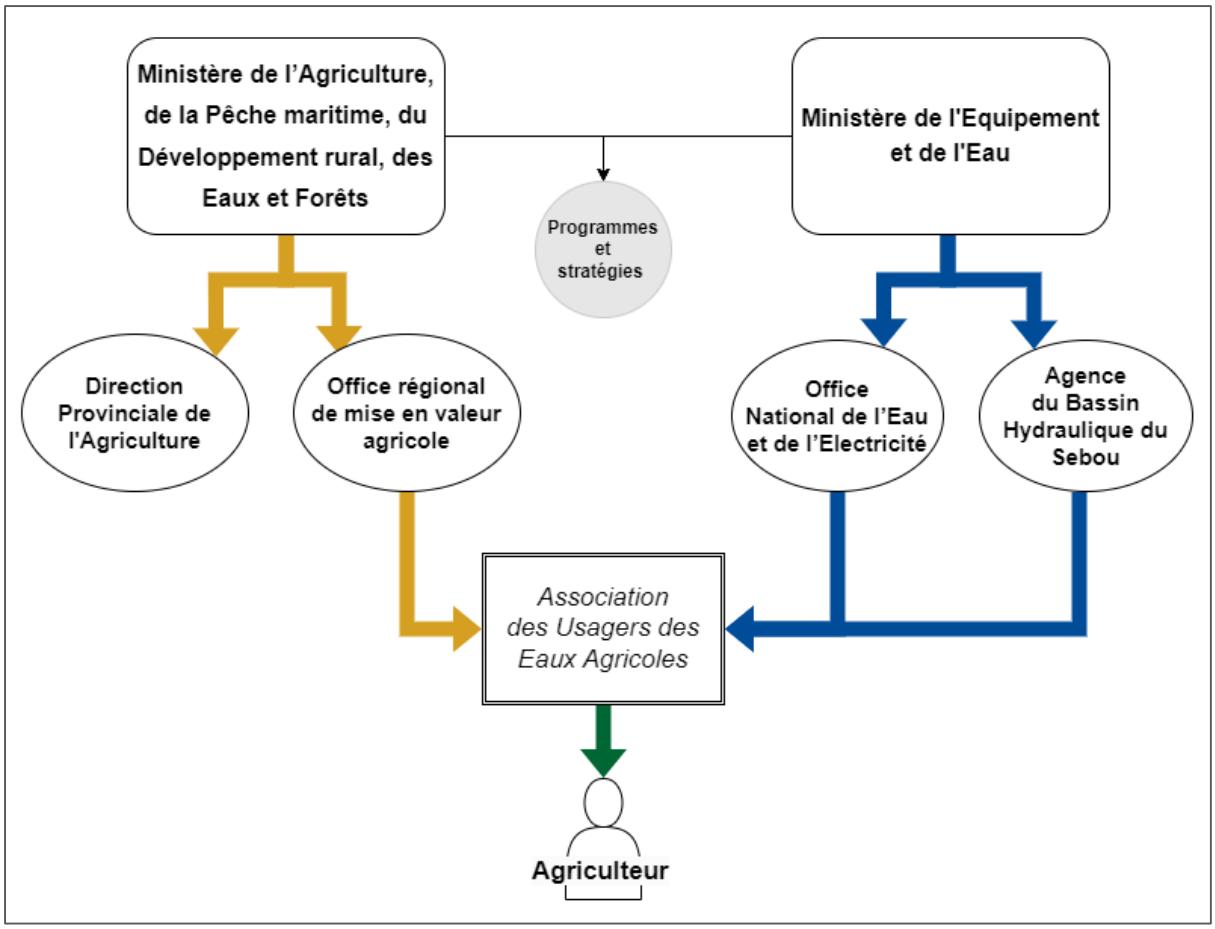


Figure 28. Acteurs et instituts impliqués dans le système d'irrigation de l'eau dans le bassin versant d'Ouergha

Les entretiens avec les agriculteurs et le responsable des périmètres irrigués du DPA de Taounate ont confirmé que des problèmes de gestion de l'eau d'irrigation existent au niveau de l'AUEA. Certains membres de l'AUEA du périmètre irrigué de Sahla assistent régulièrement aux réunions, tandis que d'autres agriculteurs expriment leur intérêt à y participer à condition que les problèmes de gestion soient résolus. Cependant, les problèmes d'administration interne empêchent l'AUEA d'atteindre ses objectifs, tels que le non-renouvellement des bureaux exécutifs et la non-réalisation des plans de distribution d'eau d'irrigation. Cela a également un impact sur la contribution des membres. Le DPA s'efforce de gérer efficacement les périmètres d'irrigation de Bouhouda afin de garantir une gestion efficace de l'eau pour les agriculteurs et les AUEA.

Les eaux stockées dans les barrages ne sont pas toujours utilisées pour l'approvisionnement en eau, mais une partie non négligeable de perte d'eau pouvant être liée à de nombreux facteurs tels que l'évaporation et les fuites en eau des réseaux d'irrigation. En

effet, le manque de gestion de l'approvisionnement en eau, caractérisé par des bassins remplis et inexploités, des terres non irriguées et de longues procédures administratives et techniques, pousse l'agriculteur à se procurer lui-même l'eau sans accord des gestionnaires de l'eau.

3.3. Application de la répartition et de la tarification de l'eau d'irrigation

En 1977, une étude nationale a été menée au Maroc pour étudier la tarification de l'eau en milieu urbain. Pendant de nombreuses années, les prix de l'eau étaient les mêmes dans différents secteurs et régions, car la politique de limitation de la consommation d'eau n'était pas aussi forte qu'aujourd'hui, ce qui a entraîné une détérioration financière de nombreux secteurs (Serghini, 2003). Après l'introduction de la nouvelle loi sur l'eau en 1995, la gestion de l'eau a été réorientée vers une forme plus décentralisée afin d'augmenter l'efficacité de sa gestion et de promouvoir des processus participatifs dans différents secteurs tels que l'agriculture (FAO, 2005; Gosselin, 2010).

La loi 10-95 intègre la tarification de l'eau d'irrigation avec le principe "collecteur-payeur" pour sensibiliser aux futurs problèmes de pénurie d'eau. Elle s'applique au Code des investissements agricoles, dont le Dahir 1-69-25 forme le code des investissements agricoles et le décret 2-69-37 définit les termes du contrat entre l'État et les usagers pour la distribution et l'utilisation de l'eau dans les périmètres d'irrigation. L'État est chargé de l'équipement et de l'entretien des périmètres, mais les agriculteurs de plus de 5 hectares doivent contribuer aux coûts par une participation directe en dirhams par hectare et une redevance annuelle régulière en dirhams par m^3 pour les frais de pompage et les coûts de fonctionnement et d'entretien du réseau d'irrigation externe (MAPMDREF, 2011).

L'État a adopté une logique intelligente pour encourager une meilleure gestion de l'eau en fixant un coût élevé qui incite à économiser l'eau et à en assurer une meilleure répartition entre les différents usages. Les décisions adoptées garantissent également les coûts de production et de renouvellement des ouvrages hydrauliques. Les subventions pour l'équipement et l'infrastructure aident les opérateurs à gérer les ressources en eau et à en prendre conscience de sa rareté. L'État prend en charge une grande partie des coûts liés aux barrages qui alimentent les grandes zones irriguées, avec une tarification qui varie entre 0,22 et 0,67 dirham par m^3 (HCP, 2008). En outre, Tenneson (2003) a estimé le coût total de l'eau agricole en intégrant le coût des barrages, où la tarification de l'eau d'irrigation serait donc comprise entre 2,71 et 6,95 dirhams par m^3.

Dans certaines zones du bassin versant de l'Ouergha, la tarification de l'eau d'irrigation n'est pas appliquée aux agriculteurs due à la gestion de l'allocation d'eau. Les agriculteurs reconnaissent ne pas payer l'eau d'irrigation qui leur est allouée, car ils ne reçoivent pas de facture et ne connaissent pas l'administration chargée de la tarification. Toutefois, il convient de souligner que la tarification de l'eau d'irrigation est en vigueur à l'échelle nationale.

4. Discussion et conclusions

L'étude actuelle décrit l'histoire de l'eau depuis son statut d'outil jusqu'à sa naissance en tant que secteur principal de l'État marocain. Nous avons également analysé la gouvernance de l'eau sous différents angles (Tableau 22). La matrice d'instruments adoptée concernant l'irrigation dans le bassin étudié montre qu'au niveau politique, l'État marocain veille à adopter les bonnes décisions et renouvelle ses réformes dans le secteur de l'eau sur la base de rapports nationaux et mondiaux. Au niveau administratif, la gestion de l'eau est hiérarchisée et repose sur le secteur de l'eau potable et de l'irrigation qui est lié aux institutions agricoles. Ainsi, les décisions formelles sont interrompues par l'application de stratégies de gestion de l'eau.

Cependant, l'analyse de la gestion au niveau du bassin versant de l'Ouergha souffre encore de difficultés dues à des problèmes économiques, techniques et sociaux. Par conséquent, cela crée un manque de communication entre les gestionnaires de l'eau au niveau des périmètres irrigués (DPA, AUEA) et passe par la coopération des consommateurs (agriculteurs). La réalité représente un faible pourcentage de ce qui a été envisagé, ce qui peut être causé par la complexité de gestion entre les institutions qui gèrent officiellement le secteur de l'eau au niveau national et celles responsables de l'application à l'échelle locale. La distribution physique de l'eau et le fonctionnement des structures techniques, qui auraient dû être effectués officiellement par l'AUEA, sont en fait gérés par la DPA. A noté qu'après 10 ans de la mise en service des AUEA dans les périmètres d'irrigation de Sahla, les objectifs prévus pour une bonne gestion des eaux d'irrigation n'ont pas été atteints à ce jour.

Contrairement à d'autres AUEA à l'échelle nationale, par exemple, dans le Moyen Sebou, les AUEA et leurs fédérations ont aidé les agriculteurs à augmenter leur productivité et leurs revenus en étant un bon interlocuteur pour l'eau d'irrigation, et non pour le développement agricole (Kadiri, et al., 2008). De même, les ressources en eau du bassin du Tensift (région de Marrakech) subissent une forte pression en termes de gestion de l'eau, dont le bassin versant consomme 103% de sa ressource (Tanouti, et al., 2013). Malgré cela, les AUEAs des périmètres irrigués du bassin de Tensift sont actives et la gestion au niveau de ses périmètres est bonne en

termes d'approvisionnement en eau d'irrigation, et de possession d'infrastructures. En comparant ces différentes associations, nous pouvons approuver que le rôle principal des AUEA dans le bassin versant de l'Ouergha, est en phase initiale de son fonctionnement, et est confrontée à de nombreux défis tels que la gestion des conflits au niveau de l'association, du non-renouvellement des bureaux exécutifs ces dernières années, de la non-élaboration des plans d'allocation d'eau d'irrigation et de la non-contribution des membres en raison du manque de confiance en l'AUEA. Bien que les décisions mettent des années à être appliquées sur le terrain, l'agriculteur souffre de l'incapacité à s'adapter et/ou à accepter le changement de ses pratiques, ainsi que de l'augmentation des charges qui poussent les petits agriculteurs à conserver leurs anciennes pratiques. Par exemple, au niveau du périmètre irrigué du Sahla, la plupart des agriculteurs attestent la défaillance des canaux d'irrigation et qu'ils préfèrent conserver leurs anciennes pratiques d'irrigation, telles que l'irrigation gravitaire et l'irrigation par submersion.

Cependant, le manque de communication entre les institutions et les agriculteurs dans les périmètres d'irrigation peut affecter la politique nationale de gestion de l'eau et entraver les progrès de la gouvernance de l'eau. Nous devons nous concentrer sur les structures stratégiques dans le bassin versant de l'Ouergha en soutenant les lois de gouvernance (Tableau 22). Le réseau d'irrigation élaboré pour les périmètres d'irrigation dans le bassin versant de l'Ouergha (Figure 27) révèle la réalité de la gestion de l'eau où les institutions prennent la responsabilité de fonctions qui appartiennent à d'autres institutions, l'allocation de l'eau n'est pas déterminée dans la zone, la société civile et les agriculteurs trouve des difficultés à s'impliquer dans les stratégies de gestion de l'eau.

Les efforts du gouvernement pour assurer de bonnes performances agricoles et une bonne gouvernance des ressources en eau seront réduits à néant en raison du manque de gestion par les responsables locaux et des défaillances techniques. Les modes d'intervention de l'État présentent néanmoins des limites, soulevées par plusieurs auteurs, et n'apportent pas de solutions efficaces à tous les problèmes de conflit d'usage de la ressource (Tanouti, 2017). Sur le plan économique, l'État prend en charge tous les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance des barrages et des périmètres d'irrigation, quant aux usagers, ils ne contribuent pas avec le faible coût d'irrigation de 0,22 dirham par m^3.

Selon Tenneson (2003), la tarification doit être sélective au sein de chaque secteur, de manière inégale, même entre les différents types de cultures, afin de guider l'usager à mieux valoriser la ressource en eau. Cependant, cette proposition peut être une solution tangible pour

une bonne gestion, mais elle créera des inégalités entre les petits et les grands agriculteurs, les amenant également à abandonner certaines cultures pour créer, enfin, un déséquilibre sur le marché national.

Bien que le bassin versant de l'Ouergha alimente d'autres zones en eau d'irrigation, et que les ressources en eau ne représentent pas un gros problème de déficit grâce à la présence des barrages, même malgré les derniers épisodes de sécheresse. Les agriculteurs du bassin de l'Ouergha ne profite pas pleinement de ses propres ressources, en raison du manque d'infrastructures (problème financier), de la mauvaise gouvernance (problème de gestion) et de la vulnérabilité aux aléas climatiques (problème environnemental).

En plus des études techniques et des lois promulguées pour aider à suivre une bonne voie de gestion des ressources en eau. L'étude de vulnérabilité doit être approfondie dans l'analyse de la société civile afin de contourner l'origine du problème de gestion. Apparemment, l'adoption d'un système autocratique en laissant les citoyens participer aux élections, à l'élaboration des politiques, à l'administration et à la supervision aidera à construire l'autorité publique et la responsabilité sur les ressources en eau (Keping, 2018).

Ainsi, cela aidera à adopter des trajectoires de vulnérabilité qui reposent sur l'étude de l'épaisseur historique des sociétés, les valeurs fondamentales sur lesquelles elles ont été construites, et leur évolution jusqu'à aujourd'hui en construisant une méthodologie basée sur l'étude des archives de la société pour planifier une bonne gestion future (Magnan, 2012). La résolution des problèmes techniques est une nécessité, mais l'élaboration d'un plan durable efficace, en particulier avec les agriculteurs, basé sur l'assistance, l'intégration et la coopération, pourrait aider à atteindre un bon niveau de résilience de l'eau face aux futurs risques climatiques.

Il est important de noter que les problèmes de gestion de l'eau ne sont pas spécifiques au bassin versant de l'Ouergha et sont courants dans d'autres régions du Maroc. La gestion de l'eau est un défi complexe qui nécessite une approche holistique et intégrée, impliquant une coordination entre les différents acteurs et parties prenantes. Les autorités locales, les agriculteurs et les organisations de la société civile devraient collaborer pour mettre en œuvre des stratégies de gestion de l'eau efficaces et durables, en tenant compte des besoins socio-économiques, des enjeux environnementaux et des facteurs climatiques. De plus, la promotion de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la réduction des pertes et des gaspillages d'eau peuvent contribuer à garantir un approvisionnement en eau adéquat pour tous les utilisateurs et à améliorer la durabilité des systèmes d'irrigation. Par conséquent, le bassin versant de l'Ouergha

finira-t-il par être un bassin fermé qui gère ses propres ressources, en abandonnant les régions qui en ont besoin ? Ou bien, avec une gouvernance rationnelle, la ressource contribuera à développer les zones rurales du bassin versant de l'Ouergha et à poursuivre la politique de transfert intra-bassin ?

Synthèse de la partie II

Cette partie de la thèse présente, dans son premier chapitre, une analyse des oscillations atmosphériques et de leur influence, ainsi que de la sécheresse, en utilisant un ensemble d'indices de sécheresse météorologique (SPI), hydrologique (SDI), des indices de végétation (NDVI) et d'humidité du sol (NDMI). Les résultats de cette étude ont mis en évidence l'impact de la sécheresse à différentes échelles temporelles et spatiales. Il a été observé que la présence des barrages contribue à soutenir la végétation et à maintenir son humidité. Cette constatation nous a conduit à examiner attentivement, dans le deuxième chapitre, la gestion de l'eau d'irrigation au niveau des périmètres irrigués dans le bassin versant de l'Ouergha. Malheureusement, cette gestion présente des lacunes qui nécessitent une attention urgente. Cependant, il est essentiel de souligner que la capacité des barrages à soutenir la production agricole lors de futurs épisodes de sécheresse dépendra grandement d'une bonne gestion de l'eau d'irrigation.

Pour approfondir l'analyse du système hydro-climatique du bassin versant de l'Ouergha et étudier son comportement dans le temps face aux changements climatiques futurs, l'utilisation de la modélisation hydrologique peut fournir des informations précieuses sur le fonctionnement des ressources en eau dans le passé et dans le futur. Ces informations peuvent contribuer à améliorer la gestion des ressources en eau et les efforts de lutte contre la sécheresse en permettant une meilleure compréhension du système et des conséquences potentielles des différentes options de gestion.

Partie III : L’évolution hydro-climatique dans le bassin versant de l’Ouergha

Chapitre 5 : Évaluation des incertitudes dans la modélisation hydrologique des impacts du changement climatique sur le bassin versant de l'Ouergha

Résultats publiés dans: Mounir, K., Sellami, H., La Jeunesse, I., El Khanchoufi, A. (2023) "Assessment of Future Climate and Hydrological Changes in Semi-Arid Catchment using the SWAT Model and Bias-Corrected EURO-CORDEX Ensemble: A Case of the Ouergha catchment, North of Morocco" Modeling Earth Systems and Environment. doi:10.1007/s40808-023-01775-6

1. Introduction

Pour étudier les processus hydrologiques, la modélisation est une représentation conceptuelle plus facile du cycle de l'eau. Elle permet de décrire les processus physiques d'un bassin versant qui contrôlent la transformation des précipitations en ruissellement (Khayyun, 2019). Dans l'ensemble, plusieurs modèles ont été développés et appliqués sur différents bassins versants dans le monde pour évaluer le processus hydrologique, analyser la gestion de l'eau et prédire ses problèmes futurs.

La performance d'un modèle hydrologique peut varier en fonction des caractéristiques du bassin versant. Par exemple, le climat et la topographie d'un bassin versant peuvent affecter la performance du modèle (Lane, 2019). De plus, Il faut tenir compte de diverses incertitudes liées aux mesures de gestion susceptibles d'affecter l'environnement (van Griensven, 2006; Yang, 2008; Thavhana, et al., 2018).

En effet, plusieurs études se sont concentrées sur l'évaluation des modèles, l'analyse de sensibilité et la simulation des modèles en utilisant différentes méthodes d'évaluation d'incertitudes (Sellami, 2013; Briak, 2019; Koo, 2020). Par ailleurs, ces études ont souligné l'importance de disposer d'un ensemble de données requises pour pouvoir prendre une décision avisée. Afin d'évaluer l'incertitude des modèles, il convient de mettre en œuvre une méthode d'analyse de sensibilité, qui consiste à analyser les variations de la sensibilité des modèles en prenant en considération les différents facteurs qui affectent sa performance (Wu, 2021). En plus, la performance des modèles hydrologiques pendant la période historique peut d'une part réduire l'incertitude de leurs projections et d'une autre part augmenter la certitude des impacts prévus du changement climatique (Krysanova, 2018). Bien que le modèle soit généralement évalué de manière qualitative, l'analyse de sensibilité est une méthode quantitative qui peut être réalisée à grande échelle. En plus, la compréhension du modèle hydrologique peut être utile pour réaliser une analyse d'incertitude efficace.

L'utilisation conjointe de modèles hydrologiques physiques et spatialement distribués, en combinaison avec des projections de modèles climatiques, est nécessaire. Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle semi-distribué en temps continu qui a démontré son efficacité dans divers bassins versants complexes, notamment dans le bassin méditerranéen (Tan et al., 2020; Harraki et al., 2020; Balhane et al., 2022; Marras, 2021; Martínez-Salvador, 2021; Hachemaoui et al., 2022; Ben Saad et al., 2023; Mahdaoui et al.,

2023). Ce modèle est largement reconnu comme l'une des approches les plus fiables pour évaluer les impacts du changement climatique sur l'hydrologie.

Dans cette étude, l'objectif est d'évaluer l'incertitude des paramètres de la structure du modèle associés au modèle SWAT (Arnold, 2011). Cependant, l'approche de l'analyse de sensibilité se concentre sur l'examen des différents facteurs qui influent sur la structure du modèle, les incertitudes liées à ses données et l'impact du modèle sur le débit moyen.

2. Données utilisées

Le modèle est basé sur l'intersection de plusieurs composantes telles que l'hydrologie, le climat, l'utilisation des terres, le sol, etc. Le modèle numérique d'élévation, d'une résolution de 25m, est fourni par l'Institut géographique national français (USGS, 2011) (Tableau 23).

Le modèle SWAT nécessite une base de données des types de sol du bassin et de leurs propriétés (Figure 8), comme la granulométrie des différentes couches de sol pour chaque type, et d'autres paramètres, comme la conductivité hydraulique (Soil_K), la densité apparente (Soil_BD) et la teneur en eau disponible (Soil_AWC). Ces paramètres ont été calculés selon les modèles mathématiques de (Van Genuchten, 1980) et (Mualem, 1976). La fonction de rétention d'eau de Van Genuchten (Equation 9) est définie par la courbe de rétention d'eau Ɵ(h) où Ɵr et Ɵs sont les teneurs en eau résiduelle et saturée (cm^3/cm^3).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(\alpha h)^n]^{1-1/n}} \qquad \textit{Equation 9}$$

L'équation suivante (10) est utilisée conjointement avec le modèle de distribution de la taille des pores de Mualem (1976) pour donner le modèle van Genuchten-Mualem (Van Genuchten, 1980):

$$K(s_e) = K_o S_e^L \{1 - [1 - S_e^{n/(n-1)}]^{1-1/n}\}^2 \qquad \textit{Equation 10}$$

Où K_o est le point de correspondance à la saturation (cm/jour) et similaire, mais pas nécessairement égal, à la conductivité hydraulique saturée, Ks. Le paramètre L (-) est un paramètre empirique de tortuosité/connectivité des pores qui est normalement supposé être de 0,5 (Mualem, 1976).

Les données climatiques quotidiennes fournies par l'ABHS (Agence du bassin hydraulique du Sebou) comprennent les années humides, moyennes et sèches. Les données de

précipitations et de températures couvrent une période allant de 1954 à 2017. Parmi les 17 stations hydrométriques existantes dans le bassin versant de l'Ouergha, nous avons considéré 10 stations qui ont la même durée des données climatiques quotidiennes moyennes entre 1993 à 2017, et la période de 1997-2017 des enregistrements de débit qui permettront de diriger la calibration et la validation du modèle. Pour l'humidité relative, le rayonnement solaire et la vitesse du vent, ils ont été simulés automatiquement à partir d'ArcSwat.

La carte d'occupation/utilisation des sols de 2017 (résolution de 50 m) a été dérivée d'images satellites Landsat 8 (USGS 2017) à l'aide d'ENVI 5.3 et a été validée sur le terrain d'étude (Figure 10). Par ailleurs, la majeure partie du bassin versant de l'Ouergha est occupée par plus de 75% de végétation agricole (vergers, cultures agricoles en rangs et blé d'hiver) et une moyenne de 6% pour la forêt naturelle. L'expansion de la couverture végétale de 1994 à 2017 est due aux conditions climatiques, ainsi qu'aux techniques agricoles adoptées depuis la construction des 4 barrages (Tableau 24).

Tableau 23. Données disponibles utilisées pour la mise en place de SWAT sur le bassin versant de l'Ouergha

Base de données du SWAT	**Données**	**Échelle**	**Date**
Géographique	DEM	50grid	-
	Types de sols	1/100 000	1994
	Utilisation des terres/couverture des terres	Télédétection (ENVI 1/50000) + Cartographie et validation dans le champ d'étude	2018
Climatique	Précipitations	Journalier	1993 - 2017
	Température (Min et Max)		
	Humidité		
	Rayonnement solaire		
	Vitesse du vent		

Tableau 24. Caractéristiques des sous-bassins de Ouergha

SBV	S.D. (Km²)	E.M. (m)	P.M. (%)	F.M. (%)	V (%)	B.H. (%)	S.N. (%)	Eau (%)	T.D.
1	396.5	375.5	8.00	11.27	50.26	27.64	10.83	-	SI-C-L
2	1050.2	294.3	6.87	-	39.39	45.14	15.47	-	
3	18.5	181.2	3.53	-	69.5	-	-	30.5	
4	10.8	156.1	4.50	-	67.1	32.9	-	-	
5	535.1	1076.5	11.29	-	38.7	38.04	23.26	-	L-S
6	746.5	1035.7	9.72	-	27.56	51.19	21.25	-	
7	862.7	561.9	8.32	-	41.19	41.47	17.34	-	
8	290.9	157.6	4.16	-	23.6	32.86	18.37	25.17	
9	578.4	579.3	9.76	-	39.91	41.6	18.49	-	
10	80.4	171	7.18	-	23.09	44.43	32.48	-	
11	550.1	660.8	9.82	-	50.37	29.09	20.54	-	
12	505.4	675.9	11.14	-	52.9	30.83	16.27	-	
13	514.3	279.4	5.71	-	38.76	28.45	32.79	-	

S-B.V. : Sous-bassin versant, **E.M.** : Elévation moyenne, **P.M. :** Pente moyenne, **V. :** Verger**, B.H. :** Blé d'hiver, **S.N. :** Sol nu, **T.D. :** texture dominante

3. Méthodologie

3.1. Description du modèle hydrologique

Le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) est un modèle semi-distribué en temps continu basé sur un programme de modélisation hydrologique. Il a été développé par Arnold (2011) pour évaluer les effets des décisions de gestion alternatives sur les processus hydrologiques, et les sources de pollution liées aux pratiques agronomiques sur la qualité de l'eau (Arnold et al. 2012).

Le modèle SWAT a été largement utilisé dans différentes régions climatiques pour soutenir la prise de décision en matière de gestion de l'eau, et s'est avéré efficace même dans les zones écologiquement sensibles ((Sellami, 2013; Brouziyne, 2017). En outre, le modèle a été appliqué avec succès au Maroc pour simuler l'écoulement, l'érosion et le dépôt de sédiments (Fadil et al. 2011 ; Brouziyne et al. 2018 ; Markhi et al. 2019 ; Briak et al. 2019). Ces études ont montré que le modèle SWAT peut représenter les variables hydrologiques observées, mais

présente une variance importante entre les observations et les simulations. Les résultats du modèle sont représentés dans un format distribué, ce qui est utile pour aider à la gestion et aux pratiques des ressources en eau locales.

Le modèle SWAT divise le bassin versant en sous-bassins. Chaque sous-bassin versant est ensuite subdivisé en une série d'unités de réponse hydrologique (HRU) qui définissent l'équilibre hydrologique en combinant le sol et l'utilisation des terres. Pour chaque HRU, le modèle simule de nombreuses propriétés, telles que la teneur en eau du sol, le débit, la production de sédiments et les pratiques de gestion agricole, et est ensuite agrégé pour chaque sous-bassin versant par une moyenne spécifique. Le bilan hydrologique de chaque sous-bassin est calculé sur la base des fonctions de transfert ci-dessous :

$$\frac{\partial SW}{\partial t} = Pday - Qsurf - Ea - Wseep - Qgw \qquad \textit{Equation 11}$$

Où : SWt : est la teneur en eau du sol (mm), Pday : est le taux de précipitation (mm/jour), Q_{surf} est le taux de ruissellement de surface (mm/jour), Ea est le taux d'évapotranspiration (mm/jour), Wseep est le taux de percolation de l'eau du profile du sol (mm/jour), Qgw est le débit de l'eau souterraine (mm/jour).

3.2. Approche de modélisation

Malgré l'efficacité du modèle, il est connu comme un modèle gourmand qui nécessite de nombreux paramètres d'entrée (cartes, données pédologiques, etc.) (Tableau 23). Dans cette étude, l'exécution du modèle a été réalisée à l'aide d'ArcSwat2012, qui est une extension du logiciel ArcGIS-ArcView (ArcMap10.3). L'objectif est de faciliter sur le plan spatial l'encodage des données de bassin versant en utilisant une unité imbriquée d'HRU. Ces unités ont été définies par la superposition de la topographie (DEM), de l'utilisation des terres et du type de sol. Dans cette étude, la distribution des HRU a formé 170 unités de sol, d'utilisation et d'occupation des sols (LULC) et de classes de pente dispersées dans 13 sous-bassins versants. Pour chaque HRU, l'eau a été stockée dans l'écoulement, le sol, l'aquifère et la neige.

Pour exécuter le modèle ArcSwat pour une période donnée, il a fallu définir la période de simulation. Dans cette étude, nous avons choisi une période de simulation journalière de 1993 à 2017, avec une période de préparation (warm-up period) de trois ans de 1993 à 1996. Le modèle a ensuite été exécuté pour le bassin versant simulé et chaque sous-bassin versant. Nous avons utilisé le stockage variable ou la méthode Muskingum (Linsley, et al., 1982) pour obtenir le débit dirigé calculé pour chaque bassin versant et sous-bassin versant. Le temps de

concentration du bassin versant a été estimé à l'aide de l'équation cinématique de Manning (Neitsch, et al., 2011).

3.3. Calibration et validation du modèle

3.3.1. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est utilisée pour identifier et classer les paramètres qui ont un impact significatif sur le résultat du modèle utilisé (Fadil, 2011). Cette méthode est reconnue par deux types, global et local. Dans cette étude, nous avons soigneusement choisi l'analyse de sensibilité globale, car elle nécessite de changer toutes les valeurs des paramètres et nécessite de nombreuses simulations (Arnold, 2012). Les paramètres de l'écoulement de surface ont été calculés à l'aide d'analyses de régression en hypercube latin. Les plages minimales et maximales des paramètres ont été adaptées pour la calibration.

L'analyse de sensibilité a été dirigée par 31 paramètres, où 11 paramètres ont été considérés comme les plus sensibles (Tableau 25), sur la base du t-test et de la p-value. Le t-test est défini comme une mesure de sensibilité d'un paramètre, et la p-value est la sensibilité significative d'un paramètre (Sellami, 2013). On considère que les valeurs des paramètres avec un t-test élevé et une p-value moindre montrent une plus grande sensibilité sur l'écoulement de surface. Ces paramètres ont été classés en fonction de leur sensibilité lors du calibrage.

Tableau 25. Les paramètres les plus sensibles du modèle SWAT

Paramètre agrégé	Définition des paramètres	Unité	Gamme
R__DEP_IMP.hru	Profondeur de la couche imperméable	mm	[2000 - 5000]
R__SHALLST.gw	Profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère peu profond	mm H2O	[5000 - 27000]
R__SOL_AWC(..).sol	Capacité en eau disponible	[mmmm^{-1} sol]	[-0.1 - 0.1]
R__SOL_ALB(..).sol	Albédo du sol humide	-	[0 - 0.4]
R__OV_N.hru	La valeur "n" de Manning pour les terres émergées.	-	[0 - 25]
R__EPCO.hru	Facteur de compensation de l'absorption par la plante	-	[-0.3 - 0.3]
V__ESCO.hru	Facteur de compensation de l'évaporation du sol	-	[0- 1]

R__SURLAG.bsn	Temps de latence du ruissellement de surface	Jours	[-4 - 15]
R__SOL_BD(..).sol	Densité apparente du sol	-	[-0.2 - 0.2]
V__TIMP.bsn	Facteur de décalage de la température du manteau neigeux	-	[0 - 0.5]
R__CN2.mgt	Valeur initiale du SCS CN II	-	[-0.3 - 0.3]

3.3.2. Performance du modèle

La modélisation hydrologique est difficile et sujette à des incertitudes (Sellami, 2014). Les chercheurs ont mis au point de nombreux algorithmes pour calibrer les incertitudes hydrologiques dans l'interface SWAT-CUP, tels que GLUE développée par l'Université d'Oxford (Beven, 1992), la méthode Parasol (Parameter Solution) développée par Van Griensven (2006) et l'algorithme SUFI-2 (Sequential Uncertainty FItting) développée par Abbaspour (2007).

Afin d'analyser la sensibilité, nous avons utilisé dans notre étude Sufi-2 (The Sequential Uncertainty FItting version 2). Cet algorithme a été recommandé par de nombreux chercheurs (Yang, 2008; Sellami, 2013; Fan, et al., 2015; Markhi, 2019) pour sa réponse de calibration fiable dans le monde entier, sur le ruissellement de surface, la qualité de l'eau et l'érosion.

La période d'étalonnage s'étend de 1997 à 2010 et la période de validation de 2010 à 2017. Plusieurs itérations de simulation ont été effectuées avec 500 simulations dans chaque cycle (Thavhana, et al., 2018). À chaque exécution, SWATCUP suggère de nouvelles valeurs de plage de paramètres afin d'optimiser les valeurs statistiques. Après avoir exécuté 500 simulations sur le débit observé, la performance et l'efficacité du modèle sont jugées par les valeurs du facteur P, du facteur R, du R^2 et du NS (Thavhana, et al., 2018).

Le facteur P, calculé à partir de l'équation 12, représente les données mesurées dans la bande de prédiction de 95 %, fréquemment appelée 95PPU. Il est calculé aux niveaux 2,5 % et 97,5 % de la distribution cumulative des débits sortants obtenue par échantillonnage de l'hypercube latin (Abbaspour, 2015). Une valeur de facteur p proche de 1 est jugée acceptable.

$$P = \frac{NQin}{n} \times 100 \qquad \textit{Equation 12}$$

Le facteur R est calculé à partir de l'équation 13. Ce facteur représente la largeur moyenne de la bande, divisée par l'écart-type de la variable mesurée correspondante. Une faible valeur du facteur R, proche de 0, est souhaitable pour expliquer une moindre incertitude.

$$\mathrm{R-factor} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{t_i=1}^{n}\left(Q^{M}_{t_i,97.5\%} - Q^{M}_{t_i,2.5\%}\right)}{\sigma_{obs}} \qquad \textit{Equation 13}$$

Le Nash-Sutcliffe est calculé par l'équation 14, pour évaluer la performance du modèle. Les simulations avec une valeur Ns inférieure à 0,5 ne sont pas considérées comme acceptables (Nash, et al., 1970).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \qquad \textit{Equation 14}$$

L'équation 15 est considérée comme un coefficient de détermination. Ce coefficient est compris entre 0 et 1. Une faible corrélation est décrite par un R^2 proche de 0, et une bonne corrélation est représentée par une valeur R^2 proche de 1.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2(P_i - \bar{P})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}}\right)^2 \qquad \textit{Equation 15}$$

Où Oi représente le débit observé, Pi est la valeur moyenne du débit observé et P est la valeur du débit sortant simulé.

4. Résultats et discussion

4.1. Analyse de sensibilité

Dans cette étude, les données ont été utilisées pour estimer le volume de ruissellement quotidien, délivré du Nord-Est (le bassin versant en amont) vers le Sud-Ouest (barrage d'Al Wahda). Le modèle SWAT a été exécuté pour les simulations de ruissellement journalier, dans 13 sous-bassins du bassin versant de l'Ouergha. Cependant, le critère du facteur NS considéré dans cette étude, est adopté de l'évaluation de Moriasi (2007) avec une limite de performance de 0.5. Cette méthode a été largement utilisée dans les études d'analyse de sensibilité dans la région méditerranéenne, comme Sellami et al. (2013) et Aouissi et al. (2016).

Quant à l'analyse de sensibilité, 13 paramètres sélectionnés pour la calibration ont été incorporés dans 500 exécutions de simulation avec SWAT-CUP en utilisant l'algorithme SUFI-

2 pour la période de calibration et de validation. Le tableau 26 montre les paramètres les plus sensibles identifiés par l'analyse de sensibilité globale. La réponse du modèle hydrologique a été évaluée en utilisant les données mensuelles observées de la station du barrage d'Al Wahda.

Le premier paramètre le plus sensible est le nombre initial de courbes de ruissellement SCS (CN2) qui dépend des paramètres du sol et des propriétés de d'occupation/utilisation des terres, suivi du facteur de décalage de la température du manteau neigeux (TIMP) qui diffère en fonction de l'influence de la température du manteau neigeux de la veille ou de la profondeur et de l'exposition de la densité du manteau neigeux. Ensuite, de la densité apparente du sol (SOL_BD) qui dépend de l'humidité du sol. Enfin, le temps de décalage du ruissellement de surface (SURLAG) qui contrôle la fraction de l'eau totale autorisée à entrer dans le cours d'eau un jour donné. En raison de la nature du terrain, dominé par des sols argileux et des couches de marne et de schiste désagrégées, la grande sensibilité de ces paramètres indique l'importance des facteurs externes tels que la température, l'évapotranspiration et les extrêmes climatiques (inondation et sécheresse) qui modifient l'écoulement.

Tableau 26. Classement des paramètres les plus sensibles dans la simulation de l'écoulement

Paramètres	Rang	t-Stat	p-Value	Valeur ajustée
CN2.mgt	1	-13.22	0.00	-0.11
TIMP.bsn	2	-7.20	0.00	0.20
SOL_BD(..).sol	3	4.58	0.00	-0.05
SURLAG.bsn	4	1.81	0.07	8.28
ESCO.hru	5	-0.87	0.39	0.86
EPCO.hru	6	-0.81	0.42	0.20
OV_N.hru	7	0.68	0.49	14.92
SOL_ALB(..).sol	8	-0.68	0.50	0.25
SOL_AWC(..).sol	9	0.59	0.56	-0.02
DEVRAIT	10	-0.48	0.63	19763.66
DEP_IMP.hru	11	-0.19	0.85	3319.67

4.2. Modèle hydrologique

La figure 29 montre les meilleures simulations du temps requis pour la calibration et la validation au bassin versant de l'Ouergha. Avec une valeur de Nash de 0.78 dans la calibration et une amélioration de la validation NS avec 0.92 que le modèle était bien ajusté. La valeur du PBIAS dans les périodes de calibration et de validation montrent une légère sous-estimation du débit présentant une grande cohérence.

Les valeurs RSR, NS et R^2 de la période de validation montrent une amélioration de la qualité de l'ajustement par rapport aux valeurs de la période de calibration (Tableau 27). On peut constater que les résultats de la simulation présentent une plus petite plage d'incertitude.

La figure 29 montre le débit mensuel simulé pour le bassin versant de l'Ouergha. Les données simulées sont très proches, et on remarque que le débit est un peu surévalué pendant la période sèche. Cette surestimation peut être justifiée par de nombreux paramètres tels que la conductivité hydraulique, le sol ou l'évapotranspiration, etc. Mais cela peut ne pas aider le modèle SWAT à fournir une bonne représentation du processus d'écoulement de surface. De plus, les bassins versants méditerranéens sont sujets à des incertitudes (Sellami, 2013; Sellami, 2014). En général, la simulation résultant de la validation et de la calibration a montré une légère sous-estimation du débit moyen.

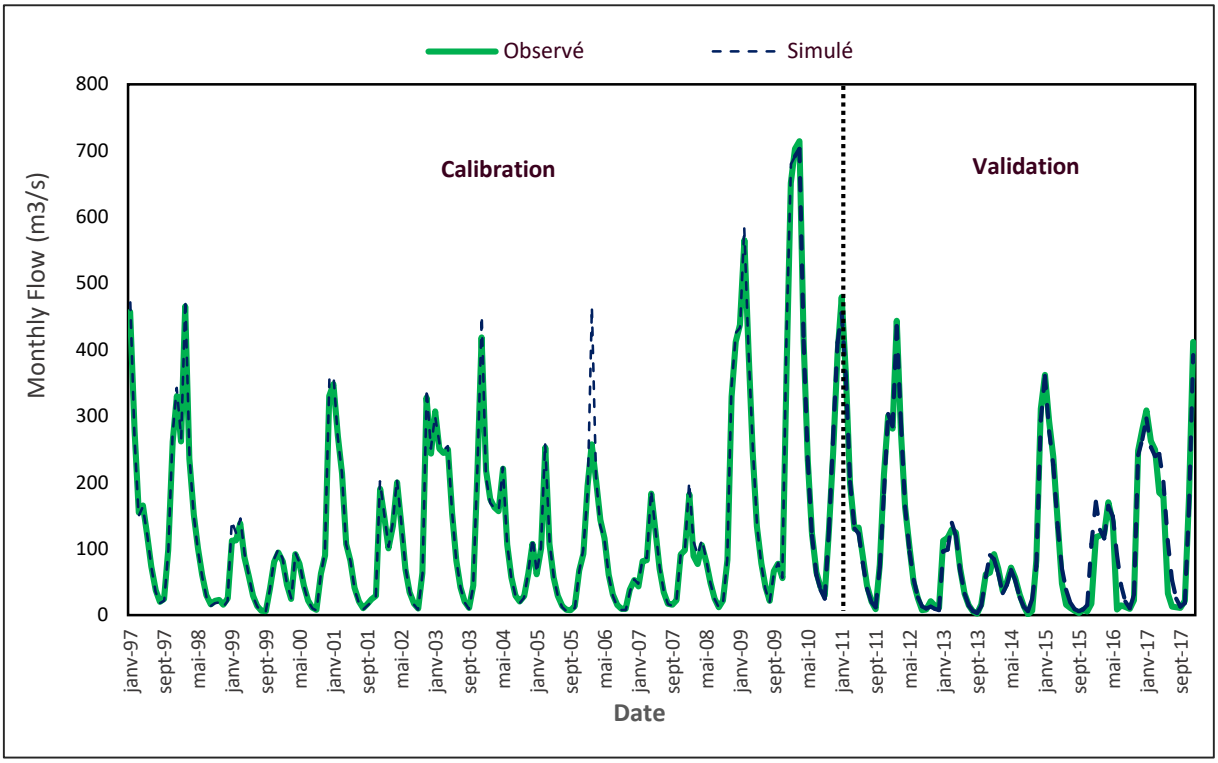


Figure 29. Débits mensuels dans le bassin versant de l'Ouergha (calibration, validation)

Tableau 27. Évaluation de la performance du modèle SWAT dans la calibration et la validation des simulations de ruissellement mensuel

Périodes	Meilleure simulation	NS	PBIAS	Facteur p	R^2	Facteur r	RSR
Calibration	426	0.78	-2.7	0.94	0.82	0.44	0.47
Validation	206	0.92	-3.4	0.8	0.92	0.49	0.29

4.3. Prédiction des courbes de durée d'écoulement dans le bassin versant de l'Ouergha

Le débit estimé du bassin versant de l'Ouergha est présenté sous forme de courbes de durée d'écoulement (CDF) dans la Figure 30, qui sont basés sur la série de débits issue des résultats observés et ajustés issue de SUFI-2. Les données présentées sont des périodes de calibration et de validation. Les percentiles de débit sont indiqués en fonction du nombre de débits qui peuvent être classés en trois catégories : débits élevés (probabilité excédée ≤ 5), débits médians (10 <probabilité excédée < 20) et débits faibles (probabilité excédée > 70).

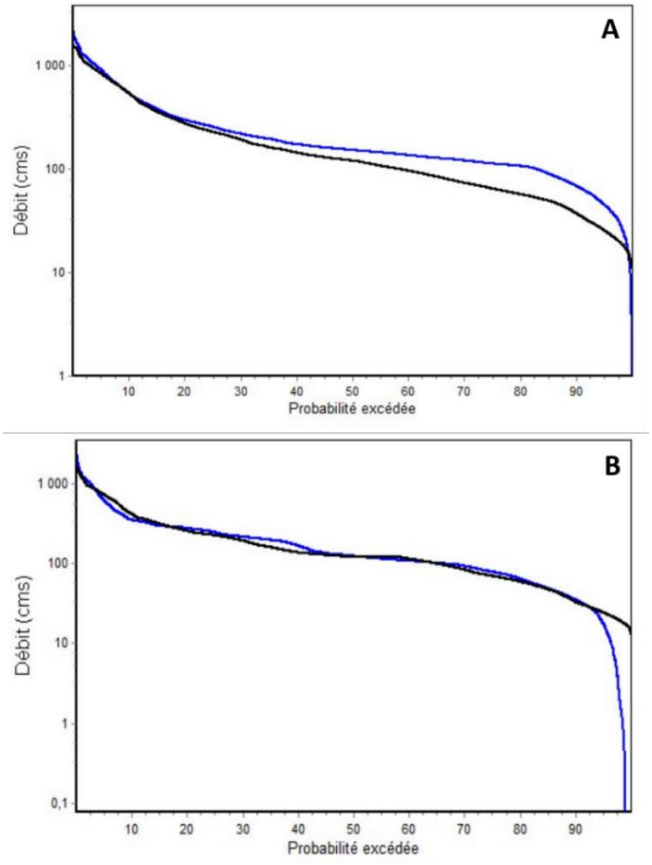


Figure 30. Comparaison du comportement de la courbe de durée de débit observé (Noir) et simulé (Bleu) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de calibration (A) et de validation (B)

Les percentiles de débit élevés pour les périodes d'étalonnage et de validation montrent que la pente des FCD dans ces intervalles est relativement abrupte. Cela suggère que le débit ne peut pas être maintenu sur une longue période. D'autre part, les extrémités des FDC simulées sont plus abruptes au cours du débit simulé, alors que leur pente est similaire au débit observé.

La courbe des débits élevés simulés montre qu'elle correspond bien aux débits observés. Ceci est dû au fait que les hauts débits qui se produisent dans un bassin versant sont une réponse directe aux tempêtes ou aux précipitations qui frappent la région. La variabilité des valeurs de débit élevé observées et simulées peut être attribuée à la variabilité annuelle des précipitations dans la zone d'étude. Les variations entre les débits faibles observés et simulés peuvent être attribuées aux incertitudes du modèle. En effet, la différence entre les deux est plus importante lorsque le modèle n'est pas en mesure de prédire la quantité exacte d'eau qui s'écoulera dans une zone donnée. Plusieurs auteurs ont également souligné que les performances de SWAT ne sont pas optimales lorsqu'il s'agit de simuler de faibles débits, en raison de la contribution des eaux souterraines à l'écoulement des crues.

5. Conclusion

Dans cette étude, notre objectif était d'évaluer l'incertitude des paramètres de la structure du modèle associés au modèle SWAT au niveau du bassin versant de l'Ouergha. Le modèle SWAT a été appliqué avec succès dans le bassin versant de l'Ouergha, démontrant sa pertinence dans la plupart des stations hydro-climatiques de la région. La calibration et la validation de 13 sous-bassins ont permis d'obtenir de bons résultats en termes de performance des processus hydrologiques.

L'analyse de sensibilité a révélé que l'algorithme SUFI-2 a été performant pour la calibration et la validation journalières dans notre zone d'étude. Le débit annuel moyen des différentes unités spatiales a été évalué à 157 cm3, avec des valeurs maximales observées dans la partie amont du bassin où les affleurements sont relativement imperméables et situés à des altitudes élevées.

Cette évaluation peut contribuer à déterminer les utilisations des terres appropriées et les mesures de conservation des sols pour le bassin versant, dans le but de réduire les impacts de la dégradation des terres, de limiter les problèmes d'inondation et de prolonger la durée de vie du bassin versant de l'Ouergha. Malgré les défis liés à la disponibilité limitée de données dans le bassin versant de l'Ouergha, les résultats du modèle SWAT ont fourni une bonne représentation des processus hydrologiques.

Cependant, afin de prédire plus précisément l'impact du changement climatique sur l'hydrologie, il est essentiel de coupler le modèle SWAT à des modèles climatiques. Cela permettra de prendre en compte les projections climatiques futures et d'évaluer les scénarios potentiels d'évolution des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha.

Chapitre 6 : Évaluation de la vulnérabilité des ressources en eau du bassin versant de l'Ouergha dans le cadre des projections futurs du changement climatique.

Résultats publiés dans : Mounir, K., Sellami, H., La Jeunesse, I., El Khanchoufi, A. (2023) "Assessment of Future Climate and Hydrological Changes in Semi-Arid Catchment using the SWAT Model and Bias-Corrected EURO-CORDEX Ensemble: A Case of the Ouergha catchment, North of Morocco" Modeling Earth Systems and Environment. doi:10.1007/s40808-023-01775-6

1. Introduction

Les études évaluant l'impact du changement climatique sur les régimes d'écoulement des bassins versants ont montré des projections d'altération hydrologique distinctes en fonction de la localisation et des caractéristiques du bassin versant, des projections du modèle climatique et des échelles temporelles et spatiales de l'étude. Par exemple, l'augmentation des précipitations dans les régions montagneuses, himalayennes et tropicales devrait augmenter la disponibilité des ressources en eau (Meehl, et al., 2005; Abbaspour, 2007; Piani, et al., 2010; Fan, et al., 2015; Hattermann, 2015; Torma, 2019; Roy, et al., 2021; Karakoyun, et al., 2022; Roy, et al., 2022), tandis qu'une diminution est attendue dans les bassins versants méditerranéens en raison des conditions climatiques plus sèches et plus chaudes prévues dans le futur (Meehl, et al., 2005; Raymond, et al., 2019; Fonseca, 2019; Torma, 2019; Rocha, 2020; Martinez-Salvador, et al., 2020). En outre, le degré d'altération hydrologique au sein d'une même région peut varier en fonction des processus hydrologiques dominants et des attributs locaux du bassin versant (Oni, et al., 2014; Lespinas, et al., 2014). D'autres chercheurs ont constaté que le choix des modèles de projections climatiques ainsi que la paramétrisation et la résolution des modèles pouvaient également entraîner des amplitudes différentes de l'altération des indicateurs hydrologiques (Ludwig, et al., 2009; IPCC, 2021; Marras, 2021). Par conséquent, les études sur les impacts hydrologiques du changement climatique ont été proposées à l'échelle du bassin versant pour une quantification précise de ces impacts et pour identifier des mesures d'adaptation pratiques (Ludwig, et al., 2011; Ben Nsir, et al., 2022; Roy, et al., 2022).

Afin de mesurer avec précision les effets potentiels du changement climatique sur l'hydrologie en Méditerranée, il est important d'utiliser des projections climatiques à la fois précises et à haute résolution. CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) est une initiative mondiale visant à fournir des projections climatiques à l'échelle régionale pour mieux comprendre les impacts du changement climatique sur différents secteurs. Cette initiative comprend plusieurs domaines qui couvrent différentes parties du monde et utilisent différents ensembles de modèles climatiques régionaux (RCM) pour réduire l'échelle de sortie des modèles climatiques mondiaux (GCM). Dans la région méditerranéenne, Med-CORDEX est couramment utilisé en raison de son orientation spécifique sur la région et de sa capacité à fournir une résolution appropriée pour les études d'impact hydrologique à l'échelle du bassin versant. Cependant, Euro-CORDEX peut également être utilisé pour fournir des

projections pour la région à une résolution plus élevée, ce qui peut être utile pour certaines applications (Ha, et al., 2022).

L'importance de l'étude des altérations hydrologiques induites par le climat dans les bassins versants méditerranéens est soulignée par le fait que la région est considérée comme un point chaud du changement climatique et de la sécurité de l'eau, comme l'ont montré plusieurs études (Meehl, et al., 2005; Fonseca, 2019; Torma, 2019; Raymond, et al., 2019; Rocha, 2020; Martinez-Salvador, et al., 2020; Marras, 2021; Lachgar, et al., 2021; De Girolamo, et al., 2022). Ces études ont également reconnu l'incertitude liée à la quantification de l'étendue du changement hydrologique sur le régime d'écoulement du bassin versant dans la région méditerranéenne. Cette incertitude provient de la structure du modèle, de la concentration de gaz à effet de serre pilotée par le modèle climatique, de la structure et de la paramétrisation du modèle, des entrées, etc. En plus de la variabilité des processus hydrologiques locaux et des attributs physiques, cette incertitude rend la quantification de l'altération hydrologique plus complexe sous l'effet du changement climatique. Le concept de méthodes d'ensemble multi-modèles a été proposé pour améliorer la fiabilité et la stabilité à long terme des modèles climatiques et fournir des prévisions cohérentes et fiables (Ruti, et al., 2015; Ilori, et al., 2022). L'utilisation d'un ensemble de modèles multi-hydro-climatiques pour évaluer les impacts hydrologiques du changement climatique s'est révélée supérieure à une projection de modèle unique. L'approche d'ensemble multi-modèle a été rapportée plus efficace qu'un modèle unique dans diverses conditions climatiques conditions climatiques dans différents bassins versants complexes, y compris la Méditerranée (Tan, et al., 2020; Balhane, et al., 2022; Marras, 2021; Martínez-Salvador, 2021).

Pour prendre en compte l'adaptation aux impacts du changement climatique, la distribution spatiale des processus hydrologiques et des conditions environnementales dans le bassin versant doivent être considérées lors de l'évaluation des impacts hydrologiques du changement climatique. Cela nécessite l'utilisation de modèles hydrologiques physiques et spatialement distribués conjointement avec des projections de modèles climatiques. Le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) est un modèle semi-distribué en temps continu qui a prouvé son efficacité dans différents bassins versants complexes, en particulier dans le bassin versant méditerranéen (Tan, et al., 2020; Harraki, et al., 2020; Balhane, et al., 2022; Marras, 2021; Martínez-Salvador, 2021; Hachemaoui, et al., 2022; Ben Saad, et al., 2023; Mahdaoui, et al., 2023). Ce modèle est largement considéré comme l'une des approches les plus fiables pour évaluer les impacts du changement climatique sur l'hydrologie.

Des études récentes menées dans la région méditerranéenne ont intégré SWAT avec des ensembles de modèles climatiques pour évaluer les ressources en eau dans des conditions climatiques futures (Torma, 2019; Marras, et al., 2021; Balhane, et al., 2022; Ha, et al., 2022) . Ces études révèlent une baisse potentielle des précipitations moyennes et une diminution des débits d'écoulement, ainsi qu'une augmentation des événements de précipitations extrêmes. Les résultats soulignent l'importance de l'utilisation de modélisation en ensemble pour améliorer notre compréhension des changements climatiques futurs et soulignent la nécessité de poursuivre la recherche pour affiner et améliorer ces méthodes.

Après une évaluation approfondie de chaque modèle EURO-CORDEX, un ensemble multi-modèle a été créé pour prévoir les changements futurs des précipitations dans le bassin versant de l'Ouergha, une région agricole cruciale qui dépend des barrages pour atténuer la sécheresse (Mounir, et al., 2023). De plus, cette étude vise à étudier les schémas d'écoulement du bassin versant d'Ouergha en combinant l'ensemble de modèles avec le modèle SWAT. L'étude se concentre uniquement sur le scénario RCP 4,5, qui n'est pas couramment utilisé dans les études hydrologiques. Le scénario RCP 4.5 choisi représente un scénario optimiste avec un plus grand potentiel de réduction des émissions et d'efforts d'atténuation, ce qui est particulièrement important pour les régions ou les secteurs qui poursuivent des stratégies de décarbonisation. L'étude apporte une contribution précieuse à l'étude des impacts du changement climatique dans la région méditerranéenne, où les changements se produisent plus rapidement que dans d'autres régions, soulignant l'importance de l'utilisation de cette méthodologie pour une prise de décision éclairée sur l'importance de la sauvegarde de l'écosystème et de la garantie de la durabilité du barrage et de ses avantages associés.

2. Méthodologie

2.1. Audit des modèles climatiques

CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) a été lancé par le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC). Il s'agit d'une étude internationale de réduction d'échelle du climat régional qui intègre l'évaluation des modèles et les cadres de projection climatique afin d'améliorer les projections régionales du changement climatique dans le monde entier (Giorgi, et al., 2009).

L'utilisation des modèles climatiques CORDEX pour améliorer les modèles climatiques moteurs des MCG présente de multiples avantages. Ceux-ci comprennent leur précision spatiale et temporelle ainsi que la possibilité d'améliorer la représentation des climats futurs et actuels.

La qualité et la précision d'un scénario régional de changement climatique sont définies à la fois par le modèle climatique régional (MCR) et le modèle climatique global (MCG) (Christensen, et al., 2020). Par conséquent, les simulations d'ensemble de différents modèles climatiques devraient être effectuées pour mieux comprendre les incertitudes associées à chaque modèle (Onyutha, et al., 2016).

Bien que les écarts entre les MCG et les grilles locales soient comblés dans une certaine mesure par la réduction d'échelle, les performances des MCR sont toujours sujettes à deux limitations majeures. D'une part, la performance de l'ajustement spatial varie par rapport aux observations en fonction du processus dynamique et de la paramétrisation physique du MCR. Cependant, le MCR, qui est piloté par les résultats du MCG en tant que conditions limites latérales, hérite du biais du MCG, qui ne peut être supprimé en augmentant la résolution (Liang, et al., 2006; Fiseha, et al., 2014; Christensen, et al., 2020). En outre, l'incertitude des données due aux modèles et aux séries de données à échelle réduite a été supprimée à l'aide de la méthode de correction du biais.

Dans cette étude, nous avons utilisé cinq modèles obtenus à partir de différents couplages de modèles globaux (GCM) et de modèles régionaux (RCM) de l'initiative EURO-CORDEX, avec une résolution de 0,11° (~12 km). Les projections de l'ensemble climatique multi-modèle concernent les périodes de référence (1979-2005) et futures (2041-2080) dans le cadre du scénario RCP4.5.

2.2. Correction du biais statistique

La méthode d'extension de la fonction de distribution cumulative (CDF) a été utilisée pour générer la même distribution des sorties des MCG que la méthode de distribution cartographique (DM) (Tan, et al., 2020). Selon les données statistiques, les variables de température et de précipitation obéissent à la distribution gamma, alors que la variable de précipitation ne le fait pas (Piani, et al., 2010). En outre, la CDF théorique a été estimée uniquement à partir des jours de pluie, sans tenir compte des jours non pluvieux. Pour surmonter ce problème, l'ECDF est employée à la fois pour les périodes humides (octobre à avril) et sèches (mai à septembre), et est donc applicable à presque tous les paramètres climatiques possibles (Jakob Themessl, et al., 2011).

$$F(x) = \int_0^x f(t|a,b)dt = \frac{1}{\beta^{\infty}T(a)} t^{a-1} e^{-\frac{t}{\beta}} dt \qquad x\geq 0 \; ; \; ,>0$$

$$G(x) = \int_{-\mu}^{x} g(t|u, s^2)dt = \int_{-\mu}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2s^2}} dt \qquad \textit{Equation 16}$$

Où x signifie la variable de précipitation ou de température, f (t|α ,β) est la fonction de densité de probabilité de la distribution gamma avec deux paramètres α et β, et g (t|μ ,σ ²) est la fonction de densité de probabilité de la distribution normale avec deux paramètres, μ et σ².

$$P_{cor}^{ECDF}(t) = ecdf_{obs}^{-1}[ecdf_{GCM}(P(t))]$$

$$T_{cor}^{ECDF}(t) = ecdf_{obs}^{-1}[ecdf_{GCM}(T(t))] \qquad \textit{Equation 17}$$

2.3. Indicateurs hydrologiques

Les modifications du régime d'écoulement peuvent être évaluées à l'aide de divers indicateurs hydrologiques existants. Bien que plusieurs indicateurs hydrologiques puissent être utilisés pour évaluer l'impact du changement climatique, ils ne sont pas universels. Les sites choisis l'ont été en fonction de leurs caractéristiques et de la disponibilité des données.

Par conséquent, ces indicateurs (Tableau 29) devraient couvrir diverses fonctions liées à la réponse du débit, telles que la fréquence et la magnitude du débit. Le tableau suivant montre les différents indicateurs hydrologiques applicables au bassin versant de l'Ouergha. Ces indicateurs peuvent être utilisés pour évaluer les changements potentiels de divers aspects de l'approvisionnement en eau d'un site donné, tels que les précipitations (PCP), la température (TMP), le débit (Q), la teneur en eau du sol (SWC) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). En outre, le choix est également basé sur l'importance de ces indicateurs, non seulement du point de vue hydrologique, mais aussi jugés informatifs et utiles pour la prise de décision en matière d'adaptation.

Tableau 28. Indicateurs hydrologiques sélectionnés pour l'évaluation de l'impact du changement climatique

Groupe de processus	Indicateurs hydrologiques
Conditions climatiques	Précipitations mensuelles cumulées (PCP)
	Température mensuelle (TMP)
	Évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP)
Bilan hydrique	Écoulement mensuel
	Contenu mensuel en eau du sol (SWC)
Ampleur et fréquence des débits extrêmes	Courbe de durée du débit (FDC)
	Nombre de jours de faible débit par mois
	Nombre de jours de fort débit par mois
Durée de l'écoulement Moment de l'écoulement	Durée minimale du débit (1, 7, 30, 90 jours)
	Durée maximale du débit (1, 7, 30, 90 jours)
	Moyenne annuelle Date julienne du maximum d'un jour
	Moyenne annuelle Date julienne du minimum d'un jour
	Moyenne annuelle Date julienne de 90 jours maximum
	Moyenne annuelle Date julienne de 90 jours minimum

L'écart prévu pour chaque indicateur a été calculé et on en a fait la moyenne pour représenter la moyenne d'ensemble du modèle multi-climatique. Les changements relatifs et absolus pour les périodes de référence et future de l'indicateur hydrologique ont été calculés à l'aide des équations suivantes :

$$\Delta v = \frac{v_{Fut} - v_{Ref}}{v_{Ref}} \times 100 \qquad \text{Changement relatif (\%)}$$

$$\Delta v = v_{Fut} - v_{Ref} \qquad \text{Changement absolu (unité d'indicateur)}$$

$$\overline{\Delta v} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \Delta v_i \qquad \textit{Equation 18}$$

Où N est le nombre total de membres du modèle climatique (N = 4), Δv est la moyenne multi-modèle du changement relatif pour l'indicateur v, et l'incertitude d'ensemble de l'ampleur projetée du changement peut être estimée à l'aide de l'équation (19) selon Giorgi et Mearns (2002).

$$\delta_{\Delta v} = \delta_{\Delta v}\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\Delta v_i - \overline{\Delta v})^2\right]1/2 \qquad \textit{Equation 19}$$

Où $\delta_{\Delta v}$ correspond à la différence quadratique moyenne du changement de l'indicateur v, et l'intervalle d'incertitude autour de l'ampleur moyenne projetée du changement est donné par $\delta_{\Delta v} \pm \delta_{\Delta v}$ et centré autour de Δv.

3. Résultats

3.1. Changements des variables climatiques selon les scénarios RCM

La performance de la correction du biais a été établie sur l'ensemble des RCM sélectionnés sur la période de référence (1979-2005) et la période future (2041-2080) pour les températures et les précipitations minimales et maximales à la station de Ain Aicha. Le choix de cette station a été basé sur sa localisation et sa représentativité au niveau du bassin versant de l'Ouergha.

Le tableau 29 montre les tendances moyennes de chaque variable hydrologique et météorologique au cours de la période future en utilisant les scénarios climatiques corrigés dans le modèle SWAT. Les résultats pour chaque variable montrent une augmentation significative de la température moyenne minimale et maximale, qui peut dépasser 34 % et 28,9 %, respectivement, pour la période 2041-2080. Une diminution significative de plus de 37 % des précipitations peut être constatée pour la période 2041-2080. Par conséquent, on s'attend à ce que le changement climatique ait un impact significatif sur les composantes climatiques et puisse avoir une incidence sur les apports d'eau et réduire le débit d'environ 8 % pour la période 2041-2080.

Tableau 29. Valeurs moyennes du débit Q (m^3/s), des précipitations PCP (mm), et des températures maximale (Tmax) et minimale (Tmin) (°C) dans le bassin versant de l'Ouergha

Variables	Période de référence (1997-2017)	Période future (2041-2080)
Q	122.7	117.5 (-8.4%)
P	18.8	11.7 (-37.8%)
Tmax	24.1	28.9 (+20%)
Tmin	10.2	(+34%)

3.2. Changements prévus des conditions climatiques

Les changements climatiques prévus ont été évalués en couplant le modèle SWAT avec des modèles climatiques selon le scénario d'émissions RCP4.5. L'ensemble multi-modèle climatique (ENS) a été évalué pour la période future (2041-2080) en utilisant l'écart relatif moyen des précipitations cumulatives mensuelles et les variations absolues des températures

mensuelles par rapport à la période de référence (1979-2005) pour le bassin versant de l'Ouergha.

Au niveau saisonnier, il est projeté que les précipitations varient de -8 à -21% en automne (OND), de -10 à -8% en hiver (JFM), de -16 à +1% au printemps (AMJ) et de +3 à +9% en été (JAS). À l'échelle annuelle, la précipitation moyenne pendant la période de référence de 421,5 mm est projetée à 358,8 mm dans la période future, ce qui représente une diminution moyenne de 14,8% (Figure 31). À l'avenir, on s'attend à une augmentation des températures dans toutes les saisons, de 0,89 à 1°C en automne, de 1,3 à 1,9°C en hiver, de 2,7 à 2,8°C au printemps et de 1,6 à 1,9°C en été. À l'échelle saisonnière, la température moyenne pendant la période de référence est de 18,5°C, tandis que la température annuelle moyenne devrait être de 21,3°C, ce qui représente une augmentation de plus de 2,5°C dans le bassin versant (Figure 32).

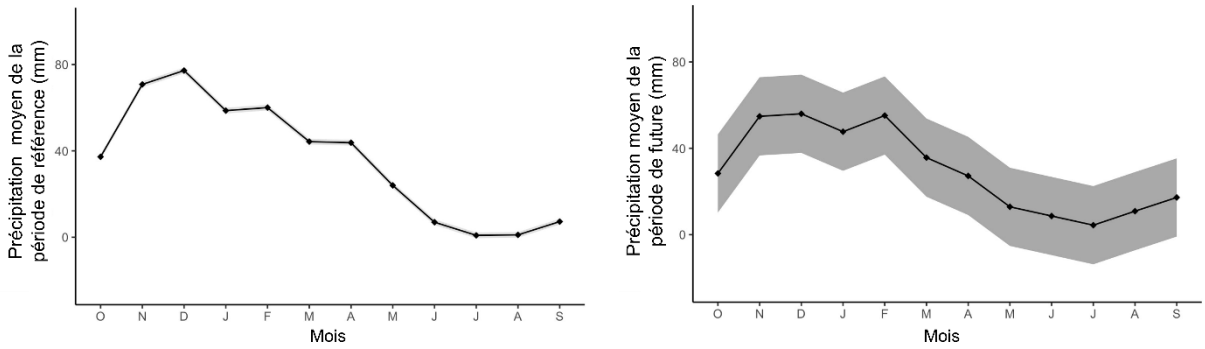


Figure 31. Précipitations mensuelles (PCP) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et futures (2041-2080)

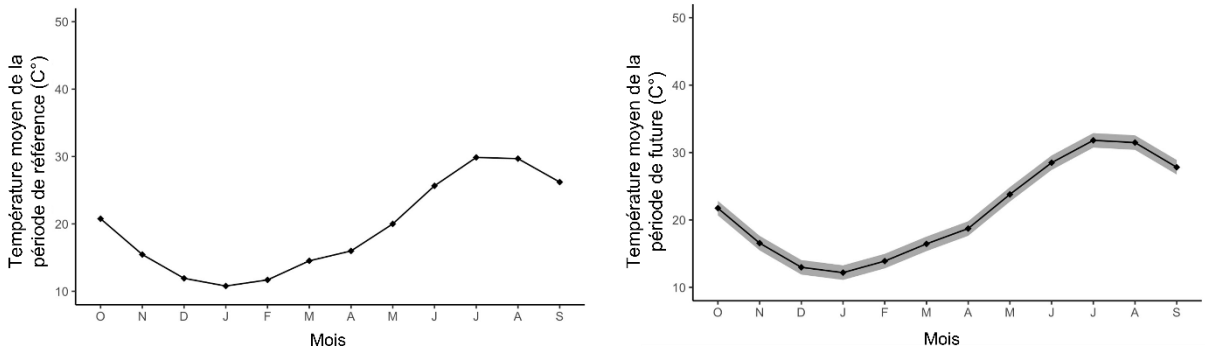


Figure 32. Température mensuelle (TMP) (°C) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)

3.3. Changements prévus des indicateurs du bilan hydrique

3.3.1. Débit (Q)

La figure 33 présente la variation prévue du volume d'écoulement entre la période de référence et la période future. Elle est calculée sur la base de l'ENS. Le changement du débit projeté peut varier entre -87% et -8% en automne, de +24% à +21% en hiver, de +18% à +37% au printemps et de +45% à -45% en été.

Sur une base annuelle, le débit moyen devrait atteindre 105 mm dans le futur contre 128 mm dans la période de référence, ce qui représente une diminution de -13%. De plus, une incertitude est associée à l'amplitude de la variation mensuelle du débit, qui tend à être relativement constante tous les mois.

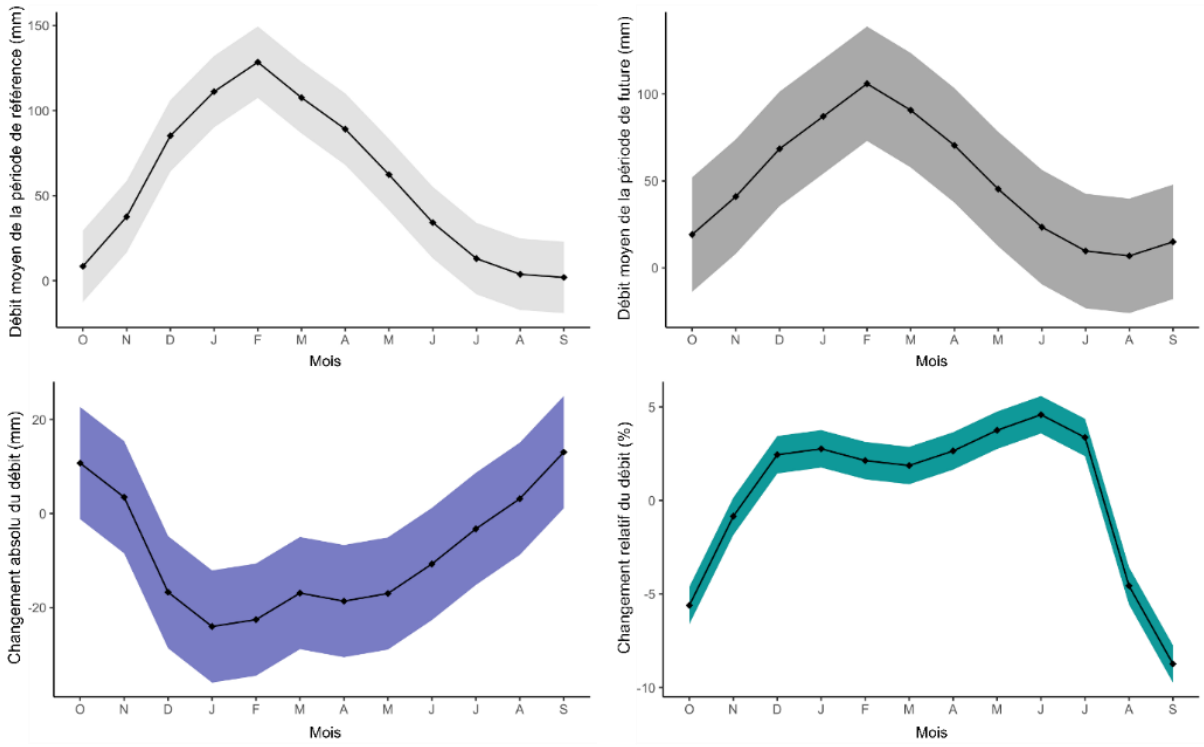


Figure 33. Indicateur de débit (Q) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)

De plus, la relation examinée entre les précipitations et le débit prévus a montré un coefficient de corrélation positif élevé de 0,75, significatif à 0,5 %. Ce résultat indique qu'une pluviométrie moindre affecte de manière significative le débit dans le bassin versant de l'Ouergha. La contribution des saisons pluvieuses à l'approvisionnement en eau du bassin et à sa répartition saisonnière est significative. Cependant, l'écoulement futur sera impacté par une réduction de la fréquence et de la quantité de précipitations (Orkodjo, et al., 2022). Bien que la

relation entre le forçage climatique et le débit soit comprise, les résultats mettent en évidence la forte dépendance de l'écoulement aux précipitations et suggèrent que les incertitudes dans les projections de précipitations affectent les prédictions d'écoulement.

3.3.2. Teneur en eau du sol (SWC)

La SWC est une composante essentielle du cycle hydrologique et est responsable de la répartition des précipitations en écoulement et en infiltration. La figure 34 montre que la SWC annuel devrait diminuer de manière significative pour atteindre moins de 15% dans le bassin versant de l'Ouergha. Ceci est en accord avec les projections saisonnières allant de -21% à -15% en automne, -12% à -15% en hiver, -24% à -21% au printemps et -15% à -12% en été.

La réduction des précipitations projetées a été le principal facteur à l'origine de la diminution du SWC dans le bassin versant de l'Ouergha. Les précipitations montrent une corrélation significative avec le débit et la SWC, de r=0.75 et r=0.80, respectivement. De plus, la quantité d'évaporation du sol et la transpiration des plantes affectent le cycle de l'eau des plantes.

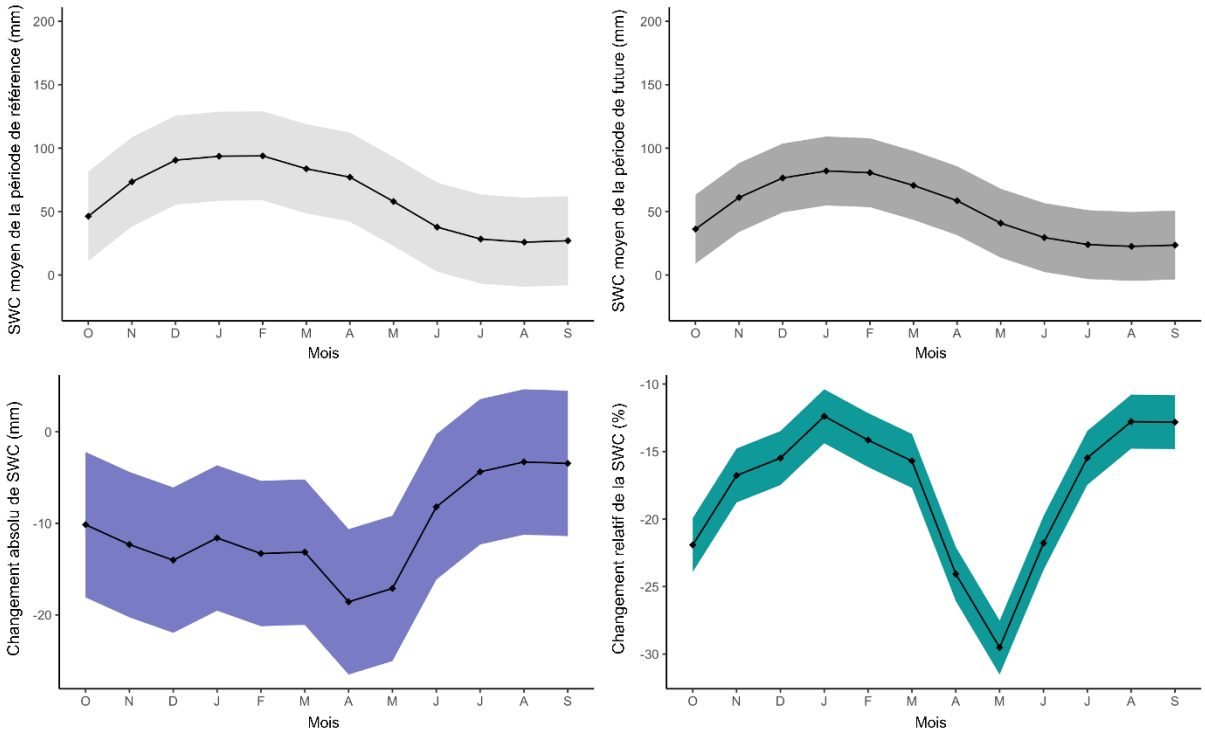


Figure 34. Indicateur de la teneur en eau du sol (SWC) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)

3.3.3. Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'ETP est une composante essentielle du bilan hydrique et peut entraîner la perte de jusqu'à 90 % des précipitations annuelles dans la région méditerranéenne (Wilcox, et al., 2003). Il est donc important de comprendre la relation entre le climat et le bilan hydrique.

Les changements projetés de l'ETP mensuelle moyenne au niveau du bassin versant de l'Ouergha sont présentés dans la Figure 35. A l'échelle saisonnière, l'augmentation de la ETP varie de +7% à +15% en automne, +17% à +11% en hiver, +15% à +5% au printemps, et +5% à +6% en été. À l'échelle annuelle, les résultats indiquent une tendance positive qui devrait se poursuivre dans le futur, dépassant +12% par an. En outre, le changement de l'ETP a été fortement affecté par la température et la saisonnalité, où la relation entre ces deux variables avait une corrélation positive de 0,96.

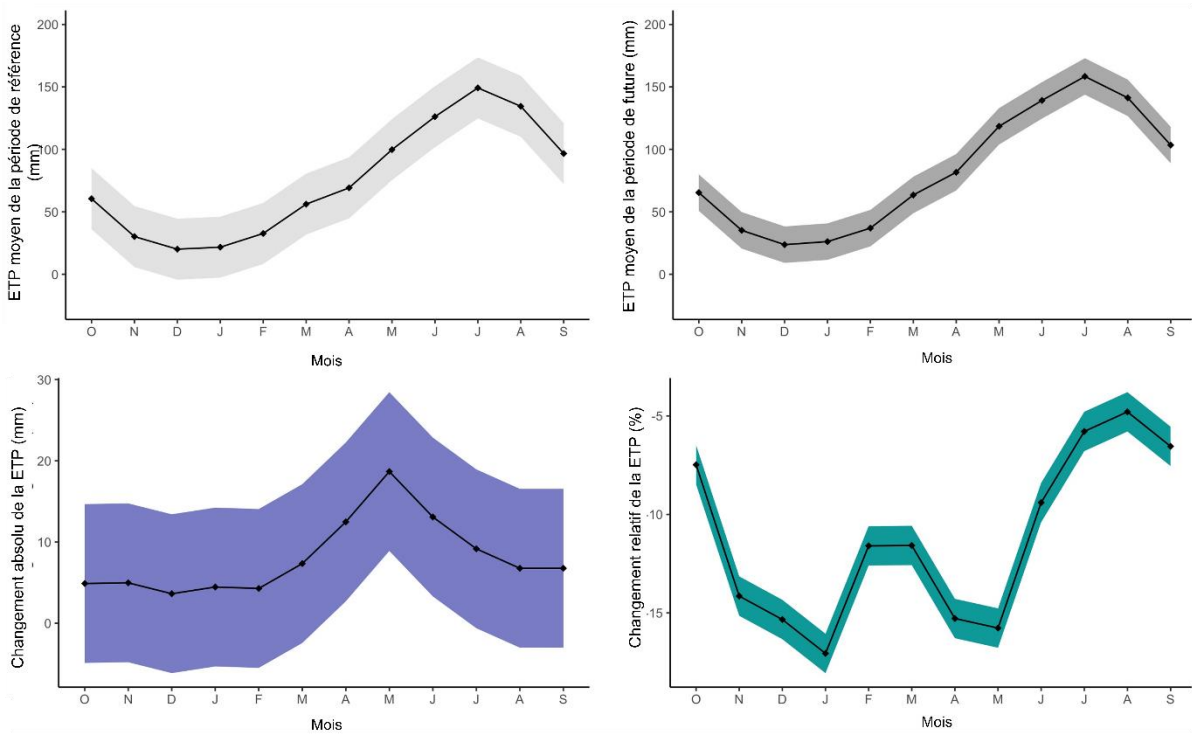


Figure 35. Indicateur d'évapotranspiration potentielle (ETP) dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)

3.3.4. L'amplitude de la durée des débits extrêmes

L'L'augmentation de la fréquence des débits faibles dans le bassin versant de l'Ouergha est susceptible d'avoir un impact négatif sur l'approvisionnement en eau de la région. Cette étude a examiné les variations des débits extrêmes sur différentes durées.

Cette étude a pris en compte les débits maximums et minimums annuels sur différentes périodes (1, 3, 7, 30 et 90 jours). La valeur moyenne de l'ENS a été calculée à l'aide de la moyenne mobile des simulations SWAT quotidiennes pour les périodes de référence et future. La valeur moyenne de l'ENS est calculée à l'aide de l'équation 18, et son incertitude associée est donnée par $\Delta v \pm \delta\Delta v$, où $\delta\Delta v$ est estimé à l'aide de l'équation 19.

La figure 36 montre que les magnitudes des débits minimums et maximums pour les périodes future et de référence sont susceptibles de diminuer dans les années 2080 dans le bassin versant de l'Ouergha. L'impact de l'augmentation de la durée du débit était plus prononcé pour les durées de 1 à 90 jours. La réduction la plus importante était attendue pour les minimums sur 90 jours, avec une moyenne de 43,5 %. À mesure que la durée du débit augmente, l'intensité de la réduction diminue progressivement. Les variations des débits extrêmes annuels suggèrent que la fréquence et l'amplitude des débits extrêmes sont susceptibles de diminuer à l'avenir dans le bassin versant de l'Ouergha.

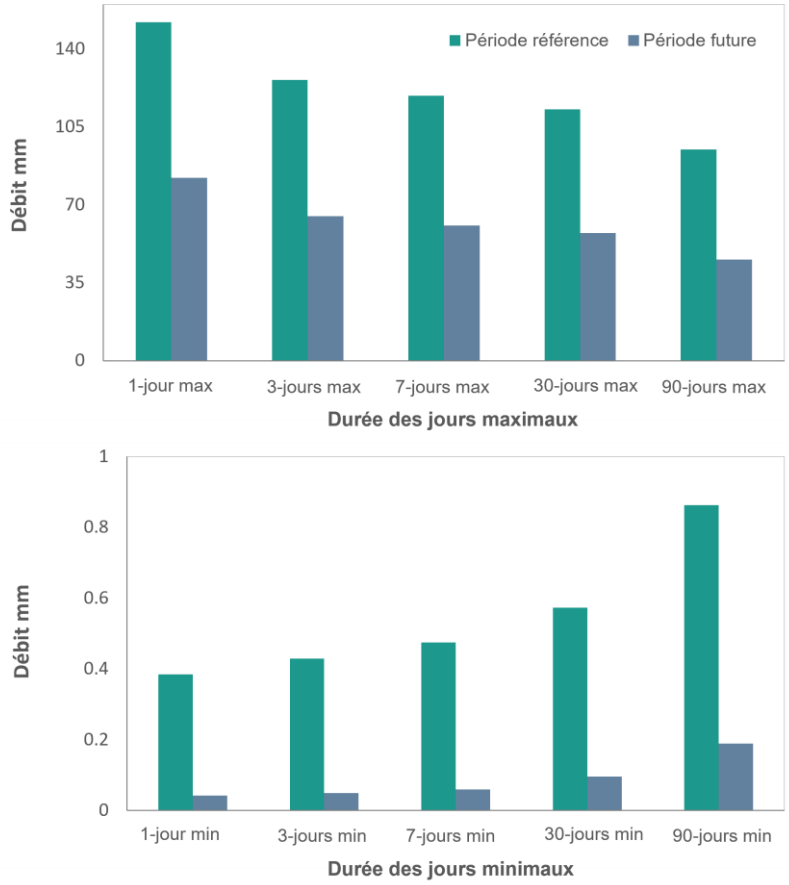


Figure 36. Variations des débits extrêmes minimums et maximums pour différentes durées dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080)

3.3.5. Durée des débits extrêmes

Cette étude vise à explorer la possibilité de changements dans la chronologie des débits annuels extrêmes entre la période de référence et la période future en raison des conditions climatiques changeantes dans le bassin versant. Cette analyse a été réalisée en se basant sur la date julienne moyenne des débits annuels minimum et maximum. La durée des débits annuels n'est présentée qu'en termes de durée de 1 jour, 30 jours et 90 jours. Cette méthode facilite une interprétation facile et permet d'afficher les débits annuels de manière simple et pratique.

Malgré les changements projetés dans l'amplitude des débits, la durée moyenne des débits extrêmes annuels dans le bassin versant de l'Ouergha présente un changement important. Par exemple, dans le futur, le débit minimal annuel sur 90 jours dans le bassin versant de l'Ouergha devrait se produire pendant les saisons d'automne et d'hiver, tandis que le débit maximal est prévu pour les saisons de printemps et d'été (Figure 37).

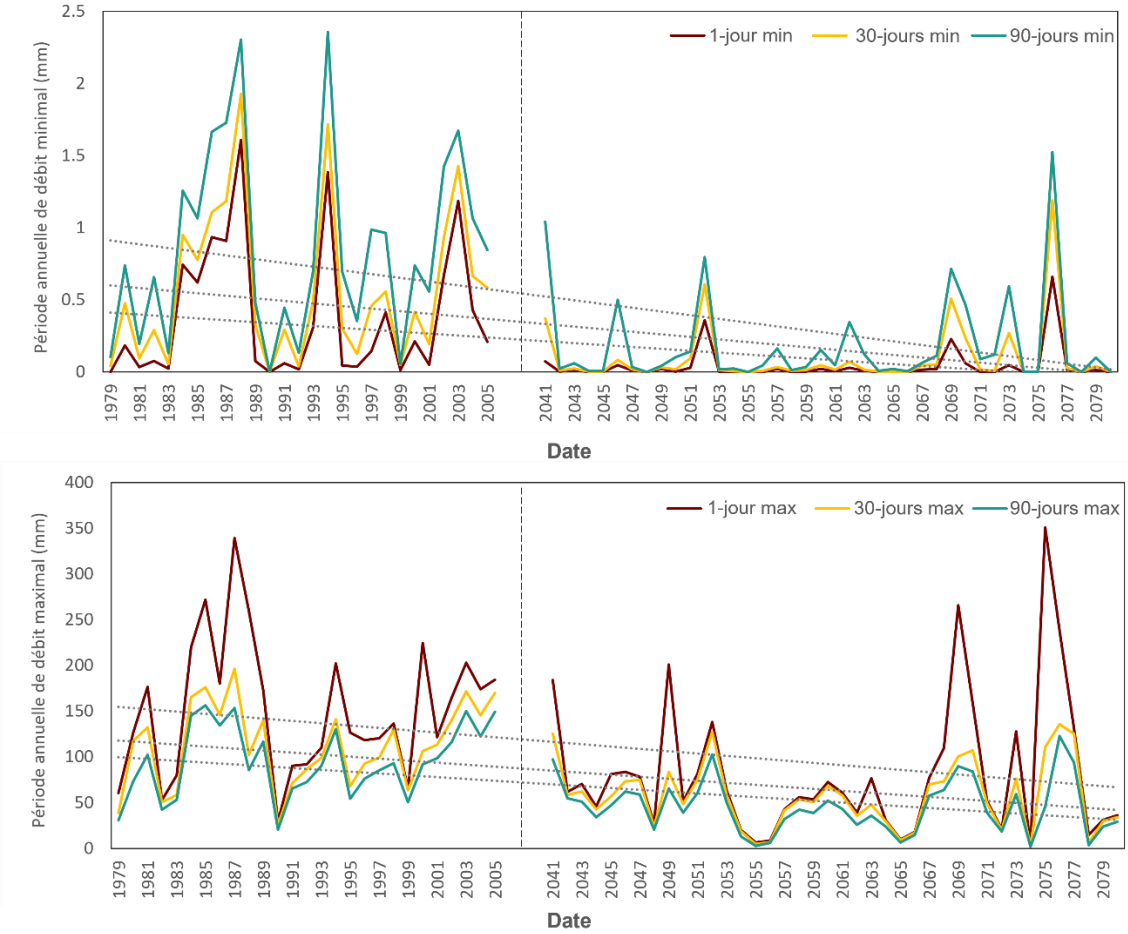


Figure 37. Le calendrier annuel des débits minimum et maximum sur 1 jour, 30 jours et 90 jours dans le bassin versant de l'Ouergha pour les périodes de référence (1979-2005) et futures (2041-2080)

4. Discussion

La collecte de données provenant de diverses sources, telles que les ressources terrestres et hydriques ainsi que les schémas météorologiques, est nécessaire pour développer des modèles capables de prédire les effets du changement climatique sur divers aspects de la population humaine et de l'environnement. Ces modèles sont ensuite utilisés pour aborder la gestion des ressources en eau et l'agriculture. La modélisation des processus hydrologiques liés au changement climatique est améliorée lorsque les données collectées par les modèles climatiques mondiaux à grande échelle sont réduites à des niveaux plus fins. Cela facilite l'analyse des données et le développement de prédictions efficaces. Parmi les facteurs les plus importants pris en compte par un modèle hydrologique lors de l'élaboration de ses modèles, on trouve la disponibilité des données de précipitations. Ainsi, si les données de précipitations ne sont pas d'une qualité suffisamment élevée, cela peut entraîner une incertitude dans les prédictions de débit du modèle et de gestion des ressources en eau. Par conséquent, la qualité des données collectées est très importante dans le développement du modèle SWAT. Cette étude a évalué les changements projetés dans les conditions climatiques et les indicateurs du bilan hydrique sur les périodes de référence (1979-2005) et future (2041-2080) selon le scénario d'émissions RCP4.5.

Dans cette étude, les précipitations projetées ont tendance à diminuer et sont associées à une plus grande incertitude, en particulier pendant les périodes humides (d'octobre à mars). Comparées aux précipitations, les changements de température dans le bassin versant sont également associés à des incertitudes qui sont présentes à la fois pendant les périodes humides et sèches. Ce résultat est cohérent avec de nombreuses études menées dans le bassin méditerranéen (par exemple, Ludwig, et al., 2011; La Jeunesse, et al., 2016; IPCC, 2021; Martínez-Salvador, 2021) et en particulier avec des études réalisées dans différents bassins versants au Maroc. Par exemple, Balhane et al. (2022) ont analysé les changements projetés de température et de précipitations dans le nord du Maroc en utilisant trois ensembles de modèles (NEXGDDP, Euro-cordex et Euro-cordex ajusté pour corriger les biais) avec les deux scénarios d'émissions considérés (RCP4.5 et RCP8.5) pour la période 2071-2100, par rapport à la période historique 1971-2005. Ainsi, les trois ensembles de modèles ont projeté qu'à la fin du siècle, la température augmenterait d'environ 1,5 à 3°C. Le réchauffement varierait en fonction de la localité et du modèle, tandis que les précipitations annuelles diminueraient. Euro-CORDEX prévoit les plus fortes diminutions, avec un changement variant de 20% à 40%. Selon Harraki et al. (2020), on s'attend à une augmentation des températures au Maroc de 1 à 2°C, de 2 à 3°C

et de 4 à 7°C pour un réchauffement de 1,5, 2 et 4°C, respectivement. Les précipitations diminueraient de - 20 % à - 40 % pour un réchauffement de 4 °C au nord du Maroc. L'étude de Mahdaoui et al. (2023) a utilisé les projections du modèle climatique CanESM2 sur le bassin versant de Bouregreg. Elle a montré que les précipitations annuelles et saisonnières diminueraient en hiver et en automne. En revanche, la température moyenne augmenterait pendant les saisons d'été et de printemps selon les scénarios RCP4.5 et 8.5.

Les saisons pluvieuses contribuent également de manière significative au volume global d'approvisionnement en eau et à la répartition saisonnière dans le bassin versant. Les débits futurs seront influencés par la diminution de la fréquence et de la quantité de précipitations (Orkodjo, et al., 2022). Cependant, lors de l'évaluation des effets du changement climatique sur une région, il est important d'identifier et de cartographier les indicateurs hydrologiques qui peuvent couvrir les différentes composantes d'un régime d'écoulement. Bien qu'il existe une vaste littérature sur les différents aspects d'un régime d'écoulement, l'évaluation des effets du changement environnemental sur une région fait encore défaut en ce qui concerne la chronologie, la fréquence, la durée et l'ampleur des débits extrêmes et d'autres facteurs du bilan hydrique.

Dans la présente étude, nous avons exploré les débits futurs, la SWC et l'ETP. La relation examinée entre les précipitations prédites et le débit a montré un coefficient de corrélation positif élevé de 0,75, significatif à 0,5%. Ce résultat indique que la diminution des précipitations affecte significativement le débit du bassin versant de l'Ouergha. Par conséquent, les résultats de cette étude soutiennent les projections fournies par d'autres études, qui ont prédit une diminution du débit qui pourrait dépasser 15% (Rocha et al. 2020, Marras et al. 2021).

Il est prévu que la SWC diminue significativement à moins ou plus de 15% dans le bassin versant de l'Ouergha sur une base annuelle et saisonnière (Figure 36). La réduction des précipitations projetées a été le principal facteur de la diminution du SWC dans le bassin versant de l'Ouergha. Les précipitations ont montré une corrélation significative avec le débit et la teneur en eau du sol (SWC), de r=0,75 et r=0,80, respectivement. En outre, la quantité d'évaporation du sol et la transpiration des plantes affectent le cycle de l'eau des plantes. Plusieurs études ont identifié différents facteurs qui affectent l'humidité du sol, tels que la température, la couverture végétale et le type de sol. Par exemple, Mohamed et al. (2018) ont utilisé des SIG et le modèle SWAT pour évaluer la teneur en humidité du sol dans la région de Wadi Al-Naft en Irak et ont constaté que les zones de faible élévation, de pentes abruptes et de

forte densité de drainage ont la SWC la plus basse. Ceci est similaire au bassin versant de l'Ouergha qui a une prédominance d'argile et la présence de couches désagrégées de marne et de schiste qui augmentent l'imperméabilité du bassin.

D'autres études, telles que Heinrich & Gobiet (2011), Houle (2012), Ramos & Martínez Casasnovas (2014), Zare et al. (2022), et Leij (2022), ont également étudié les effets de différents facteurs sur la SWC. Ces études ont trouvé que les périodes sèches et l'augmentation de la température peuvent réduire la teneur en humidité du sol, tandis que les périodes humides peuvent l'augmenter. La couverture végétale peut également influencer la teneur en eau du sol en modifiant les taux d'évapotranspiration et la capacité d'infiltration du sol. Le type de sol et la topographie peuvent affecter l'humidité du sol en régulant les taux d'infiltration et de drainage d'eau. Karakoyun & Kaya (2022) ont utilisé le modèle SWAT pour simuler et prédire la réponse hydrologique et l'érosion du sol du bassin de la rivière Murat en Turquie. Bien que l'étude ne se soit pas spécifiquement concentrée sur la SWC, les résultats suggèrent que les changements d'occupation/utilisation des terres, en particulier la conversion de zones forestières en terres agricoles, peuvent avoir un impact significatif sur l'érosion du sol et la réponse hydrologique, ce qui peut à son tour affecter la SWC en modifiant les taux d'infiltration et d'écoulement en surface.

Les changements prévus dans la ETP mensuelle moyenne du bassin versant de l'Ouergha sont présentés dans la Figure 37. Sur une base annuelle, les résultats indiquent une tendance positive qui devrait se poursuivre à l'avenir, dépassant +12% par an. En outre, le changement de la ETP a été fortement affecté par la température et la saisonnalité, où la relation entre ces deux variables avait une corrélation positive de 0,96. Plusieurs études menées dans différentes zones de la Méditerranée ont projeté que l'évapotranspiration potentielle (ETP) est susceptible d'augmenter d'ici la fin du siècle, ce qui aurait des impacts significatifs sur la demande en eau, la disponibilité de l'eau et le rendement agricole (Lovelli, et al. 2012, Aouissi, et al. 2016, Mostafa, et al. 2021, Pulighe, et al. 2021). Ces études, qui ont utilisé le modèle SWAT, sont en accord avec nos résultats. L'augmentation projetée de l'ETP est principalement attribuée à l'augmentation des températures, qui devraient entraîner une plus grande perte d'eau par évapotranspiration, entraînant ainsi une diminution de la disponibilité de l'eau pour l'agriculture. Cela conduirait, à son tour, à une augmentation du stress hydrique et à une réduction des rendements des cultures dans les zones concernées. Bien que la relation entre le forçage climatique et l'écoulement soit comprise, les résultats mettent en évidence la forte

corrélation entre les indicateurs hydriques avec la diminution des précipitations et l'augmentation de la température.

En ce qui concerne les changements dans les débits extrêmes annuels, il est suggéré que la fréquence et l'ampleur des débits extrêmes sont susceptibles de diminuer dans l'avenir dans le bassin versant de l'Ouergha. La réduction des débits minimum et maximum annuels peut avoir des effets néfastes sur les opérations de barrage et les mesures de conservation de l'eau. Par exemple, le calendrier des débits d'eau des barrages peut être ajusté à l'avenir en raison de la diminution des débits annuels. La durée des débits annuels est présentée uniquement en termes de périodes de 1 jour, 30 jours et 90 jours. Cette méthode facilite l'interprétation et affiche les débits annuels de manière simple et pratique.

L'impact de l'augmentation de la durée de débit était plus prononcé pour une durée de 1 jour à 90 jours. La réduction la plus critique était attendue pour les minima de 90 jours avec une moyenne de 43,5%. Les résultats indiquent que la réduction des écoulements saisonniers est progressive et cohérente avec l'extension de la durée d'écoulement. À mesure que la durée d'écoulement augmente, l'intensité de la réduction diminue progressivement. Les changements dans les écoulements annuels extrêmes suggèrent que la fréquence et l'ampleur des écoulements extrêmes sont susceptibles de diminuer à l'avenir dans le bassin versant de l'Ouergha.

Les résultats de cette étude sont cohérents avec d'autres études menées sur les débits extrêmes dans la région méditerranéenne, telles que Forzieri et al. (2014) et Tramblay et al. (2020), qui ont également constaté que les changements dans les caractéristiques des écoulements de cours d'eau sont liés aux faibles débits, tels que la durée, la gravité et la fréquence de la sécheresse. Satoh (2022) suggère en outre que les sécheresses hydrologiques à l'avenir devraient se produire plus tôt dans l'année et avec une gravité accrue par rapport aux relevés historiques en raison de l'augmentation des températures et de la diminution de l'accumulation de neige dans les zones montagneuses. Ces résultats sont en ligne avec l'étude de De Girolamo et al. (2022), qui indique un décalage dans le temps des écoulements maxima et minima dans un bassin méditerranéen en raison des changements dans les modèles de précipitation et les taux d'évapotranspiration.

Malgré les changements projetés en termes d'ampleur, le moment moyen des flux annuels extrêmes dans le bassin versant de l'Ouergha montre un changement significatif. Par exemple, dans le futur, le débit annuel minimum de 90 jours dans le bassin versant de l'Ouergha devrait

se produire pendant les saisons d'automne, tandis que le débit maximum devrait se produire pendant les saisons de printemps et d'été. Cela peut être considéré comme un changement de saisonnalité ou un changement dans les mois pluvieux.

Par exemple, Satoh et al. (2022) ont constaté que le moment des sécheresses hydrologiques sans précédent est susceptible de se déplacer vers les mois précédents dans plusieurs régions du monde, y compris la Méditerranée. Tramblay et al. (2020) ont souligné les défis de l'évaluation de la sécheresse dans la région méditerranéenne dans les scénarios climatiques futurs, en raison des interactions complexes entre la précipitation, l'évapotranspiration et l'humidité du sol. De Girolamo et al. (2022) ont montré que le changement climatique devrait réduire la durée et la fréquence des événements de débit élevé dans un bassin méditerranéen en Italie, tout en augmentant les événements de faible débit. Ces résultats sont cohérents avec les résultats de cette étude, qui indiquent également un changement dans le moment des flux annuels extrêmes dans le bassin versant de l'Ouergha dans les scénarios climatiques futurs.

5. Conclusion

Le bassin versant de l'Ouergha est connu pour sa production agricole, qui dépend de l'approvisionnement en eau des barrages, notamment lors des périodes de sécheresse. Cependant, la sécurité des barrages est importante en raison de l'impact potentiel du changement climatique sur leur vulnérabilité structurelle, y compris les changements de débit, l'envasement et les conditions météorologiques extrêmes. Cette étude vise à étudier les changements projetés dans le régime d'écoulement du bassin versant de l'Ouergha. Les changements et les incertitudes associées ont été évalués à l'aide du modèle hydrologique SWAT avec une série de projections de modèles climatiques. L'impact de ces changements a été quantifié à l'aide d'une série d'indicateurs hydro-climatiques.

Les résultats révèlent que les effets du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de l'Ouergha au cours de la période future (2041-2080) sont importants et doivent être sérieusement pris en compte par les organismes de gestion des ressources en eau. Les précipitations et le débit devraient diminuer de 14% et 8%, respectivement, d'ici la fin du siècle. De plus, l'étude indique que le changement climatique devrait provoquer des sécheresses prolongées et intenses dans le futur (2041-2080), car la température et le ETP devraient augmenter de 1 à +3 °C et de 1,5 à 16 %, respectivement.

De plus, l'étude a montré qu'une diminution des précipitations affectera inévitablement de manière drastique le cycle de l'eau dans la région du bassin versant de l'Ouergha. La corrélation de Pearson a montré une forte relation entre les précipitations et le débit, ainsi qu'entre les précipitations et la teneur en eau du sol, avec un coefficient de r=0,75 pour le débit et r=0,80 pour la teneur en eau du sol. De plus, la corrélation entre la température et l'évapotranspiration était très forte (0,96). Ainsi, une diminution des précipitations affectera inévitablement de manière drastique le cycle de l'eau dans la région du bassin versant de l'Ouergha. De plus, l'étude a indiqué que la teneur en eau du sol devrait diminuer considérablement, et que la réduction des précipitations projetées est le principal facteur de cette diminution. De plus, l'augmentation de l'ETP devrait se poursuivre à l'avenir, dépassant +12% par an.

En ce qui concerne l'ampleur des débits extrêmes, une nette diminution est observée pour les hautes et basses eaux pour différentes durées considérées dans cette étude, soit 1, 7, 30 et 90 jours. De plus, pour les différentes durées (1, 30 et 90 jours) des débits extrêmes prévus, le débit minimum de 90 jours est attendu pendant les saisons d'hiver et d'automne dans le bassin, tandis que le débit maximum est attendu au printemps et en été. Le principal résultat de cette étude est certainement ce changement important de saisonnalité, qui devrait se produire dans la seconde moitié du siècle.

L'importance de cette étude réside dans son approche innovante pour évaluer l'influence potentielle du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de l'Ouergha, en particulier en utilisant le scénario RCP 4.5. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour informer la prise de décision dans le domaine concerné, en particulier dans le secteur agricole. Cependant, les incertitudes associées à l'ampleur de la variation du débit, en particulier pendant les périodes humides, doivent encore être évaluées. De plus, l'étude s'est uniquement concentrée sur un scénario, et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour explorer l'impact d'autres scénarios sur l'hydrologie du bassin versant de l'Ouergha. Ces résultats confirment que la région est un point chaud du changement climatique et identifient la nécessité de recherches supplémentaires pour prendre des mesures d'adaptation urgentes.

Synthèse de la partie III

Le modèle SWAT a été appliqué avec succès dans le bassin versant de l'Ouergha, fournissant des résultats précis pour la plupart des stations hydro-climatiques présentes dans le bassin. Une bonne performance des processus hydrologiques a été obtenue par la calibration et la validation dans 13 sous-bassins. Cette évaluation peut aider à déterminer les utilisations appropriées des terres et les mesures de conservation des sols pour le bassin, afin de minimiser les impacts de la dégradation des terres, de limiter les problèmes d'inondation.

L'étude examine également les changements prévus dans le régime d'écoulement du bassin versant de l'Ouergha en raison du changement climatique. Les résultats révèlent que les effets du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de l'Ouergha au cours de la période 2041-2080 seront significatifs et doivent être sérieusement pris en compte par les agences de gestion des ressources en eau. Les précipitations et le débit devraient diminuer de 14 % et 8 %, respectivement, d'ici la fin du siècle. En outre, l'étude indique que le changement climatique devrait provoquer des sécheresses prolongées et intenses à l'avenir, la température et l'évapotranspiration devant augmenter de 1 à +3°C et de 1,5 à 16%, respectivement.

Sur la base des résultats, les recommandations suivantes peuvent être prises en considération par les gestionnaires et les utilisateurs des ressources en eau pour gérer les ressources du bassin versant de l'Ouergha en tenant compte de l'impact du changement climatique et de la diminution attendue des précipitations et du débit.

- Mettre en œuvre des stratégies de gestion de la sécheresse pour faire face aux sécheresses prolongées et intenses prévues dans le bassin versant de l'Ouergha. Cette mesure est d'une importance majeure, soutenue par les résultats spécifiques de notre étude sur les diminutions prévues des précipitations et des débits dans le bassin de l'Ouergha. En conséquence, il est impératif d'élaborer des plans de gestion spécifiques pour optimiser l'utilisation des ressources en eau disponibles et garantir leur accessibilité pendant les périodes de sécheresse.
- Élaborer des plans d'action spécifiques à la gestion de l'eau au niveau du bassin versant de l'Ouergha pour atténuer les effets de la sécheresse, en prenant en compte l'augmentation prévue de la température et de l'évapotranspiration.

- Entretenir régulièrement les systèmes d'irrigation existants, en particulier pendant les mois d'été, lorsque les cultures dépendent fortement de l'irrigation due aux températures élevées et aux précipitations limitées, en veillant à ce que les cultures reçoivent suffisamment d'eau pour compenser les pertes causées par l'évapotranspiration accrue.
- Réaliser une évaluation approfondie des utilisations des terres dans le bassin versant de l'Ouergha pour déterminer les mesures de conservation des sols afin de comprendre l'impact des activités humaines sur la qualité des sols, l'érosion, la biodiversité et la durabilité de l'écosystème. Les résultats de cette évaluation sont essentiels à la mise en place de mesures appropriées de conservation des sols. Cela nécessitera d'identifier les zones nécessitant une préservation ou une restauration, de proposer des techniques de gestion des sols adaptées aux conditions spécifiques du bassin versant de l'Ouergha.
- Mettre en place des réglementations et/ou des incitations adaptées aux conditions socio-économiques et environnementales du bassin versant de l'Ouergha, dans le but de promouvoir l'adoption de techniques agricoles respectueuses de l'environnement afin d'assurer une production alimentaire suffisante et de qualité, tout en préservant les ressources naturelles pour les générations futures.
- Favoriser la plantation d'arbres et la restauration des écosystèmes pour protéger les sols et réduire les risques d'érosion.
- Intégrer la diminution attendue des précipitations et du débit dans la planification de la gestion des ressources en eau.
- Explorer des options telles que la réutilisation des eaux usées traitées et la conservation de l'eau pour compenser la diminution des ressources en eau.
- Utiliser des modèles pour évaluer et quantifier la capacité de stockage d'eau des barrages dans le bassin versant de l'Ouergha.
- Examiner la possibilité d'améliorer les infrastructures existantes pour augmenter la capacité de stockage.
- Mener régulièrement un suivi des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha pour surveiller les changements des conditions hydro-climatiques.
- Mettre à jour les stratégies de gestion en fonction des nouvelles données et des tendances observées.

- Favoriser la collaboration entre les différentes parties prenantes, notamment le gouvernement, les communautés locales et le secteur privé, pour une gestion durable des ressources en eau.
- Établir des partenariats public-privé pour promouvoir des initiatives de gestion de l'eau efficaces et innovantes.
- Impliquer activement les communautés locales dans la prise de décision et la mise en œuvre des mesures de gestion de l'eau, en tenant compte de leurs connaissances traditionnelles et de leur expertise locale.

Conclusion générale et perspectives

1. Conclusion générale

L'objectif de cette thèse était d'étudier les défis liés à la gestion des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha, situé dans le nord du Maroc. Pour atteindre cet objectif, une méthodologie a été mise en place, basée sur une approche qui intègre l'analyse spatio-temporelle de la sécheresse, des enquêtes menées auprès des acteurs concernés, ainsi que la modélisation hydro-climatique et les prévisions futures.

Le premier objectif était d'évaluer les tendances et les schémas spatiaux de la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha en utilisant l'indice d'oscillations atmosphériques (NAOi et WeMoi), les indices de sécheresse météorologique (SPI) et hydrologique (SDI), des données multi-sources provenant de relevés hydro-climatiques locaux et de la télédétection (NDVI et NDMI). Les schémas de circulation atmosphérique, représentés par l'indice d'oscillation nord-atlantique (NAOi) et l'indice d'oscillation ouest-méditerranéenne (WeMoi), ont une influence significative sur l'occurrence de la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha. En combinant les indices de sécheresse météorologique (SPI) et hydrologique (SDI) avec des données multi-sources, y compris la télédétection, une évaluation complète de la vulnérabilité à la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha a pu être réalisée. Les résultats ont montré que la NAOi et la WeMoi influencent toutes deux la variabilité climatique dans le bassin versant de l'Ouergha, mais la WeMoi est mieux corrélée que la NAOi avec l'indice SPI de l'Ouergha, d'octobre à mars avec une corrélation négative plus importante de $|r| < -0,60$, à l'exception des mois de juillet et août. Cependant, l'importante corrélation négative entre SPI et WeMoi peut être due au fait que la sécheresse est principalement associée à l'indice WeMoi. Aussi, les sécheresses météorologiques et hydrologiques apparaissent la même année, mais avec différentes intensités dans les différentes zones du bassin versant de l'Ouergha. L'étude a mis en évidence la distribution spatiale des impacts de la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouergha, les régions est et sud étant plus vulnérables. La présence de barrages a été identifiée comme un facteur bénéfique pour la végétation, et l'étude a souligné le rôle de la variabilité des précipitations dans l'influence de la densité de la végétation.

Le deuxième objectif était d'explorer la gestion de l'eau dans les zones rurales par les acteurs et les institutions selon différentes approches, en mettant en relation les différentes perceptions des caractéristiques socio-économiques, politiques, environnementales et techniques. Les résultats ont montré la nécessité d'une approche holistique et intégrée de la gestion des ressources en eau, axée sur une communication efficace, la gouvernance et le

développement d'infrastructures durables. Il semblerait que le manque de communication entre les gestionnaires de l'eau et les agriculteurs entraîne des difficultés dans la mise en œuvre de pratiques efficaces de gestion de l'eau au niveau local. Cette situation est exacerbée par les conflits de pouvoir entre les institutions responsables de la gestion de l'eau dans le bassin versant d'Ouergha. Il a été également observé que les objectifs fixés pour la gestion de l'eau d'irrigation dans le périmètre d'irrigation de Sahla, adjacent à barrage Sahla, n'ont pas été atteints, malgré le fonctionnement de l'Association d'Usagers de l'Eau Agricole (l'AUEA) sur une longue période.

Le troisième objectif était d'évaluer les changements prévus dans les débits du bassin versant de l'Ouergha et de quantifier les impacts du changement climatique sur les ressources en eau à l'aide d'indicateurs hydro-climatiques. Le changement climatique entraînera des modifications des conditions hydro-climatiques, notamment des modifications des précipitations, du débit, de la teneur en eau du sol, de la température et de l'évapotranspiration.

Les résultats ont montré que les précipitations projetées ont tendance à diminuer et sont associées à une plus grande incertitude, en particulier pendant les périodes humides (octobre à mars), ce qui affectera augmentera la variabilité des ressources disponibles. Par rapport aux précipitations, les changements de température dans le bassin versant sont associés à des incertitudes qui sont cohérentes dans les périodes humides et sèches.

De plus, les résultats indiquent aussi que la diminution des précipitations affecte significativement le débit et la teneur en eau du sol (SWC) dans le bassin versant de l'Ouergha avec une corrélation significative, de r=0,75 et r=0,80, respectivement. Les changements prévus dans l'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle moyenne du indiquent une tendance positive qui devrait se poursuivre à l'avenir, dépassant +12% par an. En outre, le changement de l'ETP a été fortement affecté par l'évolution de la température au cours des différentes saisons, où la relation entre ces deux variables avait une corrélation positive de 0,96. Bien que ces tendances projetées soient cohérentes avec d'autres études qui ont été menées dans les bassins versants méditerranéens, l'ampleur des altérations hydrologiques indique que le bassin versant de l'Ouergha est sujet à une altération hydrologique significative due au changement climatique qui nécessite d'être anticipée notamment pour le secteur agricole, secteur économique majeur de cette région du Maroc et fortement dépendant de l'accès à l'irrigation.

2. Perspectives

L'étude souligne la nécessité d'une gestion des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha, dans la mesure où la région est vulnérable aux impacts du changement climatique, notamment en termes de sécheresse. Les résultats de l'étude indiquent qu'il existe une tendance à la diminution des précipitations et à l'augmentation de l'incertitude, en particulier pendant les périodes humides. Ceci, à son tour, peut conduire à des impacts négatifs sur la végétation et l'agriculture dans la région.

A l'issue de ce travail, basé sur un ensemble de travaux précédents, nous souhaitons que le résultat de ce travail ouvre des perspectives supplémentaires et constitue une base pour des recherches ultérieures, tant sur le plan fondamental que sur le plan des méthodes d'étude de différents points de vue.

Les perspectives de la thèse reposent sur les résultats de l'étude actuelle qui a évalué les défis de la gestion des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha et a identifié les défis futurs auxquels le bassin pourrait être confronté. Pour compléter cette recherche, il serait pertinent de regarder l'impact du changement climatique sur le fonctionnement des barrages et en lien avec les périmètres irrigués. Cette étude approfondie permettra de mieux comprendre comment les barrages existants peuvent faire face aux aléas de sécheresse et de préciser le rôle des barrages en cours de construction, tels que Sidi Abbou et Ratba.

Un autre axe de développement pourrait concerner l'adoption d'une approche de gestion participative impliquant les communautés locales, les Organisations non gouvernementales (ONG), les institutions de recherche et les autorités locales. En effet, cette approche collaborative apparaît aujourd'hui essentielle pour promouvoir des solutions de gestion durable des ressources en eau. En impliquant activement les parties prenantes, il sera possible de développer des solutions adaptées aux besoins spécifiques de la région, de renforcer la résilience communautaire et de promouvoir la prise de décision collective qui sera donc beaucoup plus aisément adoptée localement. La mise en place de forums de dialogue et de structures de gouvernance multi-acteurs favoriserait une collaboration, un échange d'informations et une recherche de solutions.

Par ailleurs, il serait pertinent d'explorer le concept du Nexus Eau-Energie-Ecosystème. Ce modèle interconnecte les secteurs de l'eau, de l'énergie et de l'écosystème, mettant en évidence l'importance de la coordination et de la gouvernance pour une utilisation efficace et

durable des ressources en eau, ainsi dénommé WEFE nexus pour Water-Energy-Food-Ecosystem nexus. En examinant les études déjà réalisées sur le concept de WEFE nexus dans des sites méditerranéens, il sera possible de tirer des enseignements précieux sur les meilleures pratiques et les solutions potentielles de gestion intersectorielle et durable des ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha.

Références

Aalirezaei A. Prediction of water security level for achieving sustainable development objectives in Saskatchewan, Canada: Implications for resource conservation in developed economies [Journal] // Journal of Cleaner Production. - 2021. - Vol. 311. - pp. 0959-6526/.

Abbaspour K.C. SWAT-CUP : SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. [Journal] // Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland. - 2015. - p. 100.

Abbaspour K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R., Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT [Journal] // Journal of Hydrology. - 2007. - pp. 333(2-4): 413-430.

ABHS ABHS [Online]. - 2018. - http://www.abhsebou.ma/entretien-des-barrages/.

ABHS Le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau [Report]. - Fès : ABHS, 2015.

Adoho F. & Wodon, Q. Perceptions of Climate Change, Weather Shocks, and Impacts on Households in the MENA region [Report]. - Washington, DC : The World Bank, 2014.

Akbari A. [et al.] Drought Analysis Based on Standardized Precipitation Index (SPI) and Streamflow Drought Index (SDI) in Chenar Rahdar River Basin, Southern Iran [Conference] // Conference: EWRI Watershed Management Symposium 2015At: ASCE Headquarter, Reston, VA, USA. - 2015.

Akhmouch A. and Clavreul D. Assessing and monitoring groundwater governance [Book Section] // Advances in Groundwater Governance / book auth. Karen G. Villholth Elena López-Gunn, Kirstin I. Conti, Alberto Garrido, Jac van der Gun. - London : Advances in Groundwater Governance (1st ed.). CRC Press., 2017.

Antonie ML. and Zaïane O.R. Mining Positive and Negative Association Rules: An Approach for Confined Rules [Book Section] // Knowledge Discovery in Databases: PKDD 2004. PKDD 2004. Lecture Notes in Computer Science(). - Berlin : Springer, 2004. - Vol. 3202.

Aouissi J. [et al.] Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT—Application in data-scarce rural Tunisia [Journal] // Agricultural Water Management. - 2016. - Vol. 174. - pp. 39-51.

Arnold J.G. SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION [Journal] // soc. Agric. Biol. Eng. 55. - 2012.

Arnold J.G. Texas Water Resours [Journal] // Institute Technical Report. - 2011. - p. 365.

Balhane S. [et al.] Changes in mean and extreme temperature and precipitation events from diferent weighted multi-model ensembles over the northern half of Morocco [Journal] // Climate Dynamics. - 2022. - Vol. 58. - pp. 389–404.

Ben Nsir S. [et al.] Assessment of Climate Change Impact on Discharge of the Lakhmass Catchment (Northwest Tunisia) [Journal] // Water. - 2022. - Vol. 14. - p. 2242.

Ben Saad A. [et al.] Hydrological modeling of the watershed of a RAMSAR site using the SWAT model (Ichkeul National Park—Tunisia of the extreme north) [Journal] // Modeling Earth Systems and Environment. - 2023.

Beven K. & Binley, A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction [Journal] // Hydrological Processes. - 1992. - pp. 279-298.

Bhuiyan C. Various Drought Indices for Monitoring Drought Condition in Aravalli Terrain of India [Book]. - [s.l.] : ISPRS Archives – Volume XXXV Part B7, 2004, XXth ISPRS Congress, Technical Commission VII, July 12-23, 2004, Istanbul, Turkey (O. Altan, ed.). International Society for Photogrammetry and Remote Sensing,, 2004.

Bird D.N., et al. Modelling climate change impacts on and adaptation strategies for agriculture in Sardinia and Tunisia using AquaCrop and value-at-risk [Journal] // Science Total Environnment. - 2015. - pp. 1019-1027.

Bouaicha R., Benabdelfadel, A Variabilité et gestion des eaux de surface au Maroc [Journal] // Science et Changements Planetaires - Secheresse 21(4). - 2010. - pp. 325-6.

Boudad B., Sahbi H. and Manssouri I. Analysis of meteorological and hydrological drought based in SPI and SDI index in the Inaouen Basin (Northern Morocco) [Journal]. - [s.l.] : Journal of Materials and Environmental Sciences, 2018. - 1 : Vol. 9. - pp. 219-227.

Bressers H. [et al.] The Governance Assessment Tool and Its Use [Book Section] // Governance for Drought Resilience / book auth. Bressers H., Bressers N. and Larrue C.. - [s.l.] : Springer, Cham., 2016.

Briak H., Mrabet, R. Moussadek, R., Aboumaria, K. Use of a calibrated SWAT model to evaluate the effects of agricultural BMPs on sediments of the Kalaya river basin (North of Morocco) [Journal] // International Soil and Water Conservation Research. - 2019.

Brouziyne & al SWAT streamflow modeling for hydrological components' understanding within an agro-sylvo-pastoral watershed in Morocco. [Journal] // J. Mater. Environ. Sci., 2018, Volume 9, Issue 1, Page 128-138.. - 2017.

Brubaker M., Flensburg S. and Skarada J. Climate Change and Health Effects in the Bristol Bay Region of Alaska: Final Project Synthesis Report. [Report]. - Alaska : Alaska Native Tribal Health Consortium, Center for Climate and Health, 2014.

Calvo-Mendieta I., & Scarwell, H. Chapitre 2. Acteurs de l'eau et gouvernance de l'eau ? [Book Section] // Environnement et gouvernance des territoires : Enjeux, expériences, et perspectives en région Nord-Pas de Calais. / book auth. Kergomard C., Laganier, R., & Scarwell, H.. - [s.l.] : Villeneuve d'Ascq : Presses universitaires du Septentrion, 2008.

CESE La gouvernance par la gestion intégrée [Report]. - [s.l.] : Conseil Economique, Social et Environnemental, 2014.

Christensen O.B. and Kjellström E. Partitioning uncertainty components of mean climate and climate change in a large ensemble of European regional climate model projections [Journal] // Climate Dynamics. - 2020. - Vol. 54. - pp. 4293–4308.

CMConjoncture Centre Marocain de Conjoncture [Online] // CMConjoncture. - Septembre 1, 2021. - https://agriculture.gouv.fr/maroc.

Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd edition) [Book]. - [s.l.] : lawrence erlbaum associates publishers, 1988.

Comtrade UN Comtrade Database [Online]. - 2021. - 2023. - https://comtradeplus.un.org/.

De Girolamo A.M. [et al.] Impact of long-term climate change on flow regime in a Mediterranean basin [Journal] // Journal of Hydrology: Regional Studies. - 2022. - Vol. 41. - p. 101061.

Delgado I.,E., De Rios,R., Perevochtchikova,M., Marin,I.,A., Fuster,R., Marin,V.H., Water governance in rural communities of Chiloé Island, soutern Chile:A multi-level analysis [Journal] // Journal of Rural Studies 83. - 2021. - pp. 236-245.

DEMEMEE Politique du changement climatique au Maroc [Book]. - [s.l.] : Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, 2014. - p. 40.

Didon J., Durand-Delga, M. and Kornprobst J. Homologies géologiques entre les deux rives du détroit de Gibraltar [Book]. - 1973. - Vol. 7 : pp. 77-105.

Döll P. and Zhang J. Impact of climate change on freshwater ecosystems: a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations [Journal] // Hydrology and Earth System Sciences Discuss.. - 2010. - Vol. 7. - pp. 1305–1342.

DREFLCD Programme de lutte anti érosif du bassin versant de l'oued Ouergha [Report]. - [s.l.] : Direction régionale des eaux et forêt et de la lutte contre la désértification, 1995. - p. p. 320..

Driouech F. [et al.] Recent observed country-wide climate trends in Morocco [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Climatology, 2020. - 51 : Vol. 41. - pp. E855-E874.

Driouech F., Ben Rached S. and Al Hairech T. Climate variability and change in north African countries [Book Section] // Climate Change and Food Security in West Asia and North Africa / book auth. Sivakumar M.V.K., Selvaraju, R.L.R. and Hamdan, I.. - 2013.

Driouech F., Ben Rached, S. and Al Hairech, T. Climate variability and change in north African countries [Journal] // In: Sivakumar, M.V.K., Selvaraju, R.L.R. and Hamdan, I. (Eds.) Climate Change and Food Security in West Asia and North. - 2013.

El malki D., Mode de gestion et qualité des ressources en eaux « Cas du périmètre irrigué et bassin versant de Sahla » (Province de Taounate, Maroc) [Report]. - [s.l.] : IAV Hassan II, Rabat, Maroc, 2021.

El Orfi T., et al. Comparaison des données de précipitation satellitaires [Journal] // XXXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Changement Climatique Et Territoires. - 2020. - pp. 271-276.

Ezzine H., Bouziane A. and Ouazar D. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data [Journal] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. - 2014. - Vol. 26. - pp. 36-48.

Fadil A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y., Alami Bachir, O. Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model [Journal] // Journal of Geographic Information System. - October 2011.

Fan M. and Shibata H. Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed northern Japan [Journal] // Ecological Indicators. - 2015. - pp. 79-89.

FAO Climate change and water resources in the Mediterranean region [Report]. - [s.l.] : The CIHEAM watch letter, 2010. - pp. 1-21.

FAO L'irrigation en Afrique en chiffres - Enquête AQUASTAT 2005 [Journal]. - 2005.

Favre P. Analyse quantitative du rifting et de la relaxation thermique de la partie occidentale de la marge transformante nord-africaine : le Rif externe (Maroc). Comparaison avec la structure actuelle de la chaîne [Book]. - [s.l.] : Geodinamica Acta, 1995. - Vol. 8 : pp. 59–81.

Fiseha B.M. [et al.] Impact of climate change on the hydrology of upper Tiber River Basin using bias corrected regional climate model [Journal] // Water Resources Management. - 2014. - Vol. 28. - pp. 1327-1343.

Fonseca A.R., Santos,J.A., Predicting hydrologic flows under climate change: The Tâmega Basin as an analog for the Mediterranean region [Journal] // Science of The Total Environment. - 2019. - Vol. 668. - pp. 1013-1024.

Forzieri G. [et al.] Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe [Journal] // Hydrol. Earth Syst. Sci. - 2014. - 1 : Vol. 18. - pp. 85-108.

Frieler K. et al. A framework for the cross-sectoral integration of multi-model impact projections: Land use decisions under climate impacts uncertainties [Journal] // Earth System Dynamics. - 2015. - Vol. 6. - pp. 447-460.

Frizon de Lamotte D., Andrieux J. and Guezou, J.-C. Cinématique des chevauchements néogènes dans l'Arc bético-rifain : discussion sur les modèles géodynamiques [Book]. - [s.l.] : Bull. Soc. Geol. Fr., 1991. - Vol. 169 : pp. 611–626.

Gilbert R.O. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring. [Book]. - [s.l.] : Wiley, 1987. - p. 336.

Giorgi F. and Mearns L.O. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) Method [Journal] // J. Clim. 15. - 2002. - pp. 1141–1158.

Giorgi F., Jones C. and Asrar G.R. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework [Journal] // World Meteorol. Org. Bull.. - 2009. - 3 : Vol. 58. - pp. 175-183.

Gosselin V. Les effets d'une augmentation du prix de l'eau d'irrigation au Maroc: une étude en modèle d'équilibre général calcuable [Report]. - Ottawa : Direction du Patrimoine de l'édition , 2010. - 978-0-494-88852-0.

Grey D. [et al.] Water security in one blue planet: twenty-frst century policy challenges for science. [Journal] // Philos Trans A Math Phys Eng Sci.. - 2013. - p. 371.

Ha M.T. [et al.] Precipitation frequency in Med-CORDEX and EURO-CORDEX ensembles from 0.44° to convection-permitting resolution: impact of model resolution and convection representation [Journal] // Climate Dynamics. - 2022.

Hachemaoui A. [et al.] Assessment of the hydrological impact of land use/cover changes in a semi-arid basin using the SWAT model (case of the Oued Saïda basin in western Algeria) [Journal] // Modeling Earth Systems and Environment. - 2022. - Vol. 8. - pp. 5611–5624.

Hadri A., Saidi M.E.M. and Boudhar A. Multiscale drought monitoring and comparison using remote sensing in a Mediterranean arid region: a case study from west-central Morocco [Journal] // Arabian Journal of Geosciences. - 2021. - 118 : Vol. 14.

Hanchane M. and Abbou R. Bassin de l'Ouergha: caractérisation de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles et régimes climatiques selon les anomalies de pression au niveau de la mer [Book]. - [s.l.] : Mutations socio-spatiales dans les montagnes rifaines (Maroc) et leurs impacts sur la patrimoineforestier, Ouvgage publié dans le cadre du projet

PICS (UniversitéLe Mans (France) et Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès, Maroc), 2019. - pp. 7-26.

Hänsel S., et al. Assessing seasonal drought variations and trends over Central Europe [Journal] // Advances in Water Resources. - 2019. - pp. Volume 127, Pages 53-75.

Harraki W.E. [et al.] Climate Change Observations and Trends Overview: Focus on Morocco with a Case-Study of A Future Reservoir's Response to Climate Change." E3S Web of Conferences 150: 8. [Conference] // E3S Web of Conferences. - [s.l.] : E3S Web of Conferences, 2020. - Vol. 150. - p. 8. - 01010.

Hattermann F.F., Huang,S., Hagen,K. Climate change impacts on hydrology and water resources [Journal] // Meteorologische Zeitschrift. - 2015. - Vol. 24 . - pp. 201 - 211.

Hayes M.J., Drought Indices. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia, John Wiley & Sons, Inc. [Journal] // Van Nostrand's Scientific Encyclopedia, John Wiley & Sons, Inc.. - 2006.

HCP PROJECTIONS DE LA POPULATION DES REGIONS ET DES PROVINCES 2014-2030 [Report]. - [s.l.] : Centre d'Etudes et de Recherches Démographiques (CERED), 2017.

Heinrich G. and Gobiet A. The future of dry and wet spells in Europe: a comprehensive study based on the ENSEMBLES regional climate models [Journal] // The International Journal of Climatology. - 2011. - 13 : Vol. 32. - pp. 1951-1970.

Hermoso A., Homar, V., Plant, R.S. Potential of stochastic methods for improving convection-permitting ensemble forecasts of extreme events over the Western Mediterranean [Journal] // Atmospheric Research, Volume 257, 105571. - 2021.

Houle D. [et al.] Projections of Future Soil Temperature and Water Content for Three Southern Quebec Forested Sites [Journal] // Journal of climate. - 2012. - 21 : Vol. 25. - pp. 7690–7701.

Hunt E.R. and Rock B.N. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-Infrared Reflectances [Journal]. - [s.l.] : Remote Sensing of Environment, 1989. - 1 : Vol. 30. - pp. 43-54.

Ilmen R., Benjelloun, H., Ouahmane, L., Hakkou, M., Benghazi, M. Preliminary study of winter North Atlantic Oscillation [Journal] // Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie, 2016, n° 38, 43-50. - 2016.

Ilori O.W. and Balogun I.A. Evaluating the performance of new CORDEX-Africa regional climate models in simulating West African rainfall [Journal] // Modeling Earth Systems and Environment. - 2022. - 8. - pp. 665–688.

IPCC Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Journal]. - 2007.

IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Intergovernmental Panel on Climate Change. [Report]. - [s.l.] : IPCC Secretariat, 2013.

IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.) [Report]. - Geneva, Switzerland : IPCC, 2014. - p. 151.

IPCC Climate Change 2021 : The Physical Science Basis [Report]. - [s.l.] : Intergovernmental Panel on Climate Change., 2021.

IPCC Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Report]. - [s.l.] : Cambridge University Press. In Press., 2021. - p. 82.

Jakob Themessl M., Gobiet A. and Leuprecht A. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models [Journal] // International Journal of Climatology. - 2011. - 10 : Vol. 31. - pp. 1530–1544.

Jaouda I., et al. Integrated Environmental Analysis using GIS for Rational Planning of Conservatory Management of Slopes Application in the Ouergha Basin (Morocco) [Journal] // Environmental Energy and Economic Research 3(2). - 2019 . - pp. 107-117.

Kadiri Z. [et al.] Transformation d'une innovation institutionnelle : l'exemple des associations d'usagers des eaux agricoles dans le Moyen Sebou au Maroc [Conference]. - 2008.

Karakoyun E. and Kaya N. Hydrological simulation and prediction of soil erosion using the SWAT model in a mountainous watershed: a case study of Murat River Basin, Turkey [Journal] // Journal of Hydroinformatics. - 2022. - 6 : Vol. 24. - pp. 1175–1193.

Kendall S.B. Enhancement of conditioned reinforcement by uncertainty [Book]. - [s.l.] : Journal of the Experimental Analysis of Behavior, 1975.

Keping Y., Governance and Good Governance: A New Framework [Journal] // Fudan Journal of the Humanities and Social Sciences. - 2018. - pp. 1-8.

Khayyun Thair Sharif, Alwan Imzahim Abdulkareem, Hayder Ali Mohsen Hydrological model for Hemren dam reservoir catchment area at the middle River Diyala reach in Iraq using ArcSWAT model [Journal] // Applied Water Science. - 2019.

Kingston D.G. [et al.] European-Scale Drought: Understanding Connections between Atmospheric Circulation and Meteorological Drought Indices [Journal] // Journal of climate. - [s.l.] : American Meteorological Society, 2015. - 2 : Vol. 28. - pp. 505–516.

Knippertz P., Christoph M. and Speth P. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates [Journal] // Meteorology and Atmospheric Physics. - [s.l.] : 83, 2003. - pp. 67–88.

Koo H., et al. A global sensitivity analysis approach for identifying critical sources of uncertainty in non-identifiable, spatially distributed environmental models: A holistic analysis applied to SWAT for input datasets and model parameters [Journal] // Environmental Modelling & Software, Volume. - 2020. - Vols. 127, 104676.

Krysanova V., et al. How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change [Journal] // Hydrological Sciences Journal, 63:5, . - 2018. - pp. 696-720.

La Jeunesse I. [et al.] Is the governance of the Thau coastal lagoon ready to face climate change? [Journal] // Ocean & Coastal Management. - 2015. - Part B : Vol. 118. - pp. 234-246.

La Jeunesse I. and Quevauviller Ph. Changement climatique et cycle de l'eau, Impacts, adaptation, législation et avancées scientifiques [Book]. - [s.l.] : Tec&Doc, Lavoisier, Paris, 325 p., 2016.

La jeunesse I., Larrue,C., Governance Challenges Facing Hydrometeorological Extreme Events [Book]. - [s.l.] : John Wiley & Sons Ltd., 2019. - pp. 1-22.

Labat D. [et al.] Evidence for global runoff increase related to climate warming [Journal]. - [s.l.] : Advances in Water Resources, 2004. - 6 : Vol. 27. - pp. 631-642.

Labat D. Oscillations in land surface hydrological cycle [Journal]. - [s.l.] : Earth and Planetary Science Letters, 2006. - 1 : Vol. 242. - pp. 143-154.

Lachgar R., Badri W. and Chlaida M. Assessment of future changes in downscaled temperature and precipitation over the Casablanca-Settat region (Morocco) [Journal] // Modeling Earth Systems and Environment volume. - 2021. - 8. - pp. 2123–2133.

Laignel B., et al. Water resources variability in the context of climatic fluctuations on both sides of the Atlantic Ocean [Journal] // IAHS Publ. 340. - 2010. - pp. 612-618.

Lane R.A., et al. Benchmarking the predictive capability of hydrological models for river flow and flood peak predictions across a large-sample of catchments in Great Britain [Journal] // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. - 2019.

Leij F.J., Dane J.H. and Sciortino A. Hierarchical prediction of soil water content time series [Journal] // CATENA. - 2022. - Vols. 209, Part 2. - p. 105841.

Lemus-Canovas M., et al. Combining circulation weather types and daily precipitation modelling to derive climatic precipitation regions in the Pyrenees [Journal] // Atmospheric Research, Volume 220. - 2019. - pp. 181-193.

Lespinas F., Ludwig W. and Heussner S. Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers [Journal] // Journal of Hydrology. - 2014. - Vol. 511. - pp. 403-422.

Liang X.Z. [et al.] Regional climate model downscaling of the US summer climate and future change [Journal] // Journal of Geophysical Research Atmospheres. - 2006. - D10 : Vol. 111. - pp. 1-17.

Linsley R.K., Kohler M.A. and Paulhus J.L.H.: Hydrology for engineers. [Journal]. - 1982.

Lopez-Bustins Joan A. and Lemus-Canovas Marc The influence of the Western Mediterranean Oscillation upon the spatio-temporal variability of precipitation over Catalonia (northeastern of the Iberian Peninsula) [Journal]. - [s.l.] : Atmospheric Research, 104819, ISSN 0169-8095, 2020. - Vol. 236.

Lotsch A., et al. Response of terrestrial ecosystems to recent Northern Hemispheric drought [Journal] // Geophysical Research Letters, Volume 32, Issue 6. - 2005.

Lovelli S. [et al.] Future Climate Change in the Mediterranean Area: Implications for Water Use and Weed Management [Journal] // Italian Journal of Agronomy. - 2012. - 1 : Vol. 7.

Ludwig R. [et al.] The role of hydrological model complexity and uncertainty in climate change impact assessment [Journal] // Advances in Geosciences. - 2009. - Vol. 21. - pp. 63–71.

Ludwig R. [et al.] Towards an inter-disciplinary research agenda on climate change, water and security in Southern Europe and neighboring countries [Journal] // Environmental Science and Policy. - 2011. - 7 : Vol. 14. - pp. 794-803.

Ludwig R. and Roson R. Climate change, water and security in the Mediterranean: Introduction to the special issue [Journal] // Science of The Total Environment. - 2016. - Vols. Volume 543, Part B. - pp. 847-850,.

Luppichini M. [et al.] Statistical relationships between large-scale circulation patterns and local-scale effects: NAO and rainfall regime in a key area of the Mediterranean basin [Journal]. - [s.l.] : Atmospheric Research, 2021. - Vol. 248. - p. 105270.

Magnan A., Duvat,V., Garnier,E., Reconstituer les « trajectoires de vulnérabilité » pour penser différemment l'adaptation au changement climatique [Journal] // Natures Sciences Sociétés 20. - 2012. - pp. 82 - 91.

Mahdaoui K., Tahiri M. and Asmlal L. Downscaling future climate changes under RCP emission scenarios using CanESM2 climate model over the Bouregreg catchment, Morocco [Journal] // Modeling Earth Systems and Environment. - 2023.

MAPMDREF Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts [Online]. - 04 26, 2011. -

https://www.agriculture.gov.ma/fr/actualites/fonds-de-developpement-agricole-fda-mecanisation-agricole.

Marchane A. [et al.] Linkages between snow cover, temperature and rainfall and the North Atlantic Oscillation over Morocco [Journal]. - [s.l.] : Climate Research, 2016. - Vol. 69. - pp. 229-238..

Markhi A., Laftouhi, N., Grusson, Y., Soulaimani, A. Assessment of potential soil erosion and sediment yield in the semi-arid N′fis basin (High Atlas, Morocco) using the SWAT model [Journal] // Acta Geophysica. - 2019.

Marras P.A. [et al.] Future precipitation in a Mediterranean island and streamflow changes for a small basin using EURO-CORDEX regional climate simulations and the SWAT model [Journal] // Journal of Hydrology. - 2021. - Vols. 603, Part B. - 127025.

Marras P.A., Lima,D.C.A., Soares,P.M.M., Cardoso,R.M., Medas,D., Dore,E., De Giudici,G., Future precipitation in a Mediterranean island and streamflow changes for a small basin using EURO-CORDEX regional climate simulations and the SWAT model [Journal] // Journal of Hydrology, Volume 603, Part B. - 2021.

Martínez-Salvador A et al. Assessment of Streamflow from EURO-CORDEX Regional Climate Simulations in Semi-Arid Catchments Using the SWAT Model [Journal] // Sustainability 2021, 13. - 2021. - p. 7120.

Martinez-Salvador A. and Conesa-Garcia C. Suitability of the SWAT Model for Simulating Water Discharge and Sediment Load in a Karst Watershed of the Semiarid Mediterranean Basin [Journal] // Water Resources Management. - 2020. - Vol. 34. - pp. 785–802.

Martin-Vide J. and López-Bustin J.A. The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian peninsula [Journal]. - [s.l.] : International Journal of Climatology, 2006. - 11 : Vol. 26. - pp. 1455–1475.

McKee et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales [Journal] // 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA (1993). - 1993. - pp. 179-184.

McKee et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales. [Journal] // 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA (1993). - 1993. - pp. 179-184.

MDCE Troisième Communication Nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. [Book]. - Rabat, Maroc : Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Chargé de l'Environnement, 2016.

Meehl G.A., Arblaster J.M. and Tebaldi C. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations [Book]. - [s.l.] : GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS , L18719, 2005. - Vol. 32.

Mera Y.E.Z., Vera J.F.R and Pérez-Martín M.Á. Linking El Niño Southern Oscillation for early drought detection in tropical climates: The Ecuadorian coast [Journal]. - [s.l.] : Science of The Total Environment, 2018. - Vol. 643. - pp. 193-207.

Mesrar H. Modélisation, quantification et définition des facteurs qui contrôlent le risque de l'érosion hydrique. Cas du bassin versant de l'oued Sahla, Rif central, Maroc. [Book]. - Fès - Maroc : USBMA, 2016.

Michard A. [et al.] Continental Evolution: The Geology of Morocco. Structure, Stratigraphy and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction [Book]. - [s.l.] : Springer, 2008.

Modarres R. and Silva V.P.R. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran [Journal] // Journal of Arid Environments. - 2007. - Vol. 70. - pp. 344–355.

Mohamed M.J., Omran I.I. and Abidalla W.A. Evaluation of the soil moisture content using GIS technique and SWAT model, (Wadi Al-Naft region: as a case study) [Conference] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - [s.l.] : IOP Publishing Ltd, 2018. - Vol. 567. - 012021.

Mohammadrezaei M., Soltani S. and Modarres R. Evaluating the effect of ocean-atmospheric indices on drought in Iran [Journal]. - [s.l.] : Theoretical and Applied Climatology volume, 2020. - Vol. 140. - pp. 219–230.

Moriasi D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L., Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations [Journal] // Trans. ASABE. - 2007. - pp. 50: 885-900.

Mostafa S.M. [et al.] Impact of climate change on water resources and crop yield in the Middle Egypt region [Journal] // Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua. - 2021. - 7 : Vol. 70. - pp. 1066–1084.

Mounir K. [et al.] Assessment of Future Climate and Hydrological Changes in Semi-Arid Catchment using the SWAT Model and Bias-Corrected EURO-CORDEX Ensemble: A Case of the Ouergha catchment, North of Morocco [Journal]. - [s.l.] : Modeling Earth Systems and Environment.

Mounir K. [et al.] Spatiotemporal analysis of drought occurrence in the Ouergha catchment, Morocco [Journal]. - [s.l.] : AIMS Environmental Science, 2023. - 3 : Vol. 10. - pp. 398–423.

Mualem Y. A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [Journal] // Water Resour. Res, 12:513-522.. - 1976.

Nabiafjadi S., Sharifzadeh M. and Ahmadvand M. Social network analysis for identifying actors engaged in water governance: An endorheic basin case in the Middle East [Journal]. - [s.l.] : Journal of Environmental Management, 2021. - pp. 0301-4797.

Nalbantis I. and Tsakiris G. Assessment of hydrological drought revisited [Journal]. - [s.l.] : Water Resources Management, 2009. - Vol. 23. - pp. 881-897.

Nash J.E. and Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. [Journal] // Journal of hydrology, 10(3): 282-290. - 1970.

Navarra A., Tubiana, L. Regional Assessment of Climate Change in the Mediterranean: Volume 1: Air, Sea and Precipitation and Water [Book]. - [s.l.] : Springer, 2013.

NCAR NCAR climate data guide [Online] = "The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (PC-based)." // National Center for Atmospheric Research Staff. - 2020. - https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based.

Neitsch S.L. [et al.] Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2009 [Journal]. - [s.l.] : Texas Water Resources Institute, College Station, TX, 2011.

Oni S.K. [et al.] Uncertainty assessments and hydrological implications of climate change in two adjacent agricultural catchments of a rapidly urbanizing watershed [Journal] // Science of The Total Environment. - 2014. - Vols. 473–474. - pp. 326-337.

Onyutha C., Tabari H. and Rutkows A. Comparison of different statistical downscaling methods for climate change rainfall projections over the Lake Victoria basin considering CMIP3 and CMIP5 [Journal] // Journal of Hydro-environment Research. - 2016. - Vol. 12. - pp. 31-45.

Orkodjo T.P., Kranjac-Berisavijevic G. and Abagale F.K. Impact of climate change on future precipitation amounts, seasonal distribution, and streamflow in the Omo-Gibe basin, Ethiopia [Journal] // Heliyon. - 2022. - 6 : Vol. 8. - p. e09711.

Piani C., Haerter J.O. and Coppola E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe [Journal] // Theoretical and Applied Climatology. - 2010. - Vol. 99. - pp. 187–192.

Piras M. and al et Impacts of climate change on precipitation and discharge extremes through the use of statistical downscaling approaches in a Medit [Journal] // Science of The Total Environment. - 2016. - Vols. Volume 543, Part B. - pp. 952-964.

Pulighe G. [et al.] Modeling Climate Change Impacts on Water Balance of a Mediterranean Watershed Using SWAT+ [Journal] // Hydrology 8. - 2021. - 475 : Vol. 4.

Ramos M.C. and Martínez-Casasnovas J.A. Soil water content, runoff and soil loss prediction in a small ungauged agricultural basin in the Mediterranean region using the Soil and Water Assessment Tool [Journal] // The Journal of Agricultural Science. - 2014. - 3 : Vol. 153. - pp. 1-16.

Raymond F. [et al.] Evolution of Mediterranean extreme dry spells during the wet season under climate change [Journal] // Regional Environmental Change. - 2019. - Vol. 19. - pp. 2339–2351.

Riad S., Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc [Report]. - [s.l.] : Semantic Scholar, 2003.

Rocha J., Duarte, A., Silva, M., Fabres, S., Vasques, J., Revilla-Romero, B., Quintela, A. The Importance of High Resolution Digital Elevation Models for Improved Hydrological Simulations of a Mediterranean Forested Catchment [Journal] // Remote Sens.12. - 2020. - p. 3287.

Rousse J.W. [et al.] Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS [Conference]. - [s.l.] : ERTS symposium, NASA,SP-351, Washington DC, 1973. - Vol. 1.

Rousse J.W. [et al.] Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS [Journal] // ERTS symposium, NASA,SP-351, Washington DC, vol. 1, pp. 309-317.. - 1973.

Roy S. [et al.] (2022). Multi-influencing factor (MIF) and RS–GIS-based determination of agriculture site suitability for achieving sustainable development of Sub-Himalayan region, India [Journal] // Environment, Development and Sustainability. - 2022. - pp. 1- 33.

Roy S. [et al.] Urban waterlogging risk as an undervalued environmental challenge: An Integrated MCDA-GIS based modeling approach [Journal] // Environmental Challenges. - 2021. - Vol. 4. - 100194.

Ruti P. M. [et al.] MED-CORDEX initiative for Mediterranean Climate studies [Journal] // Bulletin of the American Meteorological Society. - 2015. - 7 : Vol. 97.

Sarkki S., Co-producing human well-being with ecosystem services [Journal] // Ecosystem Services. - 2017. - pp. 27,82-91.

Satoh Y. [et al.] The timing of unprecedented hydrological drought under climate change [Journal] // Nature Communications. - 2022. - Vol. 13. - 3287.

Sellami H., La Jeunesse, I., Benabdallah, S., Baghdadi, N., Vanclooster, M. France), Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern [Journal] // Hydrology and Earth System Sciences. - [s.l.] : Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union., 2014. - Vols. 18, 2393–2413.

Sellami H., La Jeunesse, I., Benabdallah, S., Vanclooster, M. Parameter and rating curve uncertainty propagation analysis of the SWAT model for two small Mediterranean catchments [Journal] // Hydrological Sciences Journal. - 2013. - pp. 1635- 1657.

Sellami H., Vanclooster M. and Lajeunesse I. Quantifying hydrological responses of small Mediterranean catchments under climate change projections [Journal] // Science of the Total Environment. - 2015.

Senoussi S., Agoumi A., Yacoubi, M., Fakhraddine, A., Sayout, E-H., Mokssit, A., Chikri, N. Changements climatiques et ressources en eau Bassin versant de l'Ouergha (Maroc) [Journal] // Hydroécol. Appl. Tome 1/2 Vol. 11.. - 1999. - pp. 163-182.

Serghini M., La tarification des services de l'eau [Journal] // New Medit. - 2003. - pp. 5-13.

Singla S., et al. Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc [Article] // Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010). IAHS Publ. 340.. - October 2010. - pp. 679 - 687.

Sofuoğlu E., Ay, A. The relationship between climate change and political instability: the case of MENA countries (1985:01–2016:12) [Journal] // Environmental Science and Pollution Research. - 2020. - pp. 14033–14043.

Tan Y. [et al.] Selection of Effective GCM Bias Correction Methods and Evaluation of Hydrological Response under Future Climate Scenarios. [Journal] // Climate. - 2020. - 10 : Vol. 8. - p. 108.

Tanouti O. and Molle F. Réappropriations de l'eau dans les bassins versants surexploités [Journal] // Etudes rurales. - 2013. - pp. p. 79-96.

Tanouti O., La gestion intégrée des ressources en eau à l'épreuve du bassin versant : cas du bassin du Tensift au Maroc [Report]. - [s.l.] : Université Paris Nanterre, 2017.

Tenneson M., Rojat, D., La tarification de l'eau au Maroc : comment servir différentes causes [Journal] // Afrique contemporaine. - 2003. - pp. 205, 151-169.

Thavhana M.P., Savage M.J. and Moeletsi M.E. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu river catchment, South Africa [Journal] // Physics and Chemistry of the Earth. - 2018.

The World Bank Governance and Development [Book]. - Washington D.C., : The World Bank, 1992.

Torma C.Z. Detailed validation of EURO-CORDEX and Med-CORDEX regional climate model ensembles over the Carpathian Region [Journal] // Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service. - [s.l.] : QUARTERLY JOURNAL OF THE HUNGARIAN METEOROLOGICAL SERVICE, 2019. - 2 : Vol. 123. - pp. 217–240.

Tramblay Y. [et al.] Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios [Journal] // Earth-Science Reviews. - 2020. - Vol. 210. - 103348.

Tramblay Y., Eladlouni S. and Servat E. Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries [Journal]. - [s.l.] : Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013. - 12 : Vol. 13. - pp. 3235–3248.

Tsakiris I. and Nalbantis G. Assessment of Hydrological Drought Revisited [Book]. - [s.l.] : Water Resources Management, 2009. - Vol. 23 : pp. 881–897.

Tsakiris I. and Nalbantis G. Assessment of Hydrological Drought Revisited [Book]. - [s.l.] : Water Resources Management volume 23, pages881–897, 2009.

Tucker C.J. [et al.] An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. [Journal] // International Journal of Remote Sensing. - 2005. - 20 : Vol. 26. - pp. 4485-4498.

USGS Maps, Imagery, and Publications [Journal]. - 2011.

Van Genuchten A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [Journal] // Soil Sci. Am. J. 44:892-898. - 1980.

van Griensven A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M. and Srinivasan, R., A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models [Journal] // Journal of Hydrology. - 2006. - pp. 324(1-4): 10-23 .

Vazifehkhah S. and Kahya E. Hydrological and agricultural droughts assessment in a semi-arid basin: Inspecting the teleconnections of climate indices on a catchment scale [Journal]. - [s.l.] : Agricultural Water Management, 2019. - Vol. 217. - pp. 413-425.

Verner D. [et al.] Climate Variability, Drought, and Drought Management in Morocco's Agricultural Sector (English). Washington, D.C. : World Bank Group. [Journal]. - Washington, D.C. : World Bank Group, 2018. - Vol. 1.

Vicente-Serrano M.S., et al. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe [Journal] // Environ. Res. Lett. 9 044001. - 2014 .

Vogt J.V. and Somma F. Drought and Drought Mitigation in Europe [Book Section] // Advances in Natural and Technological Hazards Research. - [s.l.] : Kluwer Academic Publishers, 2000. - Vol. 14.

Wei J. [et al.] Drought variability and its connection with large-scale atmospheric circulations in Haihe River Basin [Journal]. - [s.l.] : Water Science and Engineering, 2020. - 1 : Vol. 14. - pp. 1-16.

Wilcox B.P., Seyfried M. and Breshears D. The water balance on rangelands, in Encyclopedia of Water Science [Book]. - [s.l.] : Encyclopedia of Water Science, 2003. - pp. 791-794.

World Bank “World Bank. . Rapport annuel 2014 de la Banque mondiale. [Report]. - Washington, DC. : World Bank, 2014.

World Bank World Bank Group [Online] // World Bank Supports Resilient and Sustainable Agriculture in Morocco. - 2022. - https://www.banquemondiale.org/fr/news/press-release/2022/03/25/world-bank-supports-resilient-and-sustainable-agriculture-in-morocco.

WRI Aqueduct Water Risk Atlas helps companies, businesses, investors, and governments to identify and evaluate water risks around the world [Conference]. - 2019.

Wu H., Chen, B., Ye, X. et al. An improved calibration and uncertainty analysis approach using a multicriteria sequential algorithm for hydrological modeling [Journal] // Sci Rep 11, 16954. - 2021.

Yang J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J. and Yang, H., Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China [Journal] // Journal of Hydrology. - 2008. - pp. 358: 1-23.

Zamrane Z. 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 [Book]. - [s.l.] : Sciences de la Terre. Université Montpellier, 2016. Français. NNT: 2016MONTT181 . tel-01690063, 2018.

Zare M., Azam S. and Sauchyn D. Evaluation of Soil Water Content Using SWAT for Southern Saskatchewan, Canada [Journal] // Water. - 2022. - 249 : Vol. 14.

Zittis G., Bruggeman, A., Lelieveld, J. Revisiting future extreme precipitation trends in the Mediterranean [Journal] // Weather and Climate Extremes, Volume 34, 100380. - 2021.

Annexes

Annexe 1 : Population recensée en 2014 et population projetée pour les années 2020 et 2030 dans les communes au niveau du bassin versant de l'Ouergha

Régions	Province	Communes	Population Resencée	Population Projetée	
			2014	2020	2030
Tanger-Tétouan-Al-Hoceima	Ouezzane	Moqrisat	10546	10296	9688
		Zoumi	40630	40957	40771
		Kalaat Bouqorra	16141	16613	17141
		Teroual	12625	12260	11482
		Zghira	15509	15035	14042
	Chefchaouen	Talambote	8485	8212	7646
		Bni darkoul	14760	15169	15608
		Bni Salah	11327	12525	14560
		Bab Taza	28654	30304	33019
		Fifi	8093	8358	8671
		Bni Faghloum	10364	10662	10990
		Oued Malha	13603	14670	16360
		Bab Berred	25848	26204	26254
		Tamorot	26654	29658	34841
		Mansoura	15779	16990	18897
		Bni Ahmed CherqIa	12858	12898	12748
		Bni Ahmed Gharbia	12969	13043	12946
	Al Hoceima	Ketama	17323	17950	18456
		Issaguen	17061	17926	19019
		Tamsaout	13690	14167	14606
		Abdelghaya Souahel	25782	26501	27016
		Taghzout	5131	5060	4814
		Zarkt	6691	6551	6157
		Bni Bchir	6516	6773	7034
		Bni Bouchibet	9014	9469	10009
		Bni Ahmed Imoukzan	9082	9020	8684
		Bni Ammart	6675	5845	4562
		Sidi Bouzineb	3728	3110	2239
		Moulay Ahmed Cherif	9762	9662	9249
Fès-Meknès	Taza	Bourd	8462	7373	5718

		Ajdir	10255	8717	6537
		Gzenaya Al Janoubia	9974	8567	6490
		Tainaste	11567	10115	7883
		Kaf El Ghar	8143	6719	4760
		El Gouzate	6597	5727	4416
		Bni Ftah	10950	9701	7737
	Taounate	Tabouda	16618	16624	16360
		Ratba	16814	16890	16722
		Tafrant	14242	14122	13682
		Oudka	8496	8261	7746
		Kissane	13402	12754	11538
		Moulay Bouchta	14389	12725	10188
		Jbabra	18609	17688	15971
		Ourtzagh	14402	13439	11767
		Galaz	17333	16130	14022
		Sidi Mokhfi	8702	8645	8403
		Timezgana	16160	16265	16154
		Khlalfa	14656	15262	16042
		Zrizer	7926	7644	7071
		Taounate	37616	40251	43331
		Ain Aicha	25417	25799	26239
		Rghioua	4229	3777	3073
		Bouhouda	26236	25806	24661
		Bni Oulid	10362	8931	6850
		Tamedit	14724	12652	9655
		Fennassa Bab El Hit	11409	10280	8492
		Sidi Haj M'hamed	9318	9411	9401
		Sidi Yahya Bni Zeroual	15450	15225	14598
		Ghafsai	6361	6825	7382
		El Bibane	9303	5930	5252
		Oulad Daoud	11989	11406	10314
		Bni Ounjel Tafraout	6972	6497	5676
		Thar Essouk	5182	4595	3584
Total	5 provinces	63 communes	857565	846641	825224

Annexe 2 : Questionnaires " Gestion de l'eau d'irrigation dans le bassin versant de l'Ouergha " Destinés aux agriculteurs

Informations sur l'enquêteur					
Nom et prénom de l'enquêteur					
Région	Province	Commune	Cercle	Accès à l'exploitation	
				Facile	Difficile
Informations sur l'enquête					
Nom et prénom de l'enquêté			Sexe	F	M
Niveau matrimonial	Célibataire	Marié(e)	Veuf(ve)	Divorcé(e)	
Nombre d'enfants à charge					
Niveau d'instruction	Analphabète	Enseignement pour adultes	Primaire	Secondaire	Supérieur
Avez-vous une formation agricole ?					
Combien de personnes vivent sur l'exploitation					
Combien de personnes membres de la famille ont une activité professionnelle hors exploitation ?					
Quelle est la superficie totale de l'exploitation					

Identification de l'exploitation agricole					
Quel est le statut de l'exploitation	Melk	Location	Autres		
Quelle est la superficie agricole utile de l'exploitation SAU	<1ha	1ha>SAU>5 ha	>5ha		
Type de cultures					
Est-ce que la main d'œuvre est :	Familial		Salaire		
			Saisonnier	Permanent	Autres
Combien coûte la main d'œuvre					
Système d'irrigation					
Equipements et ouvrages utilisés	Puit	Fourrage	Motopompe	Retenue collinaire	Réservoir, citerne

Types d'irrigation	Moderne				Traditionnelle
Technique	Aspersion	Gravité	Localisé		
Quels sont les problèmes que vous rencontrez concernant l'irrigation dans votre exploitation ?	Accès à l'eau	Disponibilité	Prix de l'eau	Le cout d'entretien	Autres
	Le cout des investissements	Qualité des eaux	Charge de travail	Le cout d'Energie	
Depuis quand utilisez-vous l'eau pour l'irrigation ?					
Avez-vous bénéficié des subventions pour l'installation du système d'irrigation ?					
Au niveau du rendement, y-a-t-il une différence entre l'ancien système d'irrigation et le nouveau ?					
Quelle est la technique la plus adéquate ?					
Quel est le coût d'irrigation					

Réseau d'irrigation					
Etes-vous membres d'une association des usagers des eaux agricoles dont le but gestion d'eau	Oui				Non
Quel est le nom de l'AEUA ?				Souhaitez-vous adhérer ?	
Quelle place occupez-vous ?	Simple membre	Membre du bureau	Président	Oui	Non
Participez-vous à des réunions concernant les questions de l'eau et de l'irrigation ?	Oui		Non		
Quelle est la fréquence des réunions ?					
Est-ce qu'il y a des problèmes d'attribution d'eau d'irrigation ?					
Est ce qu'il y a des conflits entre les agriculteurs à cause de l'attribution de l'eau d'irrigation ?					
Y-at-il des avantages dans votre adhésion à l'AUEA ?	Oui		Non		

Annexe 3: Spatiotemporal analysis of drought occurrence in the Ouergha catchment, Morocco.

Environmental Science

AIMS Environmental Science, 10 (3): 398–423.
DOI: 10.3934/environsci.2023023
Received: 19 November 2022
Revised: 03 March 2023
Accepted: 22 March 2023
Published: 04 May 2023

http://www.aimspress.com/journal/environmental

Research Article

Spatiotemporal analysis of drought occurrence in the Ouergha catchment, Morocco

Kaoutar MOUNIR[1,2,*], Isabelle LA JEUNESSE[2,4], Haykel SELLAMI[3] and Abdessalam ELKHANCHOUFI[1]

[1] University Sidi Mohamed Ben Abdallah of Fez, CED ST LGE2D, Fez, Morocco
[2] University of Tours, UMR CNRS 7324 Citeres, 33 allée Ferdinand de Lesseps, 37204 Tours cedex 3, France
[3] Centre for Water Research and Technology, EcoPark BorjCedria, Soliman, Tunisia
[4] UMR 7300 ESPACE, Université Côte d'Azur, Mediterranean Institute of Environmental Risk and Sustainable Development, Nice Meridia Technopole, 9, Rue Julien Lauprêtre, 06200 Nice, France

* **Correspondence:** Email: kaoutar.mounir@univ-tours.fr; Tel: +33-247361487.

Abstract: Although the spatiotemporal characterization of droughts is a key step in the design and implementation of practical measures to mitigate their impacts, it is hampered by the lack of hydro-climatic data with sufficient spatial density and duration. This study aimed to assess the trends and spatial patterns of drought occurrence in the Ouergha catchment in northern Morocco, which has been identified as a hot spot for climate change and variability. The study combined data from various sources, including the North Atlantic Oscillation Index (NAOi); Western Mediterranean Oscillation Index (WeMOi); a meteorological index (SPI), calculated using precipitation data; a hydrological index (SDI), calculated using precipitation data; and satellite images to calculate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Moisture Index (NDMI) from 1984/85 to 2016/17. The results showed that the adopted statistical analyses were effective in detecting the linearity and trend of drought in the Ouergha catchment scale. The correlations between various indices were moderate to strong between NAOi and SPI, WeMoi and SPI, as well as SPI and SDI, while the Mann-Kendall tests indicate an increasing trend of drought intensity in the catchment. During dry events, vegetation cover and moisture were maintained due to the presence of dam reserves. Overall, the study provides empirical evidence that confirms the severe drought conditions experienced in the Ouergha catchment. The unique set of data adds to the growing body of knowledge about drought in the region and underscores the urgency of preserving dam resources for

sustainable use during future droughts.

Keywords: drought; SPI; SDI; vegetation indices; Ouergha catchment

1. Introduction

Droughts are among the most important natural hazards affecting large populations and have significant consequences for the economy, the environment and societal development. Drought frequency and impacts are expected to be exacerbated by changing climate and land use conditions in the Mediterranean, particularly in areas already exposed to weather-related disasters [1]. Drought is one of the most complex weather-related disasters and can persist for months and years [2], negatively impacting the environment and socio-economic development, and it increases conflicts among political and economic actors [3]. From a climatic perspective, drought is defined as a precipitation shortage that persists over an extended period and is characterized by its intensity, duration and extent. Thus, the spatiotemporal characterization of drought is a key step in the design and implementation of adaptive measures [4].

By its climatic characteristics and geographical position, Morocco has experienced many severe droughts in the last years which could potentially experience up to five consecutive years of drought without interruption. Due to the recurrent drought events and the trend of decreasing precipitation, water resources are expected to worsen in the future [5–7]. The Intergovernmental Panel on Climate Change projections indicate a strong warming trend for Morocco. Since 1970, there has been an observed temperature increase of about 3 to 7°C are projected for Morocco by 2100, particularly for the summer months (from June to August). Annual precipitation is expected to decrease by 10 to 30% during the wet season (from October to April), and a 10 to 40% decline during the dry season (from May to September) [8,9]. In the upcoming years, Morocco will be more exposed to drought, unless action is taken [9,10] . Thus, this variability has negative impacts on agriculture, which is mainly rain-fed and very vulnerable to climatic variations [9,10]. Water scarcity has imposed the need for resource management to adapt the policy of dams to store the inputs of wet years in favor of dry years, and also to transfer water to deficit regions to ensure water availability and food security at the country level.

Several studies have used various approaches to understand drought impacts and predict its occurrence. One approach has been to analyze the interactions between ocean-atmospheric oscillation indices and meteorological and hydrological drought indices in critical areas worldwide [11–15]. Another approach is to model drought, which can help identify risk areas, predict the timing and severity of droughts and support decision-making for drought mitigation and management despite the complex interactions between atmospheric and continental processes.

In addition, several researchers have sought to show how the atmospheric circulation patterns lead to precipitation shortages in different regions worldwide by using statistical approaches. For example, Luppichini [16] investigated the correlation between the North Atlantic Oscillation Index (NAOi) and precipitation trends in Tuscany, Italy; Lopez-Bustins and Lemus-Canovas [17] showed the spatiotemporal relationship between the Western Mediterranean Oscillation (WeMOi) influence and precipitation irregularity in Catalonia. For Morocco, Zamrane [18] revealed significant correlation between hydrological variability and climatic fluctuations materialized by different

climatic indices such as the NAOi, the Southern Oscillation Index (SOI) and the WeMOi. Furthermore, Driouech et al. [10] evaluated the relationships of climate extremes in Morocco linked to NAOi using drought indices and showed that the NAO effect on Moroccan precipitation extends to the October–February period. In addition, El Niño–Southern oscillation (ENSO) does not affect Morocco; regarding teleconnections other than NAO, Mediterranean oscillation (MO) plays an important role in Morocco's humid and semi-arid areas. Still, more research is required for the interactions between these teleconnections and the effects of local scale topographical conditions [9].

Drought monitoring can be based on a single variable to compute meteorological and hydrological drought by using, for example, the percent of normal precipitation index [19], the standardized precipitation index (SPI) [20], the standardized water-level index [21] and the streamflow drought index (SDI) [22] . Remote sensing indices, such as the normalized difference vegetation index (NDVI), have been widely applied to characterize spatiotemporal drought indices at different timescales [23]. The 3-, 6- and 12-month scales are typically used to represent short-, medium- and long-term droughts, respectively. In addition, atmospheric circulation-drought calculation methods are subject to uncertainty [24].

Most of the few studies on climate trends in Morocco have been conducted either at the national scale or catchment level. Several studies have been conducted in Morocco to understand and address the impact of droughts on agriculture and water resources. As a national scale example, Ezzine et al. [25] developed a new drought index, i.e., the Standardized Water Index (SWI), based on the Normalized Difference Water Index (NDWI), and compared its performance with other indices. The study found a strong correlation between SWI and cereal production; Verner et al. [9] assessed the effects of droughts on the agricultural sector and evaluated the government's efforts to address them, using indices such as ENSO, NAO and MO to analyze the impact of teleconnections. The study highlighted the importance of effective drought management. Regarding examples of specific case studies in Morocco, Boudad et al. [26] analyzed the characteristics of meteorological and hydrological droughts in the Inaouen basin of northern Morocco over different timescales, using the SPI and SDI to assess the droughts. The results showed that the frequency of drought episodes varies with the timescale, and that there is a strong positive correlation between the SPI and SDI at the 12-month scale. Moreover, Hadri et al. [27] analyzed the relationship between vegetation activity and drought severity in the western Haouz plain in Morocco over a 10-year period, using satellite images and indices such as the SPI and SWI. The study found a clear relationship between vegetation activity and drought severity.

The previous research offers valuable insights into the drought trends across Morocco, but there is a lack of studies that specifically focus on the impact of atmospheric circulation patterns on drought in the Ouergha catchment. This catchment plays an important role in agricultural production and the mobilization of its conventional water resources. By combining atmospheric oscillations and meteorological (SPI) and hydrological (SDI) drought indices, the assessment of the vulnerability of the Ouergha catchment to drought can be improved.

The aim of this study was to assess the trends and spatial patterns of drought occurrence in the Ouergha catchment in Morocco using the SPI and SDI, multisource data from local hydroclimatic records, remote sensing and the large-scale NAOi and WeMOi. Therefore, this paper evaluates trends in precipitation, flow rate and extreme indices at the Ouergha catchment scale using the SPI and SDI derived from 10 meteorological stations and eight hydrometric stations covering all of the main climate zones of the catchment. Then, we examined the relationship between drought indices and the

NAOi and WeMoi indices to assess the usefulness of drought indices (SPI and SDI). In addition to assessing detailed trends at the catchment scale, we also conducted trend analysis at the stations scale. Finally, we present spatial distribution maps of drought indices, derived from temporal SPI and SDI values, as well as vegetation moisture and density states during dry events. These maps aim to demonstrate the spatial distribution of drought and its effects on land use in the Ouergha catchment.

2. Materials and methods

2.1. Study area

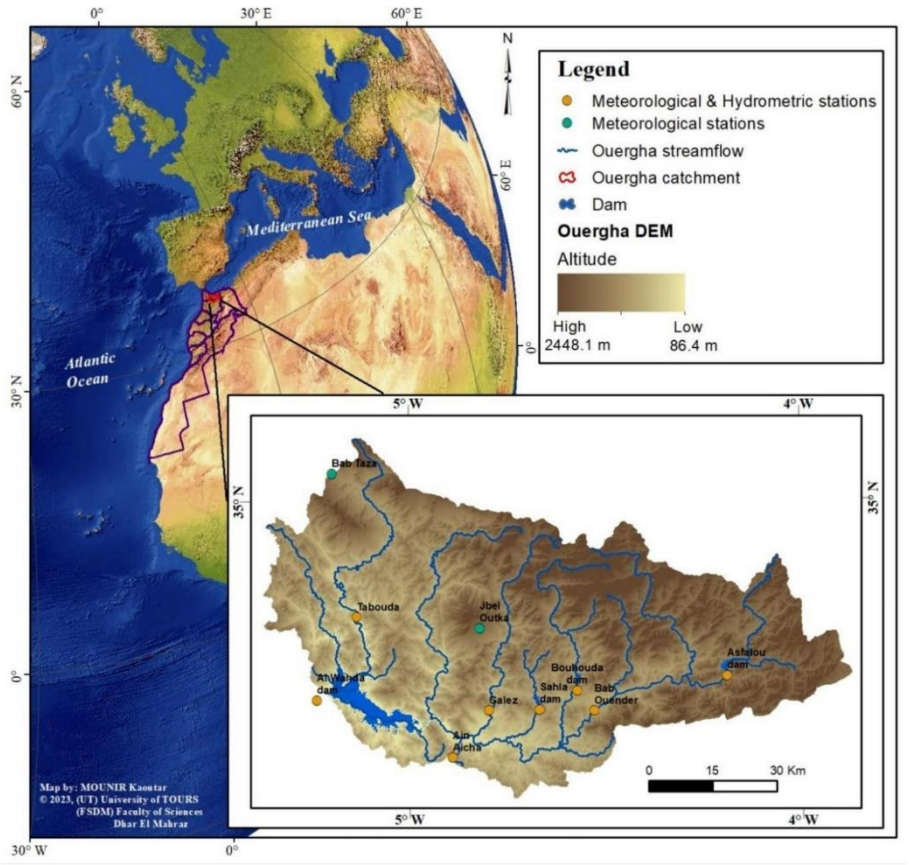


Figure 1. Geographic location of the Ouergha catchment.

The Ouergha catchment is the principal tributary of the Sebou catchment, located between 34°20'N and 35°10'N and 3°55'W and 5°20'W. The catchment covers approximately 6,190 km^2 and supplies "Al Wahda", the largest dam in Morocco, with an annual storage capacity of 3800 Mm^3 [28] (Figure 1). The catchment has deeply dug shale beds, with tormented relief and deep gorges. The largest part of the catchment is marked by a sharp relief with domed summits located on the eastern

side, while the northern boundary of the catchment, representing the summit of the Rif chain, consists almost entirely of a grit bar more resistant than shale and includes the most important summits in the basin that are east–west-oriented sandstones. The course of the Ouergha river contains poorly drained, hilly relief with many signs of erosion [29]. The southern part of the Ouergha catchment intersects with the extremely complex Pre-Rifain system and the limestone massifs of the southern border. The Ouergha Valley is dominated by alluvial terraces with shallow soils occupied by many crops [30]. The catchment has a Mediterranean climate with a dry season that varies according to altitude, annual average precipitation ranging from 800 mm to more than 1000 mm at high altitudes, and a rainy season that starts in November and ends in April. During summer, air temperatures can exceed 40 °C [29], giving important weight to evapotranspiration and its influence on the water flow balance [28]. The Northern ridge line of the catchment, which is marked by mountains, experiences westerly winds that bring rain and affects 78% of the area. However, the downstream part of the basin forms an isolated catchment that benefits less from the precipitations input of the western and southern areas [30]. The Mediterranean climate of the area is typically subject to stormy precipitation, the intensity of which can influence the amount of water flowing under torrential conditions. The Ouergha river is formed by the intersection of Asfalou river to the east and the highest part of Ouergha river to the north and passes through the Bab Ouender hydrometric station [30]. The streamflow of the Ouergha catchment is characterized by high intra-annual variability, with the lowest and highest flows from June to September and December to February, respectively [31]. The rivers in the Ouergha catchment, except for the Sahla river, are fed by melting snow on the mountains, while the predominance of clay and the presence of disaggregated layers of marl and shale increase the impermeability of the catchment, thus explaining the lack of groundwater in the Ouergha catchment [28].

2.2. Datasets

2.2.1. Local hydro-climate data

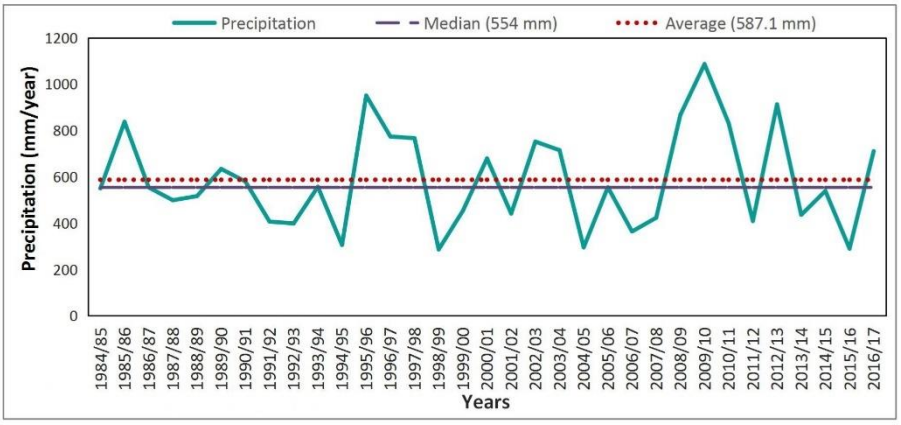


Figure 2. Annual average precipitations in the Ouergha catchment for 33 years.

Data on precipitations and flow rate were obtained from the SHBA (Sebou Hydrological Basin

Agency), which collects data from meteorological and hydrometric stations spread across the basin. Unfortunately, not all stations were selected for this study due to some being abandoned or having recently been set up. Only stations with a consistent and sufficient record length were selected for analysis, resulting in the inclusion of 10 meteorological stations and 8 hydrometric stations, all covering a 33-year period from October 1984/85 to September 2016/17.

The average annual precipitations for 10 meteorological stations for 33 years was 587.1 mm (median of 554 mm) (Figure 2). The precipitation ranged between 286 mm (in 1998/99) and 1086 mm in 2009/10. The graph shows an unbalanced average precipitation during the 33 years, with amounts below average from 1986/87–1988/89, 1990/91–1994/95, 1998/99–1999/00, 2001/02, 2004/05–2007/08, and 2013/14–2016/17. The latter periods alternated with two- to three-year humid periods with precipitations exceeding 600 mm.

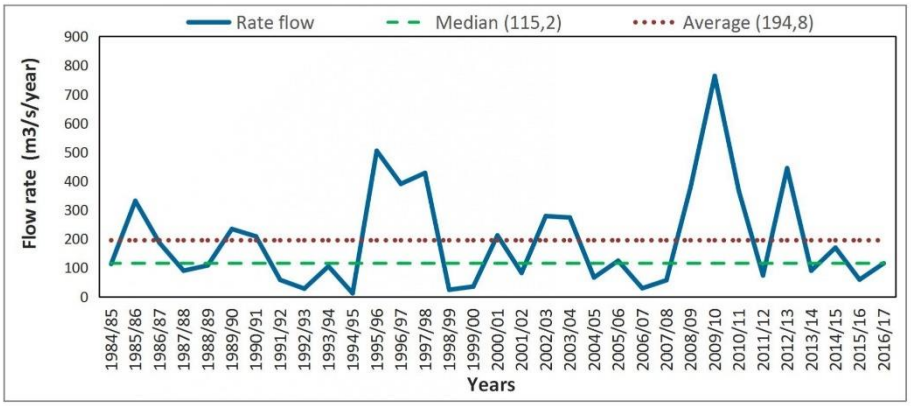


Figure 3. Annual average rate flow curve in the Ouergha catchment for 33 years.

The average annual rate flow for 8 hydrometric stations for 33 years was 194.8 m^3/s (median of 115.2 m^3/s) (Figure 3). The rate flow ranges between 11.5 m3/s in 1994/95 and 763.3 m^3/s in 2009/10. The graph shows an unbalanced average precipitations during the 33 years, with amounts below average from 1984, 1986/87–1988/89, 1991/91–1994/95, 1998/99–1999/00, 2001/02, 2004/05–2007/08, 2011/12 and 2013/14–2016/17. The latter periods alternated with two- to three-year humid periods with rate flow ranges between 208.1 in 1990/91 and 763 m^3/s in 2009/10.

2.2.2. Large-scale NAO and WeMoi

Historical records of monthly and annual NAOi were obtained from the US National Oceanic and Administration website. The NAOi is the difference in the surface pressure anomalies between various northern and southern locations that tracks seasonal movements of the Icelandic low and Azores high.

The recorded WeMOi data for the study period were acquired from the website of the Climatology Group of Barcelona University (http://www.ub.edu/gc/wemo/). WeMOi is the atmospheric connection between a point to the southwest of San Fernando and the Po Valley of Padua [32] and is calculated from the surface pressure data of the Global Forecast System (GFS), a

model developed by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), an agency within the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) of the United States. The WeMOi data is updated with model outputs at 0h and 12h, and it covers up to 144 hours. WeMOi is used during the autumn months as a predictive tool for torrential rains. Moreover, NAOi and WeMOi cover the period from 1984/85–2016/17.

2.2.3. Remote sensing data

Satellite-based vegetation observations provide a complementary method for monitoring and analyzing the spatial extent and variability of the effect of drought on vegetation conditions. The most commonly used method to monitor vegetation is through long-term, global-scale datasets of vegetation cover based on passive satellite observations since the 1970s. These datasets are highly valued by researchers and policymakers because they offer consistent and long-term data on vegetation cover over large areas [33]. Nevertheless, in this particular study, we analyzed the impact of drought on vegetation conditions using data bands from the Landsat TM5 and Landsat OLI 8 sensors (Table 1, Table 2, Table 3). The satellite images used in the study were typically from the spring season when vegetation is denser, to investigate the vegetation's growth potential in response to water and soil moisture levels. This choice of season was particularly important as any drought-induced impact on vegetation growth would be reflected in the vegetation index, which reflects the chlorophyll content and vitality of the growing vegetation.

Table 1. Landsat sensor characteristics (http://landsat.gsfc.nasa.gov/).

Characterization	Landsat 5		Landsat 8	
Sensors	TM		OLI	
Launch	01-March-84		11-February-13	
End of mission	05-June-13		To date	
Orbit Altitude	705 Km		705 Km	
Orbit	Quasi-polar heliosynchronous		Quasi-polar heliosynchronous	
Field of view	185 Km		185 Km	
Average resolution	General: 30 m; Thermal infrared: 120 m		General: 30 m; Panchromatic: 15 m; Thermal infrared: 100 m	
Coverage	16 days		16 days	
Limitations	Limited spectral resolution and the fact that it stopped operating in 2013, making its data less relevant for recent analyses		Limited spectral resolution compared to hyperspectral sensors and the fact that cloud cover can hinder observations in certain areas	
Used images date	Left image	Right image	Left image	Right image
	16/02/1993	25/02/1993	22/05/2016	15/05/2016
	13/05/1995	19/03/1995		
	21/03/1999	30/03/1999		
	08/05/2005	17/05/2005		
	19/03/2007	29/04/2007		
	22/05/2016	15/05/2016		
Source	https://earthexplorer.usgs.gov/			

Table 2. Spectral bands of Landsat 5 TM sensor (http://landsat.gsfc.nasa.gov/).

Bands	Spectral bands	Wavelength	Spatial resolution
1	Blue	0.45–0.52 µm	30 m
2	Green	0.52–0.60 µm	30 m
3	Red	0.63–0.69 µm	30 m
4	Near-infrared	0.76–0.90 µm	30 m
5	Near-Infrared	1.55–1.75 µm	30 m
6	Infrared-thermal	2.08–2.35 µm	120 m
7	Mid-infrared	2.08–2.35 µm	30 m

Table 3. Spectral bands of the Landsat 8 OLI sensor (http://landsat.gsfc.nasa.gov/).

Bands	Spectral bands	Wavelength	Spatial resolution
1	Coastal Aerosol	0.43–0.45 µm	30 m
2	Blue	0.45–0.51 µm	30 m
3	Green	0.53–0.59 µm	30 m
4	Red	0.63–0.67 µm	30 m
5	Near infrared	0.85–0.87 µm	30 m
6	Medium Infrared 1	1.56–1.65 µm	30 m
7	Medium Infrared 2	2.10–2.29 µm	30 m
8	Panchromatic	0.50–0.67 µm	15m
9	Cirrus	1.36–1.38 µm	30 m
10	TIRS 1	10.60–11.19 µm	100 m
11	TIRS 2	11.50–12.51 µm	100 m

2.3. Methods

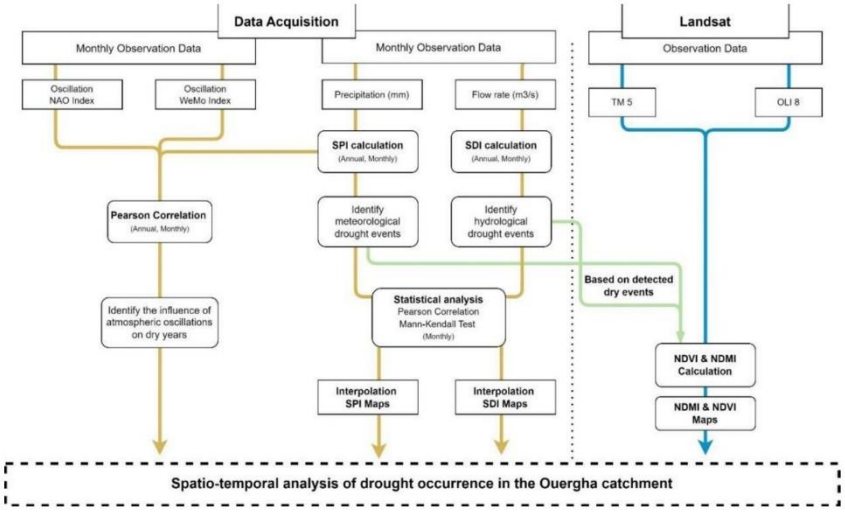


Figure 4. General framework flowchart of the adopted methodology.

As shown in the general framework flowchart (Figure 4), multi-step formulation was carried out to assess trends and spatial patterns of drought occurrence in the Ouergha catchment.

2.3.1. Drought indices

The Standardized precipitation index (SPI) was developed by McKee et al. [20] as a method for defining and monitoring drought occurrences. It is a simple index [22,26] that relies solely on precipitation data and enables the evaluation of both wet and dry periods. Different time scales can be used to calculate the SPI, reflecting the impact of drought on different types of water resources. The computation of SPI for a specific site is based on a long-term precipitation record, spanning over 30 years, and is fitted to a probability distribution, such as the Gamma distribution. The SPI is computed using the following equation:

$$SPI_{i,k} = \frac{X_{i,k} - \overline{X_k}}{S_k} \qquad i=1,2,3\ldots, k=1,2,3,4 \tag{1}$$

where: Xi,k is the cumulative precipitation amount for the k-reference period of the hydrological year (i) or month (k). N indicates the number of hydrological years. Sk is the standard deviation of the cumulative precipitation of the reference period k.

The Streamflow drought index (SDI), developed by Nalbantis and Tsakiris [22], is used to assess hydrological drought. The SDI is based on monthly observed flow rate and offers the advantage of monitoring hydrological drought and water supply over short, medium, and long terms. The index is calculated based on cumulative rate flow for each reference period in a given hydrological year, using the following equation:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \overline{V_k}}{S_k} \qquad i=1,2,3\ldots, N; k=1,2,3,4 \tag{2}$$

where: Vi,k is the cumulative flow amount for the k-reference period of the hydrological year (i). N indicates the number of hydrological years. Sk is the standard deviation of the cumulative streamflow volumes of the reference period k.

Table 4. Classification of the SPI and SDI values (modified).

Index values	Classification
SPI (SDI) > 2	Extremely wet
1.5 < SPI (SDI) < 1.99	Very wet
1 < SPI (SDI) < 1.49	Moderately wet
-0.99 < SPI (SDI) < 0.99	Mildly wet
-1 < SPI (SDI) < 0	Mildly dry
-1.5 < SPI (SDI) < -1	Moderately dry
-2 < SPI (SDI) < -1.5	Severely dry
SPI (SDI) < -2	Extremely dry

According to Nalbantis et al. [22], a dry event occurs when the index continuously reaches an intensity of -1.0 or higher; each drought event is marked by a notable duration and intensity. Table 4 displays the state of the meteorological and hydrological drought classifications [22].

2.3.2. Vegetation indices

The NDVI [23] and NDMI [34] are important indices used in remote sensing analysis. The measurements of near-infrared (NIR), red (R), and short-wave infrared (SWIR1) were taken from the bands of Landsat satellite images, which were chosen due to their widespread availability and high spatial and temporal resolution, making them suitable for remote sensing analysis (Table 1, Table 2, Table 3). These bands were processed with both radiometric correction and atmospheric correction to correct variations in the sensor response and ensure that the image data accurately reflects the reflectance properties of the Earth's surface and remove or correct the effects of atmospheric absorption, scattering, and other factors that can impact the measured radiance values. The correction process was carried out using ENVI 5.3 software, and the atmospheric correction was specifically conducted using the FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) module.

NDVI is based on the contrasting characteristics of two bands in a multispectral raster dataset, represented by the absorption of chlorophyll pigments in the R band and the high reflectivity of plant materials in the NIR band (Table 2, Table 3). The NDVI is constructed by combining the R and NIR bands and expressed using the following equation:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \tag{3}$$

NDMI uses two bands to monitor drought and display the canopy humidity level and fuel level in fire-prone areas. The index is computed using NIR and short-wave infrared reflectance (SWIR) (Table 2, Table 3) and is expressed using the following equation:

$$NDMI = \frac{(NIR - SWIR1)}{(NIR + SWIR1)} \tag{4}$$

The calculation of NDVI and NDMI was conducted using ArcMap, which is the main component of the ArcGIS suite. The NDVI and NDMI values range from -1 to 1. Generally, values between 0 and 1 indicate higher levels of vegetation cover (NDVI) and moisture (NDMI), while values between 0 and -1 are indicative of water.

2.3.3. Trend analysis

This study analyzed the correlation between the NAOi, WeMOi, SPI, and SDI during the study period at different timescales. Pearson correlation was used to analyze the annual and monthly variability of meteorological and hydrological droughts. Accordingly, the absolute value of the correlation coefficient (r values) was computed using Eq 5, where r ranges between -1 and +1, and the highest r value (positive or negative) represents a higher correlation. The test was calculated at a confidence level of $P < 5\%$.

$$r(x_I y) = \frac{b.s_x}{s_y} = \frac{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i y_i\right) - \bar{x}\cdot\bar{y}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2\right) - (\bar{x})^2} * \sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) - (\bar{y})^2}} \quad (5)$$

The non-parametric Mann–Kendall [35] test was used to detect monotonic trends in monthly, seasonal, and annual time series, does not require a normal distribution, and compares the relative magnitudes of the sample data rather than the data values themselves [36] . The Mann–Kendall statistic and the trend test for a data series are computed according to Eqs 6 and 7, respectively:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N-1} Sign(yj - yi) \quad (6)$$

$$Sign(yj - yi) = \begin{cases} 1 & if \quad yj - yi > 0 \\ 0 & if \quad yj - yi = 0 \\ -1 & if \quad yj - yi < 0 \end{cases} \quad (7)$$

where S is the statistic of the Mann–Kendall test; yi and yj are the annual values in years i and j (j > i), respectively; N is the length of the data series, and Sign is the sign (+ or -) of (yi– yj).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\sqrt{Var(S)}]^{\frac{1}{2}}} & if\ S > 0 \\ \qquad if\ S = 0 \\ \frac{S+1}{[\sqrt{Var(S)}]^{\frac{1}{2}}} & if\ S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

The standard test statistic (Z) demonstrates an increasing trend with positive values, and the negative values show a decreasing trend in the time series. If $|Z| > Z1 - \alpha/2$, the hypothesis of no trend is rejected, where |Z| and α indicate the absolute value of the Mann–Kendall coefficient and the statistical significance level, respectively.

Based on the Z-score, the trend in the data can be classified as significant, weak, or non-existent. For a significance level of 0.05, if the Z-score is greater than or equal to 1.96, this indicates a significant trend in the data, with a positive Z-score signifying an upward trend and a negative Z-score indicating a downward trend. If the Z-score falls between 1.0 and 1.96, this indicates a weak trend in the data. Finally, if the Z-score is less than 1.0, this suggests a lack of trend in the data [37].

3. Results

3.1. Drought trend analysis

The Ouergha catchment experienced varying annual precipitation and flow patterns with some years characterized by heavy precipitations and others by low precipitations (Figure 5). The precipitations exceedance probability (Figure 5, left) was generated for 10 meteorological stations

(Figure 1). The stations of Jbel Outka (at an altitude of 1090 m) and Bab Taza (at an altitude of 880m) recorded higher levels of precipitation with annual averages exceeding 1000 mm and 1500 mm respectively. Conversely, the precipitation recorded at Sahla dam station (at an altitude of 321 m) was much lower with an average of 20 mm. The remaining seven stations recorded average annual precipitation levels between 542 mm and 807 mm.

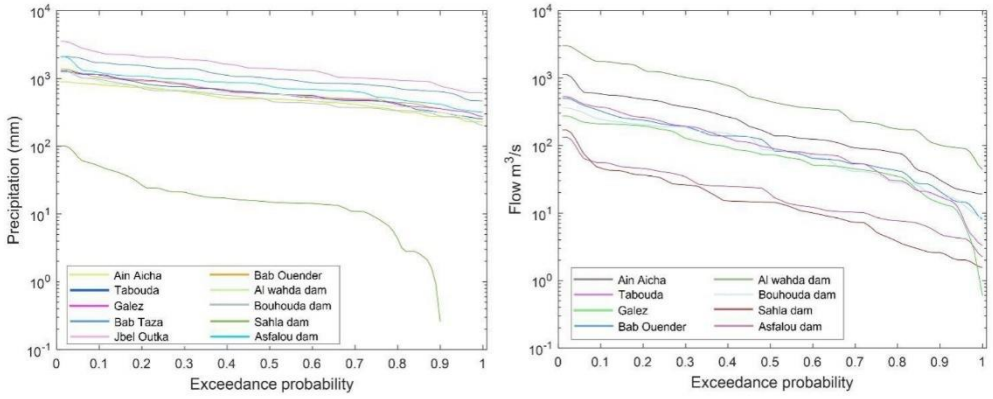


Figure 5. Exceedance probability curves for selected precipitations (left) and flow rates (right) stations in the Ouergha catchment.

The flow exceedance probability (Figure 5, right) constructed using data from 8 hydrometric stations (Figure 1). Each station recorded its highest and lowest flow rates at different times, resulting in a variation of flow rates across the stations. The Al Wahda dam station, located in the downstream region, has the highest flow rate at 755 m^3/s. On the other hand, the lowest flow rates were detected at the Asfalou and Sahla Dam stations with 26 m^3/s and 22 m^3/s, respectively. The remaining six stations had an average annual flow rate that falls between 96 m^3/s and 254 m^3/s.

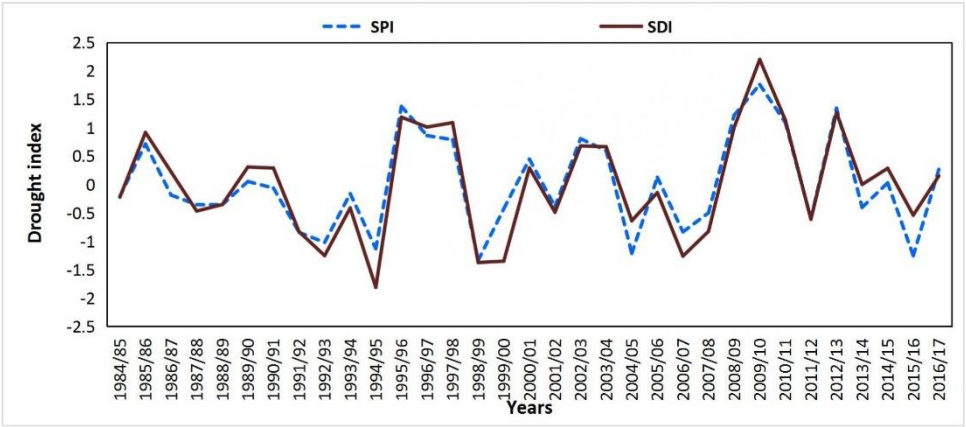


Figure 6. Temporal SPI and SDI values in the Ouergha catchment from 1984/85–2016/17.

Meteorological and hydrological parameters varied considerably within the study area. To explain the water shortage during the study period, Figure 6 shows the graphical representation of the calculated SPI and SDI. The two indices show concordant decreases and increases, indicating a close relationship between the two series. This can suggest that dry and humid events are succeeding one another, with changes in one index closely corresponding to similar changes in the other. The computed SDI and SPI are dry events when the index is equal to or below 1.0; a humid event is denoted by index values reaching or exceeding 1.0 (Table 2). The SDI reflects precipitations irregularities during the 33-year period in the form of moderate to severe dry events (-1.5 < SPI (SDI) < -1) in 1992/93, 1994/95, 1998/99, 2004/05, 2006/07, and 2015/16. The most severe hydrological stress during the 33-year period was observed in 1994/95, with a recorded average annual precipitation of 368.4 mm.

3.2. Pearson correlation

To detect the presence of linearity and to visualize the relationship between the atmospheric circulation indices (NAOi & WeMOi) and the meteorological drought index (SPI) in the Ouergha catchment, we applied the Pearson correlation coefficient on annual and monthly time-scale correlations at a significance level of 5%. In addition, the correlation coefficients ranged between -1 and +1 and measured the strength of association between two variables. A large correlation is observed for coefficient values between ± 0.5 and ± 1. A moderate correlation is represented by values lie between ± 0.3 and ± 0.5; and a small correlation occurs for value between + 0.3 and 0.1 is small, and if smaller that 0.1 is trivial [38,39].

The atmospheric oscillation index data used were adjusted on a hydrological year time scale to fit the SPI and SDI time scale patterns. For the annual time scale, the SPI has large negative relationships with the NAOi and WeMOi of -0.62, and -0.69, respectively. These large negative relationships show the connection between the NAOi and WeMOi and SPI but do not indicate if either index exerts a major influence. Therefore, a monthly correlation must be tested (Figure 7). Monthly correlations were favored to seasonal for more accurate results, since the atmospheric oscillations indices have a larger intraseasonal variability.

Overall, the monthly correlation between NAOi and SPI indicates a large negative linearity from November to March (Figure 7a). The low correlation between SPI and NAOi only from December to March may be due to the fact that the NAOi index is strongly correlated with winter climate patterns in the region but may not have as strong an influence on precipitation patterns during other seasons. Other factors, such as the North African monsoon or local convective activity, may play a larger role in determining precipitation patterns during other times of the year. Additionally, the NAOi index may exhibit less variability during other seasons, making it less strongly correlated with precipitation.

Thus, the correlation between WeMOi and SPI (Figure 7b) has a higher to moderate negative linearity for all months except May and August, when the correlation is low. This results may be due to the fact that the WeMoi index is not the only factor affecting precipitation during this time period. Other factors, such as local land use and topography, may also play a significant role in determining precipitation patterns during this period. In addition, the WeMoi index itself may exhibit less variability during these months, making it less strongly correlated with precipitation.

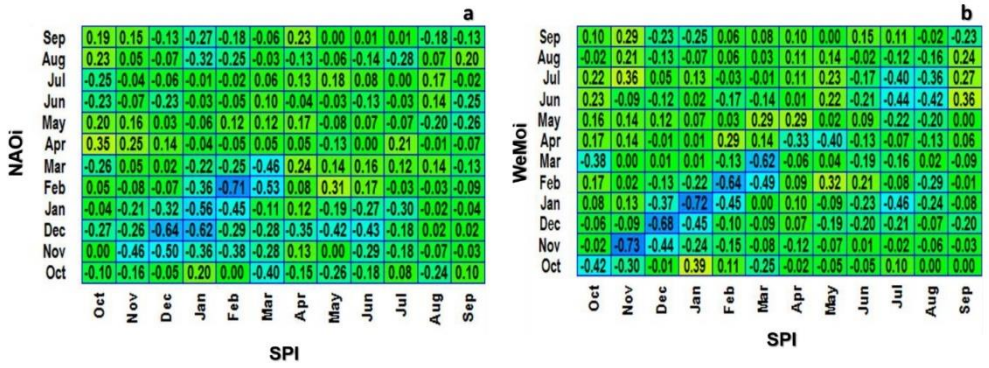


Figure 7. Correlogram of Pearson correlation coefficients between SPI and the atmospheric oscillation indices at a monthly scale from 1985–2017 at a level of significance alpha = 0.05. Large correlation: values between ± 0.50 and ± 1; moderate correlation: values between ± 0.3 and ± 0.5; small correlation: values between ± 0.3 and ± 0.1; smaller that 0.1 is trivial.

The SPI and SDI were calculated based on the average of the calculated indices for each meteorological and hydrometric station. The correlation between the indices displayed a large positive link for almost every month with a positive linearity (| r | > 0.60), except for July and August (Figure 8). Therefore, meteorological drought directly impacts the flow rate. The strong correlation is due to the dependency of the flow on precipitation, which can also be explained by the impermeability and very limited percolation of the catchment surface where stormwater runoff is predominant.

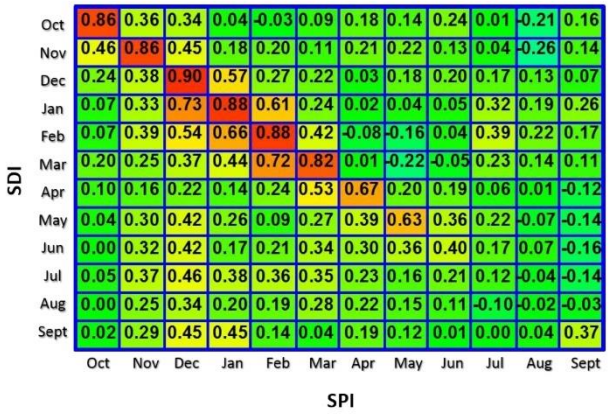


Figure 8. Correlogram of Pearson correlation coefficients between SPI and SDI at a monthly scale from 1985–2017 at a level of significance alpha = 0.05. Large correlation: values between ± 0.50 and ± 1; moderate correlation: values between ± 0.3 and ± 0.5; small correlation: values between ± 0.3 and ± 0.1; smaller that 0.1 is trivial.

3.2.1. Mann–Kendall test

The results of the Mann-Kendall test, represented as Z-scores, for the SPI across 10 meteorological stations and SDI for 8 hydrometric stations. The table 5 demonstrates that there are diverse trends across the various stations and months. Notably, some stations indicate significant trends, either positive or negative, while others exhibit no trend or only weak trends. It is crucial to consider the significant trends in the stations that could provide valuable insights into the increase or decrease of drought conditions within the SPI and SDI. However, weak trends are also considered helpful in providing valuable information about drought tendency.

Table 5. SPI trend of 10 meteorological stations in the Ouergha catchment at different time scales, for a significance level of 0.05. The colors in the table indicate: Blue: Z-scores greater than or equal to 1.96 indicate a significant trend in the data. Green: Z-scores between 1.0 and 1.96 indicate a weak trend. Grey: values less than 1.0 suggest a lack of trend. +: positive value; -: negative value.

Date	Ain Aicha	Bab Ouender	Galez	Tabouda	Bab Taza	Jbel Outka	Al Wahda dam	Asfalou dam	Bouhouda dam	Sahla dam
October	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+
November	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+
December	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+
January	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+
February	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+
March	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+
April	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+
May	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+
June	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-
July	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+
August	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
September	+	-	+	+	+	-	+	-	-	-

Table 5 reveals negative significant trends during the autumn negative significant trends were observed, while positive significant trends were noted in the autumn season, specifically in September and October at the Galez station, from September to November at the Bab Taza station, and in November at the Sahla Dam station. Weak negative trends were identified in the Bab Ouender station in September, in the Bouhouda dam station from September to October, and in the Asfalou dam station in October. Meanwhile, a positive weak trend was observed in the Tabouda station. During the winter, a significant positive trend was found in December at the Bab Ouender station and from December to February at the Sahla Dam station. Weak negative trends were observed in the Ain Aicha station in February and in Jbel Outka in January, as well as in the Asfalou dam from January to February. Positive weak trends were observed in January and February in Galez and in Bab Taza in January. During the spring, the Bab Ouender station showed a negative trend in March, whereas Bouhouda dam station had positive trends in March and May, and the Sahla dam station had a

positive trend in May. Additionally, weak positive trends were noted in Galez in March, Jbel Outka and Bouhouda dam in April, and Sahla dam station from March to April, while negative weak trends were observed in Galez in April, Jbel Outka and Al Wahda dam stations in March, and Asfalou dam in April and May. During the summer, the Jbel Outka station indicated negative trends in June and positive trends in August, while Bouhouda Dam station had a negative trend in August. Weak trends included a positive trend in Tabouda in August and in Bouhouda in June, while negative trends were observed in Bab Ouender in June, in Bab Taza from June to July, in Asfalou dam station in June and July, and in Sahla dam station in August.

Table 6. SDI trend of 8 Hydrometric stations in the Ouergha catchment at different time scales, for a significance level of 0.05. The colors in the table indicate: Blue: Z-scores greater than or equal to 1.96 indicate a significant trend in the data. Green: Z-scores between 1.0 and 1.96 indicate a weak trend. Grey: values less than 1.0 suggest a lack of trend. +: positive value; -: negative value.

Date	Ain Aicha	Bab Ouender	Galez	Tabouda	Al Wahda dam	Asfalou dam	Bouhouda dam	Sahla dam
October	-	-	+	+	+	-	+	+
November	+	-	+	-	+	-	+	+
December	+	-	+	-	+	+	+	+
January	-	-	+	+	+	+	+	+
February	+	-	+	+	-	+	+	-
March	+	-	+	+	+	+	+	+
April	-	-	+	-	+	+	+	+
May	-	+	+	-	-	+	+	+
June	-	-	-	-	-	+	+	-
July	+	-	-	+	-	-	+	-
August	+	-	-	+	-	-	+	-
September	+	-	-	+	-	-	+	-

Table 6 indicates a single significant positive trend within the Tabouda station in August, while the other results demonstrate either weak trends or no trends. During the autumn, positive trends were detected in the Bouhouda dam and Tabouda stations in September and the Tabouda station in October. In the winter, negative weak trends were observed in the Bab Ouender station in February, while positive weak trends were noted in the Bouhouda dam station in December and January, the Al Wahda dam, Asfalou dam, and Sahla dam stations in January. During the spring, negative weak trends were found in the Bab ouender station during March and April, whereas the Galez station in March, the Tabouda station in May, and the Asfalou dam station in April showed positive weak trends. In the summer, negative weak trends were seen in the Ain Aicha station in June, the Bab ouender station in August, the Galez station in July, and the Tabouda station in June. Conversely, a positive weak trend was observed in the Bouhouda dam station in June and July.

3.3. Spatial drought detection

The correlation between the atmospheric oscillation indices and drought indices showed the solid atmospheric circulation effects on precipitation distribution in the Ouergha catchment, which is also related to the availability of water resources in rivers and dams. Furthermore, the SPI and SDI calculations provided more detailed results on drought occurrence in 1992/93, 1994/95, 1998/99, 2004/05, 2006/07, and 2015/16 (Figure 4). To further analyze drought event occurrence and water stress in the Ouergha catchment, the spatial patterns based on the SPI, SDI, NDVI, and NDMI are displayed in classes for severity levels greater than mild. Landsat images were used to visualize and quantify the effect of drought by computing the NDVI, which displays the vegetation evolution and the intensity of moisture using the NDMI.

Figure 9 shows the occurrence of drought in 1993. The highest drought level was 23% in the southern part of the catchment. To quantify the intensity of the drought in different parts of the catchment, we used the SDI, which measures the severity of hydrological drought. Our analysis showed that the SDI values were highest (approximately 49%) in the southwest and eastern parts of the catchment. This severe drought had a significant impact on the vegetation cover in the catchment, particularly in the eastern and southern parts, where it was low. This can be attributed to the fact that drought reduces soil moisture and limits plant growth. Furthermore, the spatial distribution of vegetation occupancy and moisture level in the Ouergha catchment showed that 88.31% of the catchment had a moisture level of 43%. These indices provide additional evidence of the impact of drought on vegetation cover in the catchment.

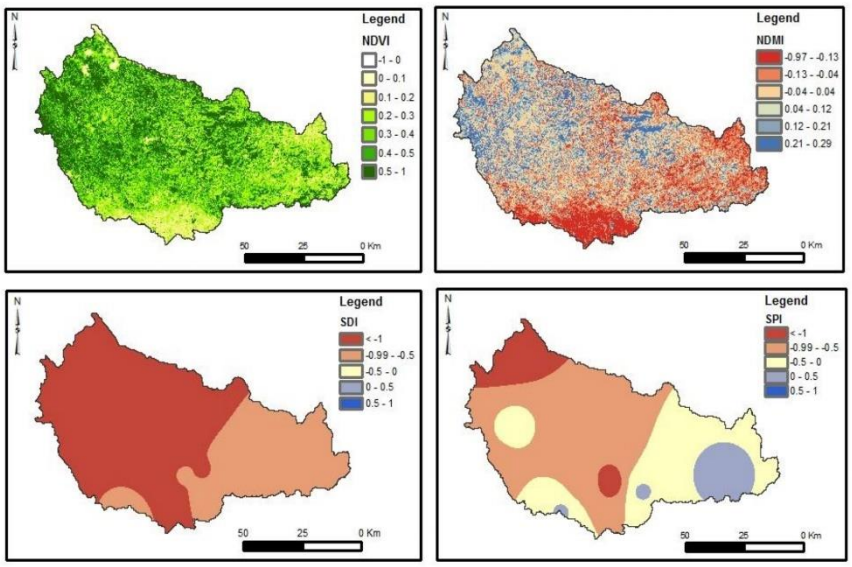


Figure 9. Spatial distribution maps of environmental variables and drought indices in the Ouergha catchment in 1993.

The commissioning of the Sahla dam, the first dam in the Ouergha Catchment, in 1994 coincided with the first extreme dry event that in 1994/95 (Figure 10). The occurrence of mild to moderate drought according to SPI values was observed in the eastern part of the catchment, representing approximately 55% of the total catchment area. SDI values indicated that a severe water deficit affected nearly all the catchment; and the percentages of the catchment experiencing moderate and severe drought were approximately 85% and 6%, respectively. Therefore, the vegetation was densest and wettest in the northern part of the catchment, which is a mountainous area. The southern part of the catchment had poor vegetation cover and experienced severe drought in 1995 as shown in NDVI map in Figure 10; spatial indices for the catchment showed vegetation and moisture levels of 88.81% and 39%, respectively.

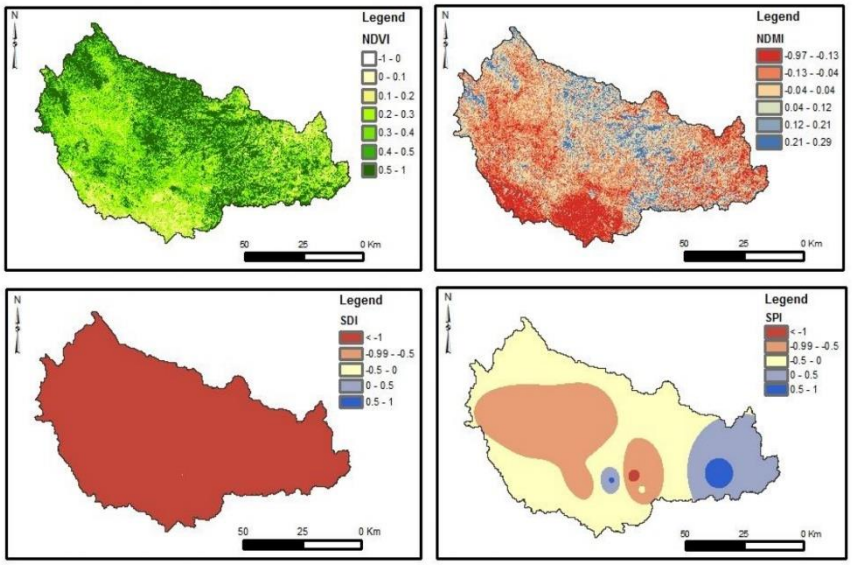


Figure 10. Spatial distribution maps of environmental variables and drought indices in the Ouergha catchment in 1995.

The Al Wahda (the second largest dam in Morocco), Bouhouda, and Asfalou dams were launched in 1996, 1998, and 1999, respectively. The dams were constructed to help provide siltation protection and continuous access to drinking water, to help promote irrigation in adjacent agricultural lands, and to cope with future drought periods. However, the dams did not help in 1999 (Figure 11), when the most severe meteorological drought in the history of the Ouergha Catchment impacted the hydrology and vegetation of the entire catchment. Vegetation cover fell 61.24%, and the level of moisture decreased to 20.52%.

Figure 12 shows that the meteorological drought was mild/moderate to severe in approximately 94% and 4% of the catchment, respectively. The SDI values in the catchment indicated mild dry events in the entire catchment, except the eastern part, which experienced severe drought. Nonetheless, the vegetation increased in 2005; and the NDMI showed moisture level of 46%. The densest vegetation was in irrigated areas surrounded by dams.

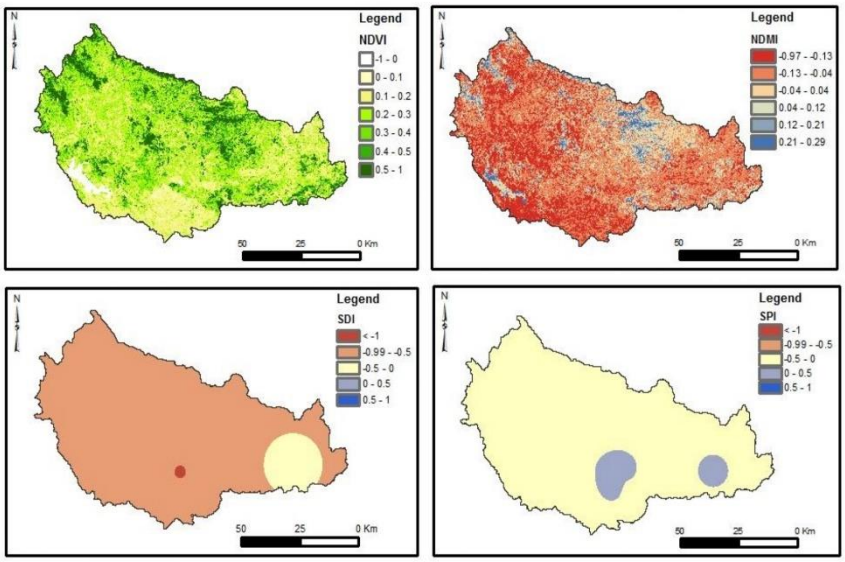


Figure 11. Spatial distribution maps of environmental variables and drought indices in the Ouergha catchment in 1999.

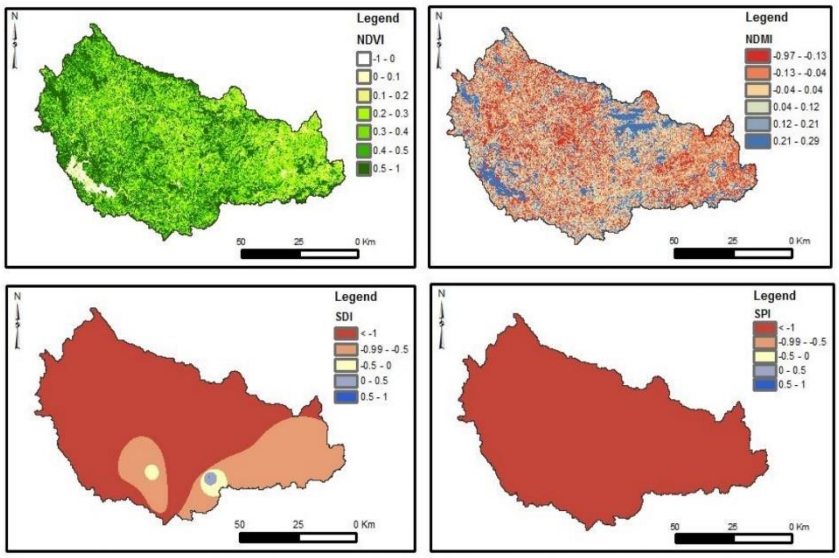


Figure 12. Spatial distribution maps of environmental variables and drought indices in the Ouergha catchment in 2005.

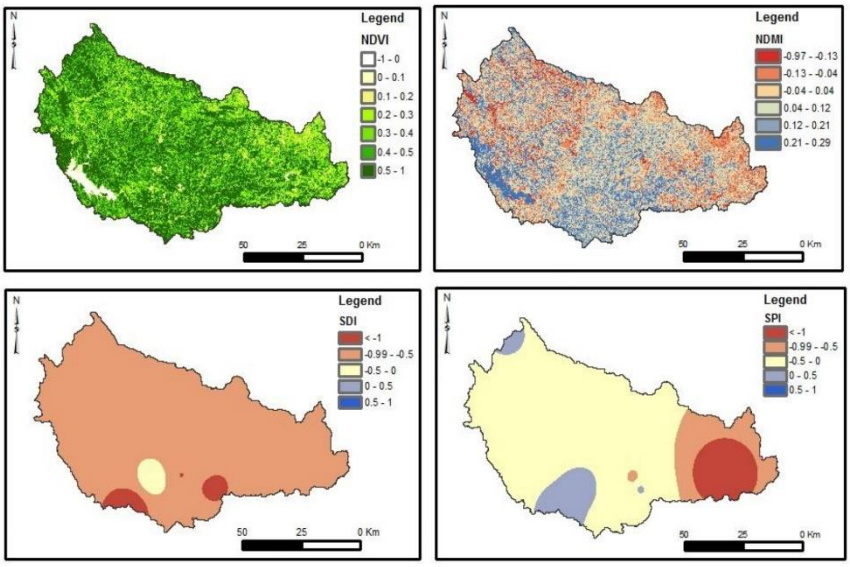


Figure 13. Spatial distribution maps of environmental variables and drought indices in the Ouergha catchment in 2007.

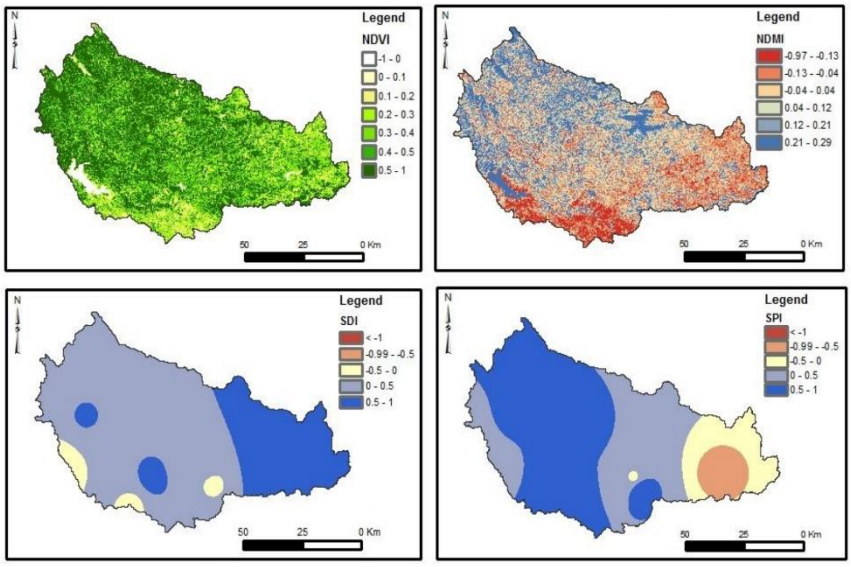


Figure 14. Spatial distribution maps of environmental variables and drought indices in the Ouergha catchment in 2016.

The SPI spatial distribution in Figure 13 indicated mild drought in the 51% of the eastern part of the catchment. Additionally, hydrological drought affected 51% of the area affected by moderate drought in the lower and eastern parts of the catchment. However, meteorological and hydrological drought did not affect vegetation cover (93%) or humidity levels (moisture level = 68%). This could be attributed to the presence of dams that provide irrigation in the area. These dams played a role in maintaining the vegetation cover and humidity levels during the dry event of 2007 and contribute to the preservation of the density and moisture vegetation in the catchment.

The meteorological dry event of 2016 (Figure 14) was mild in the southeastern part of the catchment, and hydrological drought was mild in the eastern part of the catchment. Compared to the last dry event (2007), the vegetation cover and humidity decreased slightly, especially in the lower part of the catchment, with moisture level and vegetation cover values of 90% and 62%, respectively.

4. Discussion

In this study, we aimed to investigate the relationship between climate oscillations, precipitation and flow variability, by comparing the NAO and WeMOi indices of climate fluctuations in the Ouergha catchment with the SPI and SDI from 1984/85 to 2016/17. Our results show that the Ouergha Catchment was exposed to varying intensities of moderate to severe meteorological and hydrological droughts in 1992/93, 1994/95, 1998/99, 2004/05, 2006/07, and 2015/16. The drought analysis showed that during these dry events, the precipitation and flow rate were below the average values of 400 mm and 100 m3/s, respectively. The SPI values show that the highest value of drought for the total period study was -1.32 in 1998/99. The SDI registered the highest drought value of -1.81 in 1994/95.

The temporal variations are dominant by the atmospheric oscillations influence. The positive phase of NAOi (NAOi+) is manifested by lower precipitations, conversely to the negative phase (NAOi-) that expresses climatic disturbances in favor of rainy periods [40]. Moreover, the WeMOi positive phase (WeMoi+) is expressed by precipitations shortage and important precipitations during the negative phase (WeMoi-). The resulting correlations between SPI and NAOi as well as between SPI and WeMOi have a large negative correlation. The general consensus approves that the NAOi has a major influence on climate variability in Morocco [6,10,41,42]. As for the influence of WeMoi on precipitation, Zamrane [18] shows in her study, that WeMoi has an influence on climatic variability but not as important as NAOi.

In our study, both NAOi and WeMoi influence the climatic variability on Ouergha catchment, but the WeMoi is better correlated than the NAOi with the SPI of Ouergha, from October to March with a larger negative correlation of $|r| < -0.60$, except for July and August. However, the large negative correlation between SPI and WeMoi may explain the strong influence. This is perhaps because drought is primarily associated with WeMOi patterns. The correlation between the meteorological (SPI) and hydrological (SDI) drought indices indicated a strong linear link. Thus, meteorological and hydrological droughts emerge in the same year. This result agrees with previous studies in different areas [15,26,43]. Unlike Nalbantis and Tsakiris [22] study that showed a delay of one month (lag 1) between the SPI and SDI drought indices. Indeed, we acknowledge that hydrological drought could be related to many factors such as physical characterization of the catchment, geology, soil occupation and land use/ cover [26]. Therefore, it is imperative to conduct additional research to elucidate the underlying drivers behind the correlation among vegetation

cover, agricultural practices, and their influence on dam functionality. This will enable the development of robust adaptation strategies to mitigate the impact of climate change. Moreover, with climate change accelerating, it is highly likely that the existing dams may prove insufficient to meet the increasing water demands of the region. For instance, changes in precipitation patterns and temperature may result in reduced water availability and increased evapotranspiration rates, which could negatively impact on both the stored and useful volume of water in the dam. Although we acknowledge the importance of other factors, such as physical characterization of the basin, geology, and land use/cover, it is critical to consider the potential impact of climate change on dam usefulness. The response of the hydrometeorological stations to drought was investigated using the Mann–Kendall test (at a significance level of 0.05) during the study period. The results showed a negative trend during dry events, with varying degrees of intensity across the stations. The meteorological stations in the catchment (except for Asfalou, Bab Ouender, and Jbel Outka) received less rain during rainy months stations. All stations except Bab Ouender will likely be exposed to hydrological drought in the future. Moreover, meteorological and hydrological drought helped highlight the impact on vegetation and agricultural development in the Ouergha catchment.

The spatial distribution of drought indices during dry events demonstrates a great influence on vegetation cover and moisture (NDVI and NDMI) in the catchment. During the study period, the density of vegetation cover decreased by 27% in 1998/99. Furthermore, spatial analysis of the SPI and SDI showed that drought events primarily affected the eastern and southern parts of the catchment, whereas the western part was less vulnerable to dry events. In the last 10 years, the presence of dams has supported vegetation cover, especially in nearby irrigated areas. In addition, precipitations variability influenced vegetation densification.

However, precipitations and flow regression do not explain the decline in vegetated land cover, which could also be linked to human activities. Vegetation cover is related to agricultural activities in the Ouergha Catchment and is low during dry events. Thus, the dams supply sufficient water during short dry events but not year-long droughts. Therefore, further studies are required in the Ouergha catchment to explore the relationship between vegetation cover, agricultural activities, and their impact on dam operation and to develop effective strategies for climate change adaptation.

5. Conclusions

The aim of this study was to assess the trends and spatial patterns of drought occurrence in the Ouergha catchment in northern Morocco. To do so, we utilized various data sources including the NAOi, WeMOi, SPI, SDI, NDVI, and NDMI from 1984/85 to 2016/17. Our findings reveal that the Ouergha catchment experienced moderate to severe meteorological and hydrological droughts in different years during the study period. These droughts were characterized by low precipitation and flow rates. The NAOi and WeMOi were found to have an important influence on the climatic variability in the Ouergha catchment, with the WeMOi being more strongly correlated with the SPI, especially from October to March. The correlation between meteorological (SPI) and hydrological (SDI) droughts was strong and linear. The Mann–Kendall test results indicate a negative trend during dry events at the hydrometeorological stations, with varying intensity levels. The spatial distribution of drought indices showed that eastern and southern parts of the catchment were more vulnerable to dry events, while the western part was less affected. However, the strong correlation between meteorological and hydrological droughts and their negative impact on vegetation cover demonstrate

the need for effective drought management strategies in the region. Despite the presence of dams, which helped support vegetation cover, the decline in vegetation cover cannot be solely explained by precipitations and flow regression and could be linked to human activities as well, such as agricultural activities in the Ouergha catchment.

Conflict of interest

We confirm that there is no conflict of interest regarding this manuscript.

References

1. IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 82.
2. Vogt JV, Somma F (2013) Drought and Drought Mitigation in Europe. in Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol. 14, Kluwer Academic Publishers, 2000. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1
3. La Jeunesse I (2016) Changement climatique et cycle de l'eau-Impacts, adaptation, législation et avancées scientifiques. *Vecteur Environ* 49: 70. https://doi.org/10.51257/a-v1-p4242
4. Bressers H, Bressers N, Kuks S, et al. (2016) The governance assessment tool and its use. *Governance for drought resilience: land and water drought management in Europe* 2016: 45–65. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29671-5_3
5. Tramblay Y, El Adlouni S, Servat É (2013) Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Nat Hazards and Earth Syst Sci* 13: 3235–3248. https://doi.org/10.5194/nhess-13-3235-2013
6. Driouech F, Rached SB, Hairech TE (2013) Climate variability and change in North African countries. *Climate change and food security in West Asia and North Africa* 2013: 161–172. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6751-5_9
7. MDCE, Troisième Communication Nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques., Rabat, Maroc: Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Chargé de l'Environnement, 2016. Available from: https://unfccc.int/documents/128109.
8. IPCC, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. Available from: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf.
9. Verner D, Treguer D, Redwood J, et al. (2018) Climate variability, drought, and drought management in Morocco's agricultural sector. https://doi.org/10.1596/30604
10. Driouech F, Stafi H, Khouakhi A, et al. (2021) Recent observed country-wide climate trends in Morocco. *Int J Climatol* 41: E855–E874. https://doi.org/10.1002/joc.6734
11. Mera YEZ, Vera JFR, Pérez-Martín MÁ (2018) Linking El Niño Southern Oscillation for early drought detection in tropical climates: The Ecuadorian coast. *Sci Total Environ* 643: 193–207. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.160

12. Vazifehkhah S, Kahya E (2019) Hydrological and agricultural droughts assessment in a semi-arid basin: Inspecting the teleconnections of climate indices on a catchment scale. *Agric Water Manag* 217: 413–425. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.034
13. Mohammadrezaei M, Soltani S, Modarres R (2020) Evaluating the effect of ocean-atmospheric indices on drought in Iran. *Theor Appl Climatol* 140: 219–230. https://doi.org/10.1007/s00704-019-03058-6
14. Ndehedehe CE, Agutu NO, Ferreira VG, et al. (2020) Evolutionary drought patterns over the Sahel and their teleconnections with low frequency climate oscillations. *Atmos Res* 233: 104700. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104700
15. Wei J, Wang WG, Huang Y, et al. (2021) Drought variability and its connection with large-scale atmospheric circulations in Haihe River Basin. *Water Sci Eng* 14: 1–16. https://doi.org/10.1016/j.wse.2020.12.007
16. Luppichini M, Barsanti M, Giannecchini R, et al. (2021) Statistical relationships between large-scale circulation patterns and local-scale effects: NAO and rainfall regime in a key area of the Mediterranean basin. *Atmos Res* 248: 105270. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105270
17. Lopez-Bustins JA, Lemus-Canovas M (2020) The influence of the Western Mediterranean Oscillation upon the spatio-temporal variability of precipitation over Catalonia (northeastern of the Iberian Peninsula). *Atmos Res* 236: 104819. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104819
18. 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* (Doctoral dissertation, Université Montpellier; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc). Faculté des sciences Semlalia).
19. Hayes MJ, Alvord C, Lowrey J (2007) Drought indices. *Intermountain West Climate Summary* 3: 2–6. https://doi.org/10.1002/0471743984.vse8593
20. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* 17: 179–183
21. Bhuiyan C (2004) Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli terrain of India. *In Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey* 2004: 12–23.
22. Nalbantis I, Tsakiris G (2009) Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resour Manag* 23: 881–897. https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1
23. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, et al. (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec Publ* 351: 309.
24. Kingston DG, Stagge JH, Tallaksen LM, et al. (2015) European-scale drought: understanding connections between atmospheric circulation and meteorological drought indices. *J Climate* 28: 505–516. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00001.1
25. Ezzine H, Bouziane A, Ouazar D (2014) Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 26: 36–48. https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.005
26. Boudad B, Sahbi H, Mansouri I (2018) Analysis of meteorological and hydrological drought based in SPI and SDI index in the Inaouen Basin (Northern Morocco). *J Mater Environ Sci* 9: 219–227. https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.25

27. Hadri A, Saidi MEM, Boudhar A (2021) Multiscale drought monitoring and comparison using remote sensing in a Mediterranean arid region: a case study from west-central Morocco. *Arab J Geosci* 14: 1–18. https://doi.org/10.1007/s12517-021-06493-w
28. Senoussi S, Agoumi A, Yacoubi M, et al. (1999) Changements climatiques et ressources en eau Bassin versant de I'Ouergha (Maroc). *Hydroécologie Appliquée* 11: 163–182. https://doi.org/10.1051/hydro:1999007
29. Mesrar, H (2016) Modélisation, quantification et définition des facteurs qui contrôlent le risque de l'érosion hydrique. Cas du bassin versant de l'oued Sahla, Rif central, Maroc. https://doi.org/10.1127/zfg/2015/0169
30. Brunet-Moret Y, Roche M (1955) Etude hydrologique de l'Oued Ouergha à M'Jara. *Journées de l'hydraulique* 1955: 117–122.
31. Renard, B (2009) Détection d'évolutions dans les régimes hydrologiques du bassin du Sebou (Maroc).
32. Martin-Vide J, Lopez-Bustins JA (2006) The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. International Journal of Climatology: *A J Royal Meteorol Soc* 26: 1455–1475. https://doi.org/10.1002/joc.1388
33. Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME, et al. (2005) An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *Int J remote Sens* 26: 4485–4498. https://doi.org/10.1080/01431160500168686
34. Hunt Jr ER, Rock BN (1989) Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote Sens Environ* 30: 43–54. https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1
35. Kendall SB (1975) Enhancement of conditioned reinforcement by uncertainty 1. *J Exp Anal Behav* 24: 311–314. https://doi.org/10.1901/jeab.1975.24-311
36. Gilbert RO (1987) Statistical methods for environmental pollution monitoring. John Wiley & Sons, 336.
37. Modarres R, da Silva VDPR (2007) Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *J Arid Environ* 70: 344–355. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.12.024
38. Cohen J (1988) Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd edition), lawrence erlbaum associates publishers.
39. Antonie ML, Zaïane OR (2004) Mining positive and negative association rules: An approach for confined rules. *In Knowledge Discovery in Databases: PKDD 2004: 8th European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases.* Springer Berlin Heidelberg, Pisa, Italy, 27–38. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30116-5_6
40. Ilmen R, Benjelloun H, Ouahmane L, et al. (2016) Preliminary study of winter North Atlantic Oscillation on Atlas cedar tree rings in Morocco. Bulletin de l'Institut Scientifique: *Section Sciences de la Vie* 38: 43–50.
41. 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. *Meteorol Atmo Phys* 83: 67–88. https://doi.org/10.1007/s00703-002-0561-y
42. Marchane A, Jarlan L, Boudhar A, et al. (2016) Linkages between snow cover, temperature and rainfall and the North Atlantic Oscillation over Morocco. *Clim Res* 69: 229–238. https://doi.org/10.3354/cr01409

43. Akbari H, Rakhshandehroo G, Sharifloo AH, et al. (2015) Drought analysis based on standardized precipitation index (SPI) and streamflow drought index (SDI) in Chenar Rahdar river basin, Southern Iran. *In American Society of Civil Engineers* 2015: 11–22. https://doi.org/10.1061/9780784479322.002



© 2023 the Author(s), licensee AIMS Press. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0)

Annexe 4 : Assessment of future climate and hydrological changes in semi-arid catchment using the SWAT model and bias-corrected EURO-CORDEX ensemble: a case of the Ouergha catchment, North of Morocco

Modeling Earth Systems and Environment
https://doi.org/10.1007/s40808-023-01775-6

ORIGINAL ARTICLE



Assessment of future climate and hydrological changes in semi-arid catchment using the SWAT model and bias-corrected EURO-CORDEX ensemble: a case of the Ouergha catchment, North of Morocco

Kaoutar Mounir[1,2] · Haykel Sellami[3] · Isabelle La Jeunesse[2,4] · Abdessalam Elkhanchoufi[1]

Received: 29 November 2022 / Accepted: 10 April 2023
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Switzerland AG 2023

Abstract
The Ouergha catchment, located in northern Morocco, is one of the most important water resource areas for Morocco's Sebou region, and is also a hotspot for climate change and variability, like the entire Mediterranean region. The present study aims to assess the impact of climate change on water resources in this catchment and to discuss the vulnerability of agriculture production, which has the potential to significantly impact its limited water resources and agricultural output. Specifically, the study investigates potential impacts of climate change on the hydrology of the Ouergha catchment by quantifying changes in hydro-climatic conditions simulated by the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model, and by analyzing projections from the climate multimodel ensemble from the EURO-CORDEX for reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods. The results predicted drier and hotter climatic conditions with projected 14%, 13% and 15% decreases in precipitation, runoff, and soil water content, respectively, in the Ouergha catchment, while evapotranspiration is expected to increase by 12%, suggesting a higher risk for drought conditions. While these projected trends were consistent with other studies that have been conducted in the Mediterranean catchments, the magnitude of hydrologic alterations indicates that the Ouergha catchment is subject to significant hydrologic alteration due to climate change and highlights the need for urgent adaptation and mitigation measures.

✉ Kaoutar Mounir
kaoutaramounir@gmail.com

[1] University Sidi Mohamed Ben Abdallah of Fez, CED ST LGE2D, Fez, Morocco

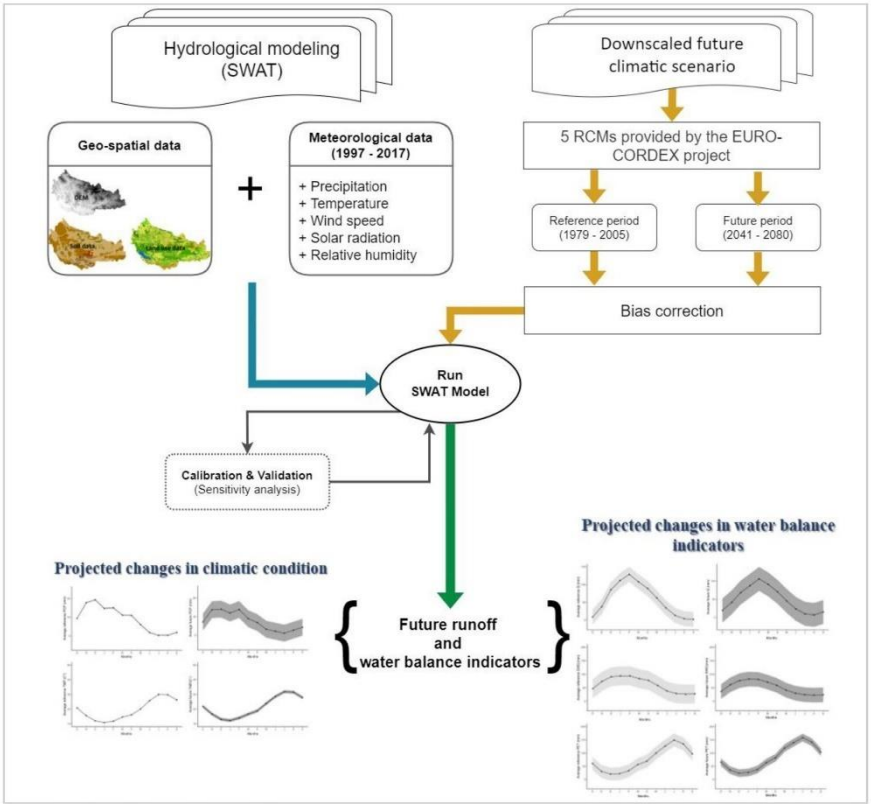
[2] University of Tours, UMR CNRS 7324 Citeres, 33 Allée Ferdinand de Lesseps, BP 60449, 37204 Tours Cedex 3, France

[3] Centre for Water Research and Technology, EcoPark Borj Cedria, Soliman, Tunisia

[4] UMR 7300 ESPACE, Université Côte d'Azur Campus Carlone, 98 Bd Herriot, BP 3209, 06200 Nice, France

Published online: 27 April 2023

Graphical abstract



Keywords Climate change · Mediterranean region · SWAT model · Euro-Cordex Ensemble models · Bias correction

Introduction

Studies assessing the impacts of climate change on catchment flow regimes have shown distinct hydrological alteration projections depending on catchment location and characteristics, climate model projections, and temporal and spatial scales of the study. For instance, the availability of water resources is projected to increase because of an increase in precipitation in mountainous, Himalayan and tropical regions (Meehl et al. 2005; Abbaspour et al. 2007; Piani et al. 2010; Fan and Shibata 2015; Hattermann et al. 2015; Torma 2019; Roy et al. 2021; Karakoyun and Kaya 2022; Roy et al. 2022a, b), but it is expected to decrease in Mediterranean catchments as a consequence of the projected drier and hotter climatic conditions in the future (Meehl et al. 2005; Raymond et al. 2019; Fonseca and Santos 2019; Torma 2019; Rocha et al. 2020; Martinez-Salvador and Conesa-Garcia 2020; Marras et al. 2021; Martinez-Salvador et al. 2021). In addition, the degree of hydrological alteration within the same region can vary depending on prevailing hydrological processes and local catchment attributes (Oni et al. 2014; Lespinas et al. 2014). Other researchers have found that the choice of climate model projections as well as model parameterization and resolution could also result in different magnitudes of hydrological indicator alteration (Ludwig et al. 2009; IPCC 2021; Marras et al. 2021). As such, hydrological impacts of climate change studies have been proposed at the catchment scale for accurate quantification of these

impacts and for identifying practical adaptation measures (Ludwig et al. 2011; Ben Nsir et al. 2022; Roy et al. 2022a, b).

In order to accurately measure the potential effects of climate change on hydrology in the Mediterranean, it is important to utilize climate projections that are both high-resolution and precise. CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) is a global initiative aimed at providing climate projections at regional scales to better understand the impacts of climate change on various sectors. This initiative includes several domains that cover different parts of the world and utilize different sets of regional climate models (RCMs) to downscale the output from global climate models (GCMs). In the Mediterranean area, Med-CORDEX is commonly used due to its specific focus on the region and its ability to provide suitable resolution for hydrological impact studies at the catchment scale. However, Euro-CORDEX can also be used to provide projections for the region at a higher resolution, which may be useful for certain applications (Ha et al. 2022).

The significance of studying climate-induced hydrologic alterations in the Mediterranean catchments is highlighted by the area's identification as a climate change and water security hotspot, as discussed in various studies (Meehl et al. 2005; Fonseca and Santos 2019; Torma 2019; Raymond et al. 2019; Rocha et al. 2020; Martinez-Salvador and Conesa-Garcia 2020; Marras et al. 2021; Lachgar et al. 2021; De Girolamo et al. 2022), which also acknowledged the issue of uncertainty in quantifying the extent of hydrologic change due to climate change. on the catchment flow regime in the Mediterranean. Uncertainty stems from the model structure, greenhouse gas concentration driven by the climate model, model structure and parametrization, inputs, etc. In addition to the variability in local hydrological processes and physical attributes, this uncertainty makes the quantification of hydrological alteration more complex under climate change. As such, the concept of multimodel ensemble methods has been proposed to improve the long-term reliability and stability of climate models and to provide consistent and reliable forecasts (Ruti et al. 2015; Ilori and Balogun 2022). The use of an ensemble of multi-hydro-climate models for assessing the hydrological impacts of climate change has proven superior to a single model projection. The multimodel ensemble approach has been reported to be more effective than a single model approach under various climatic conditions in different complex catchments, including the Mediterranean (Tan et al. 2020; Balhane et al. 2021; Marras et al. 2021; Martinez-Salvador et al. 2021).

Considering adaptation to climate change impacts, the spatial distribution of hydrological processes and environmental settings in the catchment need to be considered while assessing the hydrological impacts of climate change. This calls for physical-based and spatially distributed hydrological models to be used in conjunction with climate model projections. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a continuous-time and semi-distributed model that has proven its effectiveness under various climatic conditions in different complex catchments especially in the Mediterranean catchment (Tan et al. 2020; Harraki et al. 2020; Balhane et al. 2021; Marras et al. 2021; Martinez-Salvador et al. 2021; Hachemaoui et al. 2022; Ben Saad et al. 2023; Mahdaoui et al. 2023). This model is widely considered one of the most dependable approaches for assessing the impacts of climate change on hydrology.

Recent studies conducted in the Mediterranean area have incorporated SWAT with climate model ensembles to evaluate water resources under future climate conditions (Torma 2019; Marras et al. 2021; Balhane et al. 2021; Ha et al. 2022). These studies reveal a potential decline in mean precipitation and a reduction in streamflow discharge, along with an increase in extreme precipitation events. The results underscore the value of using ensemble modeling to improve our understanding of future climate changes and emphasize the need for continued research to refine and enhance these methods.

After conducting a thorough evaluation of each individual EURO-CORDEX model, a multi-model ensemble was created to predict future precipitation changes in Ouergha catchment in Morocco, which is a crucial agricultural region reliant on dams to mitigate drought. Additionally, this study aims on the flow patterns of the Ouergha catchment by combining the multi-model ensemble with the SWAT model. The study solely concentrates on the RCP 4.5 scenario, which is not commonly used in hydrological studies. The chosen RCP 4.5 represents an optimistic scenario with greater potential for emissions reductions and mitigation efforts, which is particularly important for regions or sectors pursuing decarbonization strategies. The study provides valuable contributions to the study of climate change impacts in the Mediterranean region, where changes are happening faster than in other areas, highlighting the significance of using this methodology for informed decision-making of the importance of safeguarding the ecosystem and ensuring the sustainability of the dam and its associated benefits.

Materials and methods

Study area

The Ouergha catchment is located on the Mediterranean coast, north of Morocco, between the sub-Rifian mountains to the north and the pre-Rifain mountains to the south. It is also the main tributary of the Sebou River catchment, which drains an area of approximately 6139 km^2, with an altitude ranging from 85 to 2447 m. As a sub-catchment of

the Sebou, the Ouergha catchment contains four dams positioned from upstream to downstream (Asfalou, Bouhouda, Sahla, and Al Wahda). The catchment feeds Al Wahda, the largest dam in Morocco with an annual storage capacity of 3.7 billion m^3 (Jaouda et al. 2018) (Figs. 1, 2).

The climate of the catchment is Mediterranean with dry summers and rainy winters. Rainfall is irregular from year to year. The average rainfall is 973 mm, ranging from 500 mm in the east to approximately 1700 mm in the central mountainous area in the south, and the annual average temperature is 28 °C.

The predominance of clay soils and disaggregated layers of marl and shale increases the impermeability of the catchment, thus explaining the lack of groundwater in the Ouergha catchment (Senoussi et al. 1999). As a result, hydrological modeling is concentrated on examining surface water flows (Fig. 2).

The Ouergha catchment is useful for the cultivation of various agricultural products (Fig. 2) that are very important for the national economy. More than 35% is occupied by orchards, consisting of olive trees, fig trees, and carob trees.

Data collection

To evaluate the hydrological processes and develop future projections of water parameters within the Ouergha catchment, we used the following variables:

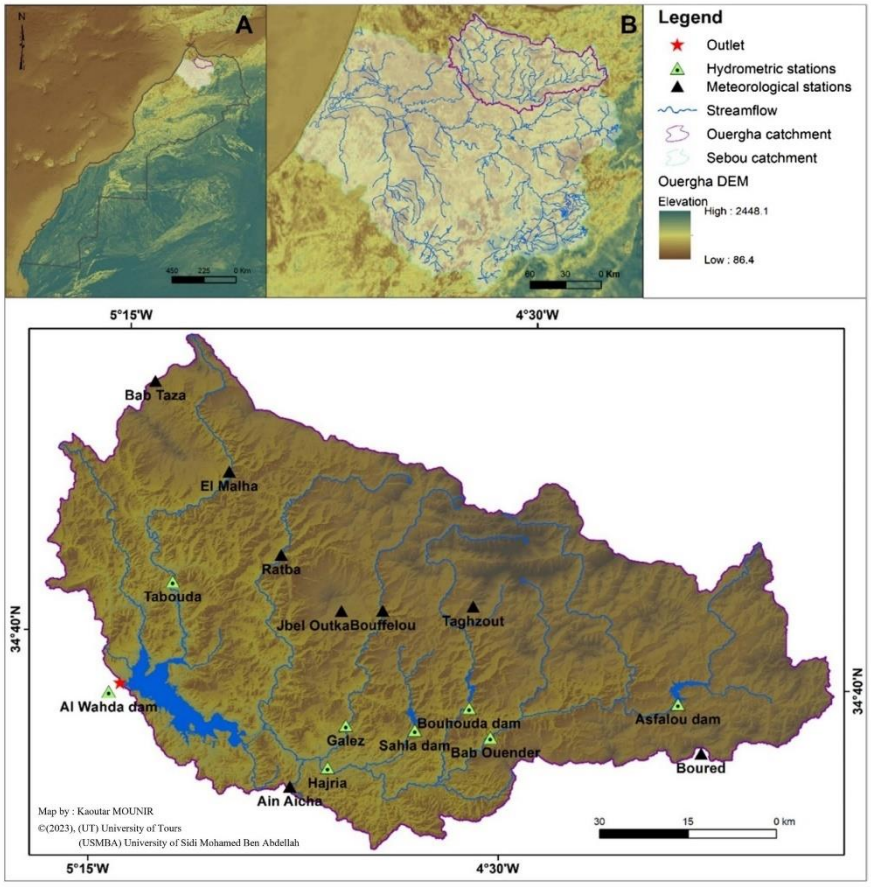


Fig. 1 Location of the Ouergha catchment in Morocco (**A**) and the Sebou catchment (**B**)

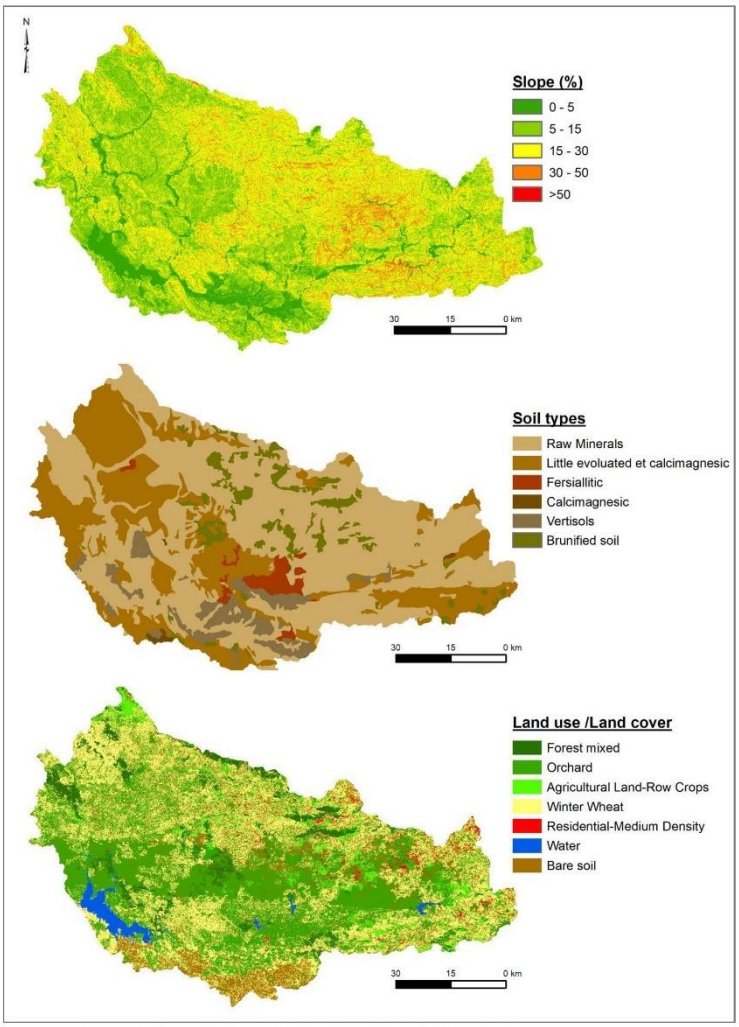


Fig. 2 Characteristics of the slope, soil and land use/land cover in the Ouergha catchment

- A digital elevation model (DEM, 25 m resolution) (USGS 2011) was used to define the catchment and extract its morphological characteristics (Table 1).
- The soil properties used were obtained from a detailed study conducted in the Ouergha catchment in 1994 by the Regional Directorate of Water and Forestry and desertification mitigation (DREFLCD 1994) (Fig. 2, Table 1). However, we completed the soil database by calculating parameters such as hydraulic conductivity (Soil_K), bulk density (Soil_BD), and available water content (Soil_AWC). These parameters were calculated according to the Van Genuchten (1980) (Eq. 1) and Mualem (1976) (Eq. 2) mathematical models (Table 2).

The Van Genuchten water retention function (Eq. 1) is defined by the water retention curve $\Theta(h)$ where Θ_r and Θ_s are residual and saturated water contents ($cm^3\ cm^{-3}$).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{1-1/n}} \quad (1)$$

Table 1 Input data for the SWAT model

SWAT database	Data	Scale	Date	Source
Geographic	DEM	50 grid	–	http://www.usgs.gov/pubprod/data.html
	Soil types	1/100,000	1994	Regional Directorate of Water and Forestry and the fight against desertification in Rabat (report)
	Land use/land cover	Remote sensing (ENVI 1/50,000) + Mapping and validation in the study field	2017	https://earthexplorer.usgs.gov/
Climatic	PCP	Daily	1993–2017	Hydraulic Sebou Catchment Agency (HSBA)
	TMP (min and max)			

Table 2 Regional climate projections obtained with different couplings of global models (GCMs) and regional models (RCMs) of the EURO-CORDEX initiative with a resolution of 0.11° (~12 km)

RCMs	Variant	PCP	TMP	WS	SR	RH
MPI-M-MPI-ESM-LR_ SMHI-RCA4	r1i1p1	✓	✓	✓	✓	✓
ICHEC-EC-EARTH_DMI-HIRHA5	r1i1p1	✓	✓	✓	✓	✓
NCC-NorESM1-DMI-HIRHAM5	r1i1p1	✓	✓	✓	✓	✓
MOHC-HadGEM2-ES-KNMI-RACMO22E	r1i1p1	✓	✓	✓	✓	✓
IPSL-IPSL-CM5A-MR_ SMHI-RCA4	r1i1p1	✓	✓	✓	✓	✓
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	✓	✓			
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	✓	✓			
CNRM-CERFACS-CNRM-CNRM_Aladin	r1i1p1	✓	✓			
ICHEC-EC-EARTH_ KNMI-RACMO22E	r1i1p1	✓	✓			
MOHC-HadGEM2-ES-CLMcom-CCLM	r1i1p1	✓	✓			
IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS-WRF331F	r1i1p1			✓	✓	✓
NCC-NorESM1-M-DMI-HIRHAM5	r1i1p1			✓	✓	✓
MOHC-HadGEM2-ES-SMHI-RCA4	r1i1p1			✓	✓	✓

PCP precipitation; *TMP* temperature; *WS* wind speed; *SR* solar radiation; *RH* relative humidity; red colour: rejected parameters; Green colour: accepted parameters

The following Eq. (2) was used in conjunction with the pore-size distribution model by Mualem (1976) to yield the Van Genuchten–Mualem model (1980):

$$K(s_c) = K_o S_e^L \{1 - [1 - S_e^{n/(n-1)}]^{1-1/n}\}^2 \quad (2)$$

n where K_o is the matching point at saturation (cm/day) and similar, but not necessarily equal, to the saturated hydraulic conductivity, Ks. The parameter L (–) is an empirical pore tortuosity/connectivity parameter that is normally assumed to be 0.5 (Mualem 1976).

- The land use/land cover data were derived from satellite images from Landsat 8 (USGS 2017) using ENVI 5.3 and validated in the field (Table 1).
- Daily meteorological data were provided by the Hydraulic Sebou Catchment Agency (HSBA). The precipitation and temperature data cover the period 1954–2017. We considered 10 hydrometric stations with temporal continuity in the data from 1993 to 2017 and good spatial coverage of the Ouergha catchment. Wind speed (WS), solar radiation (SR), and relative humidity (RH) were simulated automatically using ArcSwat. In addition, the daily flow at the Al Wahda dam station provided by the HSBA was used to calibrate and validate the SWAT Model (Table 1).
- The Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) was used to assess the impact of climate change on the Ouergha catchment from 2041 until the end of 2080. Daily meteorological data such as precipitation (PCP), temperature (TMP), WS, SR, and RH were obtained from the results of five regional climate models (RCMs) provided by the EURO-CORDEX project (http://www.euro-CORDEX.net/).

SWAT model

As shown in the general framework flowchart (Fig. 3), the multi-step formulation modeling was performed entirely in the GIS environment to evaluate the performance of the multi-GCM climate model ensembles to adequately describe the future climate of the Ouergha catchment.

Firstly, the input data for the model, which includes weather, land use, soil, and climate data, is prepared. Next, the SWAT model simulation is set up, with a defined simulation period (1997–2017) and specified hydrological response units (HRUs). The model is then calibrated and validated using the SUFI-2 algorithm with a calibration period of 1997–2010 and a validation period of 2011–2017. Secondly, the climate model data is downscaled to improve its resolution and relevance to local conditions. A bias correction is then applied to improve the accuracy and reliability of climate model simulations. The SWAT model is then coupled with the climate model ensemble from EURO-CORDEX for the reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods under the RCP4.5 scenario. The coupling process involves downscaling climate data to a finer resolution and using it as input for the SWAT model. Finally, the results of the model simulations are analyzed to assess the projected changes in climatic conditions and water balance indicators in the

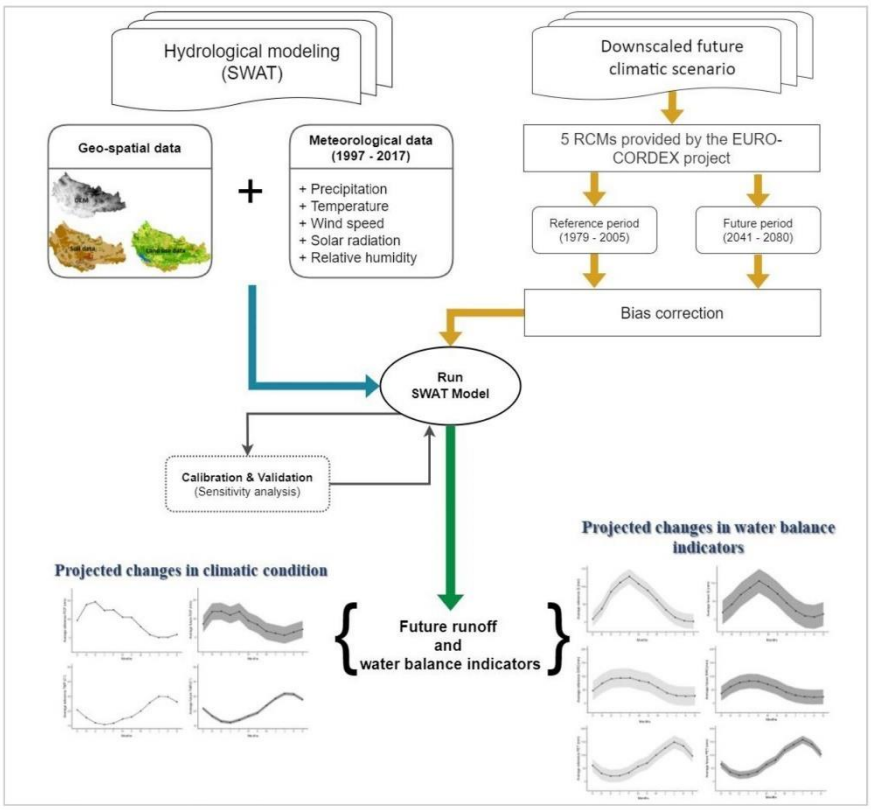


Fig. 3 General framework flowchart of the adopted methodology

Ouergha catchment. This involves comparing the future period results to reference period data and assessing the model's uncertainty.

Hydrological modelling

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a continuous-time semi-distributed model based on a hydrological modelling program. It was developed by Neitsch et al. (2011) to evaluate the effects of alternative management decisions on hydrological processes, and pollution sources related to agronomic practices on water quality (Arnold et al. 2012).

The SWAT Model has been widely used in different climate regions to support water management decision-making, and has been shown to be effective even in environmentally sensitive areas (La Jeunesse et al. 2015; Brouziyne et al. 2018). Furthermore, the model has been successfully applied in Morocco to simulate flow, erosion, and sediments deposition (Fadil et al. 2011; Brouziyne et al. 2018; Markhi et al. 2019; Briak et al. 2019). These studies have shown that the SWAT model can represent observed hydrological variables, but exhibits a significant variance between observations and simulations. The model results are represented in a distributed format, which is useful for assisting the management and practices of local water resources.

The SWAT Model divides catchments into subcatchments. Each subcatchment is further discretized into a series of hydrologic response units (HRUs) that define the hydrological balance by combining soil and land use. For each HRU, the model simulates numerous properties, such as soil water content, flow, sediment yield, and agricultural management practices, and is then aggregated for each subcatchment by a specific average. The hydrological balance of each subcatchment was calculated using Function 3.

$$\frac{\partial SW}{\partial t} = Pday - Qsurf - Ea - Wseep - Qgw \quad (3)$$

where SW_t is the soil water content (mm), P_{day} is precipitation rate (mm/day), Q_{surf} is the surface runoff rate (mm/day), E_a is evapotranspiration rate (mm/day), W_{seep} is the water percolation rate from the soil profile (mm/day), Q_{gw} is the groundwater flow rate (mm/day).

Modelling approach

Despite the effectiveness of the model, it is known as a greedy model that requires many input parameters (maps, soil data, etc.) (Table 2). In this study, model execution was performed using ArcSwat2012, which is an extension of ArcGIS-ArcView Software (ArcMap10.3). The aim is to facilitate catchment data encoding using a spatial scale imbricated unit of HRU. These units were defined by the superposition of topography (DEM), land use, and soil type (Table 1). In this study, the HRU distribution formed 170 units of soil, Land use/land cover (LULC), and slope class combinations dispersed in 13 subcatchments. For each HRU, water was stocked in the flow, soil, aquifer, and snow.

To run the ArcSwat model for a given period, it was necessary to define the simulation period. In this study, we selected a daily simulation period from 1993 to 2017, with a three-year warm-up period from 1993 to 1996. The model was then run for the simulated catchment and each subcatchment. We used the variable storage or Muskingum method (Linsley et al. 1982) to obtain the calculated process directed through flow for each catchment and subcatchment. The catchment concentration time was estimated using Manning's kinematic Equation (Neitsch et al. 2011).

Calibration and validation

Hydrological modelling is challenging and prone to uncertainty. Many algorithms have been developed to calibrate hydrological uncertainties in the SWAT–CUP interface, such as the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) developed by Beven and Binley (1992), the Parasol Method (Parameter Solution) by Van Griensven et al. (2006), and SUFI-2 (Sequential Uncertainty FItting) developed by Abbaspour et al. (2007).

We used Sufi-2 (The Sequential Uncertainty Fitting version 2) in our study to perform a sensitivity analysis. This algorithm has been recommended by many researchers (Yang et al. 2008; Sellami et al. 2013; Martinez-Salvador and Conesa-Garcia 2020) because of its low number of interactions, moderate process time during calibration and validation to reach optimal results many researchers worldwide have recommended the model for surface flow (Sellami et al. 2013), water quality (Fan and Shibata 2015) and erosion (Markhi et al. 2019).

The calibration period was from 1997 to 2010 and the validation period was from 2010 to 2017. Multiple simulation iterations were run with a minimum of 500 simulations in each run (Thavhana et al. 2018). Then, for each run, SWATCUP suggests new parameter range values to optimize the statistical values.

After running 500 simulations on the observed streamflow, the model performance and efficiency are judged on the basis of the P-factor, R-factor, R^2, and NS values (Table 4), which are based on the following factor equations (Thavhana et al. 2018).

The p-factor (Eq. 4) is computed as the percentage of discharge that represents the measured data included in the 95% prediction band limit, frequently mentioned as the 95PPU. It is calculated at 2.5% and 97.5% levels of the cumulative outflow distribution obtained by sampling the Latin hypercube (Abbaspour 2015).

$$\mathrm{p-factor} = \frac{\mathrm{NQin}}{n} \times 100 \quad (4)$$

R-factor (Eq. 5) is the average width of the band divided by the standard deviation of the corresponding measured variable. A low value of the R-factor near 0 is desirable to explicate less uncertainty; it is the inverse of the P-factor, where a p-factor close to 1 is judged as satisfying.

$$\mathrm{R-factor} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{t_i=1}^{n}\left(Q^{\mathrm{M}}_{t_i,97.5\%} - Q^{\mathrm{M}}_{t_i,2.5\%}\right)}{\sigma_{\mathrm{obs}}} \quad (5)$$

The Nash–Sutcliffe (NS) (Eq. 6) is calculated using the following Equation to evaluate the model performance. Simulations with an NS value below 0.5 are not considered acceptable (Nash and Sutcliffe 1970).

$$\mathrm{NS} = 1 - \frac{\sum_i^n \left(P_i - O_i\right)^2}{\sum_i^n \left(O_i - \overline{O}\right)^2} \quad (6)$$

R^2 equation (Eq. 7) is considered as the determination coefficient, which ranges between 0 and 1. A low correlation is described by an R^2 value near 0, and a good correlation is represented by an R^2 value near 1.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \left(O_i - \overline{O}\right)^2 \left(P_i - \overline{P}\right)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(O_i - \overline{O}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(P_i - \overline{P}\right)^2}}\right)^2 \quad (7)$$

where O_i observed flowout, $\overline{P}$ mean value of observed flowout, P_i is the simulated flow out value.

Finally, SWAT was forced using an ensemble of climate model projections. This method is intended to ensure that any changes in hydrological function are correlated with climate forcing.

Climate models auditing

The Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) was initiated by the World Climate Research Program (WCRP). It is an international regional climate downscaling experiment that integrates model evaluation and climate projection frameworks to improve regional climate change projections worldwide (Giorgi et al. 2009).

The use of CORDEX climate models to improve GCMs driving climate models has multiple advantages. These include their spatial and temporal accuracy and the possibility of improving the representation of future and current climates. The quality and accuracy of a regional climate change scenario are defined by both the RCM and driving GCM (Christensen and Kjellström 2020). Therefore, ensemble simulations of different climate models should be performed to gain a better understanding of the uncertainties associated with each model (Onyutha et al. 2016).

Despite the gaps between GCMs and local grid cells being filled to some extent by downscaling, RCM performance is still prone to two major limitations. On the one hand, the spatial adjustment performance varies from the observations by the dynamic process and the physical parameterization of the RCM. However, the RCM, which is steered by the GCM results as lateral boundary conditions, inherits the GCM bias, which cannot be removed by increasing the resolution (Liang et al. 2006; Fiseha et al. 2014; Christensen and Kjellström 2020). Additionally, the uncertainty in the data due to the downscaled models and data series was removed using the bias correction method.

In this study, we used five models obtained from different couplings of global models (GCM) and regional models (RCM) of the EURO-CORDEX initiative, with a resolution of 0.11° (~ 12 km). The projections of the multimodel climate ensemble are for reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods under the RCP4.5 scenario.

Statistical bias correction

The extension method of the cumulative distribution function (CDF) was used to generate the same distribution of GCM outputs as the distribution mapping (DM) method (Tan et al. 2020). According to the statistical data, the temperature and precipitation variables obey the gamma distribution, whereas the precipitation variable does not (Piani et al. 2010). Moreover, the theoretical CDF was estimated only from rainy days, without considering non-rainy days. To overcome this problem, the ECDF is employed for both the wet (October–April) and dry periods (May–September), and is therefore applicable to almost all possible climate parameters (Jakob Themessl et al. 2011)

$$F(x) = \int_0^x f(t|a,b)\mathrm{d}t = \frac{1}{\beta^{\infty}T(a)}t^{a-1}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\beta}}dtx \geq 0;\infty, \beta > 0$$

$$G(x) = \int_{-\mu}^{x} g\left(t|u,s^2\right)\mathrm{d}t = \int_{-\mu}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\mathrm{e}^{-\frac{(t-m)^2}{2s^2}}\mathrm{d}t \quad (8)$$

where x signifies the precipitation or temperature variable, $f(t|\alpha,\beta)$ is the probability density function of the gamma distribution with two parameters, α and β, and $g(t|\mu,\sigma^2)$ is the probability density function of the normal distribution with two parameters, μ and σ^2.

$$P_{\mathrm{cor}}^{\mathrm{ECDF}}(t) = ecdf_{\mathrm{obs}}^{-1}[ecdf_{\mathrm{GCM}}(P(t))]$$

$$T_{\mathrm{cor}}^{\mathrm{ECDF}}(t) = ecdf_{\mathrm{obs}}^{-1}[ecdf_{\mathrm{GCM}}(T(t))] \quad (9)$$

Hydrological indicators

Changes in flow regime can be assessed using various existing hydrological indicators. Although several hydrologic indicators can be used to assess the impact of climate change, they are not universal. The chosen sites were based on their characteristics and data availability.

Hence, these indicators (Table 3) should cover various functions related to the flow response, such as the frequency and magnitude of the flow. The following table shows the various hydrological indicators applicable to the Ouergha catchment. These indicators can be used to evaluate potential changes in various aspects of a given site's water supply, such as precipitation (PCP), temperature (TMP), flow (Q), soil water content (SWC), and evapotranspiration (PET). Furthermore, the choice is also based on the significance of these indicators, not only from the hydrological perspective but also deemed informative and useful for adaptation decision making.

The expected deviation for each indicator was calculated and averaged to represent the ensemble mean of the multiclimate model. Both the relative and absolute changes for the reference and future periods in the hydrologic indicator were calculated using the following equations:

$$\Delta v = \frac{v_{\mathrm{Fut}} - v_{\mathrm{Ref}}}{v_{\mathrm{Ref}}} \times 100\mathrm{Relativechange}(\%)$$

$$\Delta v = v_{\mathrm{Fut}} - v_{\mathrm{Ref}}\mathrm{Absolutechange}(\mathrm{indicatorunit})$$

Table 3 Selected hydrological indicators for climatic change impact assessment

Process group	Hydrologic indicators
Climatic conditions	Cumulative monthly precipitation (PCP)
	Monthly temperature (TMP)
	Monthly potential evapotranspiration (PET)
Water balance	Monthly runoff
	Monthly soil water content (SWC)
Extreme flow magnitude and frequency	Flow duration curve (FDC)
	Number of low flow days per month
	Number of high flow days per month
Flow duration timing of flow	Minimum flow duration (1, 7, 30, 90 days)
	Maximum flow duration (1, 7, 30, 90 days)
	Average annual Julian date of 1-day maximum
	Average annual Julian date of 1-day minimum
	Average annual Julian date of 90-days maximum
	Average annual Julian date of 90-days minimum

$$\overline{\Delta v} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Delta v_i \tag{10}$$

where N is the total number of climate model members ($N=4$), Δv is the multimodel mean of the relative change for indicator v, and the ensemble uncertainty in the projected magnitude of change can be estimated using Eq. (11) according to Giorgi and Mearns (2002).

$$\delta_{\Delta v} = \delta_{\Delta v}\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\Delta v_i - \overline{\Delta v})^2\right]^{1/2} \tag{11}$$

where $\delta_{\Delta v}$ corresponds to the root-mean-square difference of the change in indicator v, and the uncertainty interval around the mean projected magnitude of change is given by $\delta_{\Delta v} \pm \delta_{\Delta v}$ and centered around Δv.

Results

Sensitivity analysis

In this study, the data were used to estimate the daily flow delivered from the NE (catchment upstream) toward the SW (Al Wahda dam). The SWAT Model was executed for daily flow simulations in 13 subcatchments of the Ouergha catchment. The NS factor criteria considered in this study were adopted from the Moriasi evaluation (Moriasi et al. 2007), with a performance limit of 0.5. This method was widely used in sensitivity analysis studies in the Mediterranean area, such as Sellami et al. (2013) and Aouissi et al. (2016).

Table 4 lists the most sensitive parameters identified by global sensitivity analysis. The response of the hydrological model was evaluated using monthly observed data from the Al Wahda Dam station.

Table 4 Ranking of the most sensitive parameters in the flow simulation

Parameter name	Rank	*t*-Stat	*p*-Value	Fitted value
CN2.mgt	1	−13.22	0.00	−0.11
TIMP.bsn	2	−7.20	0.00	0.20
SOL_BD(..).sol	3	4.58	0.00	−0.05
SURLAG.bsn	4	1.81	0.07	8.28
ESCO.hru	5	−0.87	0.39	0.86
EPCO.hru	6	−0.81	0.42	0.20
OV_N.hru	7	0.68	0.49	14.92
SOL_ALB(..).sol	8	−0.68	0.50	0.25
SOL_AWC(..).sol	9	0.59	0.56	−0.02
SHALLST	10	−0.48	0.63	19,763.66
DEP_IMP.hru	11	−0.19	0.85	3319.67

Table 4 displays the first four most sensitive parameters: (1) the initial SCS runoff curve number (CN2), which depends on soil parameters and land use properties; (2) the Snowpack temperature lag factor (TIMP), which differs based on the influence of the previous day's snow pack temperature or snow pack density depth and exposure; (3) the soil bulk density (SOL_BD), which depends on the humidity of soil; and (4) the surface runoff lag time (SURLAG), which controls the fraction of the total water that is allowed to enter the stream on any specific day.

Hydrological model

Figure 4 and Table 5 show the best simulations of the period required for calibration and validation in the Ouergha catchment area. The SWAT model was well fitted during the

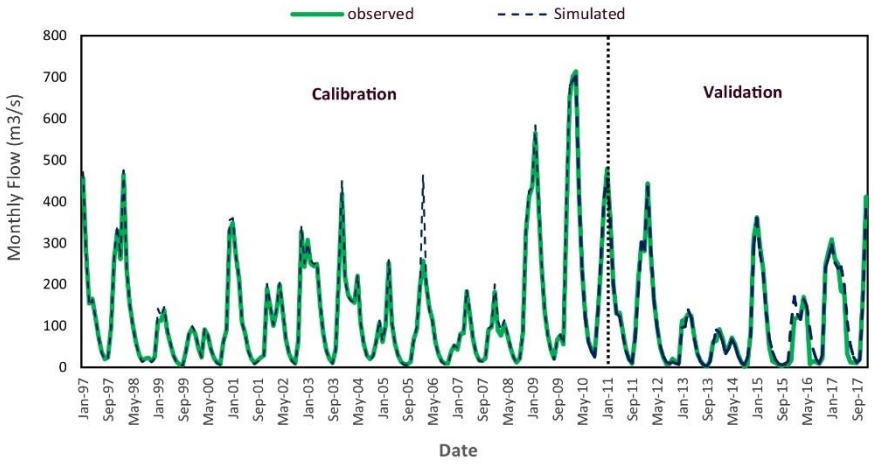


Fig. 4 Monthly flows in the Ouergha catchment (calibration and validation periods)

Table 5 Evaluation of the performance of the SWAT model in the calibration and validation of monthly runoff simulations

Periods	Best simulation	NS	PBIAS	p-factor	R^2	r-factor	RSR
Calibration	426	0.78	−2.7	0.94	0.82	0.44	0.47
Validation	206	0.92	−3.4	0.8	0.92	0.49	0.29

calibration with an NS value of 0.78, whereas the validation period showed an improvement in NS, which reached 0.92. The PBIAS values in the calibration and validation periods showed a slight underestimation of flow with high consistency. The RSR, NS, and R^2 values in the validation period showed an improvement in the goodness of fit compared with the calibration values (Table 5). This indicates that the simulation results had a smaller uncertainty range.

Figure 4 displays that the simulated data are closely related, and the flow is slightly overstated during the dry period (i.e., 2006). This overestimation can be justified by many parameters such as hydraulic conductivity, soil, or evapotranspiration. In addition, the model's sources of structural uncertainty include processes that are not considered in the model, like unknown activities in the catchment, as well as inaccuracy in the model due to over-simplification of the processes considered in the model (Yang et al. 2008; Sellami et al. 2013). In general, the resulting simulation of validation and calibration showed a slight underestimation of the average flow (Sellami et al. 2013; Rocha et al. 2020).

Changes in climate variables under RCM scenarios

The performance of bias correction was established on the set of selected RCMs over the reference period (1979–2005) and the future period (2041–2080) for minimum and maximum temperatures and precipitation at Ain Aicha station. The choice of the latter station was based on its localization and representativeness at the level of the Ouergha catchment area.

Table 6 Average values of the flow Q (m^3/s), precipitation PCP (mm), and temperature maximum (T_{max}) and minimum (T_{min}) (°C) in the Ouergha catchment

Variable	Reference period (1997–2017)	Future period (2041–2080)
Q	122.7	117.5 (−8.4%)
P	18.8	11.7 (−37.8%)
T_{max}	24.1	28.9 (+20%)
T_{min}	10.2	(+34%)

Table 6 shows the average trends of each hydrological and meteorological variable over the future period using the bias-corrected climate scenarios in the SWAT model. The results for each variable show a significant increase in the average minimum and maximum temperature, which can exceed 34% and 28.9%, respectively, for the period 2041–2080. A significant decrease of more than 37% in precipitation can be stated for the period 2041–2080. Therefore, climate change is expected to have a significant impact on climatic

components and may impact water inputs and reduce the flow by approximately 8% for the period 2041–2080.

Projected changes in climatic condition

The expected changes in climate conditions were assessed by coupling the SWAT model with climate models under RCP4.5 emissions scenario. The climate multimodel ensemble (ENS) was assessed for the future period (2041–2080) using the average relative deviation in monthly cumulative precipitation and absolute changes in monthly temperature with respect to the reference period (1979–2005) for the Ouergha catchment.

Seasonally, precipitation is projected to vary between − 8 to − 21% in autumn (OND), − 10 to − 8% in winter (JFM), − 16 to + 1% in spring (AMJ), and + 3 to + 9% in summer (JAS). On an annual scale, the average precipitation during the reference period of 421.5 mm is projected to be 358.8 mm in the future period, which represents an average decrease of 14.8% (Fig. 5).

In the future, the temperature is expected to increase in all seasons by 0.89–1 °C in autumn, 1.3–1.9 °C in winter, 2.7–2.8 °C in spring and 1.6–1.9 °C in summer. On a seasonal scale, the average temperature within the reference period is 18.5 °C, whereas the average annual temperature is expected to be 21.3 °C, representing an increase of more than 2.5 °C in the catchment (Fig. 6).

Projected changes in water balance indicators

Flow (Q) Figure 7 shows the predicted variation in flow volume between the reference and future periods. It is calculated based on the ENS.

The projected change in the flow volume can vary between − 87% to − 8% in autumn, + 24% to + 21% in winter, + 18% to + 37% in spring, and + 45% to −45% in summer. On an annual basis, the average flow is projected to reach 105 mm in the future against 128 mm in the reference period, which represents a decrease of − 13%. In addition, uncertainty is associated with the magnitude of the variation in monthly flow, which tends to be relatively constant in all months.

Furthermore, the examined relationship between the predicted rainfall and flow showed a high positive correlation coefficient of 0.75, which was significant at 0.5%. This finding indicates that less rainfall significantly affects the flow in the Ouergha catchment area.

The contribution of rainy seasons to the catchment's water supply and seasonal distribution is significant. However, future flow will be impacted by a reduction in precipitation

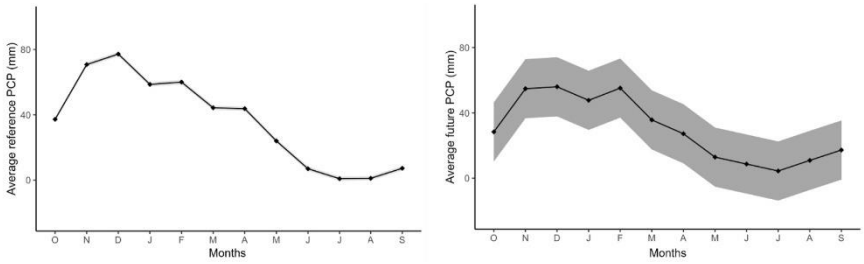


Fig. 5 Monthly precipitation (PCP) in the Ouergha catchment for reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods

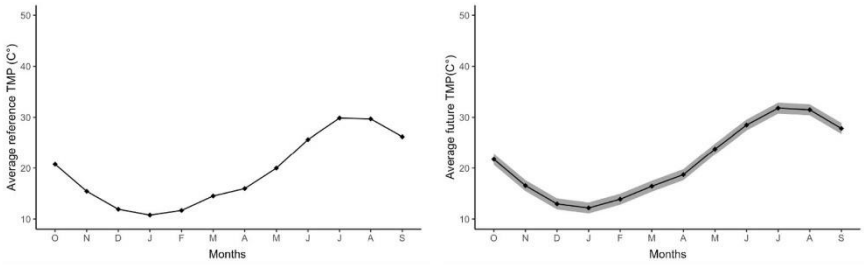


Fig. 6 Monthly temperature (TMP) (°C) in the Ouergha catchment for reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods

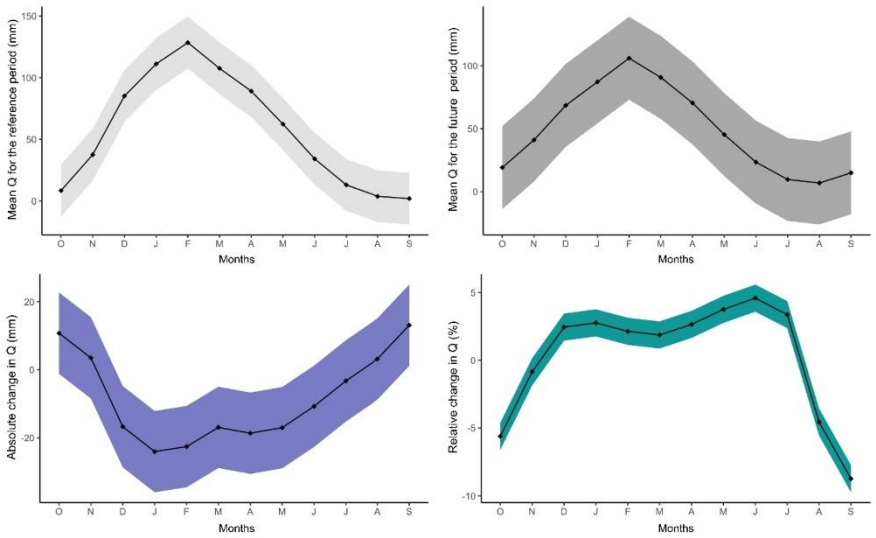


Fig. 7 *Flow* (*Q*) indicator in the Ouergha catchment for reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods

frequency and amount (Orkodjo et al. 2022). While the relationship between climate forcing and flow is understood, the findings emphasize the high reliance of flow on precipitation and suggest that uncertainties in precipitation projections affect flow predictions.

Soil water content (SWC) The SWC is an essential component of the hydrological cycle and is responsible for partitioning precipitation into flow and infiltration. Figure 8 shows that the annual SWC is expected to decrease significantly to below 15% in the Ouergha catchment area. This is in line with the seasonal projections ranging from − 21% to − 15% in fall, − 12% to − 15% in winter, − 24% to − 21% in spring and − 15% to − 12% in summer. The reduction in projected precipitation was the main factor causing the SWC to decrease in the Ouergha catchment. Precipitation shows a significant correlation with flow and soil water content (SWC), of $r=0.75$ and $r=0.80$, respectively. Furthermore, the amount of soil evaporation and plant transpiration affect the water cycle of plants.

Potential evapotranspiration (PET) PET is a vital component of the water balance and can lead to the loss of up to 90% of annual rainfall in the Mediterranean region (Wilcox et al. 2003). Thus, it is important to understand the relationship between climate and water balance.

The projected changes in the average monthly PET of the Ouergha catchment are presented in Fig. 9. On a seasonal scale, the increase in PET varied from + 7% to + 15% in fall, + 17% to + 11% in winter, + 15% to + 5% in spring, and + 5% to + 6% in summer. On an annual basis, the results indicate a positive trend that is expected to continue in the future, exceed + 12% annually. Furthermore, the change in PET was strongly affected by temperature and seasonality, where the relationship between these two variables had a positive correlation of 0.96.

Magnitude of flow extremes duration The increasing occurrence of low flows in the Ouergha catchment is expected to have a negative impact on the region's water supply. This study investigated the changes in flow extremes during different time durations.

This study considered the yearly maximum and minimum flows during different time periods (1, 3, 7, 30, and 90 days). The mean value of the ENS was calculated using the moving average of the daily SWAT simulations for reference and future periods. The mean ENS value is calculated using Eq. (2), and its associated uncertainty is given by $\Delta v \pm \delta \Delta v$, where $\delta \Delta v$ is estimated using Eq. (3).

Figure 10 shows that the minimum and maximum flow magnitudes for both the future and reference periods are likely to decrease in the 2080s in the Ouergha catchment. The impact of increasing the flow duration was more pronounced in terms of the duration from 1 to 90 days. The most critical reduction was expected to occur in the 90-days minima with an average of 43.5%. As the flow

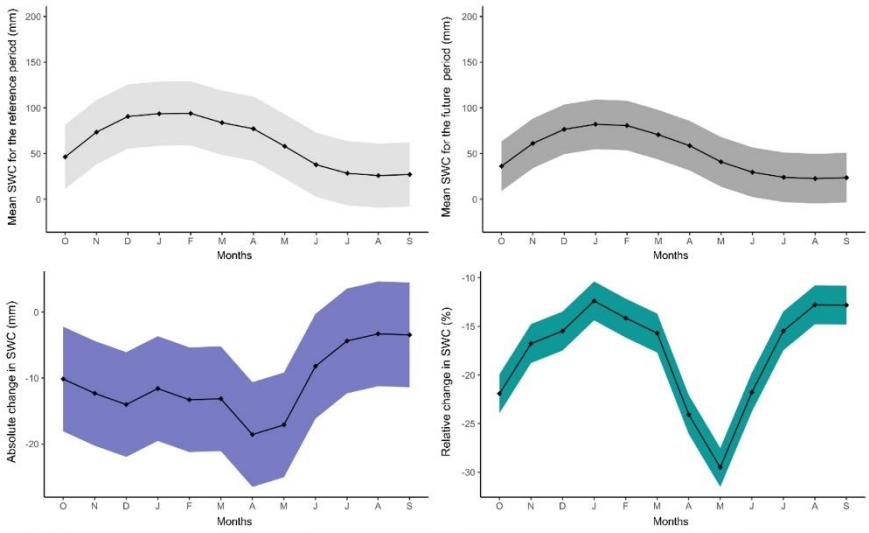


Fig. 8 Soil water content (SWC) indicator in the Ouergha catchment for reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods

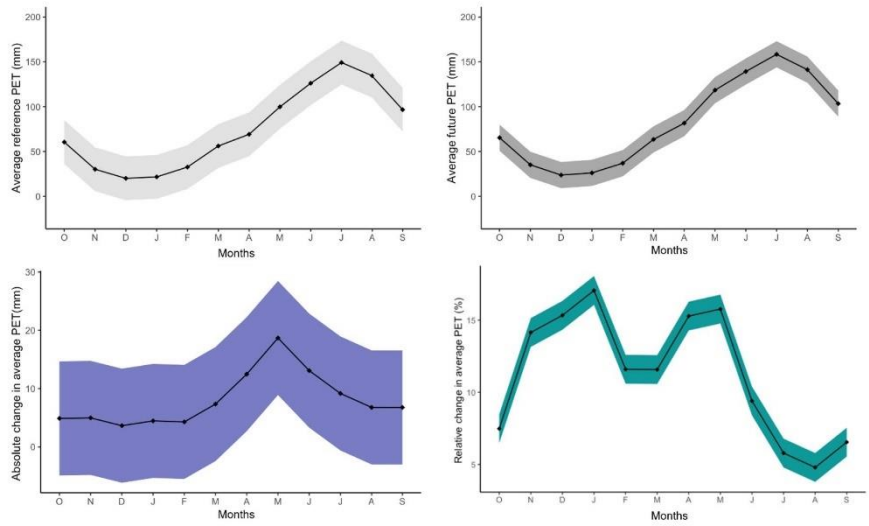


Fig. 9 Potential evapotranspiration (PET) indicator in the Ouergha catchment for reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods

duration increases, the intensity of the reduction gradually decreases. The changes in annual flow extremes suggest that the frequency and magnitude of extreme flows are likely to decrease in the future in the Ouergha catchment area.

Timing of flow extremes Studying the timing flow aims to explore the possibility of changes in the timing of annual flow extremes between the reference and future periods owing to the changing climate conditions in the catchment.

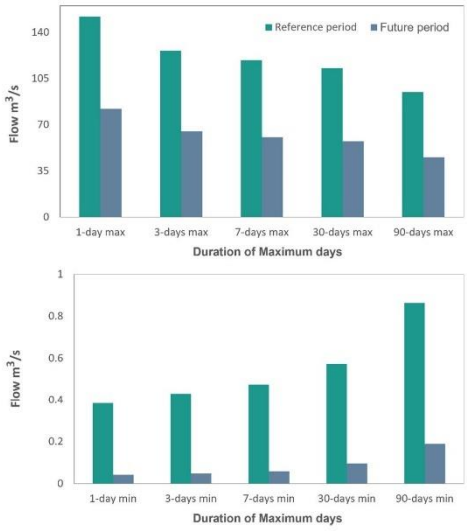


Fig. 10 Changes in minimum and maximum flow extremes for various time durations in the Ouergha catchment for reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods

This analysis was conducted based on the average Julian date of the annual minimum and maximum flows. The annual flow timing is only presented in terms of the 1-day, 30-days, and 90-days periods. This method facilitates easy interpretation and displays annual flows in a simple and practical manner.

Despite the projected changes in magnitude, the average timing of annual flow extremes in the Ouergha catchment displays an important change. For instance, in the future, the annual 90-days minimum flow in the Ouergha catchment is expected to occur during the fall and autumn seasons, whereas the maximum flow is expected to occur during spring and summer (Fig. 11).

Discussion

Data collected from a variety of sources, such as land and water resources and weather patterns, are needed to develop models that can predict the effects of climate change on various aspects of the human population and environment. These models are then used to address water resource management and agriculture. Modeling of hydrological processes related to climate change is improved when the data collected by large-scale global climate models are downscaled to smaller levels. This makes it easier to analyze the data and develop effective predictions. Among the most critical factors that a hydrologic model considers when developing its models is the availability of precipitation data. Thus, if the precipitation data is not of sufficiently high quality, it can lead to uncertainty and bias in the model's flow and water resource management predictions. Therefore, the quality of the data collected is very important in SWAT model development. This study evaluated the projected changes in climatic condition and in water balance indicators over the reference period (1979–2005) according to the RCP4.5 emission scenario in the future periods (2041–2080).

In the current study, projected precipitation tends to decrease and is associated with greater uncertainty, particularly during wet periods (October through March). Compared to precipitation, temperature changes in the watershed are associated with uncertainties that are consistent in both wet and dry periods. This result is in line with many studies that have been conducted in the Mediterranean basin (e.g., Ludwig et al. 2011; La Jeunesse and Quevauviller 2016; IPCC 2021; Martinez-Salvador et al. 2021) and especially studies that have been carried out in different catchments in Morocco. For example, Balhane et al. (2021) analyzed the projected changes in temperature and precipitation over northern Morocco using three ensembles (NEXGDDP, Euro-cordex and bias-adjusted Euro-cordex) downscaling under the two emission scenarios considered (RCP4.5 and RCP8.5) for 2071–2100, with respect to the historical period 1971–2005. Thus, the three ensembles of models projected that by the end of the century, the temperature would increase by about 1.5 to 3 degrees Celsius. Warming would vary depending on the location and model, while the annual precipitation would decrease. The Euro-CORDEX predicted the biggest decreases, with a change ranging from 20% to 40%. According to Harraki et al. (2020) the temperatures are expected to increase in Morocco by 1–2 °C, by 2–3 °C and by 4–7 °C for a warming of 1.5, 2 and 4 °C, respectively. Precipitation would change by − 20% to − 40% for 4 °C warming in the northern of Morocco and by − 10% to − 20% for the other levels of warming. The study of Mahdaoui et al. (2023) used the projections of CanESM2 climate model over the Bouregreg catchment. It showed that the annual and seasonal precipitation would decrease in winter and autumn. On the other hand, the mean temperature would increase during the summer and spring seasons under the RCP4.5 and 8.5 scenarios.

Rainy seasons also contribute significantly to the overall volume of water supply and seasonal distribution in the catchment. Future flow will be influenced by decreases in the frequency and amount of precipitation (Orkodjo et al. 2022).

However, when assessing the effects of climate change on a region, it is important to identify and map hydrologic indicators that can cover the different components of a flow regime. Although there is a vast literature on the different aspects of a flow regime, assessment of the effects

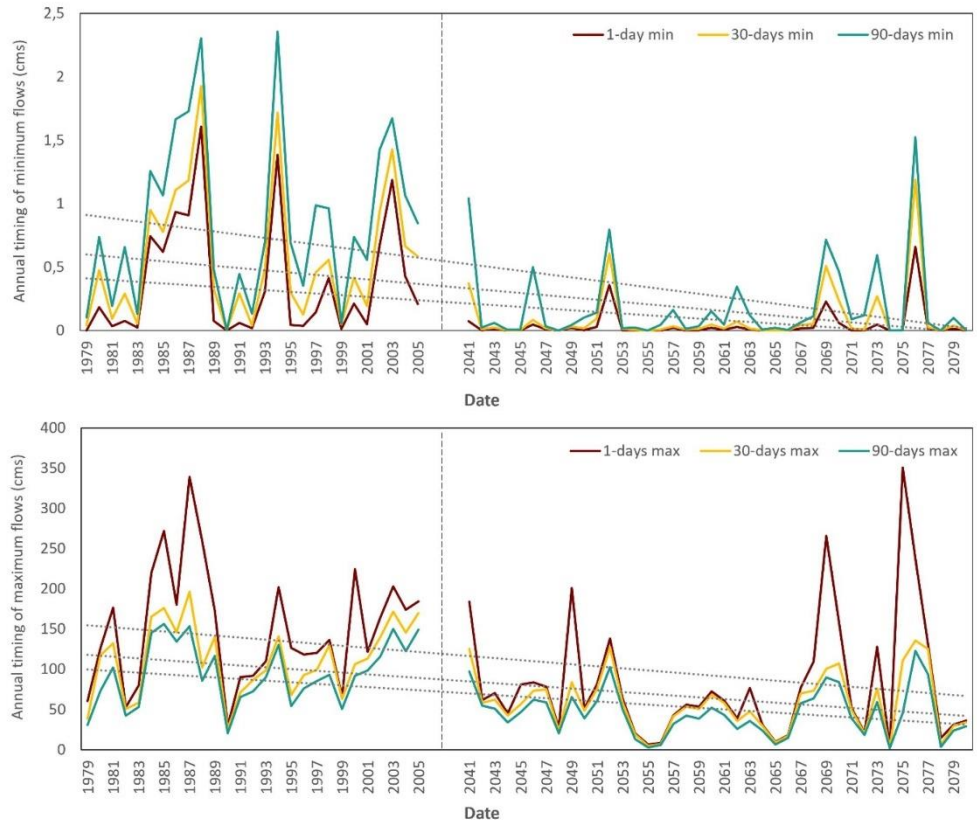


Fig. 11 The annual timing for 1-day, 30-days, and 90-days minimum and maximum flows in the Ouergha catchment for reference (1979–2005) and future (2041–2080) periods

of environmental change on a region is still lacking with respect to the timing, frequency, duration, and magnitude of extreme flows and other water balance factors.

In the current study we explored the future flow, SWC and PET. The examined relationship between predicted rainfall and flow showed a high positive correlation coefficient of 0.75, which was significant at 0.5%. This result indicates that less rainfall significantly affects flow in the Ouergha catchment. Accordingly, the results of this study support the projections provided by other studies, which have predicted a decrease in discharge that could exceed 15% (Rocha et al. 2020; Marras et al. 2021).

The SWC is projected to decrease significantly to less or more than 15% in the Ouergha watershed on annual and seasonal basis (Fig. 7). The reduction in projected precipitation was the primary factor in the decrease in SWC in the Ouergha watershed. Precipitation showed a significant correlation with streamflow and soil water content (SWC), of $r=0.75$ and $r=0.80$, respectively. In addition, the amount of soil evaporation and plant transpiration affect the plant water cycle. Several studies have identified various factors that affect soil moisture, such as temperature, vegetation cover, and soil type. For instance, Mohamed et al. (2018) used GIS and SWAT model to evaluate soil moisture content in the Wadi Al-Naft region in Iraq and found that areas with low elevation, steep slopes, and high drainage density have the lowest soil moisture content, which is similar to the Ouergha catchment that has a predominance of clay and the presence of disaggregated layers of marl and shale that increase catchment impermeability.

Other studies, such as Heinrich and Gobiet (2011), Houle et al. (2012), Ramos and Martínez-Casasnovas (2014), Zare

et al. (2022), and Leij et al. (2022), have also investigated the effects of different factors on soil moisture. These studies found that dry spells and increasing temperature can reduce soil moisture content, while wet spells can increase it. Vegetation cover can also influence soil moisture by altering evapotranspiration rates and soil infiltration capacity. Soil type and topography can impact soil moisture by regulating water infiltration and drainage rates.

Karakoyun and Kaya (2022) used the SWAT model to simulate and predict the hydrological response and soil erosion of the Murat River Basin in Turkey. Although the study did not specifically focus on soil moisture, the findings suggest that land use changes, particularly the conversion of forested areas to agricultural land, can significantly impact soil erosion and hydrological response, which in turn can affect soil moisture by altering infiltration rates and surface runoff.

The predicted changes in the average monthly PET of the Ouergha catchment are presented in Fig. 8. On an annual basis, the results indicate a positive trend that is expected to continue in the future, exceeding + 12% per year. In addition, the change in PET was strongly affected by temperature and seasonality, where the relationship between these two variables had a positive correlation of 0.96. Several studies conducted in various catchments in the Mediterranean area have projected that potential evapotranspiration (PET) is likely to increase by the end of the century, which would have significant impacts on water demand, water availability, and crop yield (Lovelli et al. 2012; Aouissi et al. 2016; Mostafa et al. 2021; Pulighe et al. 2021). These studies, which used the SWAT model, are consistent with our findings. The projected increase in PET is mainly attributed to rising temperatures, which are expected to cause greater water loss through evapotranspiration, resulting in decreased water availability for agricultural use. This would, in turn, lead to increased water stress and reduced crop yields in affected areas. While the relationship between climate forcing and flow is understood, the results highlight the strong correlation between water indicators with decreasing precipitation and increasing temperature.

In term of the changes in annual extreme flows suggest that the frequency and magnitude of extreme flows are likely to decrease in the future in the Ouergha watershed. The reduction in annual minimum and maximum flows may have adverse effects on dam operations and water conservation measures. For example, the timing of water releases from the dams may be adjusted in the future due to reduced annual flows. The annual flow schedule is presented only in terms of 1-day, 30-day and 90-day periods. This method facilitates interpretation and displays annual flows in a simple and convenient manner.

The impact of increasing the flow duration was more pronounced in terms of the duration from 1 to 90 days. The most critical reduction was expected to occur in the 90-days minima with an average of 43.5%. The results indicate that the reduction in seasonal low flows is gradual and consistent with flow duration expansion. As the flow duration increases, the intensity of the reduction gradually decreases. The changes in annual flow extremes suggest that the frequency and magnitude of extreme flows are likely to decrease in the future in the Ouergha catchment area.

The findings of this study are consistent with other studies conducted on flow extremes in the Mediterranean region, such as Forzieri et al. (2014) and Tramblay et al. (2020), which also found that changes in streamflow characteristics are related to low flows, such as drought duration, severity, and frequency. Satoh et al. (2022) further suggests that hydrological droughts in the future are expected to occur earlier in the year and with greater severity compared to historical records due to increasing temperature and decreasing snow accumulation in mountainous areas. These findings are in line with De Girolamo et al. (2022), which indicates a shift in the timing of the maximum and minimum flows in a Mediterranean basin due to changes in precipitation patterns and evapotranspiration rates.

Despite the projected changes in magnitude, the average timing of extreme annual flows in the Ouergha watershed shows a significant change. For example, in the future, the 90-day annual minimum flow in the Ouergha watershed is expected to occur during the fall seasons, while the maximum flow is expected to occur during the spring and summer. Therefore, this can be considered a change in seasonality or a change in rainy months.

For instance, Satoh et al. (2022)found that the timing of unprecedented hydrological droughts is likely to shift towards earlier months in several regions of the world, including the Mediterranean. Tramblay et al. (2020) highlighted the challenges of assessing drought in the Mediterranean region under future climate scenarios, due to the complex interactions between precipitation, evapotranspiration, and soil moisture. De Girolamo et al. (2022) showed that climate change is expected to reduce the duration and frequency of high flow events in a Mediterranean basin in Italy, while increasing low flow events. These findings are consistent with the results of this study, which also indicate a shift in the timing of extreme annual flows in the Ouergha watershed under future climate scenarios.

Conclusion

The Ouergha catchment is known for its agricultural production, which depends on the supply of dams, especially during drought events. However, dam safety is important because of the potential impact of climate change on structural vulnerability. These include changes in flow, siltation, and extreme weather conditions. Long-term flow projections

are generally subject to uncertainties due to the impacts of climate change. The current study proposes to study projected changes in the flow regime of the Ouergha catchment area. The changes and associated uncertainties were assessed using the SWAT hydrological model with an ensemble of climate model projections. The impact of these changes was quantified using an ensemble of hydroclimatic indicators.

The results reveal that the effects of climate change on the water resources of the Ouergha catchment during the future period of 2041–2080 are important and should be seriously considered by water resource management bodies. The precipitation and flow are expected to decrease by 14% and 8%, respectively, by the end of the century. Moreover, the study indicated that climate change is expected to cause prolonged and intense droughts in the future (2041–2080), as temperature and PET are expected to increase by 1 to + 3 °C and 1.5% to 16%, respectively.

Furthermore, the study showed that a decrease in precipitation will inevitably drastically affect the water cycle in the Ouergha catchment area. The Pearson correlation showed a strong relationship between precipitation with flow and soil water content with a coefficient of $r = 0.75$ for flow and $r = 0.80$ for soil. Furthermore, the correlation between temperature and evapotranspiration was very strong (0.96). Thus, a decrease in precipitation will inevitably drastically affect the water cycle in the Ouergha catchment area. Additionally, the study indicated that the SWC is expected to decrease significantly, and the reduction in projected precipitation is the main factor causing the SWC to decrease. Moreover, the increase in PET is expected to continue in the future, exceeding + 12% annually.

Regarding the magnitude of the extreme flow, a clear decrease is observed in both high and low flows for different durations considered in this study, that is, 1, 7, 30, and 90 days. Moreover, in the timing of the extreme flows forecasted during the different durations (1, 30, and 90 days), the 90-days minimum flow catchment is expected during the winter and autumn seasons, whereas the maximum flow is expected in spring and summer. The main result of the present study is certainly this important change in seasonality, which is expected to occur in the second part of the century.

The significance of this study lies in its innovative approach to evaluating the potential influence of climate change on the hydrology of the Ouergha catchment, particularly using the RCP 4.5 scenario. The findings of this study can be used to inform decision-making in the relevant domain, particularly in the agricultural sector. However, the uncertainties associated with the magnitude of the variation of flow, particularly during wet periods still need to be assessed. Additionally, the study only focused on one scenario, and further research is needed to explore the impact of other scenarios on the hydrology of the Ouergha catchment. These findings reaffirm that the region is a hotspot for climate change and identify the need for further research to address urgent adaptation measures.

Acknowledgements No funding to declare.

Data availability The data that support the findings of this study are available upon reasonable request. There are no restrictions on the data, and interested researchers may contact the corresponding author at kaoutaramounir@gmail.com to request access. The authors confirm that all data underlying the findings of this study are fully available without restriction.

Declarations

Conflict of interest The authors confirm that there is no conflict of interest regarding this manuscript.

References

Abbaspour KC (2015) SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland

Abbaspour KC, 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. J Hydrol 333:413–430. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014

Aouissi J, Benabdallah S, Chabaâne AH, Cudennec C (2016) Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT—application in data-scarce rural Tunisia. Agric Water Manage 174:39–51. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.004

Arnold JG, Moriasi DN, Gassman PW, Abbaspour KC, White MJ, Srinivasan R, Harmel RD, van Griensven A, Van Liew MW, Kannan N, Jha Santhi MK (2012) SWAT: model use, calibration, and validation. Am Soc Agric Biol Eng 55(4):1491–1508. https://doi.org/10.13031/2013.42256

Balhane S, Driouech F, Chafki O, Manzanas R, Chehbouni A, Moufouma-Okia W (2021) Changes in mean and extreme temperature and precipitation events from different weighted multi-model ensembles over the northern half of Morocco. Clim Dyn 58:389–404. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05910-w

Ben Nsir S, Jomaa S, Yıldırım Ü, Zhou X, D'Oria M, Rode M, Khlifi S (2022) Assessment of climate change impact on discharge of the Lakhmass Catchment (Northwest Tunisia). Water 14:2242. https://doi.org/10.3390/w14142242

Ben Saad A, Ben M'barek-Jemai M, Ben M'barek N et al (2023) Hydrological modeling of the watershed of a RAMSAR site using the SWAT model (Ichkeul National Park—Tunisia of the extreme north). Model Earth Syst Environ. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01659-1

Beven K, Binley A (1992) The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrol Process 6(3):279–298. https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305

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). Int Soil Water Conserv Res 7(2):176–183. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.002

Brouziyne Y, Abouabdillah A, Bouabid R, Benaabidate L (2018) SWAT streamflow modeling for hydrological components' understanding within an agro-sylvo-pastoral watershed in Morocco. J

Mater Environ Sci 9(1):128–138. https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.16
Christensen OB, Kjellström E (2020) Partitioning uncertainty components of mean climate and climate change in a large ensemble of European regional climate model projections. Clim Dyn 54:4293–4308. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05229-y
De Girolamo AM, Barca E, Leone M, Lo Porto A (2022) Impact of long-term climate change on flow regime in a Mediterranean basin. J Hydrol Region Stud 41:101061. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101061
DREFLCD (1994) Programme de lutte anti érosif du bassin versant de l'oued Ouergha. Direction régionale des eaux et forêt et de la lutte contre la désértification, p 320
Fadil A, Rhinane H, Kaoukaya A, Kharchaf Y, AlamiBachir O (2011) Hydrologic modeling of the Bouregreg watershed (Morocco) using GIS and SWAT model. J Geogr Inf Syst 3:279–289. https://doi.org/10.4236/jgis.2011.34024
Fan M, Shibata H (2015) Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed northern Japan. Ecol Indic. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.003
Fiseha BM, Setegn S, Melesse A, Volpi E, Fiori A (2014) Impact of climate change on the hydrology of upper Tiber River Basin using bias corrected regional climate model. Water Resour Manage 28:1327–1343. https://doi.org/10.1007/s11269-014-0546-x
Fonseca AR, Santos JA (2019) Predicting hydrologic flows under climate change: the Tâmega Basin as an analog for the Mediterranean region. Sci Total Environ 668:1013–1024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.435
Forzieri G, Feyen L, Rojas R, Flörke M, Wimmer F, Bianchi A (2014) Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. Hydrol Earth Syst Sci 18(1):85–108. https://doi.org/10.5194/hess-18-85-2014
Giorgi F, Mearns LO (2002) Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) method. J Clim 15(10):1141–1158. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3c1141:COAURA%3e2.0.CO;2
Giorgi F, Jones C, Asrar GR (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. World Meteorol Org Bull 58(3):175–183
Ha MT, Bastin S, Drobinski P, al. (2022) Precipitation frequency in Med-CORDEX and EURO-CORDEX ensembles from 0.44° to convection-permitting resolution: impact of model resolution and convection representation. Clim Dyn. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06594-6
Hachemaoui A, Elouissi A, Benzater B, al. (2022) Assessment of the hydrological impact of land use/cover changes in a semi-arid basin using the SWAT model (case of the Oued Saïda basin in western Algeria). Model Earth Syst Environ 8:5611–5624. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01422-6
Harraki WE, Ouazar D, Bouziane A, Hasnaoui D (2020) Climate change observations and trends overview: focus on Morocco with a case-study of a future reservoir's response to climate change. E3S Web Conf 150:8. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015001010
Hattermann FF, Huang S, Hagen K (2015) Climate change impacts on hydrology and water resources. Meteorol Zeitschr 24:201–211. https://doi.org/10.1127/metz/2014/0123
Heinrich G, Gobiet A (2011) The future of dry and wet spells in Europe: a comprehensive study based on the ENSEMBLES regional climate models. Int J Climatol 32(13):1951–1970. https://doi.org/10.1002/joc.2421
Houle D, Bouffard A, Duchesne L, Logan T, Harvey R (2012) Projections of future soil temperature and water content for three southern Quebec forested sites. J Clim 25(21):7690–7701. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00440.1
Ilori OW, Balogun IA (2022) Evaluating the performance of new CORDEX-Africa regional climate models in simulating West African rainfall. Model Earth Syst Environ 8:665–688. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01084-w
IPCC (2021) Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press (in press), p 82. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/
Jakob Themessl M, Gobiet A, Leuprecht A (2011) Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. Int J Climatol 31(10):1530–1544. https://doi.org/10.1002/joc.2168
Jaouda I, Akhssas A, Ouadif L, Bahi L, Lahmili A (2018) Stabilite des talus et impact sur le reseau routier: cas du bassin versant d'Ouergha (Maroc). MATEC Web Conf. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814902052
Karakoyun E, Kaya N (2022) Hydrological simulation and prediction of soil erosion using the SWAT model in a mountainous watershed: a case study of Murat River Basin, Turkey. J Hydroinf 24(6):1175–1193. https://doi.org/10.2166/hydro.2022.056
La Jeunesse I, Quevauviller P (2016) Changement climatique et cycle de l'eau, Impacts, adaptation, législation et avancées scientifiques. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, p 325
La Jeunesse I, Cirelli C, Sellami H, Aubin D, Deidda R, Baghdadi N (2015) Is the governance of the Thau coastal lagoon ready to face climate change? Ocean Coast Manage 118(Part B):234–246. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.05.014
Lachgar R, Badri W, Chlaida M (2021) Assessment of future changes in downscaled temperature and precipitation over the Casablanca-Settat region (Morocco). Model Earth Syst Environ 8:2123–2133. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01213-5
Leij FJ, Dane JH, Sciortino A (2022) Hierarchical prediction of soil water content time series. Catena 209(Part 2):105841. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105841
Lespinas F, Ludwig W, Heussner S (2014) Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. J Hydrol 511:403–422. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.033
Liang XZ, Pan J, Zhu J, Kunkel KE, Wang JXL, Dai A (2006) Regional climate model downscaling of the US summer climate and future change. J Geophys Res Atmos 111(D10):1–17. https://doi.org/10.1029/2005JD006685
Linsley RK, Kohler MA, Paulhus JLH (1982) Hydrology for engineers. McGraw-Hill, New York, NY
Lovelli S, Perniola M, Scalcione E, Troccoli A, Ziska LH (2012) Future climate change in the Mediterranean area: implications for water use and weed management. Ital J Agron 7(1):7. https://doi.org/10.4081/ija.2012.e7
Ludwig R, May I, Turcotte R, Vescovi L, Braun M, Cyr J-F, Fortin L-G et al (2009) The role of hydrological model complexity and uncertainty in climate change impact assessment. Adv Geosci 21:63–71. https://doi.org/10.5194/adgeo-21-63-2009
Ludwig R, Roson R, Zografos C, Kallis G (2011) Towards an inter-disciplinary research agenda on climate change, water and security in Southern Europe and neighboring countries. Environ Sci Policy 14(7):794–803. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.003
Mahdaoui K, Tahiri M, Asmlal L (2023) Downscaling future climate changes under RCP emission scenarios using CanESM2 climate model over the Bouregreg catchment, Morocco. Model Earth Syst Environ. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01683-1
Markhi A, Laftouhi N, Grusson Y, Soulaimani A (2019) Assessment of potential soil erosion and sediment yield in the semi-arid Nfis

basin (High Atlas, Morocco) using the SWAT model. Acta Geophys. https://doi.org/10.1007/s11600-019-00251-z
Marras PA, Lima DCA, Soares PMM, Cardoso RM, Medas D, Dore E, De Giudici G (2021) Future precipitation in a Mediterranean island and streamflow changes for a small basin using EURO-CORDEX regional climate simulations and the SWAT model. J Hydrol 603:127025. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127025
Martinez-Salvador A, Conesa-Garcia C (2020) Suitability of the SWAT model for simulating water discharge and sediment load in a Karst watershed of the semiarid Mediterranean basin. Water Resour Manage 34:785–802. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02477-4
Martinez-Salvador A, Illares A, Eekhout JPC (2021) Assessment of streamflow from EURO-CORDEX regional climate simulations in semi-arid catchments using the SWAT model. Sustainability 13(13):7120. https://doi.org/10.3390/su13137120
Meehl GA, Arblaster JM, Tebaldi C (2005) Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations. Geophys Res Lett. https://doi.org/10.1029/2005GL023680
Mohamed MJ, Omran II, Abidalla WA (2018) Evaluation of the soil moisture content using GIS technique and SWAT model (Wadi Al-Naft region: as a case study). IOP Conf Ser Mater Sci Eng. https://doi.org/10.1088/1757-899X/454/1/012021
Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans ASABE 50:885–900
Mostafa SM, Wahed O, El-Nashar WY, El-Marsafawy SM, Abd-Elhamid HF (2021) Impact of climate change on water resources and crop yield in the Middle Egypt region. J Water Supply Res Technol AQUA 70(7):1066–1084. https://doi.org/10.2166/aqua.2021.019
Mualem Y (1976) A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour Res 12(3):513–522. https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513
Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles. J Hydrol 10(3):282–290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6
Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR (2011) Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute, College Station, TX
Oni SK, Futter MN, Molot LA, Dillon PJ, Crossman J (2014) Uncertainty assessments and hydrological implications of climate change in two adjacent agricultural catchments of a rapidly urbanizing watershed. Sci Total Environ 473–474:326–337. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.032
Onyutha C, Tabari H, Rutkows A (2016) Comparison of different statistical downscaling methods for climate change rainfall projections over the Lake Victoria basin considering CMIP3 and CMIP5. J Hydro-Environ Res 12:31–45. https://doi.org/10.1016/j.jher.2016.03.001
Orkodjo TP, Kranjac-Berisavijevic G, Abagale FK (2022) Impact of climate change on future precipitation amounts, seasonal distribution, and streamflow in the Omo-Gibe basin, Ethiopia. Heliyon 8(6):e09711. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09711
Piani C, Haerter JO, Coppola E (2010) Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. Theoret Appl Climatol 99:187–192. https://doi.org/10.1007/s00704-009-0134-9
Pulighe G, Lupia F, Chen H, Yin H (2021) Modeling climate change impacts on water balance of a Mediterranean watershed using SWAT+. Hydrology. https://doi.org/10.3390/hydrology804015
Ramos MC, Martínez-Casasnovas JA (2014) Soil water content, runoff and soil loss prediction in a small ungauged agricultural basin in the Mediterranean region using the soil and water assessment tool. J Agric Sci 153(3):1–16. https://doi.org/10.1017/S0021859614000422
Raymond F, Ullmann A, Tramblay Y, Drobinski P, Camberlin P (2019) Evolution of Mediterranean extreme dry spells during the wet season under climate change. Reg Environ Change 19:2339–2351. https://doi.org/10.1007/s10113-019-01526-3
Rocha J, Duarte A, Silva M, Fabres S, Vasques J, Revilla-Romero B, Quintela A (2020) The importance of high resolution digital elevation models for improved hydrological simulations of a Mediterranean forested catchment. Remote Sens 12:3287. https://doi.org/10.3390/rs12203287
Roy S, Bose A, Singha N, Basak D, Chowdhury IR (2021) Urban waterlogging risk as an undervalued environmental challenge: an integrated MCDA-GIS based modeling approach. Environ Challenges. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100194
Roy S, Bose A, Mandal G (2022a) Modeling and mapping geospatial distribution of groundwater potential zones in Darjeeling Himalayan region of India using analytical hierarchy process and GIS technique. Mode Earth Syst Environ 8:1563–1584. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01174-9
Roy S, Singha N, Bose A, Basak D, Chowdhury IR (2022b) Multi-influencing factor (MIF) and RS-GIS-based determination of agriculture site suitability for achieving sustainable development of Sub-Himalayan region, India. Environ Dev Sustain. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02360-0
Ruti PM, Somot S, Giorgi F, Dubois C, Flaounas E, Obermann A, Dell'Aquila A et al (2015) MED-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies. Bull Am Meteorol Soc. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176
Satoh Y, Yoshimura K, Pokhrel Y et al (2022) The timing of unprecedented hydrological drought under climate change. Nat Commun. https://doi.org/10.1038/s41467-022-30729-2
Sellami H, La Jeunesse I, Benabdallah S, Vanclooster M (2013) Parameter and rating curve uncertainty propagation analysis of the SWAT model for two small Mediterranean catchments. Hydrol Sci J 58(8):1635–1657. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.837222
Senoussi S, Agoumi A, Yacoubi M, Fakhraddine A, Sayout E-H, Mokssit A, Chikri N (1999) Climate change and water resources Ouergha watershed (Morocco). Hydroécol Appl 11:163–182. https://doi.org/10.1051/hydro:1999007
Tan Y, Guzman SM, Dong Z, Tan L (2020) Selection of effective GCM bias correction methods and evaluation of hydrological response under future climate scenarios. Climate 8(10):108. https://doi.org/10.3390/cli8100108
Thavhana MP, Savage MJ, Moeletsi ME (2018) SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu river catchment, South Africa. Phys Chem Earth A/B/C 105:115–124. https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.03.012
Torma CZ (2019) Detailed validation of EURO-CORDEX and Med-CORDEX regional climate model ensembles over the Carpathian Region. Q J Hungarian Meteorol Serv 123(2):217–240. https://doi.org/10.28974/idojaras.2019.2.6
Tramblay Y, Koutroulis A, Samaniego L, Vicente-Serrano SM, Volaire F, Boone A, Le Page M et al (2020) Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. Earth Sci Rev. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348
USGS (2011) Maps, imagery, and publications. http://www.usgs.gov/pubprod/data.html
USGS (2017) United States geological survey. https://earthexplorer.usgs.gov/
Van Genuchten MTh (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci Soc Am J 44(5):892–898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

Van Griensven A, Meixner T, Grunwald S, Bishop T, Diluzio M, Srinivasan R (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. J Hydrol 324(1–4):10–23. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008

Wilcox BP, Seyfried M, Breshears D (2003) The water balance on rangelands, in Encyclopedia of Water Science. Encycl Water Sci. https://doi.org/10.1081/E-EWS120010097

Yang J, Reichert P, Abbaspour KC, Xia J, Yang H (2008) Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. J Hydrol 358(1–2):1–23. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.012

Zare M, Azam S, Sauchyn D (2022) Evaluation of soil water content using SWAT for Southern Saskatchewan, Canada. Water 14:249. https://doi.org/10.3390/w14020249

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.

Table des matières

REMERCIEMENTS ..... **I**

RESUME ..... **IV**

ABSTRACT ..... **V**

LISTE DES FIGURES ..... **VI**

LISTE DES TABLEAUX ..... **IX**

INTRODUCTION GENERALE **1**

1. EAU ET SECURITE ENVIRONNEMENTALE **2**

2. LA CRISE DE L'EAU EN MEDITERRANEE **4**

3. PROBLEMATIQUE AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA **5**

4. DIFFICULTES LIEES A LA PANDEMIE **7**

5. ENONCE DU PLAN **7**

PARTIE I : CONTEXTE ET METHODOLOGIE **9**

CHAPITRE 1 : CONTEXTE CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA **10**

1. LA GESTION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA STABILITE SOCIALE, ECONOMIQUE ET POLITIQUE **11**

2. LE ROLE DES MODES DE FLUCTUATION CLIMATIQUE SUR LE CLIMAT MEDITERRANEEN **12**

2.1. INDICE D'OSCILLATION DE L'ATLANTIQUE NORD 13

2.2. INDICE D'OSCILLATION AUSTRALE 14

2.3. INDICE D'OSCILLATION DE LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE 15

3. L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'AGRICULTURE **16**

4. ENJEUX ET OBJECTIFS DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA **17**

CHAPITRE 2 : CONTEXTE PHYSIQUE ET TERRITORIAL **19**

1. SITUATION GEOGRAPHIQUE **20**

2. GEOLOGIE 21

3. PEDOLOGIE 22

4. CLIMATOLOGIE ET HYDROLOGIE 24

4.1. Précipitation 24

4.2. Hydrologie 27

4.3. Tests de détection de rupture météorologique et hydrologique 28

5. OCCUPATIONS DES SOLS /COUVERTURE DES TERRES 29

6. DECOUPAGE ADMINISTRATIF 30

7. ACTIVITES SOCIO-ECONOMIQUES ET PLACE DE L'AGRICULTURE 31

7.1. Activités sociales 31

7.2. Activités économiques 33

SYNTHESE DE LA PARTIE I 39

PARTIE II : EVALUATION ET GESTION DES ENJEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA 40

CHAPITRE 3 : L'ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DE L'OCCURRENCE DE LA SECHERESSE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA 41

1. INTRODUCTION 42

2. DONNEES ET METHODOLOGIE 45

2.1. ACQUISITION DE DONNEES 45

2.1.1. Données hydro-climatiques locales 45

2.1.2. NAOi à grande échelle et WeMoi 47

2.1.3. Données de télédétection 47

2.2. METHODES 49

2.2.1. Indices de sécheresse 50

2.2.2. Indices de végétation 51

2.2.3. Analyse des tendances *52*

3. RESULTATS **53**

3.1. ANALYSE DES TENDANCES DE LA SECHERESSE 53

3.2. CORRELATION DE PEARSON 55

3.3. TEST DE MANN-KENDALL 58

3.4. DETECTION SPATIALE DE LA SECHERESSE 60

4. DISCUSSIONS **65**

5. CONCLUSION **67**

CHAPITRE 4 : LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA : DEFIS ET OPPORTUNITES POUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE **69**

1. INTRODUCTION **70**

2. CONTEXTE ET ANALYSE DE L'ETUDE **72**

2.1. DONNEES 72

2.2. METHODES 73

3. RESULTATS **74**

3.1. GOUVERNANCE ET IMPLICATION DES INSTITUTIONS A LA GESTION DE L'EAU 74

3.2. GESTION DE L'IRRIGATION ET DES RESSOURCES EN EAU 80

3.3. APPLICATION DE LA REPARTITION ET DE LA TARIFICATION DE L'EAU D'IRRIGATION . 82

4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS **83**

SYNTHESE DE LA PARTIE II **87**

PARTIE III : L'EVOLUTION HYDRO-CLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA **88**

CHAPITRE 5 : ÉVALUATION DES INCERTITUDES DANS LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA **89**

1. INTRODUCTION **90**

2. DONNEES UTILISEES 91

3. METHODOLOGIE 93

3.1. DESCRIPTION DU MODELE HYDROLOGIQUE 93

3.2. APPROCHE DE MODELISATION 94

3.3. CALIBRATION ET VALIDATION DU MODELE 95

3.3.1. Analyse de sensibilité 95

3.3.2. Performance du modèle 96

4. RESULTATS ET DISCUSSION 97

4.1. ANALYSE DE SENSIBILITE 97

4.2. MODELE HYDROLOGIQUE 99

4.3. PREDICTION DES COURBES DE DUREE D'ECOULEMENT DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA 100

5. CONCLUSION 101

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DE LA VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA DANS LE CADRE DES PROJECTIONS FUTURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE. 103

1. INTRODUCTION 104

2. METHODOLOGIE 106

2.1. AUDIT DES MODELES CLIMATIQUES 106

2.2. CORRECTION DU BIAIS STATISTIQUE 107

2.3. INDICATEURS HYDROLOGIQUES 108

3. RESULTATS 110

3.1. CHANGEMENTS DES VARIABLES CLIMATIQUES SELON LES SCENARIOS RCM 110

3.2. CHANGEMENTS PREVUS DES CONDITIONS CLIMATIQUES 110

3.3. CHANGEMENTS PREVUS DES INDICATEURS DU BILAN HYDRIQUE 112

3.3.1. Débit (Q) 112

3.3.2. Teneur en eau du sol (SWC) *113*

3.3.3. Evapotranspiration potentielle (ETP) *114*

3.3.4. L'amplitude de la durée des débits extrêmes *114*

3.3.5. Durée des débits extrêmes *116*

4. DISCUSSION 117

5. CONCLUSION 121

SYNTHESE DE LA PARTIE III 123

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 126

1. CONCLUSION GENERALE 127

2. PERSPECTIVES 129

RÉFÉRENCES 131

ANNEXES 147

Kaoutar MOUNIR

Analyse et modélisation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha (Maroc)

Cette thèse porte sur l'évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha à partir d'outils empruntés à la modélisation hydrologique et climatique, l'analyse spatiale et l'analyse statistique. Les résultats de l'analyse montrent une tendance à l'augmentation de l'intensité de la sécheresse même si, à ce jour, l'irrigation été possible grâce à la présence de réservoirs. Cependant, les projections climatiques font état de diminutions des précipitations et du ruissellement avec un impact sur l'humidité des sols. Or ceci est accompagné d'une augmentation de l'évapotranspiration due à l'élévation des températures si bien qu'il y a un risque accru de sécheresse. L'approche holistique et intégrée du cycle de l'eau dans cette thèse met en évidence l'ampleur des impacts en cascade de la diminution des précipitations et de l'élévation des températures de l'air sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha et la nécessité de considérer cette vision holistique pour adapter la gestion des ressources au changement climatique afin en atténuer ses effets négatifs sur les usages.

Mots clés : Changement climatique, Sécheresse, Eau, modèle SWAT, Euro-CORDEX, Bassin versant de l'Ouergha (Région méditerranéenne)

This thesis assesses the impact of climate change on water resources in the Ouergha catchment using tools that are based on hydrological and climate modelling, spatial analysis and statistical analysis. The results of the analysis show a trend towards increasing drought intensity, even though irrigation has been possible to date thanks to the presence of reservoirs. However, climate projections point to decreases in rainfall and runoff, with an impact on soil moisture. This is accompanied by an increase in evapotranspiration due to rising temperatures, so there is an increased risk of drought. The holistic and integrated approach to the water cycle in this thesis highlights the extent of the cascading impacts of reduced rainfall and rising air temperatures on water resources in the Ouergha catchment, and the need to take this holistic view to adapt resource management to climate change in order to mitigate its negative effects on uses.

Keywords: Change impact, Drought, Water, SWAT model, Euro-CORDEX, Ouergha catchment (Mediterranean region)