



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE



ENSH-(n° d'ordre)

**THESE DE DOCTORAT
DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Présentée par

Monsieur **Issam ZAIBAK**

**En vue de l'Obtention du Diplôme de Docteur en Sciences de
L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Sujet de la thèse :

**Régimes hydrologiques, Transport solide et changements
climatiques dans le bassin du Chélif**

Thèse présentée et soutenue à Blida le 09/05/2024 devant le jury composé de :

Mr. RASSOUL A	Professeur ENSH Blida	Président
Mr. MEDDI M	Professeur ENSH Blida	Directeur de thèse
Mr. HACHEMI A	MCA ENSH Blida	Examineur
Mr. YBEDRI D	Professeur UST Oran	Examineur
Mr. BOUDERBALA A	Professeur Univ Khemis Miliana	Examineur

Année Universitaire 2023/2024

*Remerciements et
Dédicaces*

Remerciements

Avant tout, je remercie Le BON DIEU pour cet Aboutissement

Je remercie mes parents car ce parcours est le fruit de leurs sacrifices et leur soutien

J'adresse mes remerciements chaleureux et toute ma gratitude à mes deux directeurs de thèse messieurs MEDDI Mohamed et Gil Mahe.

Je tiens à remercier Monsieur Mohamed MEDDI, Professeur à L'Ecole Nationale Supérieure de L'Hydraulique, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués

Je remercie également toute l'équipe du Laboratoire ECOLAB de l'université de TOULOUSE pour leur accueil et leur soutien et leur aide au début de ce parcours, je Cite Docteur Sabine SAUVAGE, Docteur José Miguel Sanchez et un hommage spécial à mon ami et confrère Docteur ZETTAM A de l'université de Tlemcen et Docteur MAMI A de l'université D'Oran.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer mon travail : au Professeur RASSOUL A de l'ENSH Blida, de l'honneur d'être président du jury,

Au Professeur, YBEDRI D de l'UST Oran, aux Docteurs BOUDERBALA A de l'Université de Khemis Miliana et HACHEMI A de L'ENSH Blida de bien vouloir examiner avec attention ce travail.

Mes remerciements vont aussi à l'équipe du laboratoire Génie d'Eau et d'Environnement et particulièrement à la directrice du laboratoire GEE, Professeur MEDDI H, pour m'avoir fourni l'aide nécessaire pour l'avancement de mes travaux de recherche, au corps enseignant et au personnel administratif de l'ENSH.

Je remercie particulièrement mes confrères et amis de l'ENSH, Docteur AMMARI A, Docteur TOUMI S, Docteur ZEROUAL A, Docteur KAHLERRAS D, Docteur KHALFI A de l'Université de Blida, Docteur Abdi I de l'Université de Jijel sans oublier Docteur BOUFEKANE A de l'USTHB et Mr.KETFI B.

Un chaleureux remerciement à toute l'équipe de l'ANRH D'Alger et de Blida, je cite Mr.OULDAMARA A, Mr.HAMID A, Mr MESSAOUDENE et Mme Abda. Sans oublier toute l'équipe des départements Géologie et Pédologie.

Toute ma gratitude aux cadres et techniciens de L'ANBT et spécialement Mr. HOUGLAOUEN M et toute son équipe.

Un remerciement Spécial et infini à ma chère épouse qui m'a accompagné et encouragé à arriver au terme de mon travail « je ne te dirais jamais assez Merci Souhila »

Je remercie toute personne de loin ou de près qui a contribué à me motiver et à me défier pour réussir et avancer dans ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents

A mes frères et sœurs

A ma petite famille

A ma belle famille

A toute ma famille

A la mémoire de mes grands parents

A la mémoire de mes oncles et mes tantes

A la mémoire de Mr. Bouhouche Said.

Résumé–Abstract–ملخص

ملخص

في شمال الجزائر، تأثر حوض الشلف الهيدروغرافي بشدة بسبب انخفاض جريان المياه منذ السبعينيات بسبب نقص هطول الأمطار السنوية. ومع ذلك، فإن حساسية الأحواض لهذا الانخفاض متغيرة وتنطوي على عمليات معقدة. يضم هذا الحوض العديد من السدود التي تمد السكان بمياه الشرب ومياه السقي لضمان إنتاج زراعي جيد و ضروري للأمن الغذائي لأكثر من 5 ملايين نسمة. تصبح الإدارة العقلانية والمثلّية ضرورة مطلقة في الظروف المناخية الجديدة. وسيتم تنفيذها باستخدام أدوات النمذجة الذكية. إن تطوير نماذج فعالة أمر أكثر من ضروري لتقييم أفضل للإمكانات والمخاطر على المدى القصير والمتوسط والطويل، من أجل اعتماد نهج فعال لإدارة الموارد الطبيعية التي يجب أن تتماشى مع أرض الواقع

وللقيام بذلك، تعد أداة تقييم التربة والمياه (SWAT) وسيلة موثوقة للغاية لمحاكاة السلوك الهيدرولوجي في المنطقة. في هذه الدراسة تم تطبيق نموذج SWAT على خمسة أحواض تغذيها سدود في حوض الشلف. ومنفذه على نطاق شهري. وكانت النتائج التي تم الحصول عليها مرضية للغاية حيث تتراوح قيم R^2 بين 0.69 و 0.79، ومعامل كفاءة-Nash Sutcliffe بين 0.68 و 0.78 ونسبة انحياز بين -21% و -1.5%. وأظهر الرسم الهيدروغرافي لوادي الشلف الذي تم محاكاته بواسطة (SWAT) على مستوى محطة سيدي بلعطار (مخرج الحوض) أن الجريان السطحي يمثل 58.3% والتدفق الجانبي 37.3% و 4.4% مما يغذي طبقات المياه الجوفية في العمق. إن التقلب المكاني والزمني للتدفقات الناجم عن تغير المناخ له تأثير كبير على العمليات الهيدرولوجية وكميات المياه المعبأة على مستوى مالأحواض الهيدروغرافية. تم تنفيذ التنبؤ بالتدفقات عند منبع السدود الخمسة باستخدام نموذج المناخ الإقليمي RCA4 باتباع ثلاثة نماذج دوران عالمية. أعطت توقعات التدفقات المستقبلية اتجاهات سلبية للفترتين (2021-2040) و(2041-2060) وباتباع السيناريوهين RCP4.5 و RCP 8.5 باستثناء استثناء بسيط تميز به نموذج القيادة Ec-Earth مع ارتفاع طفيف في معدلات التدفق للسيناريو الأكثر تشاؤما RCP 8.5 كما تم استخدام نموذج SWAT لمحاكاة ظاهرة تعرية التربة النوعية في المحطة الهيدرومترية واد الأبطال بنتيجة أعلى من 5% مقارنة بمتوسط القيمة المرصودة من خلال نفس المحطة. وستكون النماذج التي تم تطويرها بمثابة أدوات دعم القرار لمسيرى الموارد المائية. في المنطقة.

الكلمات المفتاحية: حوض الشلف، SWAT ، السدود، النسق الهيدرولوجي، التوازن المائي، التدفقات المرتقبة، إنجراف التربة.

Abstract

In Northern Algeria, the Cheliff watershed has been severely affected by a decline in annual runoff since the 1970s due to a decrease in rainfall. However, the sensitivity of watersheds to this decline is variable and involves complex processes. This basin contains several dams that supply the population with water for drinking as well as for irrigation purposes to ensure a good agricultural yield necessary for food security of more than 5 million inhabitants. Rational and optimal management becomes an absolute necessity in new climatic conditions. It will be done based on efficient modelling tools. The development of high-performance models is more than necessary for a better assessment of potential and risks in the short, medium and long term, to adopt an efficient strategy in the water sector which have to be in line with ground reality. To do this, the soil and water assessment tool (SWAT) is a very reliable way to simulate the hydrological behaviour of the region. In this study, the SWAT model was applied to five dam-feeding basins in the Cheliff basin and its outlet on a monthly scale. The results obtained are very satisfactory with R^2 values ranging from 0.69 to 0.79, Nash–Sutcliffe efficiency coefficient between 0.68 and 0.78 and bias percentage between -21% and -1.5%. The Oued Cheliff hydrogram modelled by the SWAT at the Sidi Belattar station (basin outlet) showed that surface flow represents 58.3% and 37.3% lateral flow and 4.4% that feeds deep aquifers. The spatio-temporal variability of runoff caused by climate change has a major impact on hydrological processes and the quantities of water mobilized at watershed scale. Flow predictions upstream of the five dams were carried out using the RCA4 regional climate model, following three global circulation models. Future flow projections showed negative trends for both periods (2021-2040) and (2041-2060), and according to both RCP4.5 and RCP 8.5 scenarios, with one small exception marked by the Ec-Earth driving model, with a slight increase in flows for the most pessimistic scenario.RCP 8.5. The SWAT model was also used to simulate specific erosion at the Oued EL Abtal hydrometric station, with a result +5% higher than the average value observed at the same station. The models developed will be used as decision-making tools by water-resource managers.

Keywords: Cheliff watershed; SWAT; dams; hydrological behaviour; water balance, Runoff Forecasting, Soil erosion.

Résumé

Dans le nord de l'Algérie, le bassin versant du Cheliff a été sévèrement affecté par une diminution de l'eau de ruissellement depuis la décennie soixante-dix en raison d'une baisse des précipitations annuelles. Cependant, la sensibilité des bassins versants à cette baisse est variable et implique des processus complexes. Ce bassin contient plusieurs barrages qui approvisionnent la population en eau potable et en eau d'irrigation pour assurer un bon rendement agricole nécessaire à la sécurité alimentaire de plus de 5 millions d'habitants. Une gestion rationnelle et optimale devient une nécessité absolue dans les nouvelles conditions climatiques. Elle sera réalisée à l'aide d'outils de modélisation intelligents. Le développement de modèles performants est plus que nécessaire pour une meilleure évaluation du potentiel et des risques à court, moyen et long terme, afin d'adopter une approche efficace de la gestion des ressources naturelles qui doit être en ligne avec la réalité du terrain. Pour ce faire, l'outil d'évaluation des sols et de l'eau (SWAT) est un moyen très fiable de simuler le comportement hydrologique de la région. Dans cette étude, le modèle SWAT a été appliqué aux niveaux de cinq bassins alimentant des barrages dans le bassin du Chélif ainsi que son exutoire. Les résultats obtenus sont très satisfaisants avec des valeurs du coefficient de détermination (R^2) comprises entre 0,69 et 0,79, un coefficient d'efficacité Nash-Sutcliffe (NSE) compris entre 0,68 et 0,78 et un pourcentage de biais (PBIAS) compris entre -21 % et - 1,5 %. L'hydrogramme de l'Oued Cheliff modélisé par SWAT à la station de Sidi Belattar (exutoire du bassin) a montré que les écoulements de surface représentent 58,3%, les écoulements latéraux 37,3% et l'alimentation des aquifères profonds 4,4%. La variabilité spatio-temporelle des écoulements causée par le changement climatique a une incidence importante sur les processus hydrologiques et les quantités d'eau mobilisées à l'échelle du bassin versant. La prédiction des débits à l'amont des cinq barrages a été réalisée avec le modèle climatique régionale RCA4 suivant trois modèles globaux de circulation. Les projections futures des débits ont donné des tendances négatives pour les deux périodes (2021-2040) et (2041-2060) et suivant les deux scénarios RCP4.5 et RCP 8.5 sauf une petite exception marquée par le « *Driving model* » Ec-Earth avec une légère augmentation de débits pour le scénario le plus pessimiste RCP 8.5. Le modèle SWAT a été également utilisé pour la simulation du transport solide de l'Oued Mina au droit de la station hydrométrique d'Oued EL Abtal. Le résultat simulé est supérieur à +5 % comparé à la valeur moyenne observée au niveau de la même station. Les modèles développés serviront d'outils d'aide à la décision pour les gestionnaires des ressources en eau de la région.

Mots Clés : Bassin du Chélif, SWAT, Barrages, Comportement Hydrologique, Bilan Hydrique, Prédiction des débits, érosion des sols

Liste des Figures

Liste des Figures

Figure I. 1 Classification des modèles hydrologiques selon la description du processus (Refsgaard, 1996).	6
Figure I. 2 Schéma de développement historique du Modèle SWAT, y compris des adaptations sélectionnées (Gassman et al., 2007)	14
Figure I. 3 Estimations du forçage radiatif en 2011 par rapport à 1750 et incertitudes agrégées pour les principaux facteurs du changement climatique. Les valeurs correspondent au forçage radiatif (FR) moyen mondial, réparti en fonction des composés émis ou des processus qui résultent d'une combinaison de facteurs. Les meilleures estimations du forçage radiatif net sont représentées par des diamants noirs avec les intervalles d'incertitude correspondants ; le niveau de confiance dans le forçage net (TÉ : très élevé ; É : élevé ; M : moyen ; F : faible). (Source GIEC2014).	16
Figure I. 4 Le développement des modèles climatiques au cours des 35 dernières années montrant comment les différentes composantes ont été couplées en modèles climatiques complets au fil du temps. Dans chaque aspect (par exemple, l'atmosphère, qui comprend un large éventail de processus atmosphériques), la complexité et l'éventail des processus ont augmenté au fil du temps (illustré par des cylindres croissants). Source (Alexander et al., 2013).	18
Figure I. 5 Progrès dans la résolution horizontales des MCG (à gauche) et de la résolution verticale (à droite) Source : IPCC AR4 (2007) Working Group I The Physical Science Basis et UK Met Office (Hadley Centre).	20
Figure I. 6 Résolution des modèles climatiques centré sur l'Europe, a)Résolution 87.5km ;b)Résolution 30km.	21
Figure I. 7 Changements observés en matière de température et de précipitations. Tendances récentes en matière de température (a et b, °C par décennie) et précipitations (c et d, mm par jour par décennie) dans le bassin méditerranéen sur les terres. Cartes a & c moyenne pour la période 1950-2018, cartes b & d pour 1980-2018. Source : (Cramer et al., 2020).	23
Figure I. 8 Projection du réchauffement dans le bassin méditerranéen sur les terres. Changements projetés en matière de température annuelle par rapport à la période de référence (1980-1999), sur la base de la moyenne d'ensemble d'EURO-CORDEX 0,11 °, a : : simulations pour les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5, b Réchauffement à la fin du XXI ème siècle (2080-2099) pour RCP 2.6 , c : idem pour RCP8.5. Source (Cramer et al., 2020)	24
Figure I. 9 Projection de l'évolution des précipitations dans le bassin méditerranéen. Évolution projetée des précipitations annuelles par rapport à la période passée récente de référence (1980-1999), sur la base de la moyenne de l'ensemble d'EURO-CORDEX 0,11 °, a: simulations pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5, b : anomalies de précipitation à la fin du XXIe siècle (2080-2099) pour RCP2.6, c : idem pour RCP8.5. Source (Cramer et al., 2020).	24
Figure I. 10 Limites géographiques d'application de l'EURO-CORDEX région4 (source : https://cordex.org/wp-content/uploads/2012/11/CORDEX-domain-description_231015.pdf)	26
Figure II. 1 Situation du bassin du Cheliff et les barrages étudiés	32
Figure II. 2 Découpage par sous-régions du Bassin du Chélif	33
Figure II. 3 Classes d'altitudes et Relief du Bassin versant Barrage Sidi M'hammed Ben Taïba	34
Figure II. 4 Courbe hypsométrique du Bassin Versant du barrage SMBT	35
Figure II. 5 Classes d'Altitudes du Bassin Versant du barrage Harreza	36
Figure II. 6 Courbe hypsométrique du Bassin versant du barrage Harreza	36
Figure II. 7 Classes d'altitudes du bassin versant « Barrage Gargar »	37
Figure II. 8 Courbe hypsométrique du bassin versant « Barrage Gargar »	38
Figure II. 9 Classes d'altitudes du bassin versant « Barrage SMBA »	40
Figure II. 10 Courbe Hypsométrique du bassin versant « barrage SMBA »	40

Figure II. 11 Classes d'altitudes du bassin versant « Barrage Bakhadda »	41
Figure II. 12 Courbe Hypsométrique du bassin versant « barrage Bakhadda »	41
Figure II. 13 Réseau hydrographique du Chélif	43
Figure II. 14 Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage SMTB »	44
Figure II. 15 Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage Harreza »	45
Figure II. 16 Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage SMBA »	46
Figure II. 17 Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage Bakhadda »	47
Figure II. 18 Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage Gargar »	48
Figure II. 19 Carte géologique du Chélif (ANRH)	51
Figure II. 20 Organigramme De La Méthodologie SWAT	53
Figure II. 21 Organisation du modèle	54
Figure II. 22 Schématisation du bilan hydrique conceptuel Adapté Pastori et al 2017	56
Figure II. 23 Représentation schématique du cycle hydrologique de la phase sol : Adapté (Neitsch et al., 2011)	57
Figure II. 24 Représentation de la phase routage : Adapté (Neitsch et al., 2011)	58
Figure II. 25 structure d'une unité de réponse hydrologique	60
Figure II. 26 (a)Modèle numérique du terrain (100m); (b)Carte pédologique de la FAO ; (c)carte d'occupation des sols ; (d)Cordonnées des stations climatiques et hydrométriques	62
Figure II. 27 Histogramme montrant le pourcentage des années lacunaires	64
Figure III. 1 Débit mensuel simulé et observé (m ³ /s) aux stations de barrages étudiées : (a et b) calibration et validation des barrages SMTB ; (c et d) calibration et validation du barrage Gargar ; (e et f) calibration et validation du barrage Harreza ; (g et h) calibration et validation du barrage Bakhadda et (i et j) calibration et validation du barrage SMBA. h) Calibration et validation du barrage de Bakhadda et (i et j) Calibration et validation du barrage de SMBA.	79
Figure III. 2 : Débit mensuel simulé et observé (m ³ .s ⁻¹) à Sidi Belattar (Exutoire du Cheliff), (a) période de calibration et (b) période de validation.	80
Figure IV. 3 Combinaison des variations des débits à la sortie des cinq barrages en fonction des trois modèles RCM, a) période (2021-2040) ; (2041-2060) ; b) période totale (2021-2060)	85
Figure IV. 4 Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage SMTB (a) : HadGEMS2- RCP45 (2021-2040) ; (b) : HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c):HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ; (e) : IPSL-RCP45(2021-2040) (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) :EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) : EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k) :EC-Earth-RCP85 (2021-2040) ; (l) :EC-Earth -RCP85 (2041-2060) .	87
Figure IV. 5 Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage Harreza (a) : HadGEMS2- RCP45 (2021-2040) ; (b) : HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c):HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ; (e) :IPSL-RCP45(2021-2040) ; (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) :EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) :EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k) :EC-Earth-RCP85 (2021-2040) ; (l) : EC-Earth -RCP85 (2041-2060) .	88
Figure IV. 6 Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage Gargar (a) :HadGEMS2- RCP45 (2021-2040) ; (b) :HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c):HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ;(e) :IPSL-RCP45(2021-2040) ; (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) :EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) : EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k) :EC-Earth-RCP85 (2021-2040) ; (l) :EC-Earth -RCP85 (2041-2060).	89

Figure IV. 7 / Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage Bakhadda (a) : HadGEMS2- RCP45 (2021-2040) ; (b) : HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c):HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ; (e) : IPSL-RCP45(2021-2040) ; (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) : EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) :EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k):EC-EarthRCP85 (2021-2040) ; (l) : EC-Earth –RCP85 (2041-2060) .	90
Figure IV. 8 / Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage SMBA (a) : HadGEMS2- RCP45 (2021-2040) ; (b) : HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c): HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ; (e) :IPSL-RCP45(2021-2040) ; (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) : EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) : EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k) :EC-Earth-RCP85 (2021-2040) ; (l) :EC-Earth –RCP85 (2041-2060).	91
Figure IV. 9 / Radar Plot montrant un comparatif des variations négatives des débits pour les deux scénarios RCP4.5, RCP 8.5 et pour les deux périodes (2021-2040) ,(2041-2060)	92
Figure IV. 10 / Evolution des précipitations futures des barrages : (a) : SMBT scénario RCP4.5 ; (b) : SMBT scénario RCP 8.5 ; (c) : Harreza scénario RCP 4.5 ; (d) : Harreza scénario RCP 8.5 ; (e) : Gargar scénario RCP 4.5 ;(f) : Gargar scénario RCP 8.5 ; (g) : Bakhadda scénario RCP 4.5 ; (h) : Bakhadda scénario RCP 8.5 ; (i) : SMBA scénario RCP 4.5 ; (j) : SMBA scénario RCP 8.5.	94
Figure IV. 11 / Evolution des températures futures des barrages : (a) : SMBT scénario RCP4.5 ; (b) : SMBT scénario RCP 8.5 ; (c) : Harreza scénario RCP 4.5 ; (d) : Harreza scénario RCP 8.5 ; (e) : Gargar scénario RCP 4.5 ;(f) : Gargar scénario RCP 8.5 ; (g) : Bakhadda scénario RCP 4.5 ; (h) : Bakhadda scénario RCP 8.5 ; (i) : SMBA scénario RCP 4.5 ; (j) : SMBA scénario RCP 8.5.	95
Figure V. 1 / Carte de situation du BV Oued el Abtal par rapport au bassin de la MINA	102
Figure V. 2 / Carte des sols du BV Oued el Abtal	103
Figure V. 3 / Carte d'occupation du sol du BV Oued el Abtal	104
Figure V. 4 / Représentation des Sédiments simulés et des débits moyen annuels	105

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 <i>Caractéristiques des modèles (Devia et al., 2015)</i>	11
Tableau II. 1 <i>Caractéristiques Des Barrages Etudiés</i>	31
Tableau II. 2 <i>Découpage Hydrographique et Administratif du Chéouiff</i>	32
Tableau II. 3 <i>Classification des reliefs en fonction de la dénivelée spécifique</i>	39
Tableau II. 4 <i>Caractéristiques hydro-morpho métriques des bassins versants étudiés avec : S : Surface, P : périmètre, Kc : Coefficient de compacité, H_{moy} : Altitude Moyenne, D_d : Densité de drainage, I_g : Indice de pente globale, D_s : Densité spécifique, C_t : Coefficient de torrentialité, E : Coefficient d'allongement.</i>	48
Tableau II. 5 <i>caractéristiques des stations pluviométriques du grand bassin du Chéouiff</i>	63
Tableau II. 6 <i>Caractéristiques statistiques des stations pluviométriques</i>	64
Tableau II. 7 <i>Caractéristiques des Stations Hydrométriques du Chéouiff</i>	65
Tableau II. 8 <i>Liste des MCG définissant les conditions aux limites du modèle régional RCA4</i>	66
Tableau II. 9 <i>Méthodes de correction des biais utilisées pour le modèle RCA4</i>	67
Tableau II. 10 <i>Critères de performances de Nash</i>	68
Tableau II. 11 <i>Critères de performances du PBIAS</i>	68
Tableau III. 1 <i>Résultats de calibrage et de validation sur les barrages étudiés</i>	73
Tableau III. 2 <i>analyse de sensibilité et détermination des paramètres effectifs du modèle ; v : remplacement de la valeur d'un paramètre par une nouvelle valeur d'un nouveau paramètre ; r : valeur du paramètre multiplié par (1 + valeur donnée)</i>	74
Tableau III. 3 <i>Paramètres de calibration</i>	76
Tableau IV. 1 <i>Variation des débits prédits (2021-2040) et (2041-2060) par rapport à la période de référence 1974-1993</i>	97
Tableau V. 1 <i>Coordonnées de la station hydrométrique Oued el Abtal.</i>	103
Tableau V. 2 <i>Paramètres de calibration des sédiments avec le modèle SWAT</i>	106

Liste des Abréviations

Liste des Abréviations

ABH : Agence des Bassins Hydrographiques

ALPHA-BF : Base Flow Alpha Factor Characterizes The Groundwater Recession Curve

ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transferts

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

AOGCM: Atmosphere-Ocean General Circulation Model

ARS: Agricultural Research Service

ASABE: American Society of Agricultural and Biological Engineers

ASAE: American Society of Association Executives

ASCE: American Society of Civil Engineers

ATHYS: atelier hydrologique spatialisé

AVSWAT: ArcView SWAT

BV: Bassin Versant

CEAP: Conservation Effects Assessment Project

CFSR: Climate Forecast System Reanalysis

CHESS: Climate Hydrochemistry and Economics of Surface-water Systems

CORDEX: The Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

CREAMS: Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems

CREC : Modèle conceptuel global

CZ : Chélif Zahrez

DEEPST: Initial Depth of Water in The Deep Aquifer

DHI: Danish Hydraulic Institute

EC-EARTH: European community Earth System Model

ECOLAB : Laboratoire d'écologie fonctionnelle et environnement

EPCO: Plant Uptake Compensation Factor

EPIC: Environmental Policy Integrated Climate

ESCO: Soil Evaporation Compensation Factor

ETP: Evapotranspiration potentiel

EURO-CORDEX: European Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

FAO: Food and Agriculture Organisation

FAR: First Assessment Report

FORTTRAN: mathematical FORMula TRANslating system

GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GLEAMS: Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems

GR: Génie Rural

GW-DELAY: Groundwater Delay: Time

GWP /TAC: Global Water Partnership/ Technical Advisory Committee

GW-REVP: Groundwater coefficient controls the amount of water which evaporates from the shallow aquifer

HBV : Modèle hydrologique « Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning »

HEC: Hydrologic Engineering Center

HIRLAM: High Resolution Limited Area Model

HRU : Hydrological Response Unit

HYDROBLOCKS : Modèle hydrologique à haute résolution

IAHS: International Association of Hydrological Sciences

ICHEC: Irish Centre for High-End Computing

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IPSL : Institut Pierre Simon Laplace

IPSL-CM5A-MR : Institut Pierre Simon Laplace- CMIP5 A (modèle système terre) -Moyenne résolution

IRD : Institut de recherche pour le développement

IRSTEA : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

JAWRA: Journal of the American Water Resources Association

LARHYSS : Laboratoire De Recherche En Hydraulique Souterraine Et De Surface

LAT-SED : Concentration De Sédiments Dans L'écoulement Latéral Et Souterrain

MCG : Modèles de circulation générale

MCR : Modèle Climatique Régional

METNO-QMAP : Institut Norvégien de météorologie- Quantile Mapping

MIKE : Modèle hydrologique à base physique

MNT : Modèle numérique du terrain

MODFLOW : Logiciel De Modélisation Des Ecoulements Souterrains

MOHC-HadGEM2-ES MESAN: Met Office Hadley Centre UK – Global Environment Model Version 2-Earth system Model

MUSLE: Modified Universal Soil Loss Equation

NAO: North Atlantic Oscillation

NCEP: The National Centers for Environmental Prediction

NRCS: Natural Resources Conservation Service

NSE: Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient

ODE: Ordinary differential equations

ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer

OVN: Manning’s “N” Value for Overland Flow

PBIAS : Percent Bias

PRF : Facteur D’ajustement De Pointe Pour L’acheminement Des Sédiments Dans Le Chenal Principal

RCA: Rossby Centre regional Atmospheric climate model

RCHRG-DP: Deep Aquifer Percolation Fraction.

RCM: Regional climate model

RCP: Representative Concentration Pathway

ROTO: Routing Outputs to Outlet

RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation

SBV : Sous Bassin Versant

SCS : Soil Conservation Service

SCS-CN : Soil conservation Service Curve Number

SHE : Système hydrologique européen

SIG : Système d’information géographique

SLSOIL : Slope Soil

SLSUBBSN: Sub-Basin Average Slope Length

SMBA: Sidi M’hammed Ben Aouda

SMBT: Sidi M’hammed Ben Taïba

SMHI: Swedish Meteorological and Hydrological Institute

SOGREAH : Société Grenobloise d’Études et d’Applications Hydrauliques

SOL-AWC: Available Water Capacity Of The Soil Layer

SPCON : Paramètre Linéaire Permettant De Calculer La Quantité Maximale De Sédiments Pouvant Etre Ré entraînés Lors De L’acheminement Des Sédiments Dans Le Chenal

SPEXP : Paramètre D'exposant Pour Le Calcul Des Sédiments Ré entraînés Dans Le Cheminement Des Sédiments Dans Le Chenal

SRES: Special Report on Emission Scenario

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

SUFI: Sequential Uncertainty Fitting 2 Algorithm

SURLAG: Surface Runoff Lag Coefficient

SWAT: Soil and water assessment tools

SWAT-CUP: Soil and Water Assessment Tool Calibration Uncertainty Program:

SWRRB: Simulator for Water Ressources in Rural Basins

TMDL: Total Maximum Daily Charge

TOPLATS: Topographic-Landscape-Templates

TOPMODEL: Topographic Model

UK: United Kingdom

URH: Unité de Réponse Hydrologique

USA: United States of America

USDA: United States Department of Agriculture

USEPA: U.S. Environmental Protection Agency

USLE: Univeral Soil Loss Equation

WG1: Working Group 1 of IPCC

Symboles

Liste des Symboles

P : Précipitation totale (mm)

SR : Ecoulement de surface (mm)

LF : Ecoulement latéral (mm)

BF : Flux de l'aquifère peu profond (mm)

BF_{DA} : Flux de l'aquifère profond (mm)

DA_{RCHRG} : Recharge de l'aquifère profond (mm)

$TLOSS$: Pertes de transmission en rivière (mm)

$WYLD$: Productivité en eau (mm)

SW_t : Le contenu final en eau du sol (à la fin du jour i) (mm)

SW_0 : Le contenu initial en eau du sol (au début du jour i) (mm)

R_{day} : Les précipitations au jour i (mm)

Q_{surf} : Le ruissellement de surface au jour i (mm)

E_a : L'évapotranspiration au jour i (mm)

W_{seep} : Un flux latéral représentant la quantité d'eau entrant dans la zone vadose (mm)

Q_{gw} : Le flux de retour issu de la zone saturée en eau au jour i (mm).

O_i : Valeurs observées des débits (m^3/s)

S_i : Valeurs simulées des débits (m^3/s)

\bar{O} : moyenne des valeurs observées des débits (m^3/s)

\bar{S} : moyenne des valeurs observées des débits (m^3/s)

R^2 : Coefficient de détermination

Sed : Quantité journalière des sédiments [tonnes]

Q_{surf} : Volume total de ruissellement [m^3]

q_{peak} : Débit de pointe ruisselé [$m^3 \cdot s^{-1}$]

$Area_{hru}$: Surface de l'HRU [ha]

K_{USLE} : Facteur d'érodibilité

C_{USLE} : Facteur de couverture végétale du sol

P_{USLE} : Facteur de pratique antiérosif

LS_{USLE} : Facteur topographique

$CFRG$: Facteur de Fragmentation Grossière

Table des Matières

CHAPITRE I	: ETAT DE L'ART	4
I.1	MODELISATION PLUIE-DEBIT	5
I.2	CLASSIFICATION ET TYPOLOGIE DES MODELES HYDROLOGIQUES	5
I.3	MODELE SWAT : DEFINITION, HISTORIQUE ET DEVELOPPEMENT	12
I.4	PROJECTIONS CLIMATIQUES	15
I.5	TRANSPORT SOLIDE	27
CHAPITRE II	: MATERIELS ET METHODES	29
II.1	DESCRIPTION PHYSIQUE	29
II.1.1	REGION D'ETUDE	29
II.2	DECOUPAGE DU BASSIN DU CHELIFF	32
II.3	PARAMETRES DU RELIEF ET DE MORPHOMETRIE	33
II.4	PLUVIOMETRIE	42
II.5	RESEAU HYDROGRAPHIQUE	42
II.6	HYDROGEOLOGIE DU CHELIFF	49
II.7	LE MODELE SWAT	52
II.7.1	ETABLISSEMENT DU BILAN HYDRIQUE CONCEPTUEL	55
II.7.2	ETABLISSEMENT DU BILAN HYDROLOGIQUE	56
II.7.3	CARACTERISTIQUES DU MODELE SWAT	58
II.7.4	ETAPES DE MISE EN ŒUVRE DU MODELE	60
II.8	DONNEES D'ENTREE DU MODELE	61
II.8.1	DONNEES NECESSAIRES POUR LA SIMULATION HYDROLOGIQUE	61
II.8.1.1	Données pluviométriques	62
II.8.1.2	Données hydrométriques disponibles	65
II.8.2	DONNEES NECESSAIRES POUR LES PREDICTIONS DES DEBITS	66
II.9	CALIBRATION ET VALIDATION DU MODELE	67
II.10	EVALUATION DU MODELE	67
CHAPITRE III	: MODELISATION HYDROLOGIQUE	70
III.1	RESULTATS ET DISCUSSIONS	72
CHAPITRE IV	: SIMULATION DES PROJECTIONS FUTURES DES APPORTS AUX BARRAGES	81
IV.1	RESULTATS ET DISCUSSIONS	83
CHAPITRE V	: SIMULATION DU TRANSPORT SOLIDE	99
V.1	APPLICATION DU MODELE SWAT	101
V.2	RESULTATS ET DISCUSSIONS	104

Introduction Générale

Introduction Générale

L'eau occupe une place primordiale dans la vie des hommes. Depuis la nuit des temps, elle rassemble autour d'elle les populations et constitue pour eux une denrée vitale. Pendant des millénaires, elle a toujours été cause de nombreux conflits et de discorde.

Dans le continent Africain, les ressources en eau sont restreintes et inéquitablement réparties dans l'espace et dans le temps. L'Algérie n'en fait pas exception. Le développement qu'a connu ce pays ces derniers temps a provoqué une demande accrue en eau afin de répondre aux besoins des populations de l'agriculture et de l'industrie. Selon le (GWP/TAC(Global Water Partnership/Technical Advisory Committee), 2000), " la demande actuelle d'eau croît deux fois plus rapide que la population mondiale. Cette tendance devrait s'intensifier au cours des 40 prochaines années.

L'Algérie à l'essor d'autres pays du monde, s'annoncera un déficit en matière de disponibilité en eau d'environ 1 Milliard de m³ d'ici l'an 2025. La région du Constantinois-Seybouse-Mellègue devrait échapper à cette situation pour cet horizon et la région du Chélif-Zahrez- et l'Algérois- Soumam -Hodna connaîtront le maximum de ce déficit (Remini, 2010).

C'est au début des années 70 que l'Algérie a connu une diminution importante des précipitations (M. Meddi & P, 2003) et vu cette crise, l'état algérien a opté pour la réalisation de plusieurs barrages pour pallier aux besoins incessant en matière d'eau pour l'irrigation des terres agricoles dans les zones les moins arrosées.

La question qui se pose est : quelle serait la stratégie à adopter par l'état afin de faire face à la demande accrue de la ressource hydrique, dans un contexte de changements climatiques.

Face à cette situation décisive et compliquée faute de l'accroissement des populations, le développement économique et le changement climatique, des efforts considérables devront être fournis en matière de gestion et de prévisions des potentiels hydriques fondé sur une meilleure compréhension du comportement hydrologique des bassins hydrographiques en matière de ruissèlement et de transport solide. A cet égard, l'intérêt est palpable de faire recours aux modèles hydrologiques.

La communauté internationale et depuis une quarantaine d'année évoque la notion de la gestion intégrée dans le but principal d'assurer la préservation et la protection de la ressource en eau. Ce type de gestion est souvent considéré comme la manière la plus raisonnable de gérer de manière durable les environnements d'eau douce (UN-Water, 2008). L'objectif de la gestion intégrée de l'eau est de conserver l'équilibre de l'écosystème tout en assurant une utilisation raisonnable de cette ressource à l'échelle d'un bassin versant. Au cœur de ce mécanisme, on est

face à une prise de décision pour une gestion optimale et avertie. Selon le (GWP/TAC, 2003), dans un environnement de gestion intégrée, les décisions doivent se baser sur une gestion dans le but de prendre la meilleure décision basée sur les modèles pluie-débit, les modèles de la qualité de l'eau, du transport solide et de l'hydrodynamique.

Le modèle pluie-débit est un composant principal pour tout outil de simulation. Ce type de modèles permet de simuler la réponse des rivières aux changements du climat et/ou les conditions physiques d'un bassin versant selon une caractérisation des processus naturels (Villeneuve et al., 2008)

Nombreuses sont les études sur des bassins versants Algériens utilisant les modèles hydrologiques afin de vérifier leurs applicabilité et leurs adéquation à citer (Abdi & Meddi, 2020; Amiar et al., 2015; Hemza et al., 2022; Touazi & Laborde, 2004). Parmi ces modèles, le modèle **SWAT** (Arnold et al., 1998) classé avec les modèles semi-distribué à base physique a commencé à être utilisé pour modéliser le ruissellement de surface (Zakaria et al., 2019; Zettam et al., 2017), transport des sédiments (Hallouz, 2013; Salhi et al., 2022) et le transfert des nutriments et pollution (Zettam et al., 2021).

Le bassin versant du Chéouli, le plus grand du Nord de l'Algérie, compte 17 barrages avec une capacité de 2.275 Milliards de m³ et cinq périmètres irrigués avec 49154 hectares. Les eaux de ces barrages participent dans la sécurité hydriques et alimentaires de la population de 07 Wilayas et les wilayas limitrophes. Pour une meilleure gestion de ces eaux, la simulation des apports constitue une étape primordiale dans le processus de gestion optimale des ressources en eau ainsi que la gestion de la rareté des eaux de barrages avec la récurrence des périodes sèche. Aussi, la projection future des apports, en se basant sur les projections climatiques, permettra aux décideurs et gestionnaires d'établir un plan d'adaptation et de résiliences aux nouvelles conditions climatiques que vit notre pays depuis la décennie soixante-dix. Dans cette thèse, le modèle SWAT a été utilisé pour simuler les apports au niveau de cinq barrages ainsi que l'exutoire du bassin du Chéouli. Cette simulation permettra la gestion des eaux superficielles emmagasinées dans ces barrages plus les projections futures pour différents scénarios.

Les composantes de cette thèse sont définies comme suit :

- La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique sur les modèles pluie-débit, leurs types et leurs domaines d'application suivie par une consécration aux modèles distribués, leurs structures et leur développement. Ensuite, cette partie traitera le modèle SWAT et les phases chronologiques de son développement.
- La deuxième partie présente la région d'étude et ses caractéristiques, le modèle utilisé, les données d'entrées nécessaires à sa mise en exécution et les critères de validation.

Les objectifs de cette thèse sont résumés comme suit :

- Vérification de l'adaptabilité du modèle SWAT au bassin hydrographique le plus grand en superficie d'Algérie (le Chéouli). Cette adaptabilité concerne (05) barrages situés au sein du grand bassin ainsi qu'au niveau de l'exutoire du grand bassin.
- Confirmer la spécificité géologique karstique de certaines régions du Chéouli en adaptant les grandeurs physiques des paramètres de calibration correspondants.
- Prédiction des débits futurs au niveau de cinq exutoires situés au biais des cinq barrages dans l'objectif de fournir un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de l'eau.
- Estimation de l'érosion spécifique à l'aide du modèle SWAT et comparaison

*Chapitre I :
Etat de l'Art*

Introduction

Le présent chapitre a pour but de présenter un état de l'art sur les modèles hydrologiques et la prédiction des débits dans un contexte de changements climatiques.

La modélisation hydrologique des bassins versants est indispensable pour la compréhension du comportement du système pour faire face à des problématiques liées à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des formes de risques hydrologiques. Elle doit représenter les différentes phases de la transformation pluie-débit. Pour objectif de fournir un outil performant pour le dimensionnement des ouvrages, protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique du bassin versant.

Dans cette partie, nous allons passer en revue les différents modèles hydrologiques, leurs typologies, leurs applications dans différentes régions du monde ainsi que leurs points forts et leurs limitations.

I.1 Modélisation pluie-débit

Un modèle pluie-débit n'est qu'une caractérisation simplifiée d'un système complexe (Payraudeau, 2002). Tout modèle mathématique est le résultat d'une interaction complexe entre la réalité et l'être humain, qui introduit de nouvelles approximations de la réalité à chaque étape du processus de modélisation : perception du phénomène, formalisation dans un cadre conceptuel, traduction en logiciel. Il s'agit d'une interprétation orientée de la réalité, décrite d'un certain point de vue et en fonction d'un certain objectif. Par conséquent, elle possède une double nature relative qui dépend de la véracité des conceptions et des hypothèses sur lesquelles elle est construite. Néanmoins, il s'avère nécessaire de définir clairement l'objectif du modèle, les hypothèses et approximations de manière à définir les limites de son domaine de validité et de son champ d'application (Ambroise, 1999).

I.2 Classification et typologie des modèles hydrologiques

Un large éventail de ces modèles pluie-débit est actuellement utilisé par les chercheurs et les praticiens. Néanmoins, les applications de ces modèles sont fortement dépendantes des objectifs souhaités (Soo et al., 2022). De nombreux modèles pluie-débit sont utilisés à des fins de recherche afin d'améliorer la connaissance et la compréhension du système hydrologique.

On trouve dans la littérature plusieurs auteurs qui ont proposé des classifications des modèles hydrologiques (Singh 1995 In (Gnouma, 2006), (Ambroise, 1999)). (J. K. Refsgaard, 1996) : Les modèles déterministes et les modèles stochastiques. Les modèles déterministes peuvent

être classés selon que le modèle donne une description globale ou distribuée de la zone considérée, et que la description des processus hydrologiques est empirique, conceptuelle, ou à base physique (Villeneuve et al., 1998). Un modèle global implique que le bassin versant est considéré comme une unité de calcul (Galdos Vegas, 2006). Un modèle distribué, par contre, fournit une description des processus du bassin versant à des points d'une grille de calcul géo référencés dans le bassin versant (Labbas et al., 2015). Une approche intermédiaire est un modèle semi-distribué, qui utilise une certaine forme de distribution, soit en sous-bassins versants, soit en unités de réponse hydrologique, où les zones ayant les mêmes caractéristiques clés sont agrégées en sous-unités sans tenir compte de leur emplacement réel dans le bassin versant (Loumagne et al., 1999). Des exemples d'unités de réponse hydrologique considérées dans les modèles semi-distribués sont les zones d'élévation, qui sont pertinentes pour la modélisation de la neige, et les combinaisons de type de sol et de végétation, qui peuvent être pertinentes pour la simulation des processus de la zone racinaire, tels que l'évapotranspiration et le lessivage et le transfert des nitrates (Ferrant, 2009).

Etant donné que la plupart des modèles conceptuels sont également globaux et que la plupart des modèles à base physique sont également distribués, Trois classes se distinguent (J. K. Refsgaard, 1996) (Figure I. 1)

- Empiriques (exemple : Modèles Boite Noire)
- Conceptuels globaux (Boite grise)
- Distribués à base physique (Boite blanche)

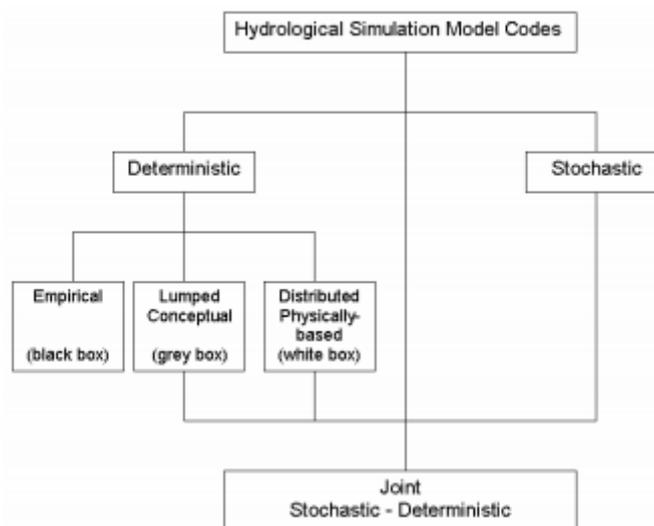


Figure I. 1 | Classification des modèles hydrologiques selon la description du processus (Refsgaard, 1996).

Les modèles Boite Noire ou « *Black Box* » sont définis comme des modèles empiriques, basés sur des équations et de coefficients mathématiques. Ces dernières sont développées et évaluées uniquement à partir d'analyses de séries chronologiques simultanées d'entrées et de sorties, sans tenir en compte de la compréhension du processus hydrologique (J. C. Refsgaard et al., 2022).

Dans de nombreux modèles globaux, les processus sont définis sous forme d'équations simplifiées ou d'équations dérivées de raisonnements empiriques (Singh 1995). Parmi les modèles globaux les plus cités dans la littérature, on trouve les modèles Génie Rural (GR) (Edijatno et Michel, 1989), HEC-1 (Hydrologic Engineering Center, 1981).

Les modèles GR (Génie Rural) sont développés pour objectifs : l'évaluation du potentiel hydrique, la prévision des crues, des étiages et la prédiction des débits futurs. Plusieurs modèles GR fonctionnent à différents pas de temps, annuel, Mensuel, journalier et horaire. En ce qui suit, une brève description historique des modèles GR et leurs développements.

Au début des années 80, le Cemagref d'Antony (IRSTEA Actuellement) a lancé une étude sur la modélisation pluie-débit basée sur le modèle CREC, un modèle à neuf paramètres développé au Laboratoire d'Hydrologie de l'Université de Montpellier (Cormary & Guilbot, 1973). Sur la base de cette construction, des simplifications ont été effectuées afin d'obtenir un modèle avec peu de paramètres, sans pour autant réduire les performances du modèle à l'origine en termes de simulation de débits. Un concept simplifié à deux réservoirs a ainsi été proposée, avec un seul paramètre correspondant à une capacité maximale identique de ces deux réservoirs dans le cas du bassin versant de l'Orgeval (Michel, 1983). Plus généralement, ce premier modèle était un modèle GR2, avec un paramètre pour chaque capacité de réservoir (Mouelhi, 2003). Le GR2 a été testé par JC, Mailhol sur le bassin de l'ORGEVAL (100 km²) ainsi que sur des bassins plus importants tels que la Seine à BAR-SEINE (2.300 km²) par (Lebosse, 1986) et (Devred, 1989) (In (Loumagne, 1988)). Ensuite repris par (Edijatno 1987-1991) avec une approche plutôt empirique en augmentant d'un paramètre sur la fonction de production pour objectif d'améliorer sa structure. Le nouveau modèle GR3J a été appliqué sur 110 bassins français avec des résultats très satisfaisants en le comparant avec des modèles plus complexes (Mouelhi et al., 2002).

(Makhlouf & Michel, 1994) ont mis au point un modèle mensuel à deux paramètres GR2M pour les bassins français et avant cette période, (Kabouya, 1990) avait aussi développé un modèle à trois paramètres à pas de temps mensuel GR3M. Ce modèle a été calibré sur 63 bassins versants dans le Nord de l'Algérie, une région d'environ 200.000 km² (Kabouya & Michel, 1991).

D'autres modèles GR qu'on peut présenter, le GR1A (Modèle Génie Rural à un paramètre) à pas temps annuel lancé par (Michel, 1983) et largement testé sur des bassins versants en France, au Côte d'Ivoire, aux États-Unis et au Brésil (Mouelhi et al., 2006).

En outre, (Perrin, 2000) a rajouté un paramètre au modèle journalier pour objectif d'améliorer sa performance à l'instar d'une étude comparative et devient GR4J. Ce dernier a été appliqué sur un échantillon de 240 bassins en Australie par (Pagano et al., 2010) et dans le bassin de la Tafna (Nord-Ouest algérien) par (Gherissi & Bouanani, 2017). Un autre aspect sur la modélisation pluie débit a été traité par (YANG, 1993) qui est la prévision des crues, en utilisant le modèle GR3 en pas temps horaire. Ce dernier a été largement utilisé en France, aux États-Unis et en Australie (Mata Espinoza, 2017).

Parmi les modèles conceptuels globaux (ou Boîte grise) les plus utilisés en hydrologie, on cite **TOPMODEL** qui a été mis au point par (K. J. Beven & Kirkby, 1979) à l'école de géographie, Université de Leeds ; La première version a été programmée en langage FORTRAN IV et depuis 1994, plusieurs versions ont été développées à l'université de Lancaster ainsi qu'à l'université de Leeds. C'était l'un des tout premiers modèles à utiliser explicitement les données topographiques dans sa conception, d'où le nom du modèle (Topographic Model). Le **TOPMODEL** est considéré comme un modèle physique car ses paramètres peuvent être calculés théoriquement (K. Beven & O'Connell, 1982). C'était, cependant, bien avant que les cartes MNT (Modèle Numérique du Terrain) ne commencent à être disponibles. La théorie du **TOPMODEL** visait à refléter la manière dont la topographie d'un bassin versant façonne les réponses du processus dynamique et en particulier la génération de ruissellement sur une zone de contribution variable. En d'autres termes, il peut être défini comme un modèle conceptuel de zone de contribution variable. Il peut être utilisé dans un seul ou plusieurs sous-bassins versants en utilisant des données d'élévation quadrillées pour le bassin versant. Il aide à la prédiction du comportement hydrologique des bassins. Les principaux facteurs pris en compte sont la topographie du bassin versant et la transmissivité du sol. Son objectif principal est de calculer le déficit de stockage ou la profondeur de la nappe phréatique à n'importe quel endroit. La valeur du déficit de stockage est une fonction de l'indice topographique ($a/\tan\beta$) (K. Beven et al., 1984), où a est la surface drainée par unité de longueur de contour et $\tan\beta$ est la pente du sol locale. Comme l'indice est basé sur la topographie du bassin, le modèle ne donne des calculs que pour des valeurs représentatives des indices. Cet indice topographique peut être calculé selon différents algorithmes (Quinn & Beven, 1991). Le modèle utilise la méthode exponentielle Green-Ampt (K. Beven et al., 1984) pour calculer le ruissellement et il est

conseillé de réduire le nombre de paramètres. Le résultat sera sous forme de cartes de surface ou d'hydrogrammes simulés.

Les attraits de **TOPMODEL** ont toujours été son élégante simplicité, qui rend compte des contrôles hydrologiques dynamiques et spatiaux dominants sous une forme semi-distribuée ; la facilité de mise en place d'une application initiale pour un bassin versant ; la rapidité de calcul qui en résulte ; sa facilité de modification (il s'agit davantage d'un ensemble de concepts que d'une structure de modèle fixe) ; et son lien direct avec la topographie en tant que contrôle de la réponse hydrologique d'un bassin versant (K. Beven et al., 2021).

TOPMODEL peut être utilisé dans les bassins versants avec un sol peu profond et une topographie modérée. (Nourani et al., 2011) ont utilisé ce modèle pour étudier la réponse du ruissellement du bassin versant d'Ammammeh en Iran et les résultats montrent la capacité du modèle dans les simulations journalières et événementielles.

Les nouvelles versions du **TOPMODEL** ont également été motivées par l'objectif d'incorporer certains effets de la variabilité topographique et couvert végétale dans les paramètres du sol et des modèles de circulation atmosphérique. La première tentative en ce sens a été la formulation « *Topmodel-based Land surface - Atmosphere Transfer Scheme* » (ou **TOPLATS**) établie dans le cadre du doctorat de Jay Famiglietti à l'Université de Princeton (Famiglietti & Wood, 1994). Elle a ensuite été modifiée pour ajouter davantage de composantes du bilan énergétique (Pauwels & Wood, 1999). Il existe également une forme de paramétrage de la surface terrestre basée sur **Dynamic TOPMODEL** appelée **HYDROBLOCKS** développée par (Chaney et al., 2016) conçue pour permettre la représentation de la variabilité locale à haute résolution.

Dynamic TOPMODEL a été créé par (Metcalf et al., 2015) qui utilise le routage cinématique des ondes pour calculer l'écoulement des eaux souterraines entre des classes de points "hydrologiquement similaires" dans un bassin versant, où la classification n'a pas besoin d'être basée sur une forme d'indice ($a/\tan b$).

Les modèles distribués à base physique (ou Boite blanche) forment une représentation mathématiquement idéalisée du phénomène réel (Jeannot, 2020) . On parle aussi de modèles mécanistes qui incluent les principes des processus physiques (Villeneuve et al., 1998). Il utilise des variables d'état qui sont mesurables et qui sont des fonctions du temps et de l'espace (Devia et al., 2015) . Les processus hydrologiques du mouvement de l'eau sont représentés par des équations à différences finies. Elle nécessite pour leur calibration l'évaluation d'un grand nombre de paramètres décrivant les caractéristiques physiques du bassin versant. Dans cette méthode, une grande quantité de données telles que la teneur en humidité du sol, la profondeur initiale de l'eau, la topographie, la topologie, les dimensions du réseau fluvial, etc. sont

nécessaires. Le modèle physique peut surmonter de nombreux défauts des deux autres modèles en raison de l'utilisation de paramètres ayant une interprétation du sens physique (Devia et al., 2015). Il peut fournir une grande quantité d'informations même en dehors de la frontière et peut être appliqué à un large éventail de situations. Le modèle **SHE/ MIKE SHE** en est un exemple (Abbott et al., 1986 a).

Trois organisations européennes : (l'Institut britannique d'hydrologie, l'Institut hydraulique danois et la société de conseil française SOGREAH) ont collaboré pour lancer le Système hydrologique européen (**SHE**) (Abbott et al., 1986 b). Il s'agit d'un modèle général à base physique, pour objectif de reproduire le comportement hydrologique de n'importe quel bassin versant pour toute zone géographique. Le système vise à fournir une forte capacité européenne en matière de modélisation hydrologique et son développement a donc été soutenu financièrement par la Commission des Communautés européennes.

Le besoin d'un système de modélisation distribué et basé sur la physique a été perçu vers le milieu des années 1970 et a conduit à la décision de développer le **SHE** en tant qu'entreprise collaborative entre les trois organisations (Abbott et al., 1986 a). A l'époque, il a estimé que seul un tel système permettrait de résoudre un grand nombre de problèmes hydrologiques pratiques qui devenaient de plus en plus pressants. Ces problèmes découlent de l'impact négatif des activités humaines sur le cycle hydrologique et, par conséquent, sur le développement et la gestion des ressources en eau (Devia et al., 2015) . Dans plusieurs pays européens, les ressources en eau de surface et souterraines étaient polluées par les engrais et les pesticides associés aux pratiques agricoles intensives. Le transport de contaminants depuis les sites d'élimination des déchets et les effets plus récemment médiatisés des pluies acides représentaient d'autres menaces pour la qualité de l'eau (R. Liu et al., 2021). Dans les pays en développement, les grands projets relatifs aux ressources en eau ont été affectés par la déforestation à grande échelle, qui a entraîné des changements importants dans les régimes de débit élevé et faible des rivières (Abbott et al., 1986 a) . La déforestation entraînait également une érosion massive des sols, dont les produits provoquaient l'envasement rapide des réservoirs. Le modèle **MIKE SHE** développé par le DHI ou « *Danish Hydraulic Institute* » et initialement basé sur le modèle européen SHE fournit une modélisation intégrée du comportement hydrologique des bassins versants, y compris les eaux souterraines, les eaux de surface, la recharge et les processus d'évapotranspiration. La modélisation est possible en 1D, 2D et 3D. **MIKE SHE** a été appliqué dans des études d'évaluation des bilans hydrologiques (Rahim et al., 2012), la gestion des eaux de surface (Prucha et al., 2016) et souterraines (Demetriou & Punthakey, 1998), la cartographie de la vulnérabilité des aquifères (Kassem et al., 2022), les

impacts de l'occupation des sols (Im et al., 2009) et du changement climatique (Papadimos et al., 2022) et la planification et la gestion des bassins fluviaux (Christensen, 2004). Les principales caractéristiques du modèle MIKE SHE comprennent des capacités SIG et la possibilité de modéliser certains processus en fonction de la disponibilité des données, le suivi des particules dans les eaux souterraines et l'auto-calibration. En outre, le logiciel fonctionne dans l'interface openMI « *Open Model Interface* » qui permet d'échanger des données en mémoire en moment d'exécution et peut être lié à d'autres modules MIKE ou d'autres programmes openMI.

Le modèle **MIKE SHE** utilise un nombre très important de données tels que : les données hydrométéorologiques, les cartes pédologiques et occupation des sols, le modèle numérique du terrain, données sur la qualité de l'eau, etc. (Sandu & Virsta, 2015). Il permet de modéliser le ruissellement de surface, les sédiments et d'analyser la qualité de l'eau. Le modèle **MIKE SHE** offre des avantages quant à l'intégration directe des données satellitaires.

Quelques caractéristiques des modèles cités précédemment sont résumées dans le Tableau I. 1 :

Tableau I. 1 | Caractéristiques des modèles (Devia et al., 2015)

Modèle empirique	Modèle conceptuel	Modèle à base physique
Modèle basé sur les données, métrique ou boîte noire	Modèle paramétrique ou boîte grise	Modèle mécaniste ou boîte blanche
Impliquer des équations mathématiques, déduire des valeurs à partir de séries chronologiques disponibles.	Basé sur la modélisation des réservoirs et des équations semi-empiriques Inclue avec une base physique.	Basé sur la distribution spatiale, Évaluation des paramètres décrivant les caractéristiques physiques
Peu de considération pour les caractéristiques et les processus du système	Les paramètres sont dérivés des données de terrain et de l'étalonnage.	Besoin de données sur l'état initial du modèle et la morphologie du bassin versant.
Pouvoir prédictif élevé, faible profondeur explicative	Simple et peut être facilement mis en œuvre dans un code informatique.	Modèle complexe. Nécessite une expertise humaine et des capacités de calcul.
Ne peut être généré à d'autres bassins versants	Nécessitent beaucoup de données hydrologiques et météorologiques	Difficultés liées à l'échelle
ANN, hydrogramme unitaire	Modèle HBV, TOPMODEL	SHE ou MIKE-SHE, Modèle SWAT
Valable dans les limites d'un domaine donné	La calibration implique un ajustement de la courbe, ce qui rend difficile l'interprétation physique.	Valable pour un large éventail de situations.

Le choix du modèle global ou distribué dépend de plusieurs facteurs : les objectifs de la modélisation, les processus étudiés et la disponibilité des données (Devia et al., 2015).

Les modèles distribués peuvent répondre aux besoins d'applications pratiques tels : (i) les effets de changements de l'occupation des sols, (ii) les effets de variabilité spatio-temporelle des entrées et des sorties, (iii) mouvement des polluants et des sédiments et prévision de la réponse hydrologique dans un bassin non jaugé (Indarto, 2002).

Le modèle spatial offre un avantage significatif sur les modèles alternatifs pour toutes ces questions (par exemple, l'évolution de la couverture ou de l'utilisation des sols est correctement prise en compte dans un modèle distribué). L'espoir est que les valeurs des paramètres mesurés puissent être extrapolées à d'autres endroits et à d'autres moments grâce à la base physique du développement de ces modèles (Vélez et al., 2009).

Dans beaucoup de situations, le modèle n'est pas entièrement distribué car certains processus sont globalisés. Le modèle est donc dit semi-distribué (K. Beven & O'Connell, 1982).

Nous visons dans cette étude, la modélisation pluie-débit, la prédiction des apports d'eau et la modélisation du transport solide. Pour ce faire, nous avons opté pour le modèle semi distribué **SWAT** (Indarto, 2002).

I.3 Modèle SWAT : Définition, Historique et développement

SWAT est l'acronyme de « *Soil and Water Assessment Tools* » est le prolongement de près de 30 ans d'efforts de modélisation menés par le service de recherche agricole ARS de l'USDA « *Agricultural research Service of United States Department of Agriculture* » (ARS) (D. Yu et al., 2018). Le SWAT a été reconnu internationalement comme un outil robuste et interdisciplinaire de modélisation des bassins versants, comme en témoignent les conférences internationales sur le SWAT, les centaines d'articles liés au SWAT présentés lors de nombreuses autres réunions scientifiques, et les nombreuses publications sur le SWAT, et des dizaines d'articles publiés dans des revues à comité de lecture. Le modèle a également été adopté dans le cadre du projet BASINS « *Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources* » de l'Agence américaine de protection de l'environnement (USEPA) « *United States Environmental Protection Agency* ».

Le modèle Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1998; Arnold & Fohrer, 2005) (Arnold & Fohrer, 2005) est un outil efficace pour évaluer les ressources en eau et de pollution à différentes échelles et de conditions environnementales à travers le monde. Aux états unis, plusieurs organismes utilisent le **SWAT** afin d'évaluer la charge polluante maximale journalière des eaux pluviales **TMDL** « *Total Maximum Daily Charge* » par l'agence américaine de la protection de l'environnement USEPA (Arnold & Fohrer, 2005), par le service de conservation des ressources naturelles NRCS « *Natural Resources Conservation Service* »

de l'USDA dans le cadre du projet d'évaluation des effets de conservation CEAP « *Conservation Effects Assessment Project* » (Borah et al., 2013), à la simulation du bilan hydrologique à grande échelle comme le bassin supérieur du Mississippi et l'ensemble des états unis (Mausbach & Dedrick., 2004), aussi pour d'autres recherches sur l'utilisation et à la qualité de l'eau. Des applications semblables ont été réalisées avec SWAT En Europe et dans d'autres régions du Monde, comme le montre la variété des applications de SWAT.

Historiquement, le modèle SWAT est le fruit d'une expérience de 30 ans dans le domaine de la modélisation du service de recherche agricole (ARS) de l'USDA. Il a été développé à partir de plusieurs modèles à citer : le modèle CREAMS « *Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems* ». Des systèmes de gestion agricole (CREAMS) (Arnold et al., 1999). Le modèle GLEAMS « *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* » (Knisel, 1980), et le modèle « *Environmental Policy Integrated Climate* » (EPIC) (A. Leonard et al., 1987), qui s'appelait à l'origine « *Erosion Productivity Impact* » à l'origine appelé « *Erosion Productivity Impact Calculator* » ou calculateur d'impact de l'érosion et de la productivité (Izaurrealde et al., 2006). (Williams, 1990) ont élaboré le SWRRB « *Simulator for Water Resources in Rural Basins* » pour modéliser les effets de la gestion sur les ressources en eau et des sédiments dans les bassins ruraux non jaugés des États-Unis. Les modèles et sous modèles associés ont augmenté l'aptitude du modèle SWRRB à traiter une grande panoplie de difficultés liées à la gestion de la qualité de l'eau dans les bassins versants. Le SWAT actuel est directement dérivé du simulateur du modèle SWRRB.

Afin d'enlever la limitation d'exécution du modèle SWRRB à dix sous bassins, (Arnold & Williams, 1987) ont développé le modèle ROTO « *Routing Outputs to Outlet* » au début des années 1990 dans le cadre d'une étude d'impact de la gestion de l'eau sur les terres des réserves indiennes en Arizona et au Nouveau-Mexique qui s'étendaient sur plusieurs milliers de kilomètres carrés, à la demande du Bureau des affaires indiennes des États-Unis. L'analyse a été réalisée en reliant les résultats de plusieurs exécutions de SWRRB, puis en dirigeant les flux à travers des canaux et des réservoirs dans ROTO. Cette approche a permis de dépasser les limites du SWRRB ; toutefois, les fichiers d'entrée et de sortie SWRRB étaient volumineux et nécessitent un espace de stockage important. Pour surmonter cette situation, SWRRB et ROTO ont été combinés dans le modèle unique **SWAT** (Arnold et al., 1995).

SWAT a gardé toutes les particularités qui faisaient de SWRRB un modèle de simulation si précieux, tout en permettant de simuler des zones très étendues.

SWAT connu une révision et une expansion continues de ses capacités depuis sa première parution au début des années 1990. Les principales améliorations apportées aux versions précédentes du modèle (SWAT94.2, 96.2, 98.1, 99.2 et 2000) sont décrites par (W. Gassman et al., 2007) et (Arnold & Fohrer, 2005), notamment l'introduction de routines cinétiques en cours d'eau du modèle QUAL2E (Neitsch et al., 2005), comme le montre la Figure I. 2.

. Une documentation théorique détaillée et un manuel de l'utilisateur pour la dernière version du modèle (SWAT2005) sont donnés par (Brown & Barnwell, 1987).

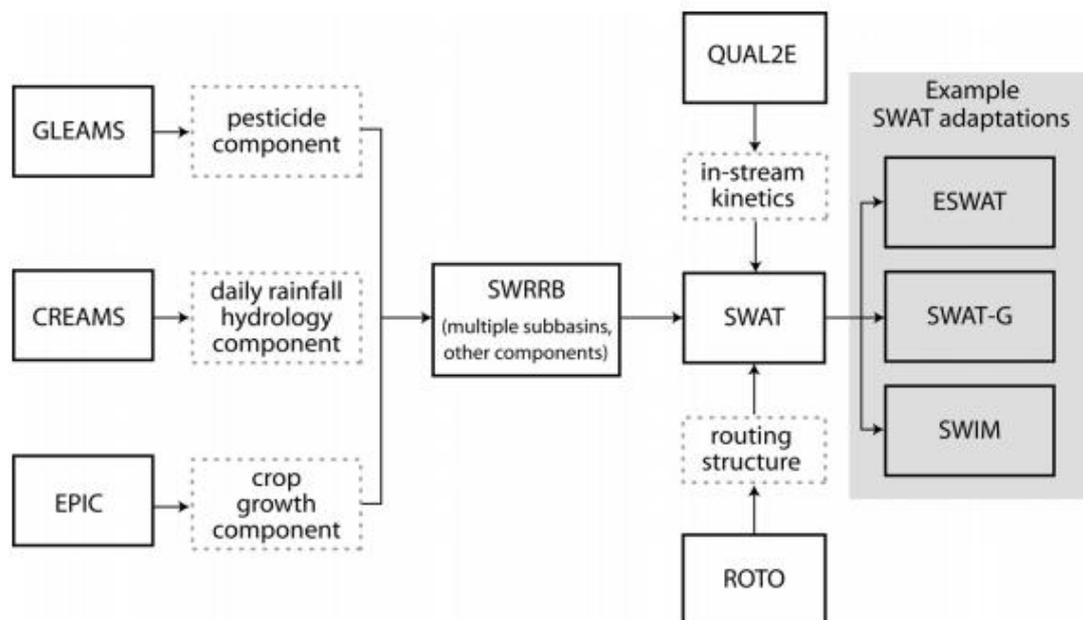


Figure I. 2 | Schéma de développement historique du Modèle SWAT, y compris des adaptations sélectionnées (Gassman et al., 2007)

SWAT est un modèle en temps continu à l'échelle du bassin qui fonctionne sur un pas de temps quotidien et qui est conçu pour prédire l'impact de la gestion sur l'eau, les sédiments et les rendements chimiques agricoles dans les bassins versants non jaugés. Le modèle est basé sur la physique, efficace sur le plan informatique et capable de simuler en continu sur de longues périodes. Les principales composantes du modèle comprennent la météo, l'hydrologie, la température et les propriétés du sol, la croissance des plantes, les nutriments, les pesticides, les bactéries et les germes pathogènes.

SWAT est un modèle semi-distribué à base physique et continu dans le temps à l'échelle d'un bassin et la gestion des terres. Dans **SWAT**, un bassin versant est divisé en plusieurs sous-

bassins versants, qui sont ensuite subdivisés en unités de réponse hydrologique (HRU) constituées de caractéristiques homogènes d'utilisation des terres, de gestion et de sol. Les HRUs représentent des pourcentages de la superficie du sous bassin versant et ne sont pas identifiées spatialement dans une simulation **SWAT**. Alternativement, un bassin versant peut être subdivisé en sous-bassins seulement qui sont caractérisés par l'utilisation dominante des terres, le type de sol et la gestion des terres (Neitsch et al., 2005).

I.4 Projections Climatiques

Dans un contexte de changement climatiques et selon Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernementale sur l'évolution du Climat (GIEC, 2014) , la température de la planète augmentera entre environ 1.0°C (scénario optimiste) et 4.1°C (scénario pessimiste) et une augmentation du niveau des mers de 26 à 82 cm. Ce changement rapide du climat mondial ou réchauffement climatique peut engendrer des catastrophes naturelles (cyclones, inondations, sécheresses) plus accentuées dans certaines parties du globe. En outre, ces conséquences peuvent être la cause de diminution importante et catastrophique des rendements agricoles et du coup l'exode des populations touchées par ces catastrophes (zones inondées ou touchées par la désertification). La vulnérabilité des systèmes naturels et sociaux à ces événements extrêmes et leurs capacités d'acclimatation varient d'une région à une autre et d'une population à une autre. Il est donc impératif de bien comprendre le processus d'évolution du climat à l'échelle régionale pour mieux s'adapter aux contraintes qui s'appliquent à ces sociétés.

Comme défini dans le cinquième rapport du (GIEC, 2014) , le réchauffement climatique menace l'équilibre global de la terre quand le bilan énergétique est perturbé par des substances, des processus naturels et anthropiques qui sont les causes principales du changement climatique. C'est ce qu'on appelle le forçage radiatif. Ce dernier (FR) tend à perturber l'équilibre du bilan radiatif de la terre. Celui-ci représente la différence entre les rayonnements solaires reçus et le rayonnement infra-rouge réfléchi par la planète et est calculé au sommet de la troposphère (10 – 16 km d'altitude). Cet équilibre se déplace sous l'influence de facteurs de changement climatique tel que la concentration des gaz à effet de serre. Le forçage radiatif (FR) quantifie la variation des flux d'énergie causée par les changements de ces facteurs pour l'année 2011 par rapport à l'année 1750 considérée comme l'aube de l'ère industrielle (Figure I. 3). Un (FR) positif entraîne un réchauffement de la surface, un (FR) négatif entraîne un refroidissement de la surface. Le (FR) est estimé sur la base d'observations in situ et à distance, des propriétés des gaz à effet de serre et des aérosols, et de calculs effectués à l'aide de modèles

numériques représentant les processus observés. Certains composés émis affectent la concentration atmosphérique d'autres substances. Le forçage radiatif peut être rapporté suivant deux approches, la première est que Le FR peut être rapporté sur la base des changements de concentration de chaque substance. La deuxième est qu'il est possible de déclarer le FR basé sur les émissions d'un seul composé, ce qui permet d'établir un lien plus direct avec les activités humaines. Il comprend les contributions de toutes les substances affectées par cette émission.

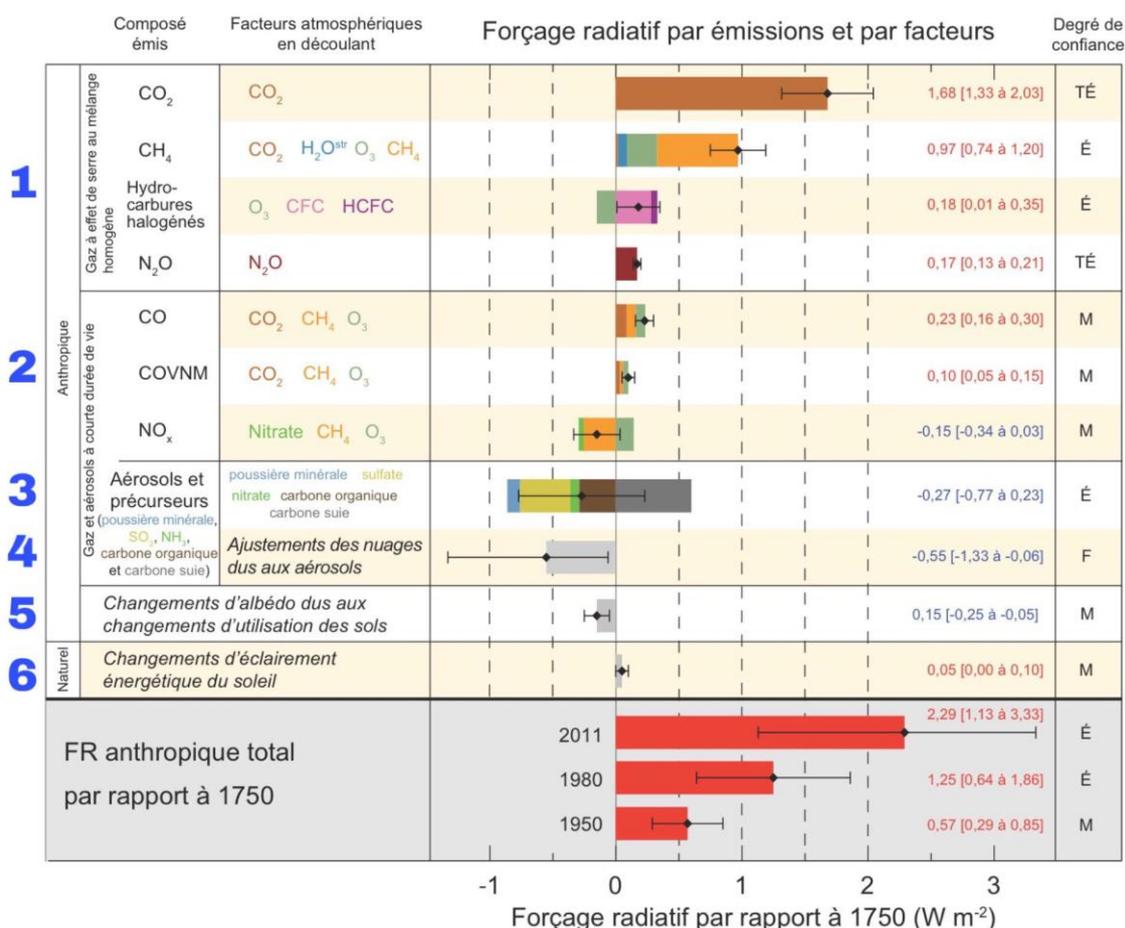


Figure I. 3 | Estimations du forçage radiatif en 2011 par rapport à 1750 et incertitudes agrégées pour les principaux facteurs du changement climatique. Les valeurs correspondent au forçage radiatif (FR) moyen mondial, réparti en fonction des composés émis ou des processus qui résultent d'une combinaison de facteurs. Les meilleures estimations du forçage radiatif net sont représentées par des diamants noirs avec les intervalles d'incertitude correspondants ; le niveau de confiance dans le forçage net (TÉ : très élevé ; É : élevé ; M : moyen ; F : faible). (Source GIEC2014).

Les projections futures des changements dans le système climatique sont réalisées à l'aide d'une hiérarchie de modèles climatiques allant des modèles climatiques simples, aux modèles de complexité intermédiaire, aux modèles climatiques complets et aux modèles du système terrestre. Ces modèles simulent les changements sur la base d'une série de scénarios de forçages anthropiques. Un nouvel ensemble de scénarios, les RCP « Representative

Concentration Pathways » (IPCC, 2008; Moss et al., 2010) a été utilisé pour les nouvelles simulations de modèles climatiques effectuées dans le cadre de la phase 5 du projet de comparaison de modèles couplés (CMIP5) «*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* » du Programme mondial de recherche sur le climat. Dans tous les RCP, les concentrations atmosphériques de CO dans l'atmosphère sont plus élevées en 2100 par rapport à aujourd'hui en raison d'une nouvelle augmentation des émissions cumulées de CO₂

Dans l'atmosphère au cours du 21^e siècle. Les projections présentées dans ce résumé à l'intention des décideurs concernent la fin du XXI^e siècle (2081-2100) et sont données par rapport à la période 1986-2005, sauf indication contraire. Pour placer ces projections dans un contexte historique, il est nécessaire d'examiner les changements observés entre les différentes périodes. Sur la base du plus long ensemble de données disponibles sur les températures de surface à l'échelle mondiale, Le changement de température à la surface du globe à la fin du XXI^e siècle devrait dépasser 1,5 °C par rapport à la période 1850-1900 pour tous les scénarios RCP, sauf le RCP2.6. Il est probable qu'il dépassera 2°C pour les scénarios RCP6.0 et RCP8.5, et plus probable qu'improbable qu'il dépassera 2°C pour le scénario RCP4.5. Le réchauffement se poursuivra au-delà de 2100 dans tous les scénarios RCP, sauf le RCP2.6

Les modèles climatiques ont commencé leur développement au début du 20^{ième} siècle et plus précisément dans les années 1920-1921, un mathématicien et météorologiste Anglais Lewis Fry Richardson a réalisé la première tentative de résoudre numériquement les équations différentielles afin de faire une prévision météorologique de six heures (Richardson, 2007). A défaut des moyens de calculs, les résultats ne s'avèrent pas intéressants mais l'éventail vers d'autres initiatives était ouvert. Ces travaux ont été repris par (Charney et al., 1950) pour résoudre les équations météorologiques avec l'apparition des premiers ordinateurs. Au début des années 1960, deux équipes entamèrent l'étude de l'écoulement atmosphérique dans sa dimension climatique. Il s'agit de l'équipe du GFDL «*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* » avec (Manabe et al., 1965) et celle de l'UCLA «*University of California , Los Angeles* » avec Y.Mintz et A.Arakawa qui ont supprimé certaines approximations afin d'utiliser les modèles atmosphériques à toutes les latitudes (Gachon, 2000) .

Le développement des MCG (Modèles de circulation générale) a commencé au cours des années 1970 et 1980. Les premières versions introduisent la quasi-totalité des processus participant au maintien de la circulation générale de l'atmosphère, ils s'appuient sur des équations mathématiques décrivant les processus dynamiques liés à l'écoulement atmosphérique, et aux processus physiques liés aux échanges de masse, d'énergie et de quantité de mouvement dans l'atmosphère et à l'interface atmosphère/océan, atmosphère/glace marine

et Atmosphère/biosphère. Ces équations sont le produit des équations fondamentales de la mécanique des fluides (Equations de Navier-Stokes)(Hourdin et al., 2011).

Avec l'avancée de la science et le développement de la puissance de calcul informatique, des simulations sur plusieurs décennies ont été réalisés avec de plus en plus hautes résolutions. Tout d'abord consacrés à l'écoulement atmosphériques et ensuite couplés (atmosphère/océan et atmosphère/glace marine). Les MCG présentent une reproduction de la circulation atmosphérique à grande échelle.

Cette avancée a permis aux modèles climatiques globaux regroupés de prendre en considération de plus en plus de processus depuis le début du développement des modèles (les années 1970), le schéma suivant illustre ce développement jusqu'à l'édition du cinquième rapport d'évaluation des GIEC (Figure I. 4).

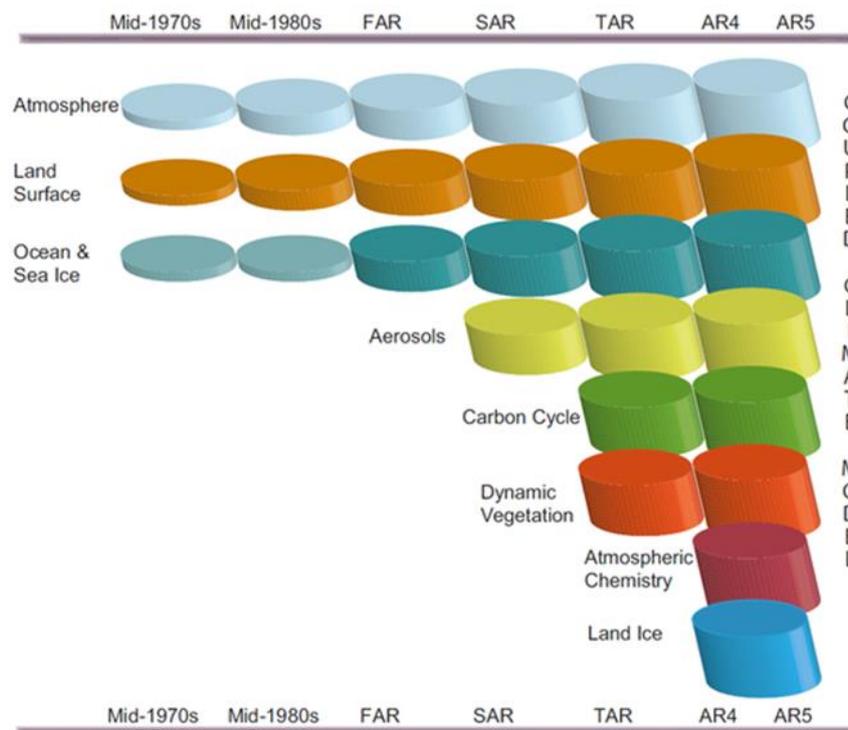


Figure I. 4 | Le développement des modèles climatiques au cours des 35 dernières années montrant comment les différentes composantes ont été couplées en modèles climatiques complets au fil du temps. Dans chaque aspect (par exemple, l'atmosphère, qui comprend un large éventail de processus atmosphériques), la complexité et l'éventail des processus ont augmenté au fil du temps (illustré par des cylindres croissants). Source (Alexander et al., 2013).

L'utilisation des MCG permet de reproduire la circulation atmosphérique à grande échelle et ainsi de simuler les principales caractéristiques de la distribution et de l'évolution du climat à la surface du globe. Toutefois, compte tenu de la faible résolution horizontale des modèles climatiques (autour de 350-450 km), les MCG ne peuvent pas représenter adéquatement

certain processus climatiques, en particulier les processus hydrologiques (IPCC, 1992)(Leggett et al., 1992) ou reliés aux échanges atmosphère/océan en bordure des zones côtières. La prise en compte appropriée de ces processus nécessite une plus haute résolution horizontale, avec une définition plus précise des bassins versants des rivières, ou du tracé des zones côtières, des masses d'eau, etc. Or, les contraintes de temps de calcul ne permettent pas à ces modèles d'être intégrés avec des résolutions plus élevées. En effet, si on désire réaliser des simulations sur des échelles de temps suffisantes pour que ces données aient une représentativité climatologique, il est encore impossible d'atteindre des résolutions plus élevées que 350 km pour des simulations sur tout le globe, compte tenu de la puissance actuelle des ordinateurs. Cependant, la plupart des effets climatiques régionaux ou locaux, liés par exemple à la topographie, aux types de sol ou à la végétation d'une région, ne peuvent pas être correctement pris en compte par les MCG avec de telles résolutions.

Les projections climatiques servant à la rédaction des rapports du GIEC s'appuient sur les modèles climatiques globaux. Ces modèles fournissent une représentation numérique de la planète et des interactions entre l'atmosphère, les océans et les surfaces terrestres qui déterminent le changement climatique. Le géo-espace numérique est constitué de mailles (comme les pixels d'une photo). Les interactions entre les mailles sont modélisées mathématiquement en transformant la conservation de diverses quantités physiques (masse, énergie, quantité de mouvement, etc.). Plus la maille est petite, plus le modèle est précis. Les effets des phénomènes météorologiques à des échelles plus petite que la maille (Flous lorsque la photo est agrandie) sont pris en considération en rajoutant des termes aux équations de conservations. Les modèles climatiques tentent de refléter de très près la réalité et représenter les forces qui animent les mouvements de l'atmosphère, des océans ou de la terre. Pour ce faire, les modèles sont basés sur des conditions initiales connues pour les variables climatiques telles que la température, le vent, le rayonnement solaire et l'humidité et les fait développer en résolvant des équations mathématiques.

La Figure I. 5 illustre les progrès réalisés dans la résolution spatiale typique utilisée dans les modèles climatiques de pointe à l'époque de chacune des quatre premières évaluations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). La résolution s'est améliorée, passant d'environ 500 km en 1990 le premier rapport d'évaluation (FAR) « *First Assesment Report* » à 110 km en 2007 le quatrième rapport d'évaluation) (AR4) « *Fourth Assesment Report* »

Les modèles CMIP5 actuels évalués dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5) ont une résolution horizontale la plus fine dans l'atmosphère d'environ 70 km, mais la moyenne est d'environ 200 km. La résolution verticale s'est également améliorée au fil des ans. Pour le premier rapport d'évaluation du GIEC, les modèles comportaient une seule couche "océanique" et 10 à 15 couches atmosphériques, tandis que les modèles du quatrième rapport d'évaluation comprenaient souvent 30 couches dans les océans et 30 autres dans l'atmosphère. Les modèles actuels CMIP5 évalués dans le AR5 ont une résolution verticale dans l'atmosphère de 20 à 50 niveaux.

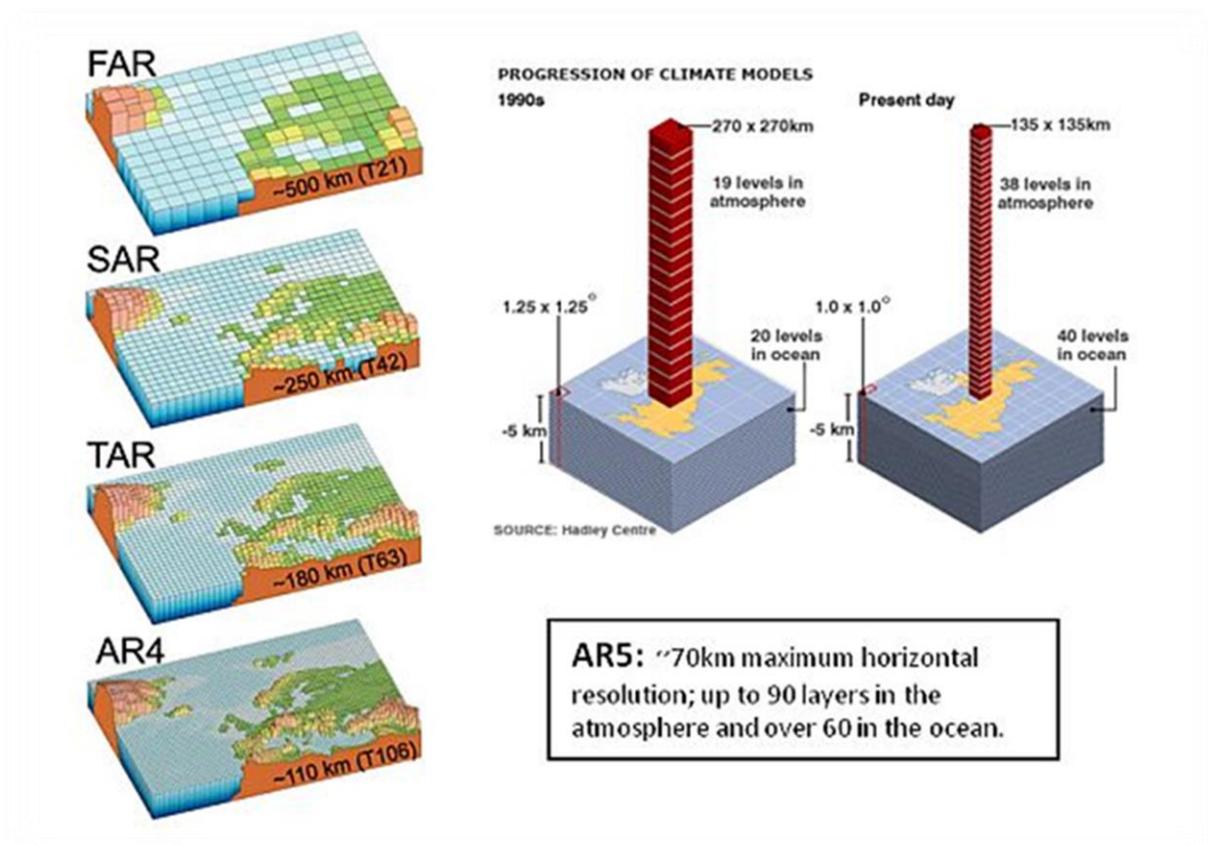


Figure I. 5 | Progrès dans la résolution horizontales des MCG (à gauche) et de la résolution verticale (à droite)
Source : IPCC AR4 (2007) Working Group I The Physical Science Basis et UK Met Office (Hadley Centre).

Selon le cinquième rapport du (GIEC, 2014), Plusieurs développements ont particulièrement fait progresser les capacités de modélisation au cours des dernières années. La résolution horizontale et verticale n'a cessé d'augmenter. Ceci est particulièrement visible dans la façon dont les grilles océaniques ont été affinées, et des grilles sophistiquées sont maintenant utilisées dans les modèles océaniques et atmosphériques, faisant un usage optimal des architectures informatiques parallèles. Davantage de modèles à plus haute résolution sont disponibles pour davantage de régions. La (Figure I. 6) montre l'effet important sur la représentation de la surface

d'une grille horizontale de 87,5 km (résolution supérieure à celle de la plupart des modèles globaux actuels et similaire à celle utilisée dans les modèles actuels à haute résolution) à un espacement de grille de 30,0 km (similaire à celui des modèles climatiques régionaux actuels).

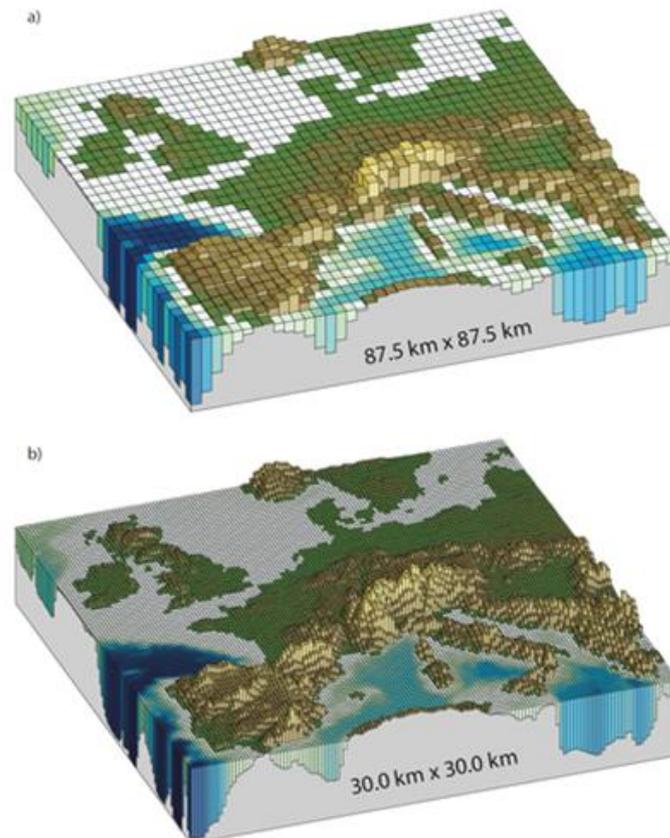


Figure I. 6 | Résolution des modèles climatiques centré sur l'Europe, a) Résolution 87.5km ; b) Résolution 30km.

L'étude d'impact des changements climatiques en utilisant le modèle SWAT a été largement entreprise par plusieurs chercheurs et par des institutions étatiques et continentales. On détecte dans la base de données SWAT <https://swat.tamu.edu/publications/>. Plus de 400 articles publiés dans le contexte de changements climatiques pour différentes problématiques. Plusieurs études ont été menées aux Etats unis (USA) sur les effets des changements climatiques sur les processus hydrologiques dans tous ses aspects: (i) variations des apports d'eau suite aux variations des températures et des précipitations (Hanratty & Stefan, 1998) sur le bassin versant agricole dans le Minnesota, (Fontaine et al., 2001) dans les *Black Hills* du Dakota du Sud , simulation des débits futurs en utilisant des modèles climatiques globaux et régionaux dans le bassin supérieur du Mississippi (Takle et al., 2010) ; (ii) Rendements des sédiments et

productivité agricole dans l'Ouest de l'Oregon (Mueller-Warrant et al., 2019) ; (iii) qualité de l'eau et mouvement des nutriments lié aux pratiques agricoles (Cousino et al., 2015). Il s'avère aussi qu'il soit utilisé par le projet de l'Union européenne (CHESS) « *Climate Hydrochemistry and Economics of Surface-water Systems* » (Boorman, 2003).

Le modèle climatique global ou MCG utilise un maillage suffisamment large (>100 km), cette résolution implique une représentation assez grossière du relief, des zones côtières et aussi l'occupation des sols avec pour contrepartie d'utiliser des mailles de taille relativement grossière (supérieure à 100 km). Dans ce cas, il s'agit d'un modèle de climat global. La résolution (la taille du pixel) de ce type de modèle induit une représentation trop grossière du relief, des côtes mais aussi de l'occupation des sols. Ceci limite les études des événements extrêmes, les études d'impact et de stratégies d'adaptation associées aux changements climatiques. Or produire de l'information à l'échelle régionale est indispensable car l'adaptation aux changements repose en grande partie sur les initiatives locales. Cette démarche nécessite des résolutions beaucoup plus fines, autour de 10 km, pour pouvoir bien décrire le relief, le trait de côte qui sépare la mer du continent, l'occupation des sols dont les zones urbaines. Dans ce cas, il est judicieux d'utiliser un modèle climatique couvrant uniquement une région, avec comme avantage d'utiliser une résolution plus élevée (de 60 à moins de 10 km). Dans ce cas, il s'agit d'un modèle de climat régional.

Les modèles climatiques régionaux (MCR) peuvent être utilisés pour augmenter encore la résolution. Afin de fournir des projections à long terme du changement climatique à plus haute résolution, les modèles climatiques régionaux MCR sont imbriqués dans les modèles climatiques globaux (Laprise et al., 2008) qui fournissent des champs climatiques à grande échelle (Températures de surface de la mer, vents et pressions atmosphériques) nécessaires pour guider le MCR. On dit généralement que le MCG fournit les « conditions aux limites » pour le MCR.

Dans le cinquième rapport d'évaluation du climat (GIEC, 2014), les simulations climatiques globales ont été établies dans le contexte du projet international CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project, Phase5*) <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/> utilisant un grand nombre de modèles atmosphériques, océaniques et climatiques globaux AOGCM « *Atmosphere-Ocean General Circulation Model* »(Taylor et al., 2011) .

Selon le premier rapport d'évaluation sur la méditerranée (MAR1) « *First Mediterranean Assesment Report* » rédigé par MedECC « *Mediterranean Experts on Climate and environmental Change* »(Cramer et al., 2020), le changement climatique anthropique a été observé pour de multiples variables au cours des dernières décennies la région du méditerranée

sera à l'avenir parmi les régions les plus touchées par le changement climatique, notamment en termes de précipitations et du cycle hydrologique.

Des preuves solides d'un conséquent réchauffement de la région méditerranéenne. Au niveau du bassin, la température moyenne annuelle est maintenant de 1,54°C au-delà du niveau de 1860-1890 en zones terrestres et marines ce qui exprime une variation de +0,4°C par rapport réchauffement moyen mondial (Cramer et al., 2020)(Figure I. 7).

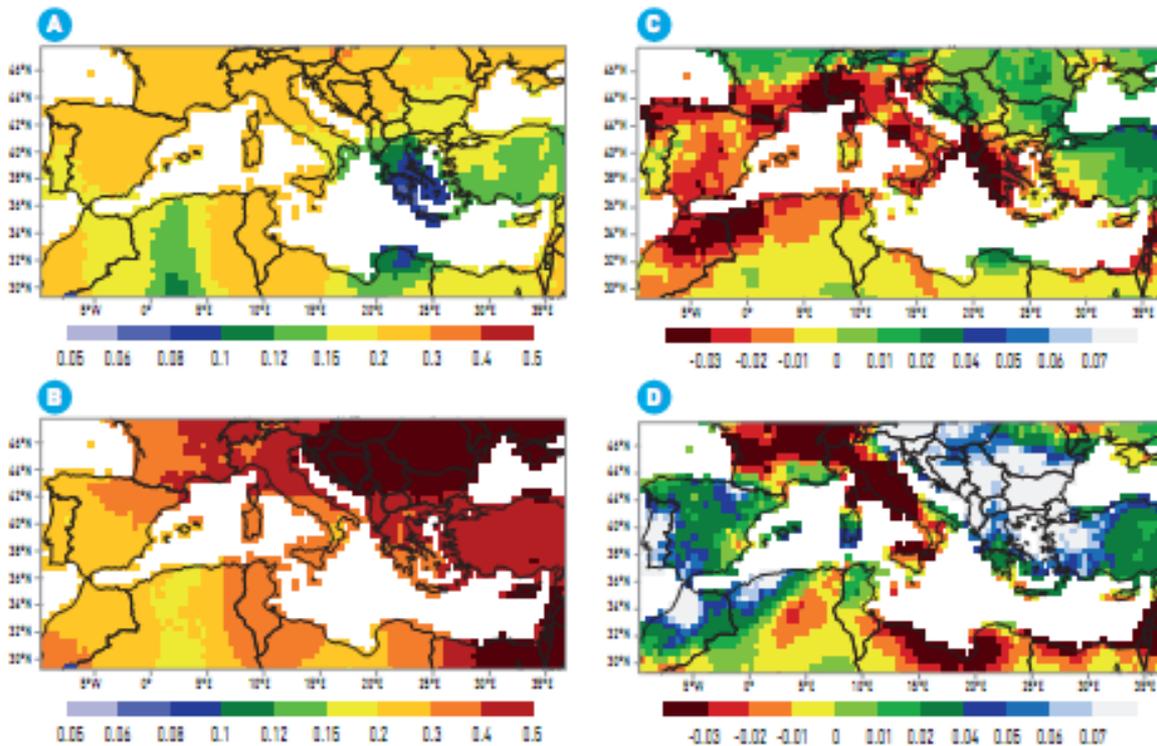


Figure I. 7 | Changements observés en matière de température et de précipitations. Tendances récentes en matière de température (a et b, °C par décennie) et précipitations (c et d, mm par jour par décennie) dans le bassin méditerranéen sur les terres. Cartes a & c moyenne pour la période 1950-2018, cartes b & d pour 1980-2018. Source : (Cramer et al., 2020).

Le réchauffement des zones terrestres pourrait varier de 0,9 à 1,5°C selon deux scénarios, RCP 2.6 exprimant une faible émission des gaz à effet de serre RCP8.5 pour une plus forte émission. Le réchauffement moyen futur de la zone méditerranéenne surpasse la moyenne globale de 20%.

D'après d'autres études sur la région méditerranée, la température de l'air a connu une augmentation de 1,5° à 4°C selon les sous-régions (Bouabdelli, 2021). L'Afrique du Nord par exemple, la température s'est élevée à 2°C de manière accélérée depuis les années 1970 (Giannakopoulos et al., 2009; Zeroual et al., 2016). En outre, l'Algérie est fortement soumise aux changements climatiques et les projections futures sont sensibles aux scénarios d'émissions (Zeroual et al., 2019). Les futurs déplacements vers le nord de l'humidité de l'air

associés à une plus forte anomalie de l'oscillation nord-atlantique (NAO) devraient réduire les précipitations en Afrique du Nord et en Asie occidentale (Waha et al., 2017) voir (Figure I. 8).

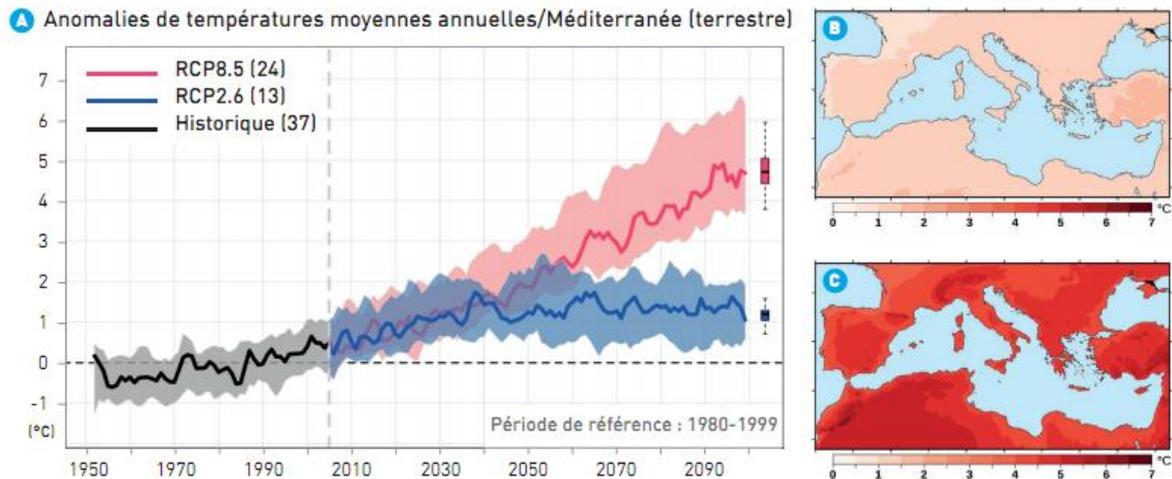


Figure I. 8 | Projection du réchauffement dans le bassin méditerranéen sur les terres. Changements projetés en matière de température annuelle par rapport à la période de référence (1980-1999), sur la base de la moyenne d'ensemble d'EURO-CORDEX 0,11 °, a : simulations pour les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5, b Réchauffement à la fin du XXI ième siècle (2080-2099) pour RCP 2.6 , c : idem pour RCP8.5. Source (Cramer et al., 2020)

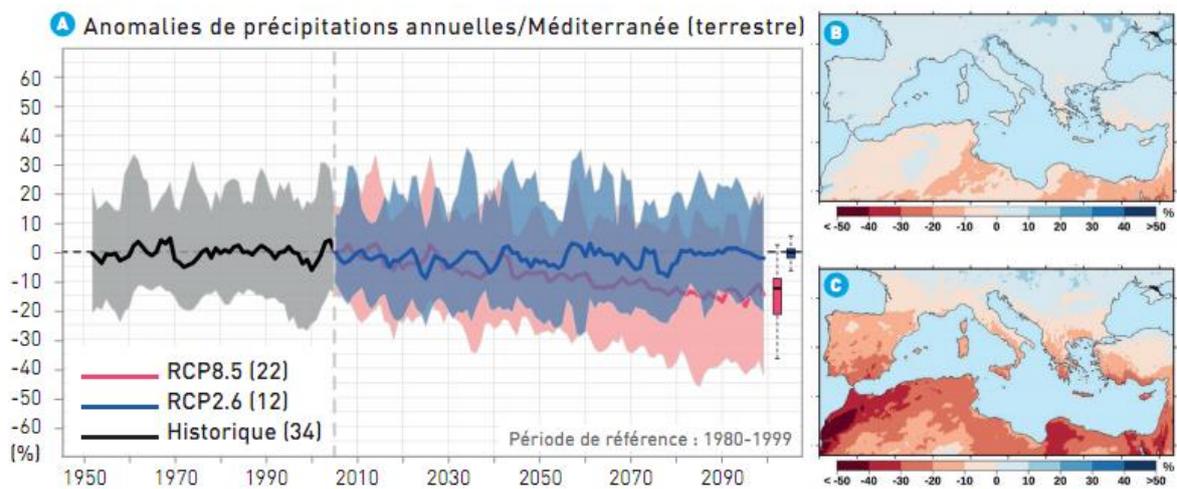


Figure I. 9 | Projection de l'évolution des précipitations dans le bassin méditerranéen. Évolution projetée des précipitations annuelles par rapport à la période passée récente de référence (1980-1999), sur la base de la moyenne de l'ensemble d'EURO-CORDEX 0,11 °, a : simulations pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5, b : anomalies de précipitation à la fin du XXIe siècle (2080-2099) pour RCP2.6, c : idem pour RCP8.5. Source (Cramer et al., 2020).

Dans une zone climatique classée semi-aride, le bassin du Cheliff a connu plusieurs épisodes de sécheresse qui ont influencé sensiblement les rendements agricoles de la région à cause de la forte distribution spatio-temporelle des précipitations en raison de la forte

distribution temporelle et spatiale des précipitations (Habibi et al., 2018). Une tendance à la baisse des précipitations et des ruissellements dans le bassin du Cheliff respectivement de l'ordre de 30% et 43% selon l'étude menée par (Khedimallah et al., 2020; H. Meddi et al., 2014) en utilisant les test de Mann-Kendal et Pettitt pour la période de 1968-2013. Le déficit hydrique enregistré dans la période 1930-2007 est vigoureusement lié à l'AMO « *Atlantic multidecadal oscillation* » et à la NAO « *North atlantic oscillation* ». Cette liaison est bien justifiée par les corrélations entre l'indice climatique NAO avec les précipitations et les débits allant de 60% à 67%.

Les scénarios RCP ont été établis dans le cadre du GIEC pour le cinquième rapport d'évaluation (GIEC, 2014). Les scientifiques ont opté pour une panoplie de quatre scénarios de trajectoire de forçage radiatif appelée RCP pour « *Representative Concentration Pathways* » jusqu'à l'horizon 2300.

Les scénarios RCP ont succédé les scénarios SRES « *Special Report on Emission Scenario* » établi durant le rapport spécial sur les scénarios d'émissions du GIEC (Nakicenovic et al., 2000).

Chacun des quatre scénarios RCP concorde avec une variation différente de ce forçage. Ils sont identifiés par une valeur exprimée en Watt/m² (puissance par unité de surface) qui indique la valeur du forçage radiatif. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère augmente en énergie et se réchauffe. Les quatre scénarios sont le RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 ; Les valeurs qu'on leur a attribuées correspondent aux différents forçages radiatifs éventuels en 2100.

Pour notre étude, nous avons envisager d'utiliser deux scénarios d'émissions, le premier plutôt modéré RCP4.5 qui s'accommode avec des changements climatiques modérés. Un deuxième scénario RCP8.5 dit pessimiste.

Nous avons utilisé le modèle climatique régional (MCR) de l'initiative CORDEX « *The Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* », et plus exactement la plus haute résolution de 0.11 degrés (EUR-11, ~12.5 km) du modèle EUROCORDEX qui couvre suffisamment notre zone d'étude (Figure I. 10). A partir des variables de base (températures et précipitations) en appliquant différents scénarios climatiques. Le choix de l'EURO-CORDEX était sur la base des bon résultats réalisés par des études sur des région méditerranéennes semi-arides représentant effectivement des phénomènes de crues extrêmes et de sécheresse, caractéristiques intrinsèques de ce climat (Martínez-Salvador et al., 2021; Nerantzaki et al., 2020; Rocha et al., 2020). Deux scénarios du GIEC sont utilisés le RCP 4.5 et le RCP 8.5, le

premier est le plus modéré et qui suppose qu'il y a possibilité de réduire les gaz à effet de serre avant l'année 2050 (+1.5° C). Le scénario RCP 8.5 le plus pessimiste considère qu'il n'y aura pas de changement et que les gaz à effet de serre continueront à être émis de manière continue tout au long du 21^{ème} siècle (GIEC, 2014) conduisant à une augmentation de la température moyenne annuelle de la planète d'environ 3°C.

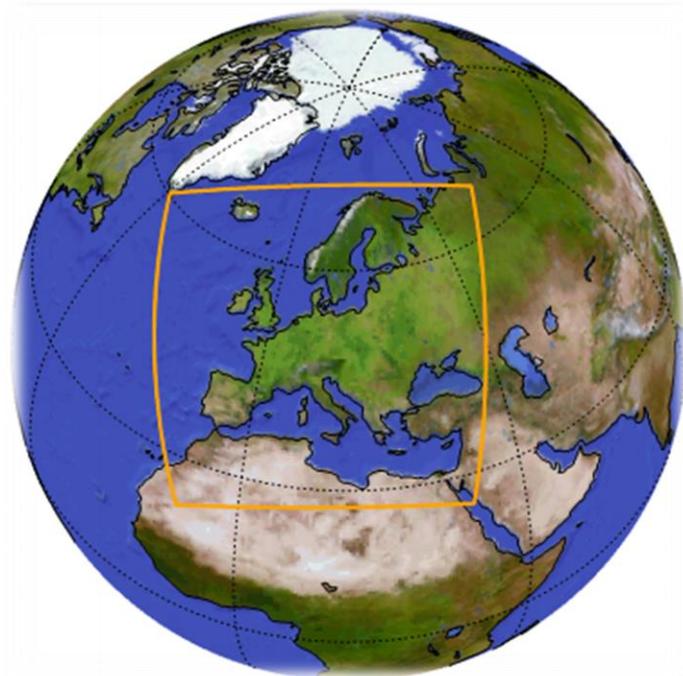


Figure I. 10 | Limites géographiques d'application de l'EURO-CORDEX région4 (source : https://cordex.org/wp-content/uploads/2012/11/CORDEX-domain-description_231015.pdf)

I.5 Transport solide

La problématique du transport solide est d'une importance majeure, vu qu'elle ne cesse de causer la dégradation et les pertes des sols ainsi que l'alluvionnement des barrages et des retenues collinaires tout en diminuant leur capacité de stockage.

L'écorce terrestre avec sa matière organique et des microorganismes qu'elle contient et sa végétation est indispensable pour le maintien et augmenter sa fertilité. Lorsqu'elle est dégradée, il en faut des siècles pour qu'elle soit reconstituée à partir de la roche mère. La réduction de la fertilité des terres est la conséquence principale de l'érosion des sols (Ouillon, 1998) . En un siècle (1870-1970), l'estimation de la surface des terres arables soustraites aux possibilités culturales est de l'ordre de 10 millions de km² faute de l'érosion. Cette surface représentait 7% du globe terrestre et 14 % des surfaces en activité agricole (Duvigneaud, 1974).

L'érosion du sol se produit en amincissant la couche arable d'un champ sous l'action des forces érosives naturelles de l'eau. La conservation des sols représente un souci majeur vu son incidence sur l'environnement et sur l'économie. C'est pour cela, l'érosion sous toutes ses formes (éolien, hydrique, ...etc.) est au cœur des efforts pour la compréhension du phénomène et la limitation de son étendue.

En Algérie, le phénomène de l'érosion et le transport solide constituent une contrainte majeure au développement du secteur agricole et à la gestion des ouvrages hydrotechniques (Achite & Meddi, 2005). L'envasement des barrages et la perte de leurs capacités ainsi que la dégradation des sols en sont les conséquences. Selon (Meguenni & Remini, 2008), l'Algérie enregistre parmi les valeurs les plus importantes du globe et les barrages dans le bassin hydrographique du Chéouli renferment les taux de sédimentation les plus élevés de toutes les régions d'Algérie (Remini, 2005).

Nombreux sont les travaux qui ont étudié le phénomène de l'érosion en Algérie à citer (Achite & Meddi, 2005; Benkaci et al., 2018; Bouanani et al., 2013; Hallouz, 2013; Meddi, 1992; Toumi et al., 2013; Zettam et al., 2017).

Conclusion

En conclusion, l'état de l'art présenté ci-dessus vise à présenter une synthèse sur les modèles hydrologiques, leurs typologies et leurs critères de classification en étalant quelques exemples de développement de quelques modèles pluie-débit, les plus célèbres et les plus utilisés dans le monde.

Ensuite, nous avons présenté une description du modèle SWAT en définissant (i) sa typologie, (ii) son domaine d'application et (iii) son étendue de modélisation dans l'espace et dans le temps.

La deuxième partie de l'état de l'art a été consacrée sur le contexte des changements climatiques à l'échelle globale, régionale et locale. Une description des modèles climatiques globaux et régionaux et les scénarios appliqués.

La troisième et la dernière partie a été dédiée à la problématique du transport solide en Algérie et dans le bassin du Chéouli.

A l'égard de cet état de l'Art, les prochains chapitres vont décrire le modèle choisi, les caractéristiques intrinsèques de la région d'étude et les données nécessaires pour le mettre en application. Ensuite, la modélisation va toucher trois axes distincts : la simulation hydrologique, la prédiction future des débits et le transport des sédiments.

Les résultats obtenus seront très utiles pour les décideurs dans le secteur de l'eau pour une meilleure gestion de la ressource hydrique et la préservation des sols.

Chapitre II :
Matériels et Méthodes

Introduction :

Toute Recherche en hydrologie nécessite la présentation de la zone d'étude, ces caractéristiques hydro-morphométriques et climatiques. Les données observées sont plutôt indispensables à l'étude du comportement hydrologique des bassins versant. Toutefois, la rareté des données observées demeure un obstacle rendant la tâche de modélisation assez difficile à réaliser. Le traitement et le comblement des données existantes est indispensable pour contourner cette difficulté.

Dans notre étude, nous avons utilisé un amalgame de source de données et la première priorité était celles des données observées. Ensuite, et pour faire tourner le modèle, nous avons eu recours aux données satellitaires englobant des données climatiques, des cartes de sols et d'occupation de sols mondiales reconnues et d'utilisation justifiée dans la sphère de la recherche en hydrologie en absence de données mesurées ou de cartes réalisées à l'échelle régionale ou locale

II.1 Description physique

II.1.1 Région d'étude

Le bassin versant du Chélif est situé au Nord d'Algérie. Il est considéré comme étant le bassin le plus important du pays avec une superficie de plus de 43750 km². Il est drainé par l'oued Chélif sur une distance de 750 km qui prend naissance dans l'atlas saharien. Ce bassin comporte 17 barrages dont trois sont construits sur le cours principal (Boughzoul, Ghrib et la prise Chélif) ainsi que près de Plusieurs autres ouvrages de déviation des eaux pour l'irrigation sont construits tout au long de son périphe (Djendel, Oum Drou, Boukader, Sidi belattar).

L'oued Chélif est alimenté par plusieurs affluents et nappes souterraines. En période d'étiage, il est alimenté par les lâchures de barrages tel que Ghrib situé à l'amont ou par plusieurs affluents (exemple : Oued Mina, Ouahrane, Fodda...etc.).

Ce grand bassin a fait l'objet de nombreux travaux relatifs aux régimes hydrologiques et aux changements climatiques (Elmeddahi et al., 2016; M. Meddi et al., 2010) où multiples modèles ont été appliqués tels que GR1A, GR2M, GR4J, ATHYS, SCS (Touazi & Laborde, 2004) sur différents sous bassins mais il n'a jamais fait l'objet d'une modélisation globale par un modèle global.

L'objectif du travail consiste à l'adaptation du SWAT au bassin du Chélif spécialement à l'entrée de cinq barrages pour simuler les apports nécessaires à la gestion des eaux de ces barrages et également, l'utilisation du SWAT à l'exutoire du bassin en intégrant le

fonctionnement de la totalité des barrages du bassin. Cette démarche est fastidieuse vu le nombre d'ouvrages contenu dans le bassin ainsi que leur gestion. On doit intégrer dans le modèle les lâchées des différents barrages.

Ce grand bassin de 43750 km² a fait l'objet de nombreux travaux relatifs aux changements climatiques (Taïbi et al., 2015) et modélisation pluie-débit pour certains sous bassins (M. Meddi et al., 2010) mais il n'a jamais fait l'objet d'une modélisation globale du bassin tenant compte de l'ensemble des ouvrages hydrauliques et les 36 sous bassins qui le composent.

Le bassin du Chélif enveloppe 17 barrages et 44 retenues collinaires régularisant un volume de 684 Hm³ ce qui nécessite une modélisation adéquate pour une meilleure gestion des ressources en eau.

Dans ce travail il sera question de modéliser la relation pluie débit par le **SWAT** à l'entrée de cinq barrages dont le régime hydrologique n'est pas perturbé et à l'exutoire du grand bassin. La prévision des apports permettra une gestion rigoureuse et optimale des stocks d'eau pour l'irrigation et l'AEP. Ces barrages constituent la source principale d'approvisionnement en eau des paysans et de la population. Une gestion intégrée nécessite la connaissance de débit entrant dans le barrage à une échelle mensuelle pour calculer les dotations et les volumes d'eau restants pour une gestion rationnelle des ressources en eau superficielles et souterraines.

Pour se faire, le **SWAT** sera utilisé pour modéliser les apports aux cinq barrages ainsi qu'à l'exutoire du grand bassin du Chélif pour développer un outil d'aide à la décision nécessaire aux gestionnaires de ces barrages. Ce modèle a donné des résultats satisfaisants en Amérique du Nord (Ayivi & Jha, 2018; Sohoulane, 2018), en Europe (Grusson et al., 2018), en Asie (Paul et al., 2019) et en Afrique (Zettam et al., 2017).

Le bassin hydrographique du Chélif représente plus de 17 % de la superficie du Nord de l'Algérie. Situé entre les latitudes 0°8'26"E et 3°31'33"E et les longitudes 35°20'29"N et 36°3'41"N Limité naturellement par la mer méditerranée au Nord, à l'Ouest par les bassins hydrographiques du côtier Oranais - La Mactaa – Chott Chergui, à l'Est par le côtier Algérois-Hodna-Soumam et au Sud par Zahrez –Sahara. Il est parcouru par un oued qui porte le même nom sur une distance de plus de 700 km et prend sa source dans les monts du Djbel Ammour dans l'Atlas saharien près d'Aflou et termine son parcours la mer méditerranée.

Les caractéristiques des barrages étudiés (Figure II. 1) sont représentées dans le Tableau II. 1

Tableau II. 1 | Caractéristiques Des Barrages Etudiés

Barrage	Année De Mise En Eau	Capacité Initiale (Hm ³)	Apport Moyen Interannuel (Hm ³ /An)	Application
SMBT	2005	75	56	AEP ; Irrigation
HARREZA	1984	70	30.8	Irrigation
SMBA	1978	235	120	AEP ; Irrigation
GARGAR	1988	450	185	AEP ; Irrigation
BAKHADDA	1936	56	72	AEP ; Irrigation

Le choix de ces barrages était basé principalement sur la disponibilité des données hydro-climatiques suffisantes pour les besoins du modèle.

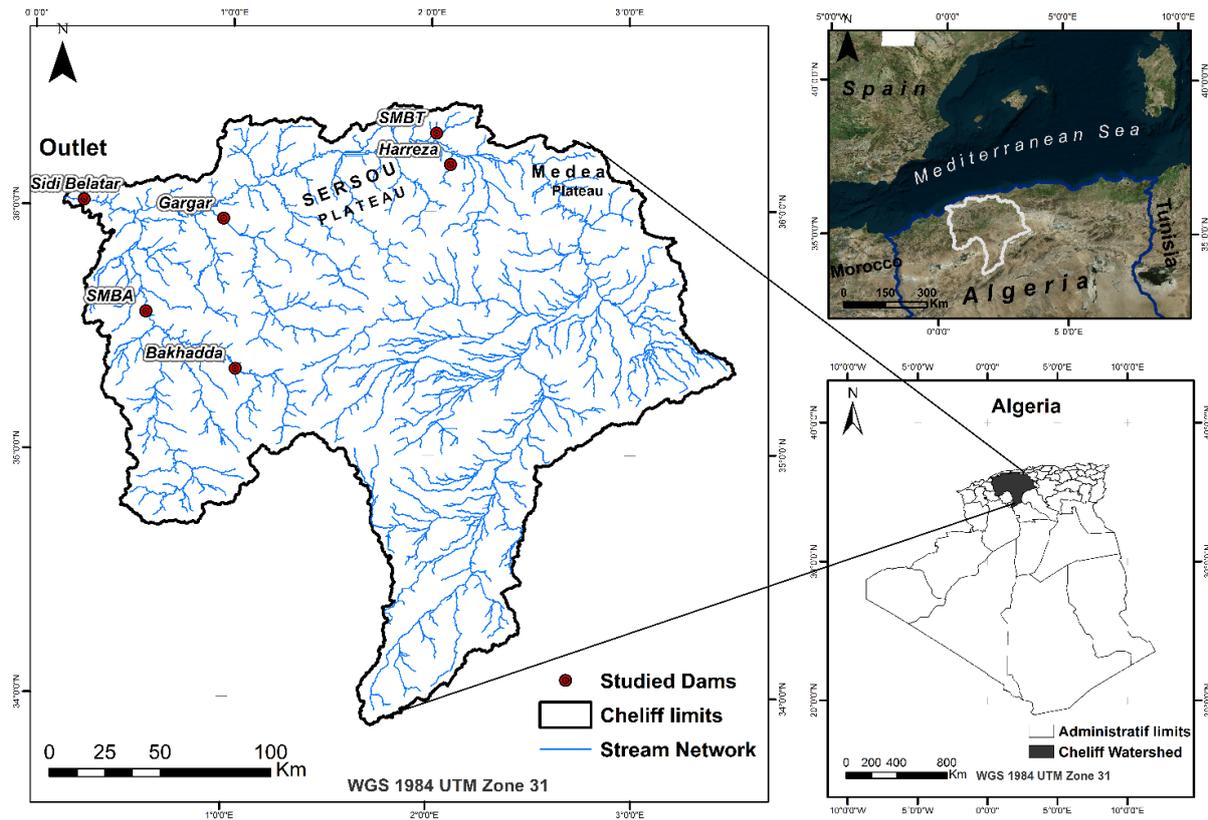


Figure II. 1 | Situation du bassin du Chélif et les barrages étudiés

II.2 Découpage du bassin du Chélif

Le bassin du Chélif est découpé en trois sous-régions distinctes suivant les limites des bassins hydrographiques, les infrastructures existantes ou à projeter et les limites administratives (Tableau II. 2).

Tableau II. 2 | Découpage Hydrographique et Administratif du Chélif

Sous-région	Bassin Hydrographique	Wilayas
Sous-région I, II	Haut et Moyen Chélif	Ain Defla, Médéa, Tissemsilt, Chlef
Sous-région III	Bas Chélif et la Mina	Relizane, Tiaret, Mostaganem et Mascara
Sous-régions IV	Chélif Amont Boughzoul	Djelfa, Laghouat, Tissemsilt, Tiaret

Le découpage est illustré dans la Figure II. 2;

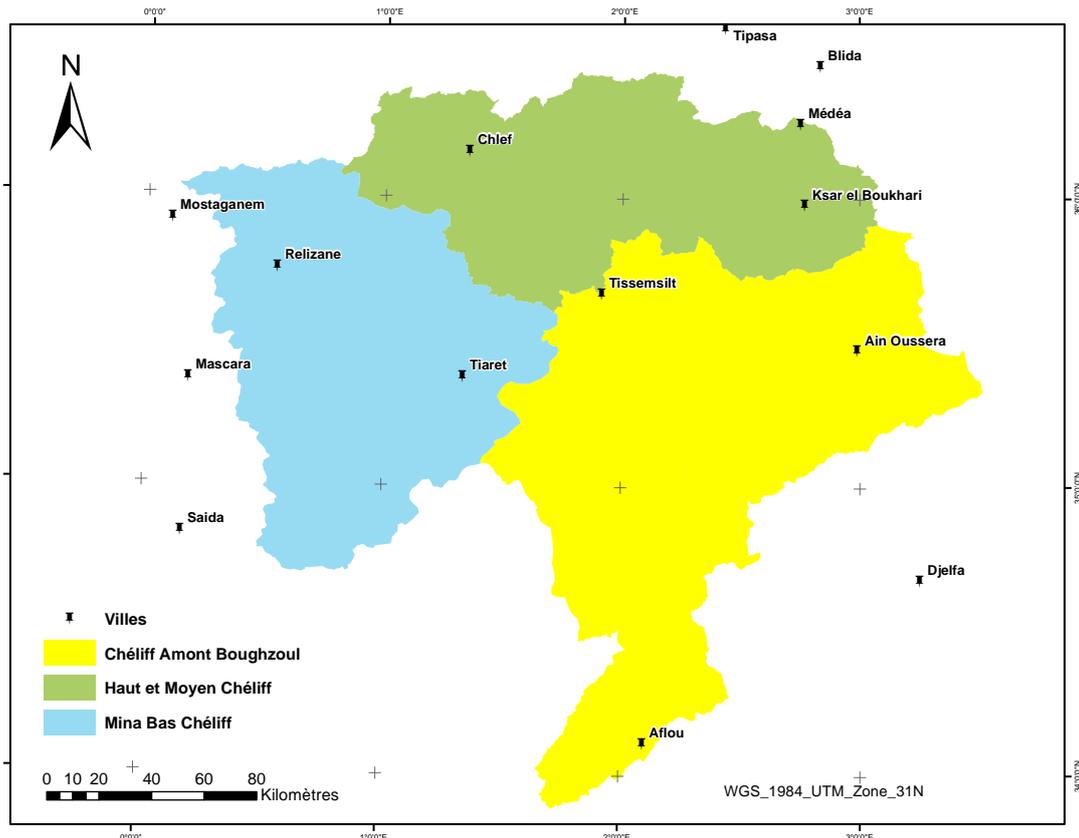


Figure II. 2 | Découpage par sous-régions du Bassin du Chéouf

Les bassins hydrographiques Haut et Moyen Chéouf comportent deux barrages concernés par notre étude : le barrage SMBT sur l'Oued Ebda et le barrage Harreza sur l'Oued Chéouf Harreza et le Bas Chéouf et la Mina comporte de son côté trois barrages : le barrage Gargar sur Oued R'hiou, le barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (SMBA) sur l'Oued Mina et le barrage Bakhadda sur le même Oued vers le Sud-Est du barrage SMBA.

II.3 Paramètres du relief et de morphométrie

Le relief c'est un des facteurs dominants sur la rapidité de la concentration des eaux à l'exutoire du bassin versant, et même d'approcher les paramètres hydro climatologiques moyens en tenant compte des gradients altimétriques. Les pentes fortes à très fortes sont identifiées surtout, dans la partie amont du bassin-versant. Celles-ci sont caractérisées par un relief accidenté où les pentes moyennes sont réparties beaucoup plus en aval bassin. Cependant, les pentes faibles sont concentrées au niveau de la plaine du Cheliff et occupent ainsi une surface plus faible (Benkaci et al., 2018).

Tous les barrages étudiés sont situés sur la rive gauche de l'Oued Chéouf, à l'exception du barrage SMBT qui est entaillé entre le massif montagneux de Djebel Boumaad et le Mont

Zeccar avec une surface relativement faible (266 km²) et une morphométrie plutôt ramassée avec un temps de concentration très court ce qui favorise la genèse des crues avec des vitesses de propagation très rapides. Son relief est caractérisé par une différence d'altitude assez prononcée pour une distance courte. Une valeur de 87 % de la surface du bassin se situe entre l'altitude min qui est de 268 m et 1000 m ce qui indique une très grande dénivelée et une faible longueur de pente et ce qui reste de la surface (13%) est compris entre l'altitude 1000 m et le sommet du bassin (1550m). (Figure II. 3)

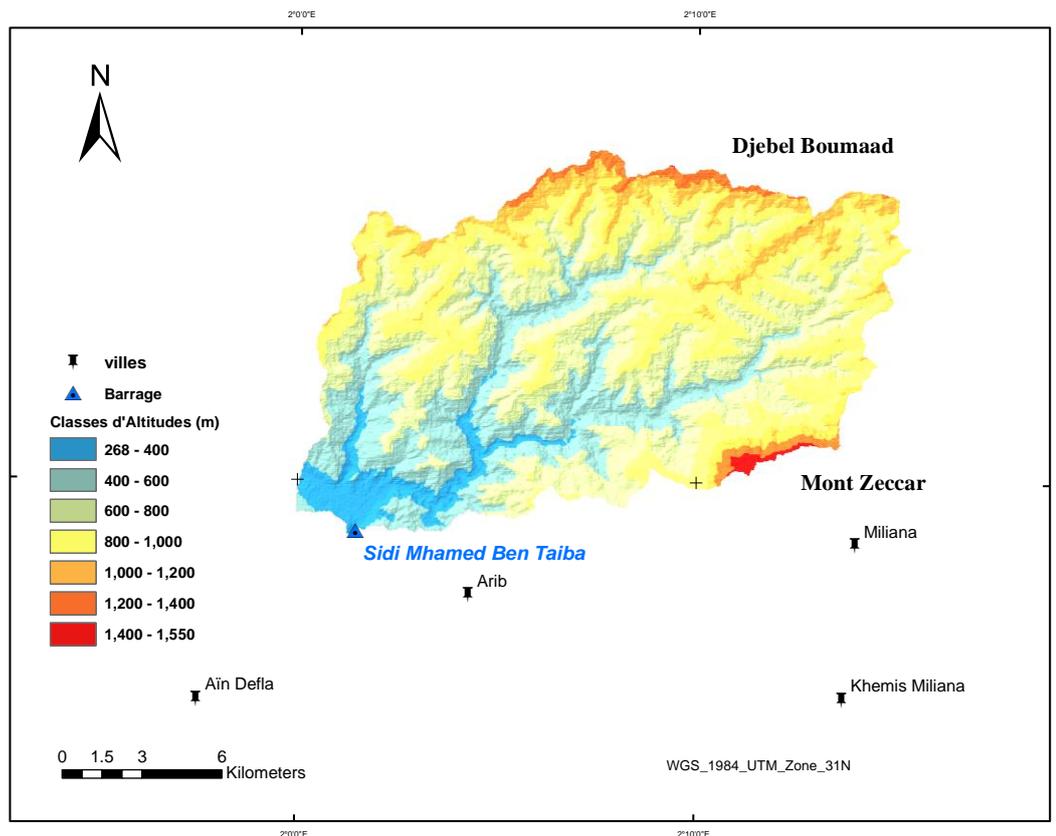


Figure II. 3 | Classes d'altitudes et Relief du Bassin versant Barrage Sidi M'hammed Ben Taïba

La courbe hypsométrique du bassin SMBT est représentée dans la figure ci-dessous (Figure II. 4) :

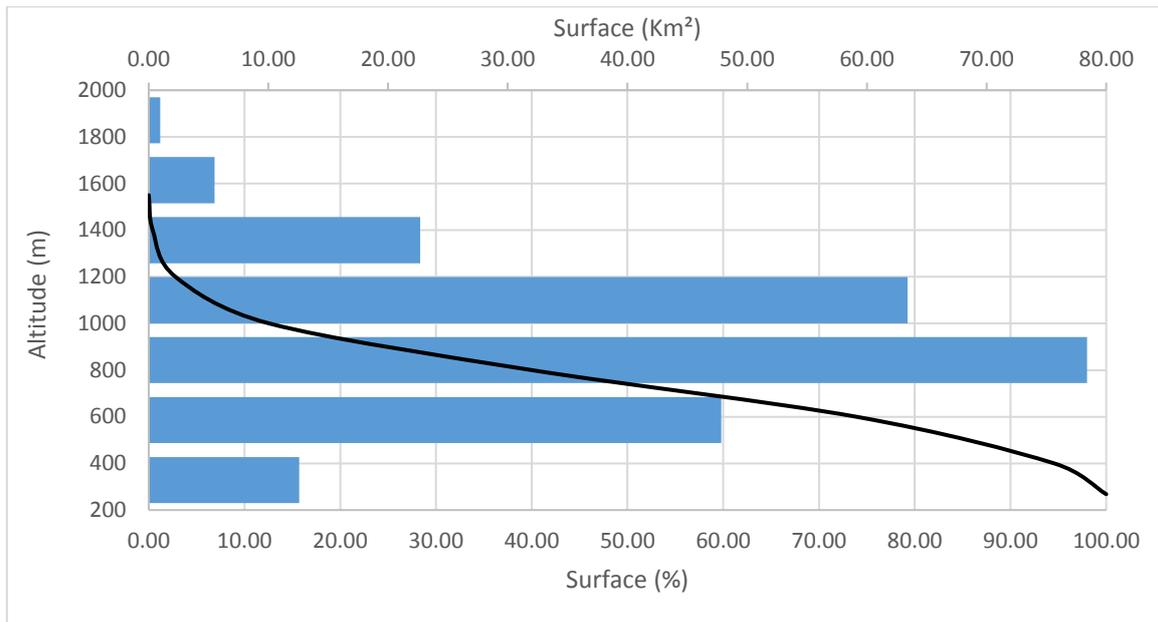


Figure II. 4 | Courbe hypsométrique du Bassin Versant du barrage SMTB

Le bassin versant de l'Oued Harreza s'étend sur une superficie de 142 km², une altitude moyenne de 500 m, une altitude max de 765 m au Sud et une altitude min de 313 m au niveau de l'exutoire (Barrage Harreza) (Figure II. 5)

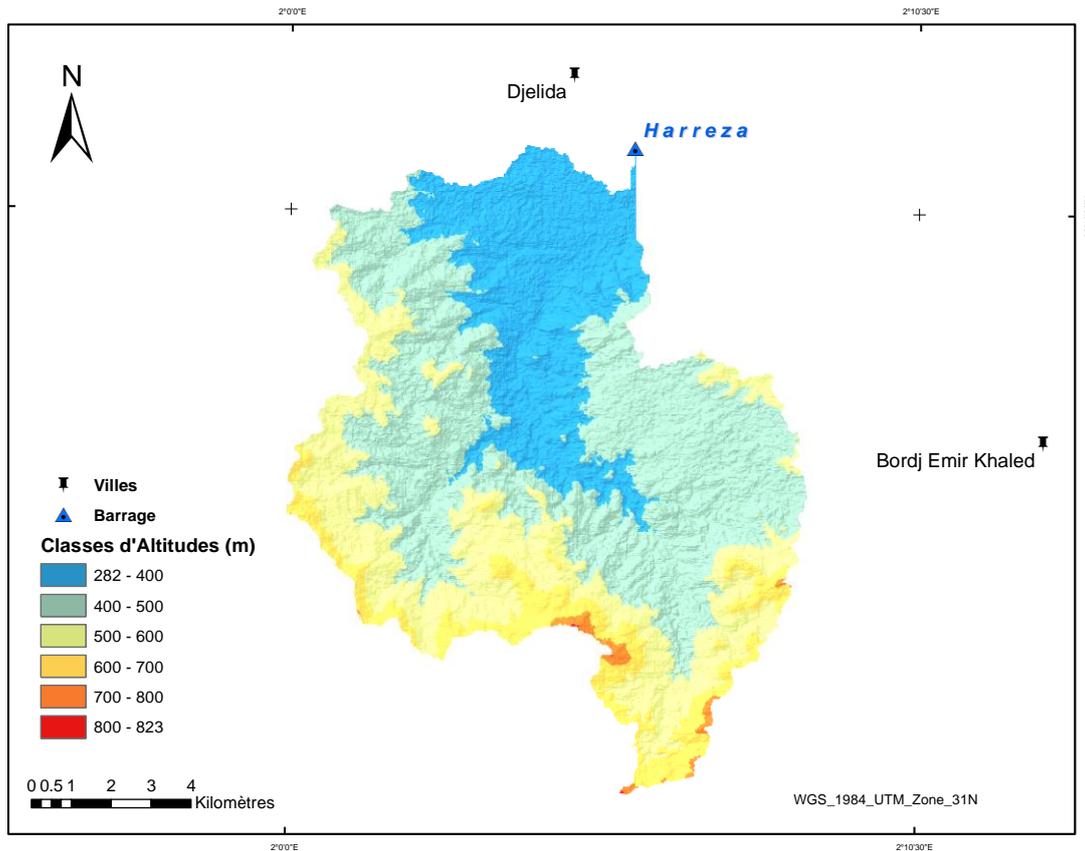


Figure II. 5) Classes d'Altitudes du Bassin Versant du barrage Harreza

Environ 90 % de la surface totale sont situés entre l'altitude 282 (pieds du barrage) et l'altitude 600 m contrairement aux altitudes 600 m jusqu'à l'altitude max du bassin (823m) qui ne représente que 10 % de la surface totale. (Figure II. 6)

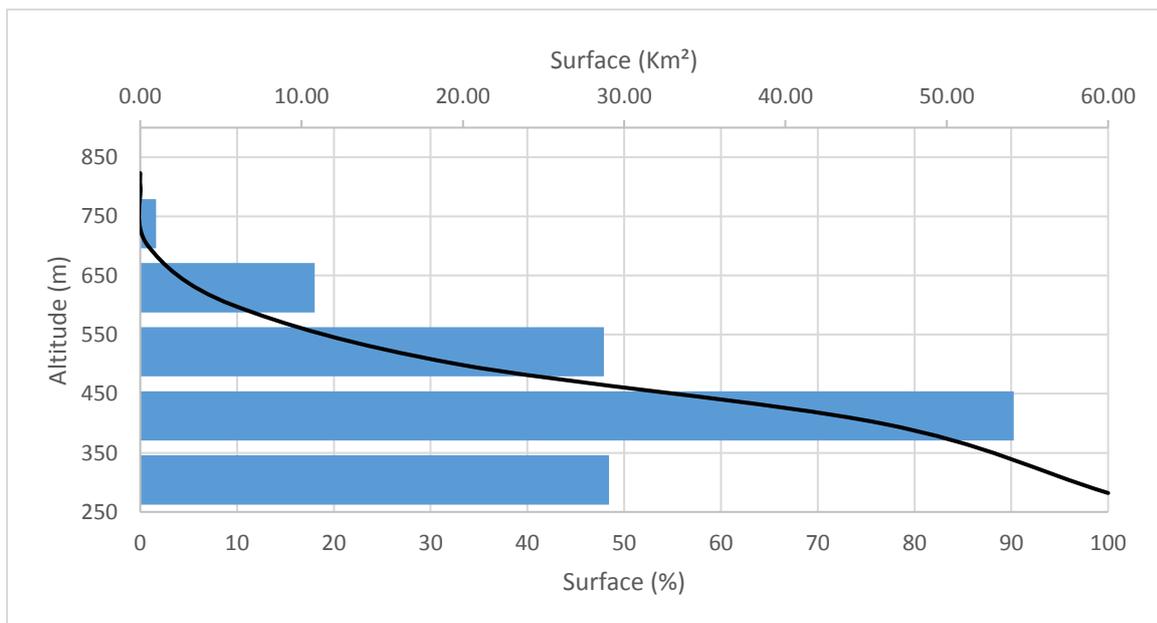


Figure II. 6) Courbe hypsométrique du Bassin versant du barrage Harreza

A l'encontre des barrages cités plus haut, le bassin versant en amont du barrage Gargar dénote la présence d'une plaine alluviale importante, elle commence après la confluence de l'Oued Tiguiquest dont les communes de Lahlef et Ammi Moussa y sont implantés. La présence des plaines alluviales tend à ralentir la vitesse d'écoulement et favorise la recharge des nappes phréatiques. Ceci est exprimée graphiquement avec les classes d'altitude du bassin (Figure II. 7).

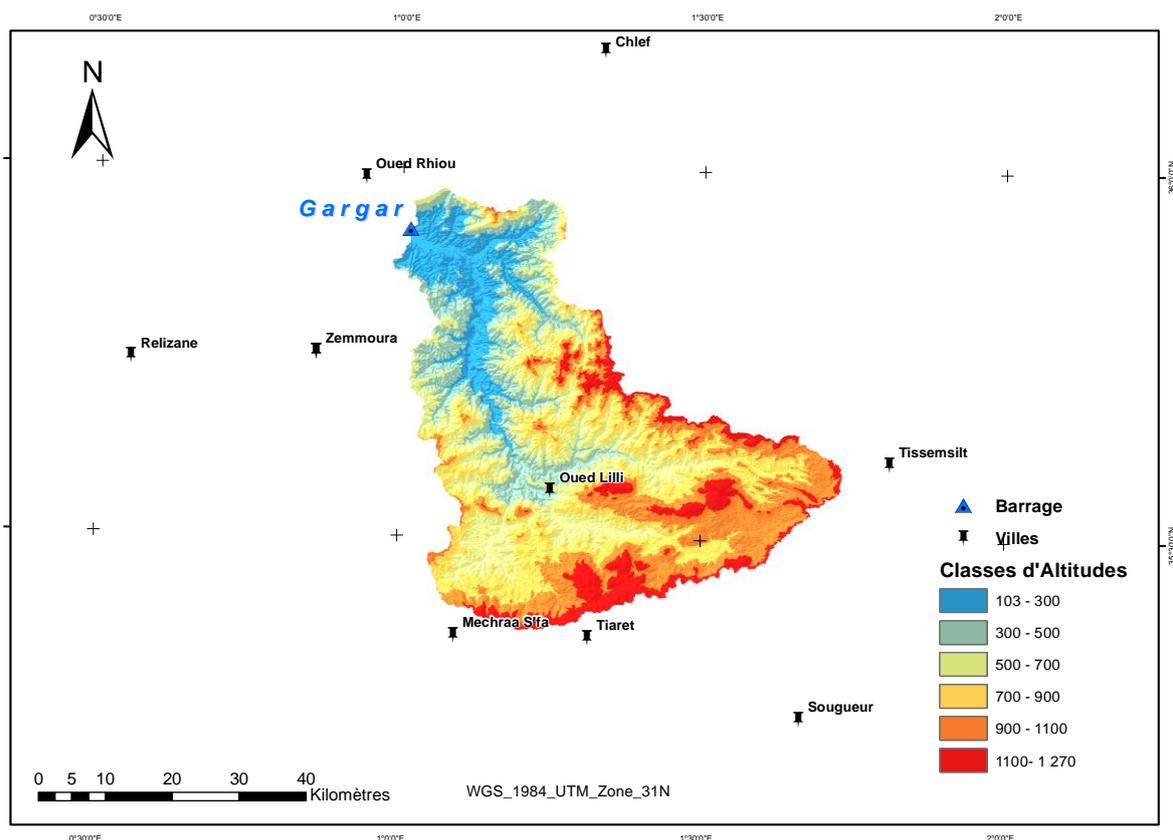


Figure II. 7 | Classes d'altitudes du bassin versant « Barrage Gargar »

La courbe hypsométrique du bassin versant du barrage Gargar est représentée comme suit (Figure II. 8) :

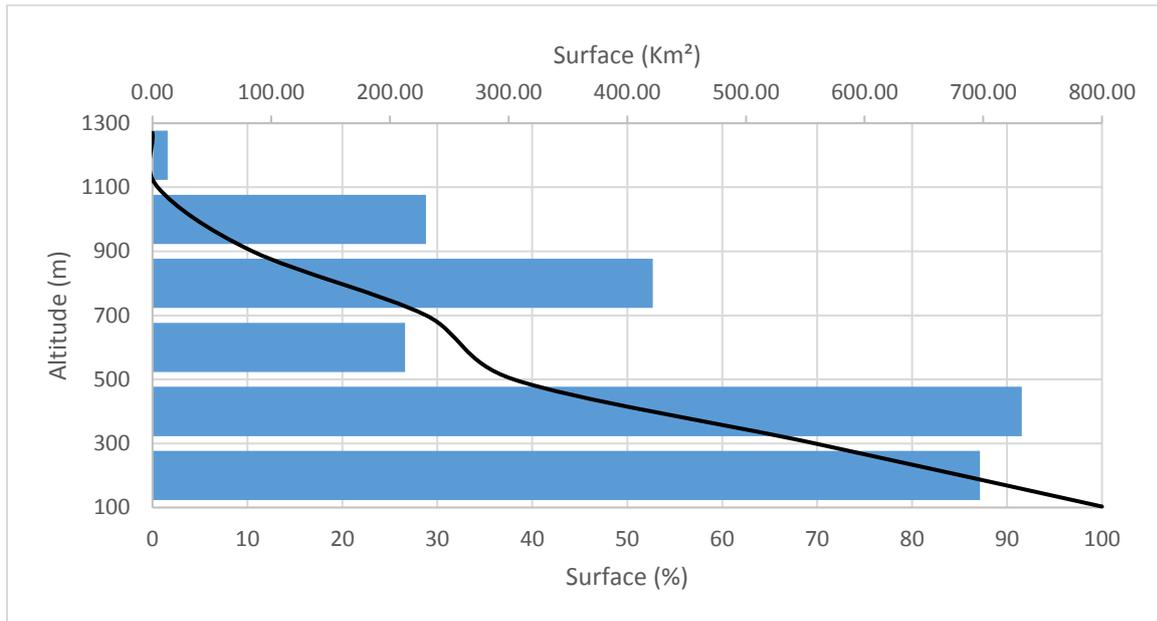


Figure II. 8 / Courbe hypsométrique du bassin versant « Barrage Gargar »

Il est à noter que les altitudes supérieures à 100 m jusqu'à 500 m représentent plus que 60 % de la surface du bassin et les altitudes supérieures à 900 m jusqu'à 1200 m n'occupent quant à elles que 10 % de cette dernière.

Le bassin versant de la Mina est caractérisé par un relief Fort ($D_s = 468$ m) Suivant la classification ORSTOM/IRD (Dubreuil & Guiscafre, 1971) (Tableau II. 3)

En général, le bassin versant est défini par des :

- Altitudes faibles au Nord
- Altitudes moyennes à l'Est et à l'Ouest
- Altitudes fortes au Sud
- Altitudes moyennes et fortes au centre.

Tableau II. 3 / Classification des reliefs en fonction de la dénivelée spécifique

Classes du relief	Dénivelée Spécifique
R1 Relief Très Faible	Ds < 10 m
R2 Relief Faible	10 < Ds < 25 m
R3 Relief Assez Faible	25 < Ds < 50 m
R4 Relief Modéré	50 < Ds < 100 m
R5 Relief Assez Fort	100 < Ds < 250 m
R6 Relief Fort	250 < Ds < 500 m
R7 Relief Très fort	Ds > 500 m

Et à partir de la courbe hypsométrique (Figure II. 9), on peut déduire ce qui suit : Environ 21% de la surface du bassin versant est comprise entre les altitudes 700 et 900 m, autour de 13 % pour les tranches d'altitudes de 1100 à 1300 m et 32 % de la surface couvre la frange >100 m jusqu'à 700 m d'altitude.

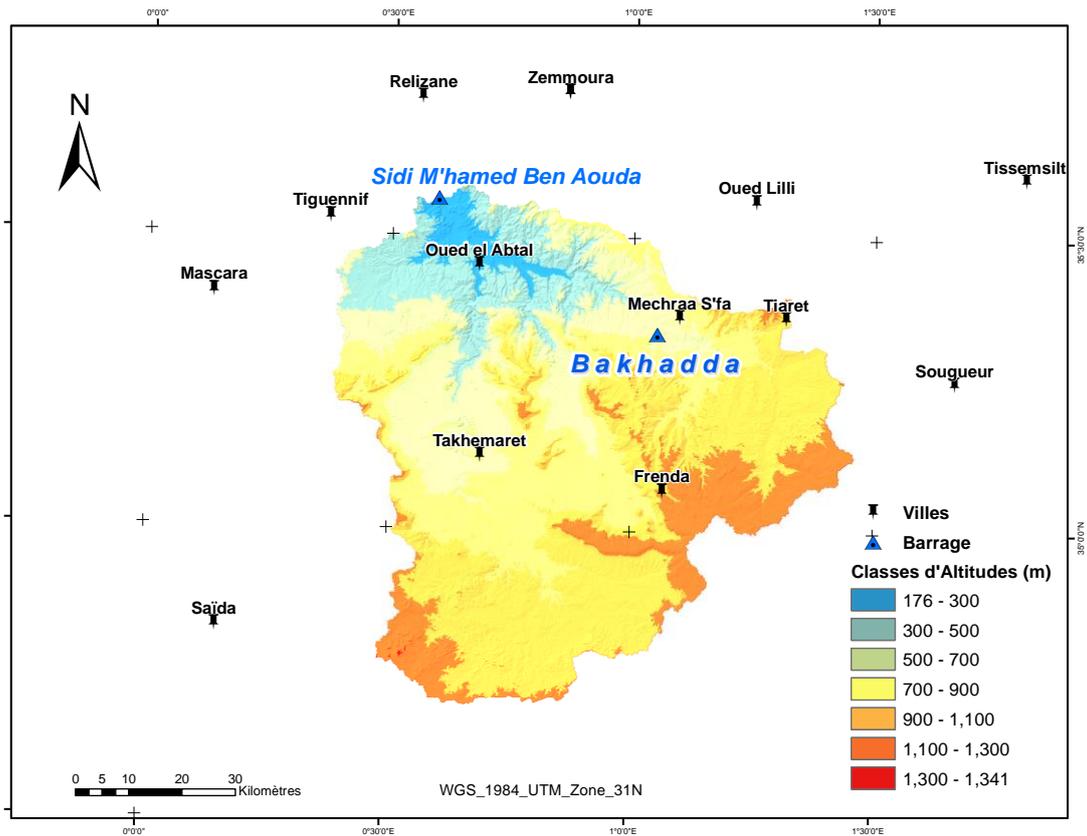


Figure II. 9 | Classes d'altitudes du bassin versant « Barrage SMBA »

L'hypsométrie du bassin versant SMBA est figurée comme suit (Figure II. 10) :

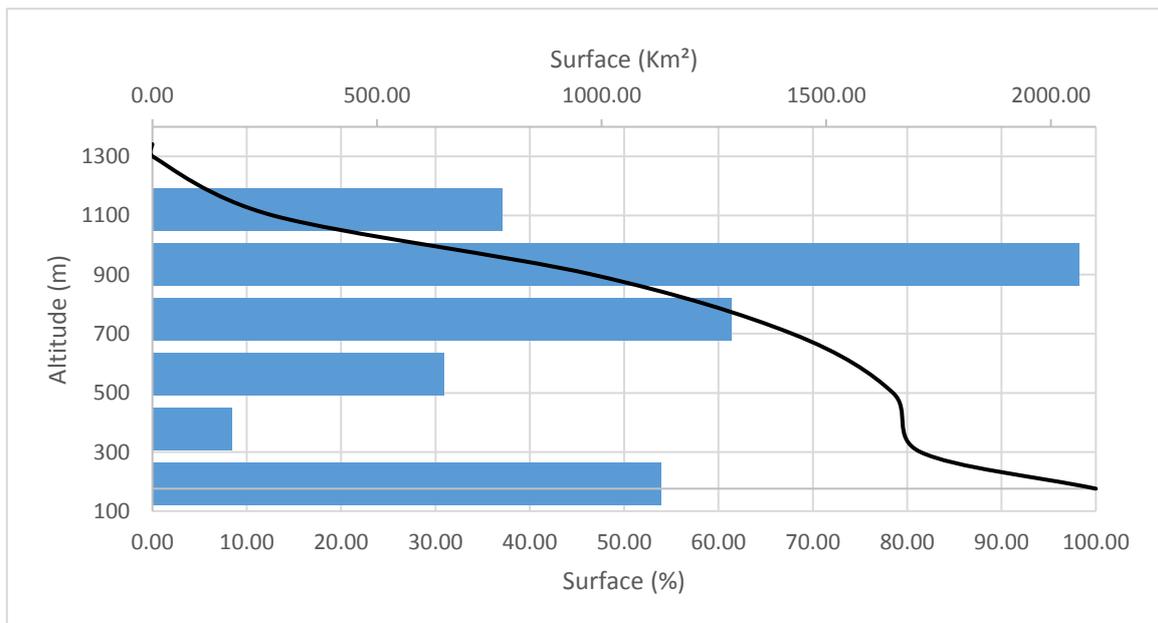


Figure II. 10 | Courbe Hypsométrique du bassin versant « barrage SMBA »

Le bassin versant du barrage Bakhadda représente la continuité de la Mina vers le Sud- Est. La tranche d'altitude (800-1000) couvre 50 % de la superficie totale du bassin (Figure II. 11) ce qui définit un relief fort et une longueur de pente assez importante.

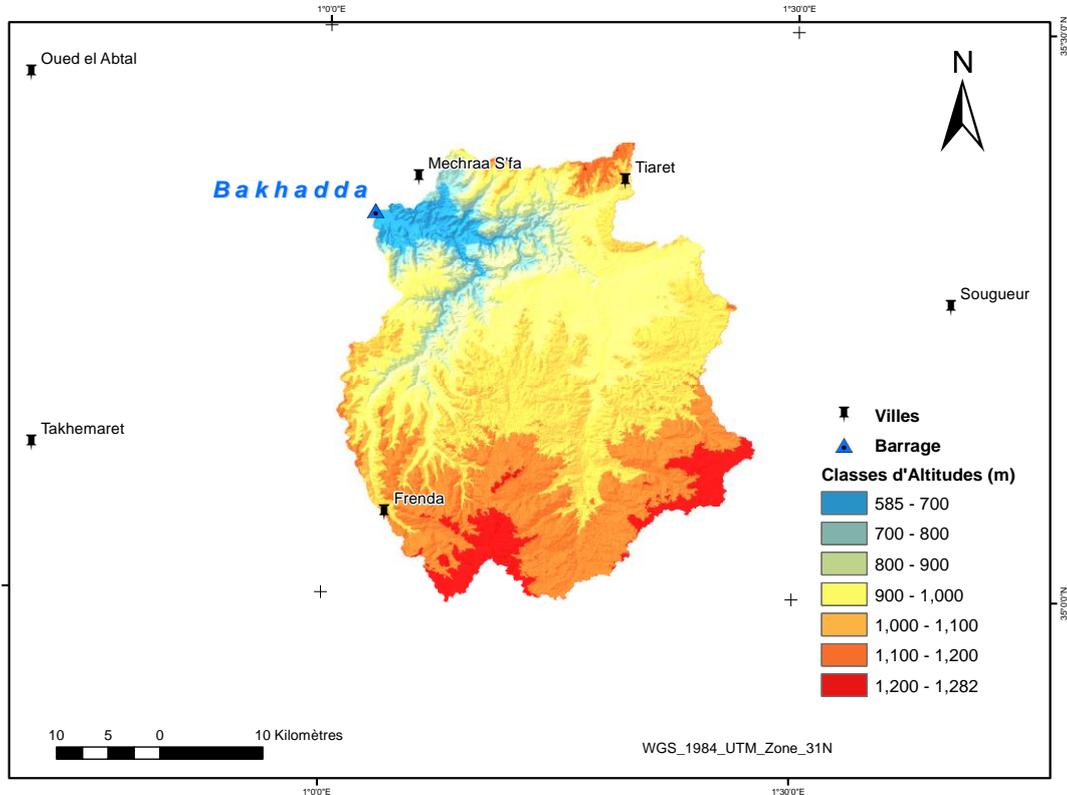


Figure II. 11 | Classes d'altitudes du bassin versant « Barrage Bakhadda »

La courbe hypsométrique du bassin versant de Bakhadda figure comme suit (Figure II 12) :

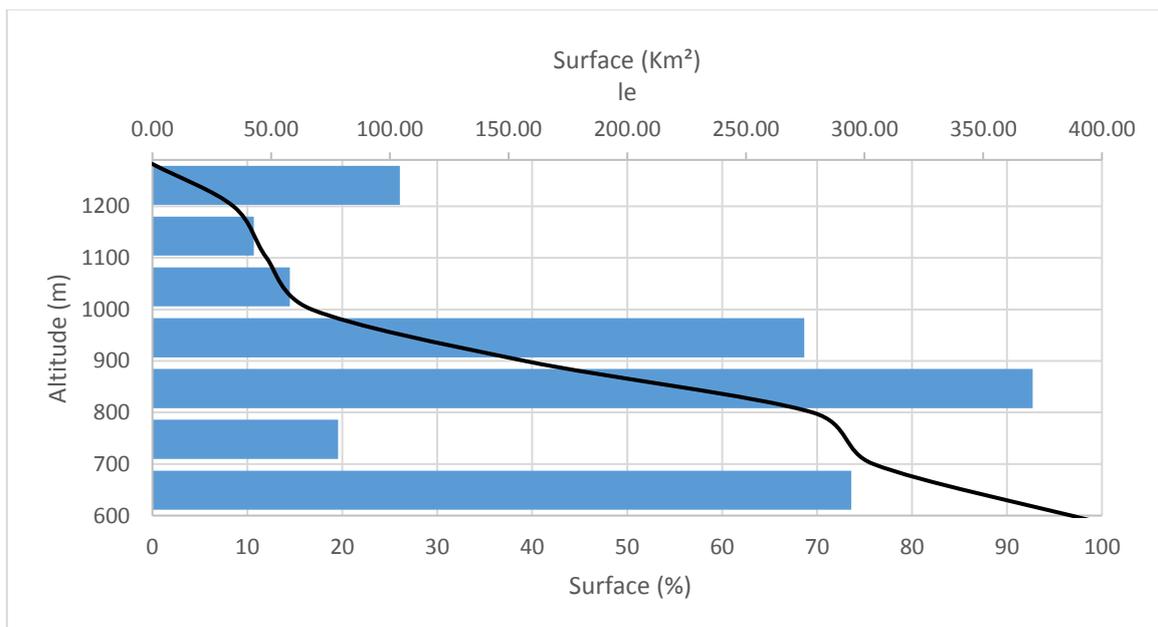


Figure II 12 | Courbe Hypsométrique du bassin versant « barrage Bakhadda »

II.4 Pluviométrie

Les conditions climatiques jouent un rôle très important dans le régime des cours d'eau. Les plus déterminantes entre elles sont les précipitations qui forment un facteur essentiel dans l'élaboration du bilan hydrologique d'un bassin versant.

Le Haut Chélif ou communément appelé la sous-région I est équipé en 62 stations pluviométriques. Bien réparties, celles-ci sont gérées par L'ANRH. Les précipitations sont très irrégulières dans le temps et dans l'espace ; on distingue deux zones extrêmes, une zone pluvieuse avec une moyenne annuelle de 845mm à la station pluviométrique 011803 (Sidi Medjahed ; côtier) et 564 mm à la station pluviométrique 011605 (Theniet el Had, Ouarsenis) et une zone moins pluvieuse avec une moyenne annuelle de 453 mm auprès de la station 011713 (Bordj Emir Khaled) (ABH-CZ 1.1, 2004)

La sous-région II dite le moyen Chélif enveloppe quant à elle 26 stations pluviométriques contrôlées aussi par l'ANRH. La zone extrême est située du côté Dahra et Ouarsenis (Cheliff) avec une moyenne annuelle de 600mm et en face la plaine du Chélif avec une moyenne d'environ 300 mm (ABH-CZ 2.1, 2004).

La sous-région III qui couvre les bassins hydrographiques de la MINA et Bas-Chélif est dotée d'un réseau de 56 postes pluviométriques. Cette région est caractérisée par une pluviométrie très irrégulière en particulier sur le côtier de Mostaganem(ABH-CZ 3.1, 2004). Au niveau du bassin de la Mina, la présence de chaînes de montagnes généralement orientées Sud-Ouest, Nord-Est ou Nord-Ouest, Sud-Est provoque l'augmentation des précipitations sur les versant exposé au vent.

La sous- région IV couvrant le bassin hydrographique Amont Boughzoul est caractérisée par un climat aride et une pluie moyenne annuelle ne dépassant pas les 200 mm/an ainsi qu'une forte évapotranspiration. Ce bassin est équipé de 21 postes pluviométriques et 06 pluviographes.

II.5 Réseau Hydrographique

Le réseau hydrographique est représenté par la totalité des cours d'eau naturels, qu'ils soient permanents ou temporaires, contribuent à la création de l'écoulement. Le réseau hydrographique alors, constitue une composante capitale du bassin versant.

Le Bassin du Chélif est issu de la confluence de deux fleuves majeurs, l'Oued Touil et le Nahr Ouassel, dont la confluence forme l'Oued Chélif. L'Oued Touil trouve ses sources dans l'Atlas Saharien pas loin d'Aflou dans les montagnes du Djebel Ammour. Il parcourt les hautes plaines des quatre wilayas : Laghouat, Djelfa, Tiaret et Médéa au niveau du barrage de Boughezoul,

suivant une orientation SW-NE, se terminant à Chahbounia et se joint ensuite avec Nahr Ouassel qui coule en diagonale vers le Nord-Est et traverse les wilayas de Tiaret, Tissemsilt et Médéa (MEHAIGUENE, 2013). Ensuite l'Oued Chélif suit l'orientation Sud, Nord en traversant la ville de Ksar El Boukhari et le massif de Gantass suivant l'orientation Sud,Est Nord,Ouest et suit son chemin courbé en passant respectivement par : Ain Defla, Chlef, Relizane et Enfin Mostaganem vers son exutoire au niveau de la mer méditerranée au niveau de la commune de Sidi Belattar.(Figure II. 13)

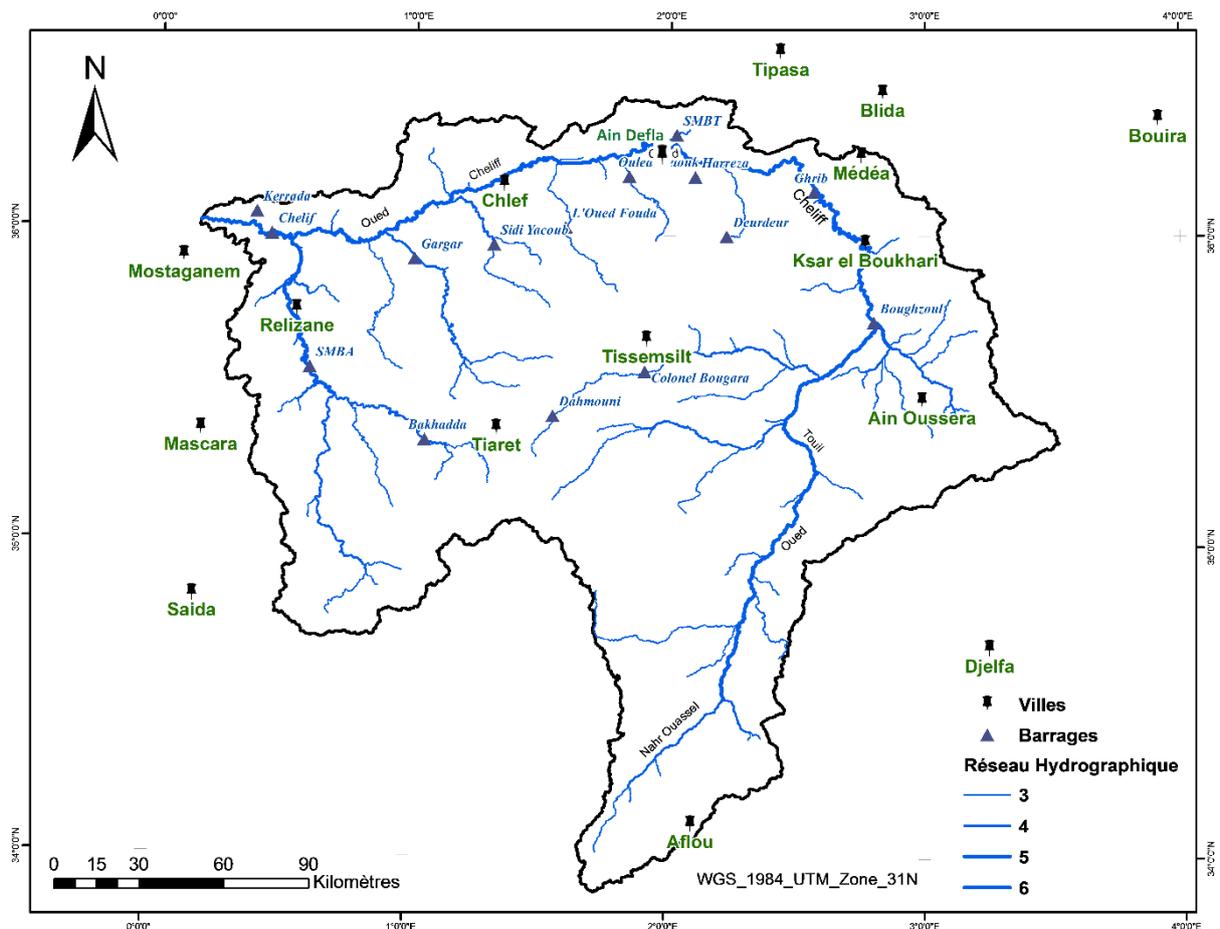


Figure II. 13 | Réseau hydrographique du Chélif

Le bassin versant au site du barrage SMBT qui est le seul barrage situé sur la rive droite de l'Oued Chélif. Immédiatement à l'aval de la confluence des Oueds Ferhat et Oued el Had, pour former l'Oued Ebda sur une longueur de 28.8 km et avec un chevelu hydrographique d'une densité de drainage de 1.02 km/km² (Figure II. 14).

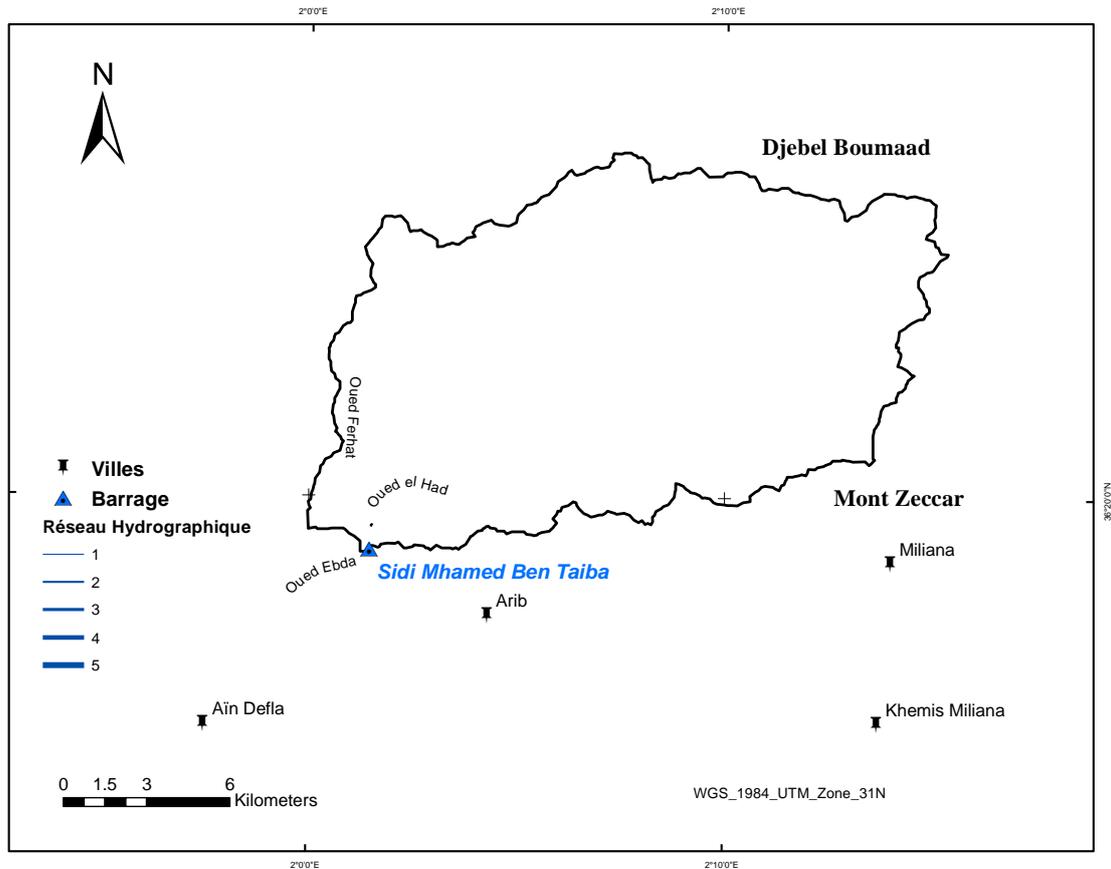


Figure II. 14 | Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage SMTB »

L'Oued Harreza traverse une distance de 20 km et orienté Nord-Ouest au sud du bassin. Drainé par des affluents du côté Est par l'Oued Emial prend sa source dans territoires de Beni Zougzoug puis rejoint la vallée de la Harreza. L'oued Slimane rejoint l'oued principal en drainant la partie ouest de la ligne de partage avec une densité de drainage de 1.25 km/km² et un coefficient de torrentialité de 0.94 (Figure II. 15)

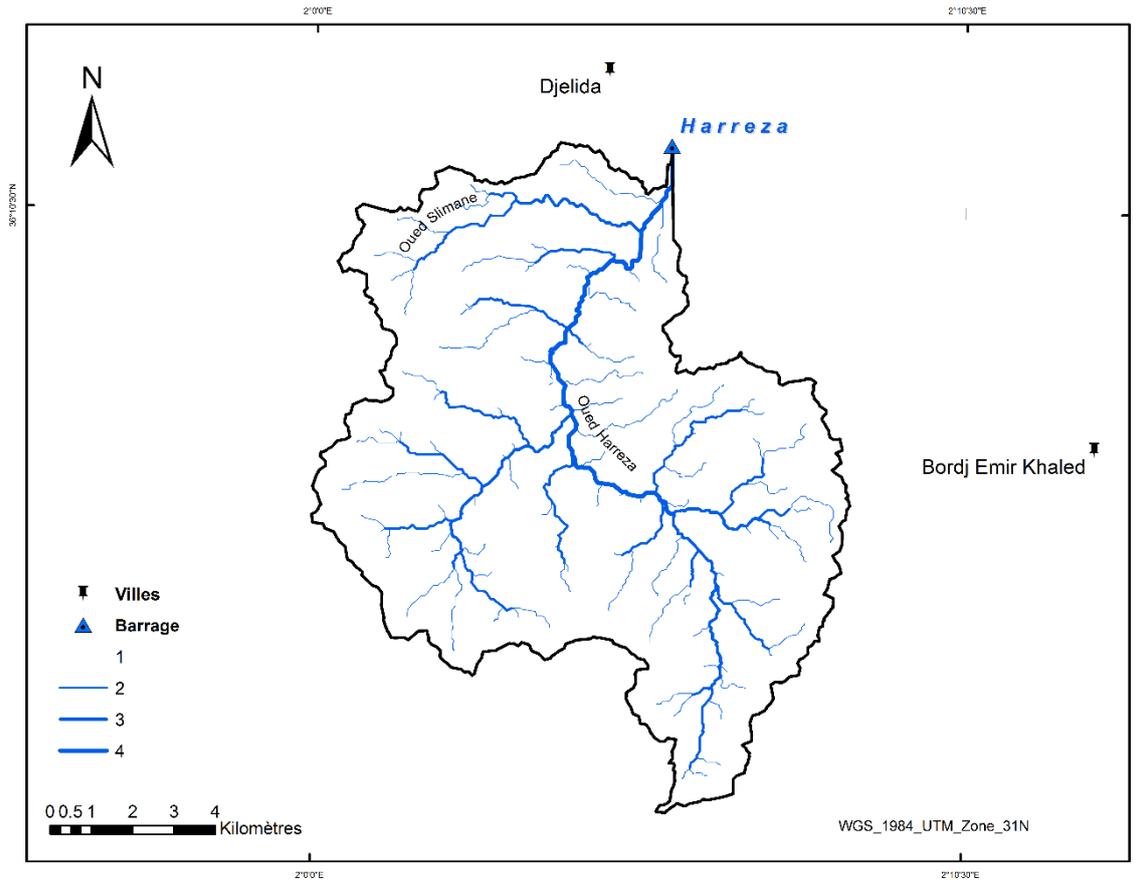


Figure II. 15 / Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage Harreza »

L'hydrographie du bassin de la Mina est composée par quatre principaux affluents, l'Oued Mina sur une distance de près de 70 km jusqu'au barrage de Bakhadda (Fig) avec une orientation SE-NO. La partie centrale du bassin versant est drainée par Oued el Abtal et Oued Taht et du côté NO Oued Haddad avec une densité de drainage et un coefficient de torrentialité respectivement de l'ordre de 1.23 km/km² et 0.82 km/km² (Figure II. 16).

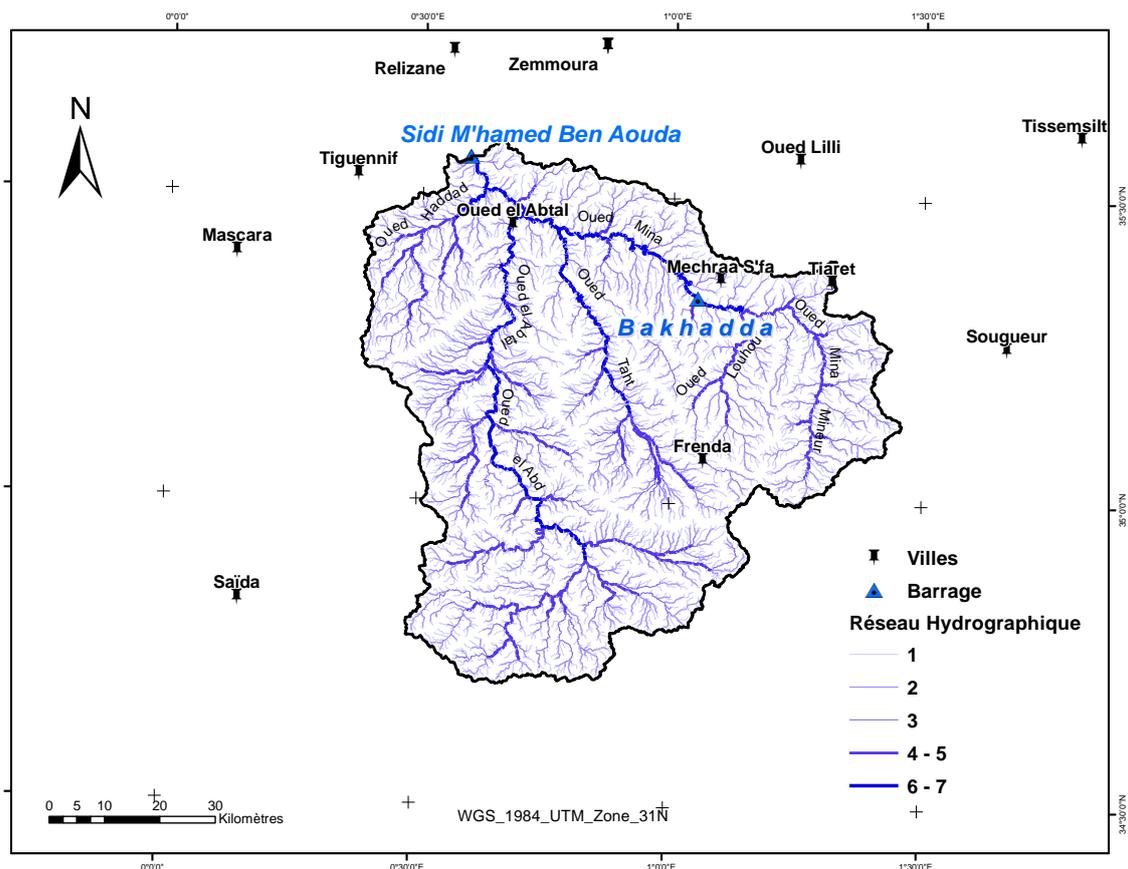


Figure II. 16 | Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage SMBA »

En amont du barrage Bakhadda, l'Oued Mina continue en prenant source sur le plateau à l'Est de la ville de Frenda à plus de 1200 m d'altitude au passage de la RN9 de la Wilaya de Tiaret. Il reçoit la confluence d'un oued appelé Oued Louhou qui s'avère aussi important que l'oued Mina mineur (Figure II. 17).

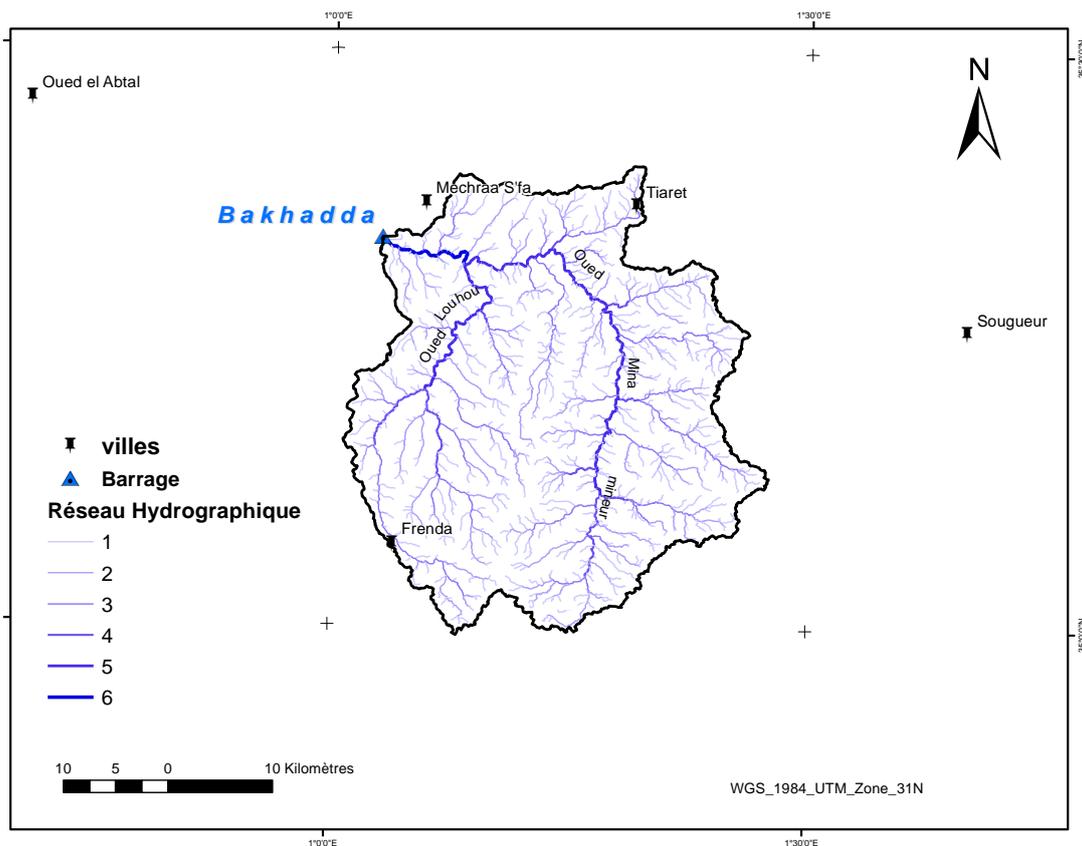


Figure II. 17 | Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage Bakhadda »

Le réseau hydrographique du bassin versant « Barrage Gargar » est assez dense avec une densité de drainage de 1.13 km/km² principalement traversé par l’oued R’hiou qui prend sa naissance plus au Sud vers les frontières des wilayas de Tiaret et Tissemsilt, avec une orientation Sud-Est, Nord-Est sur une distance de plus de 110 km (Figure II. 18).

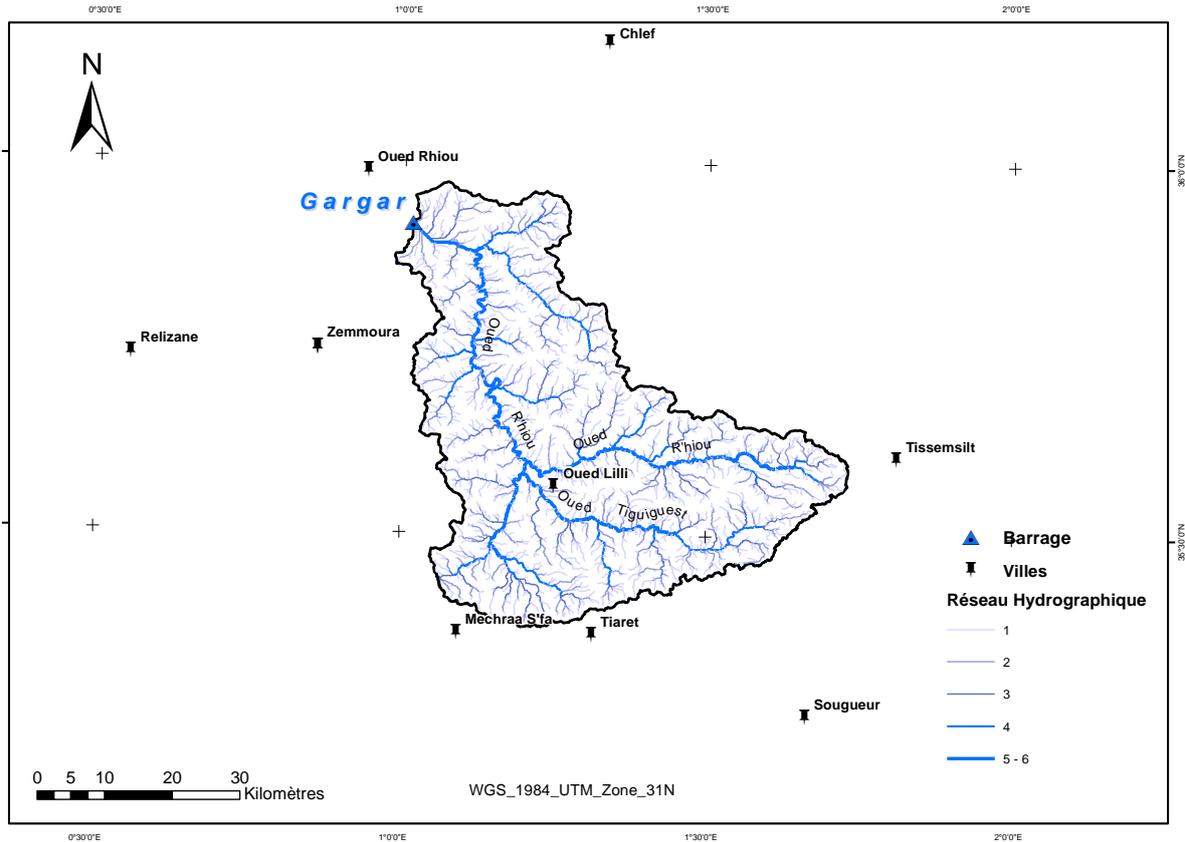


Figure II. 18 | Réseau hydrographique du bassin versant « Barrage Gargar »

Les caractéristiques hydro morpho métriques des bassins versants étudiés sont résumées dans le Tableau II. 4 :

Tableau II. 4 | Caractéristiques hydro-morpho métriques des bassins versants étudiés avec : S : Surface, P : périmètre, Kc : Coefficient de compacité, H_{moy} : Altitude Moyenne, D_d : Densité de drainage, I_g : Indice de pente globale, D_s : Densité spécifique, C_t : Coefficient de torrentialité, E : Coefficient d'allongement.

Bassins	$S(km^2)$	$P(Km)$	Kc	$H_{moy}(m)$	$D_d(km/km^2)$	$I_g(m/km)$	$D_s(m)$	C_t	E
SMBT	231.32	77.51	1.42	733.91	1.02	23.90	363.35	0.71	1.89
Harreza	124	65.51	1.65	466	1.25	11.49	127.95	0.94	1.80
Gargar	2307.38	312	1.82	495.87	1.13	6.11	293.98	0.79	2.43
SMBA(Mina)	6091	491.66	1.76	781.44	1.23	4.59	358.24	0.82	1.82
Bakhadda	1222.86	204.61	1.63	869.39	1.14	7.51	262.62	0.72	1.99

II.6 Hydrogéologie du Chélif

L'analyse de certain nombre d'étude, ainsi que l'analyse litho stratigraphique et structurale du bassin versant du Cheliff, nous a permis de définir les principaux aquifères suivant (Figure II. 19) :

- Dans la zone nord du bassin du Cheliff, quatre aquifères principaux sont observés :
- ✓ **Aquifère alluvionnaire quaternaire** : Ce réservoir, qui est le plus important, le plus exploité et le plus vulnérable à la pollution de surface, est composé de graviers, sables, galets et argiles. Il se trouve au niveau de l'axe du synclinal du Cheliff. Les alluvions grossières du Quaternaire ancien affleurent aux bordures de la plaine, tandis qu'au niveau de l'axe du synclinal, les limons et les argiles du Quaternaire récent forment les premiers vingt mètres. L'épaisseur de cet aquifère varie de 20 à 150 m en bordure de la plaine. Le substratum de cet aquifère est formé d'argiles villafranchiennes, mais cette formation imperméable est parfois absente, permettant un contact direct entre le premier et le deuxième aquifère.
- ✓ **Aquifère gréseux-sableux du Pliocène** : Constitué de conglomérats, de sables rouges, de grès et de poudingues d'âge Astien (Pliocène supérieur), ce réservoir plonge sous les alluvions anciennes et est généralement séparé par un banc d'argile de quelques mètres d'épaisseur, bien que dans certains endroits, il soit en contact direct avec elles. Cet aquifère est bien développé au niveau du moyen et bas Cheliff, tandis que dans le haut Cheliff, il n'est pas bien développé et est souvent conjoint avec l'aquifère du Miocène. Son épaisseur peut atteindre 200 m, et son substratum est formé de marnes bleues d'âge Plaisancien (Pliocène inférieur).
- ✓ **Aquifère de grès et sables miocène** : C'est un système aquifère multicouche constitué de plusieurs niveaux aquifères, principalement formés de grès, poudingues et sables jaunâtres du Gontas. Le substratum de ce niveau est formé par des argiles helvétiques. Un deuxième niveau aquifère est constitué de grès, de poudingues et/ou de calcaires à lithothamnium, observé surtout dans la partie sud du moyen Cheliff, avec un substratum de marnes cartenniennes d'âge Burdigalien (Miocène inférieur).
- ✓ **Aquifère des calcaires jurassiques** : C'est un système aquifère karstique à surface libre avec une épaisseur considérable pouvant atteindre jusqu'à 700 mètres. Il est caractérisé par une fissuration distinctive très importante, favorisant la libre circulation de l'eau souterraine. Toutefois, la densité de répartition mal connue de ces fissures pose

d'énormes problèmes pour l'implantation des forages. Ces calcaires affleurent surtout dans le massif de Zaccar, Djebel Doui et Djebel Temoulga.

- Dans la zone sud du bassin versant du Cheliff, la succession de terrains allant du Jurassique au Quaternaire, comprenant des formations géologiques à la fois perméables et imperméables, a permis d'identifier les principaux aquifères suivants :
- ✓ **Dolomies et grès du Callovo-Oxfordien et Kimméridgien-Tithonien** : Les dolomies karstiques du Kimméridgien-Tithonien, ainsi que les grès et calcaires du Callovo-Oxfordien, constituent l'un des meilleurs systèmes aquifères de la région sud et sud-ouest du bassin versant du haut Cheliff, particulièrement dans les régions de Frenda, Faidja, Ain Dehab et Aflou.
- ✓ **L'aquifère des grès, calcaires et dolomies du Barrémo-Albo-Aptien du Crétacé inférieur, ainsi que des calcaires dolomitiques du Turonien et du Cénomanién du Crétacé supérieur**, est observé dans les régions de Ain Oussera, au nord du Djebel Amour et sur le plateau du Sersou. Cet aquifère est particulièrement important dans la région du Haut-Plateau, constituant un grand réservoir d'eau souterraine. Le Barrémien est principalement composé de grès à granulométrie variable, l'Aptien de grès à ciment calcaire, et l'Albien de grès friables, de sables et de quelques passages d'argiles marneuses. Le Cénomanién est constitué d'alternances de calcaire, marne et argile, tandis que le Turonien est formé de calcaires dolomitiques, bien que cet aquifère n'ait pas une grande importance.
- ✓ **Aquifère de l'Éocène** : Cet aquifère, observé dans les régions de Ain Oussara et Birine, est principalement composé de calcaires à silex et a une importance moyenne.
- ✓ **Aquifère Mio-Plio-Quaternaire** : Les formations du Mio-Plio-Quaternaire reposent sur le Sénonien, dont les niveaux marneux assurent la rétention des eaux. Cet aquifère est principalement constitué de grès et d'argiles sableuses, de conglomérats et de poudingues. Il est développé sur l'ensemble des hauts plateaux, tels que le plateau de Sersou, la plaine de Ain Oussara et la plaine de Nahr Ouassel.

L'alimentation de ces aquifères est assurée par infiltration des : Précipitations efficaces, les eaux de ruissellement au niveau des cours d'eau dans les lits et/ou berges favorisent l'infiltration et par les eaux d'irrigation excédentaires.

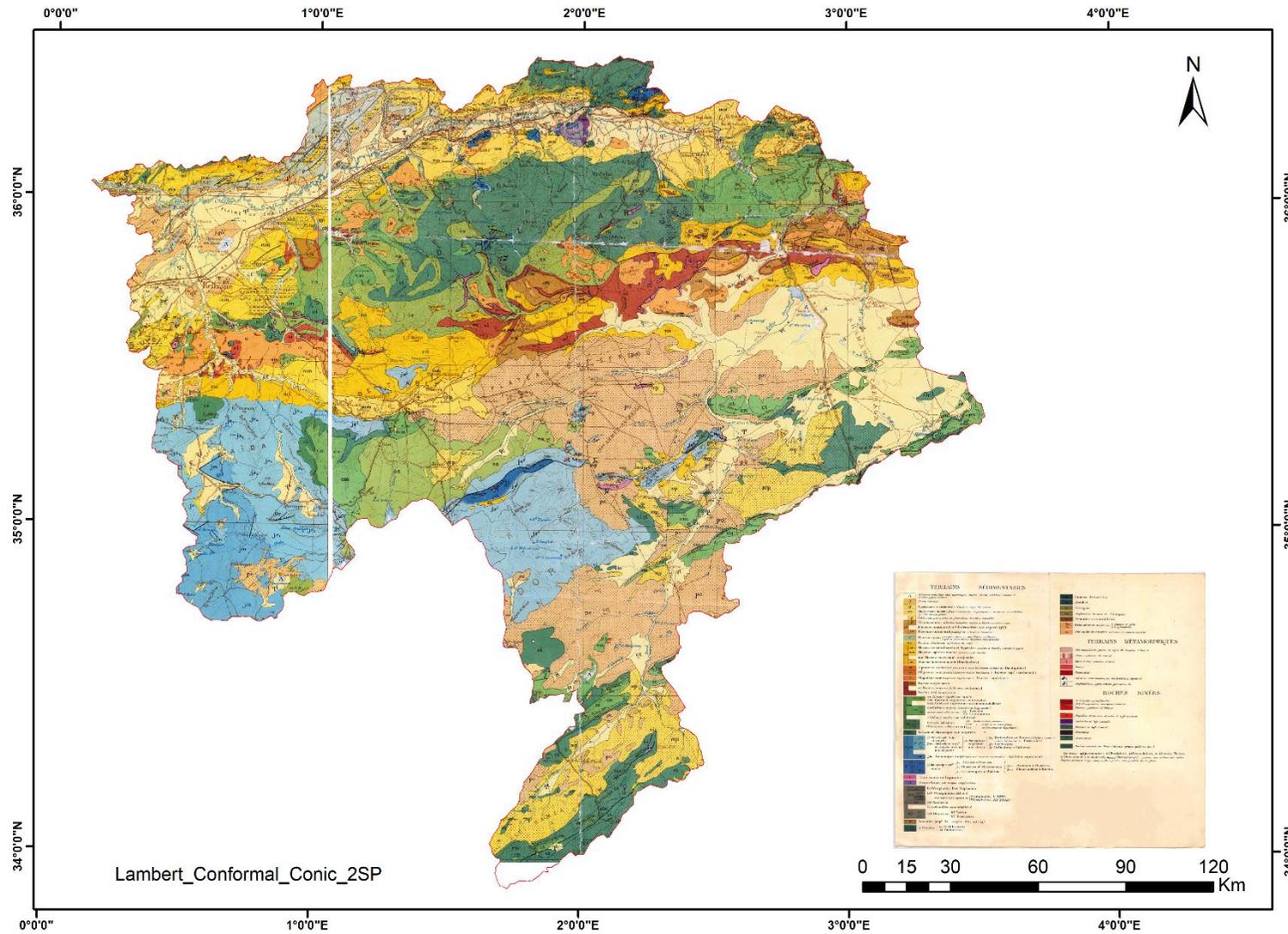


Figure II. 19 | Carte géologique du Chélif (ANRH)

II.7 Le modèle SWAT

SWAT est un modèle continu dans le temps, fonctionnant à l'échelle d'un bassin versant et pour un pas de temps d'une journée. Il a été développé par le département de l'agriculture des Etats-Unis (USDA) (Arnold et al., 1998) dans le but de déterminer l'impact des techniques de gestion sur le bilan en eau, sédiments, pesticides, nutriments d'un bassin versant pour différents types de sols et utilisations des terres.

Ce modèle se base sur les processus physiques en jeu dans le bassin versant. Sa grande robustesse et son efficacité en font un modèle largement utilisé dans le domaine de la modélisation de bassins versants, notamment par différentes agences fédérales américaines ou de la Commission Européenne (Gassman et al., 2007). Le modèle **SWAT** est utilisé dans la modélisation hydrologique et l'évaluation du rendement des sédiments (Sambou et al., 2021; Taleb et al., 2021), la caractérisation des régimes d'écoulement (Girolamo et al., 2022; Kim et al., 2012), le transfert des nutriments (Jaimes-Correa et al., 2022), l'évaluation des techniques de conservation et des pratiques de gestion agricoles (Yuan & Koropecj-Cox, 2022; Zettam et al., 2021) et le transport des sédiments (Acharyya et al., 2022; Dutta et al., 2017) sans oublier les effets des changements climatiques et les effets des changements de l'occupation des sols (Li et al., 2020; Peng et al., 2021), l'évaluation de la sécheresse et les événements extrêmes (Gautam et al., 2021; Sehgal & Sridhar, 2018).

Les composantes de base du modèle sont :

- 1) La composante hydrologique : établissement du bilan hydrique conceptuel et le bilan hydrologique sur le bassin versant ;
- 2) La composante météorologique (SWAT peut également être utilisé afin de déterminer l'impact des changements climatiques passés sur le bilan hydrologique ainsi que pour des projections)
- 3) Les propriétés du sol
- 4) Le cycle végétatif de la plante
- 5) Le cycle des nutriments, des pesticides et des germes pathogènes
- 6) La gestion des terres.

Les composantes ci-dessus sont décrites ensuite, Les composantes ci-dessus sont décrites ensuite, et nous utilisons différentes données pour modéliser le bilan hydrologique du bassin versant.

L'organigramme de la méthodologie SWAT est présenté dans la Figure II. 20.

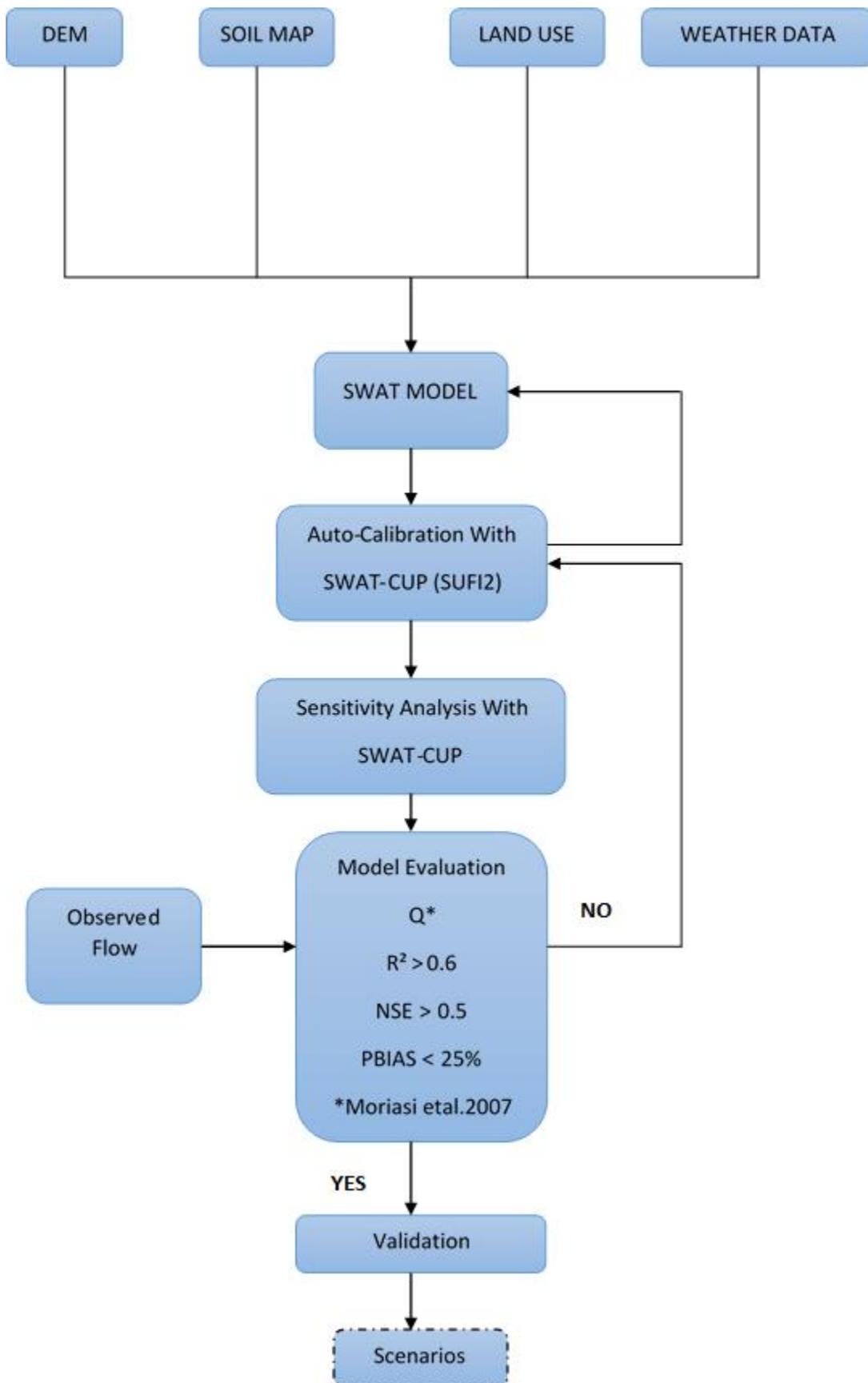


Figure II. 20 | Organigramme De La Méthodologie SWAT

Dans le modèle **SWAT**, le bassin versant considéré est divisé en différents niveaux d'organisation comme représenté dans la (Figure II. 21).

Les limites du bassin versant sont déterminées par la topographie du terrain. Celui-ci est divisé en différents sous-bassins (SB_1, \dots, SB_n) également délimités par la topographie. Ces sous-bassins sont reliés dans l'espace de sorte que la vache d'un sous-bassin se rende entièrement dans le sous-bassin suivant. Chaque sous-bassin contient une branche du système d'eau qui sera connectée par le SWAT pour former le réseau à l'échelle du bassin versant. Les sous-bassins sont ensuite divisés en unités de réponse hydrologique (HRU).

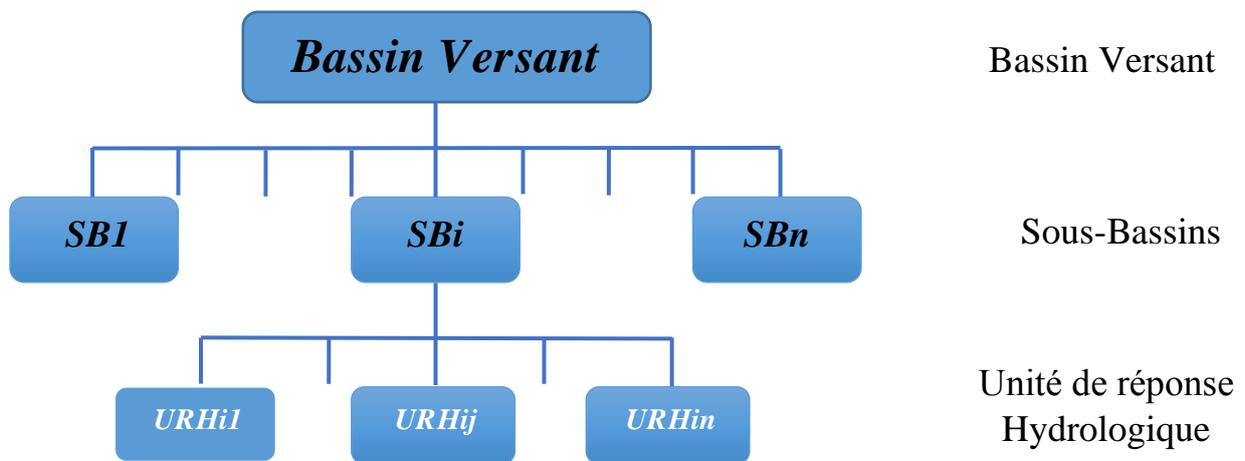


Figure II. 21 | Organisation du modèle

Les HRUs sont des unités homogènes en termes d'utilisation des terres, de technique de gestion et de caractéristiques du sol. Si les sous-bassins sont connectés les uns aux autres, il n'y a pas d'interaction entre les HRUs. Les sorties du modèle sont calculées séparément pour chaque unité et additionnées dans chaque sous-bassin. Une fois que les valeurs ont été déterminées au niveau du sous-bassin, le SWAT détermine les relations spatiales entre les sous-bassins et incorpore les données calculées dans le système hydrique global. Le modèle permet également à l'utilisateur d'ajouter des sources ponctuelles ainsi que des réservoirs, naturels (lacs et dépressions) ou non, qui constitueront des zones d'accumulation d'eau (Neitsch et al., 2005).

Le modèle SWAT a fait l'objet de plusieurs recherches à travers le monde en matière d'hydrologie et de gestion des ressources en eau et du changement climatique (Abbas & Xuan, 2019; L. Liu & Xu, 2017; L. Zhang et al., 2019), d'évaluation des sédiments (Aga et al., 2020; Mahoney et al., 2018) et de mouvement des nutriments et de croissance des cultures (Masud et al., 2018; Zang & Mao, 2019).

Le modèle **SWAT** a été exécuté en amont de cinq barrages situés dans le bassin du Cheliff avec une fréquence mensuelle et pour différentes périodes en fonction de la disponibilité des valeurs de débits observées. Ils permettent de les comparer avec les valeurs simulées en validant le modèle sur notre région d'étude (Figure II. 1)

II.7.1 Etablissement du bilan hydrique conceptuel

Le bilan hydrique conceptuel est représenté par l'équation suivante (Pastori et al., 2017) :

$$P = ET + SR + LF + BF + BF_{DA} + DA_{RCHRG} + TLOSS \quad (1)$$

Avec :

P: Précipitation totale (mm)

ET: Evapotranspiration (mm)

SR: Ecoulement de surface (mm)

LF: Ecoulement latéral (mm)

BF: Flux de l'aquifère peu profond (mm)

BF_{DA}: Flux de l'aquifère profond (mm)

DA_{RCHRG}: Recharge de l'aquifère profond (mm)

TLOSS: Pertes de transmission en rivière (mm)

La schématisation représentation schématique du bilan hydrique conceptuel est montré dans la Figure II. 21.

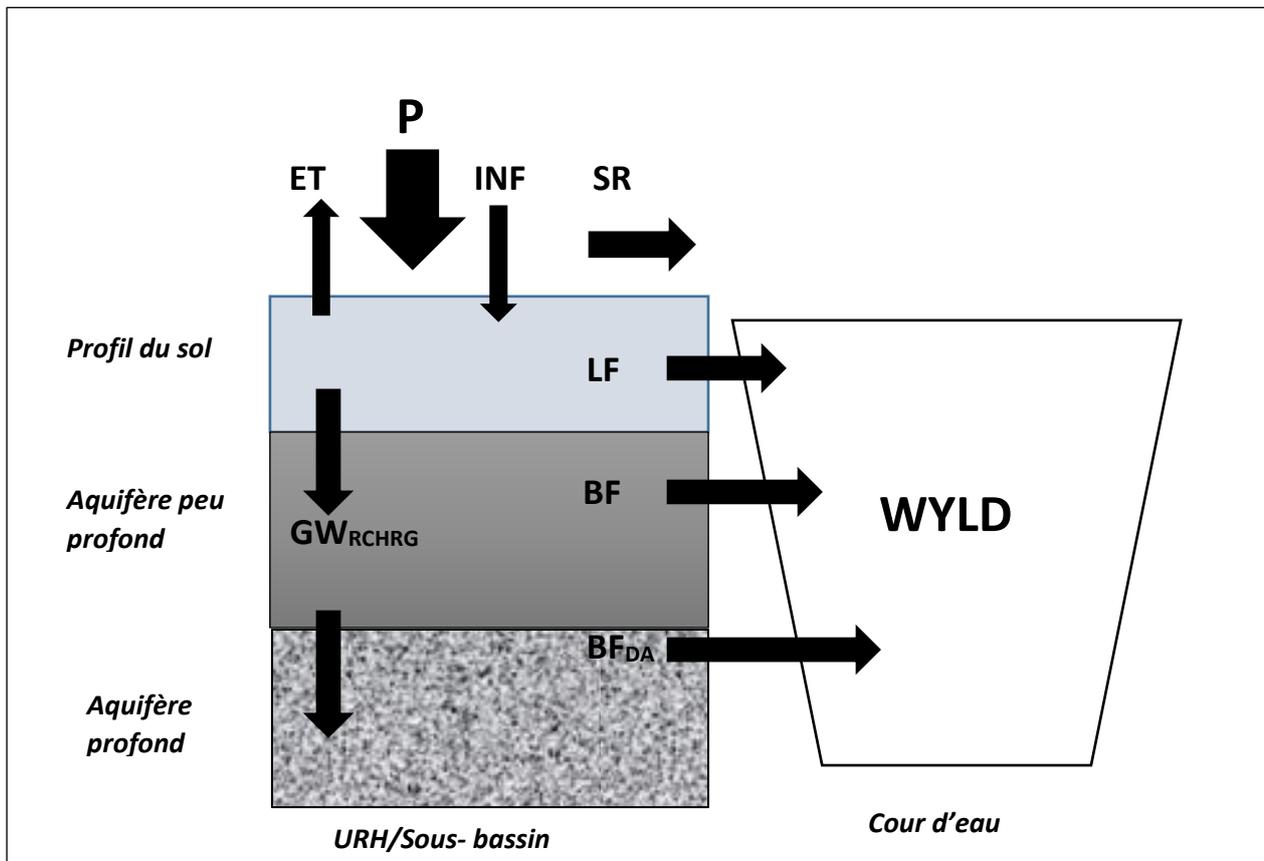


Figure II. 22 | Schématisation du bilan hydrique conceptuel Adapté Pastori et al 2017

II.7.2 Etablissement du bilan hydrologique

Une fois que le bassin versant est organisé spatialement, le bilan hydrologique peut être calculé. Le cycle hydrologique est alors divisé en deux phases (Biesbrouck et al., 2002)

- 1) Une phase dite terrestre dans laquelle les quantités d'eau, de sédiments et de pesticides qui seront apportées au réseau au niveau de chaque de chaque sous-bassin est déterminée. Dans cette phase terrestre phase terrestre, les différents termes nécessaires à l'établissement du bilan hydrologique seront calculés. Ses différentes composantes sont exprimées comme suit :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (2)$$

Avec :

SW_t : Le contenu final en eau du sol (à la fin du jour i) (mm)

SW_0 : Le contenu initial en eau du sol (au début du jour i) (mm)

R_{day} : Les précipitations au jour i (mm)

Q_{surf} : Le ruissellement de surface au jour i (mm)

E_a : L'évapotranspiration au jour i (mm)

W_{seep} : Un flux latéral représentant la quantité d'eau entrant dans la zone vadose (mm)

Q_{gw} : Le flux de retour issu de la zone saturée en eau au jour i (mm).

Ce bilan hydrologique est effectué sur l'épaisseur entière du bassin (y compris la nappe phréatique) (Figure II. 23) au niveau de chaque unité de réponse hydrologique puisqu'une partie des paramètres dépend de l'occupation ou du type de sol. Leurs contributions au bilan du sous bassin sont ensuite sommées.

Pour calculer ces composantes de ce bilan, plusieurs entrées sont nécessaires. Les processus clés sont les suivants :

- L'écoulement de surface estimé par la méthode SCS-Curve Number
- L'écoulement hypodermique correspondant au flux latéral et à l'infiltration
- L'écoulement souterrain
- L'évapotranspiration

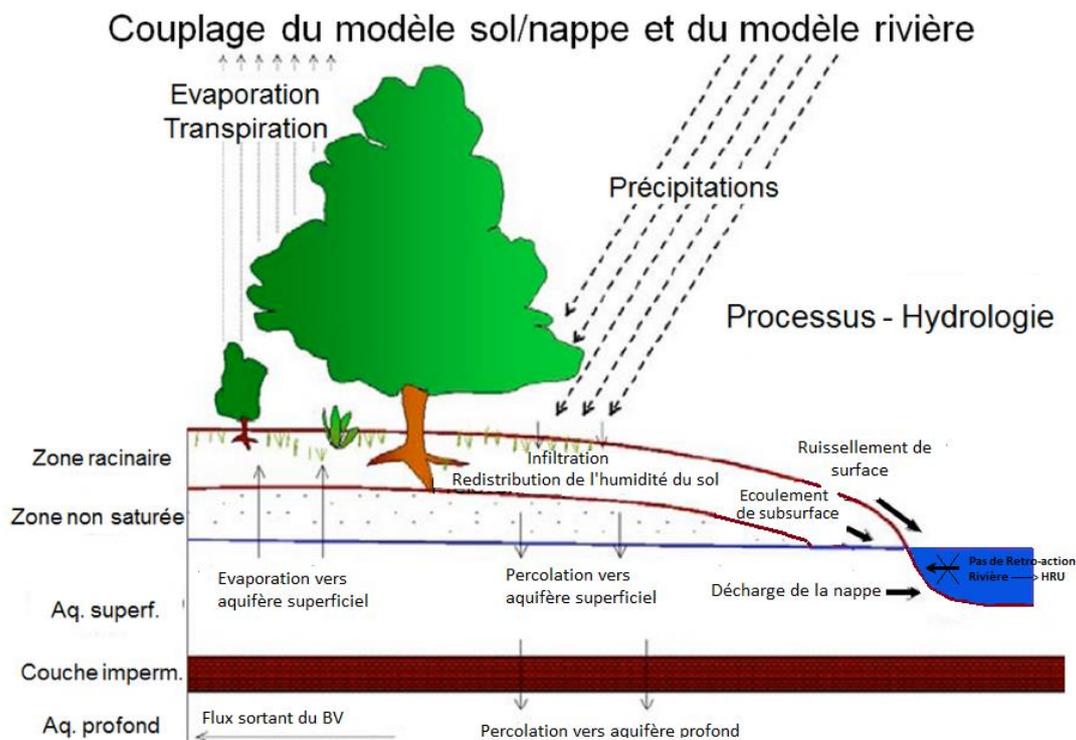


Figure II. 23 | Représentation schématique du cycle hydrologique de la phase sol : Adapté (Neitsch et al., 2011)

2) Une phase dite de " routage " dans laquelle le déplacement de l'eau et des différents éléments sera modélisé à travers le réseau hydrographique jusqu'à l'exutoire. Lors de la phase de routage, on détermine le transport par le réseau hydrographique des différents éléments présents. Ce processus est illustré à l'instant et prend en compte (Neitsch et al., 2011)(Figure II. 24) :

- a) Le transport des particules par advection et diffusion
- b) La sédimentation
- c) La dégradation et la transformation dans différents cycles (carbone, azote, phosphore)
- d) La dégradation biologique (par des bactéries etc.) et
- e) Leur volatilisation dans l'atmosphère

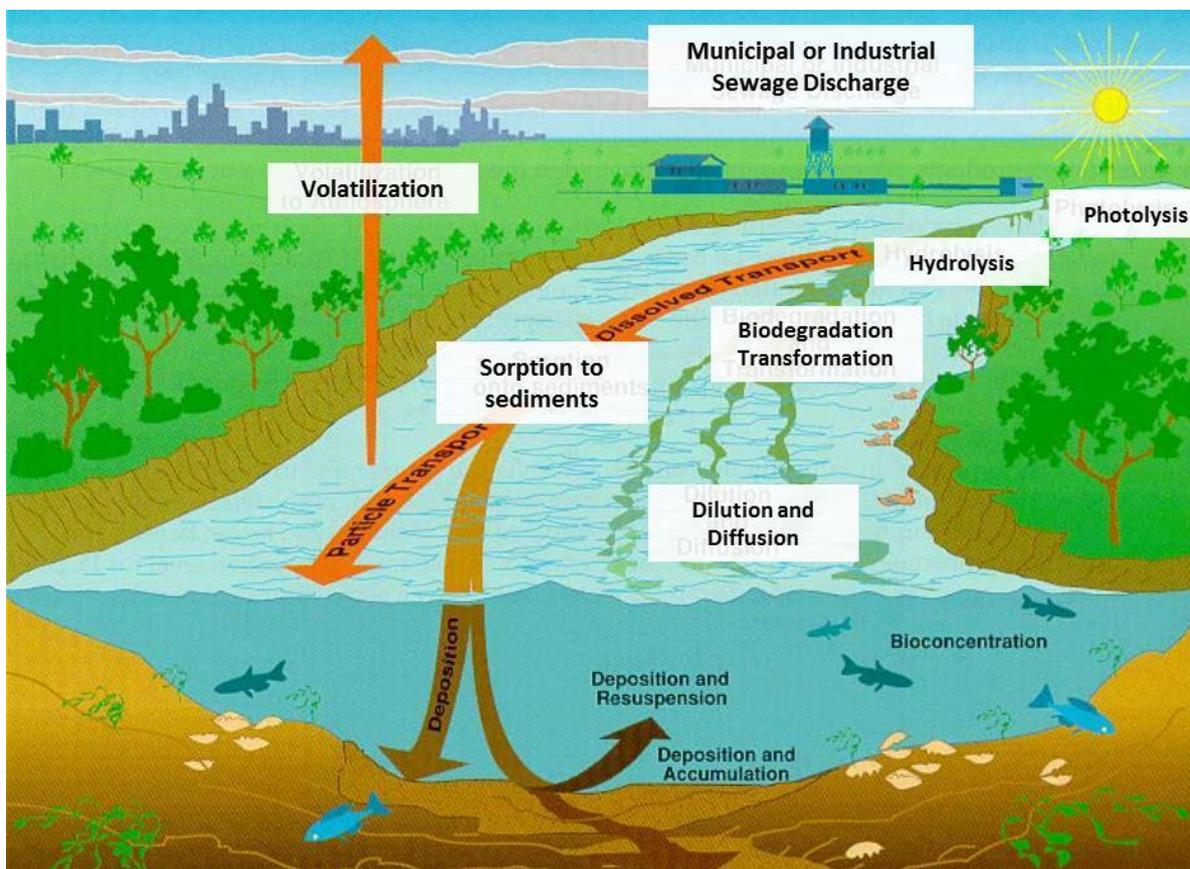


Figure II. 24 | Représentation de la phase routage : Adapté (Neitsch et al., 2011)

II.7.3 Caractéristiques du modèle SWAT

SWAT est un modèle conceptuel distribué basé sur la physique qui peut simuler des bassins versants avec des pas de temps quotidiens allant jusqu'à des milliers de kilomètres. Ce modèle agro hydrologique intègre la partie hydrologique du modèle SCSCN « Soil

Conservation Service Curve Number » (Neitsh et al., 2002). SWAT a également été validé dans de nombreux bassins versants à travers le monde entier pour analyser les problèmes de pollution, d'érosion ou de développement (Chaponnière, 2005; Z. Zhang et al., 2023).

Le modèle **SWAT** est téléchargeable gratuitement sur la plateforme <https://swat.tamu.edu> et fonctionne dans un environnement ArcGIS sous l'appellation Arcswat version 2012. Ce couplage a un double avantage. En effet, l'utilisation du SIG facilite à la fois le prétraitement des données pour leur incorporation dans les modèles et la visualisation des résultats de simulation.

La structure hydrologique du modèle **SWAT** reproduit le cycle de l'eau de manière simplifiée. La modélisation hydrologique s'effectue en deux étapes. La première hydrologique en simulant le ruissellement et l'exportation de sédiments et de nutriments vers le chenal. La seconde étape de transport dans un cours d'eau qui définit le passage de ces éléments du réseau hydrographique du bassin versant jusqu'à l'exutoire. De plus, **SWAT** peut simuler des phénomènes hydrologiques dans les lacs, les réservoirs et les zones humides (Jalowska & Yuan, 2018).

Les processus simulés dans le sol sont l'infiltration, l'absorption par les plantes, l'écoulement latéral et l'écoulement vers les horizons profonds (Levesque, 2003).

Pour l'érosion hydrique, **SWAT** utilise l'équation universelle de perte de sol modifiée MUSLE « *Modified Universal Soil Loss Equation* ».

Les unités de réponses hydrologiques HRU permettent au modèle **SWAT** de tenir en compte l'hétérogénéité du milieu. Ces dernières constituent l'unité de base des calculs exécutés par modèle. Cette division spatiale en sous unités est le résultat de l'intersection d'un MNT avec les limites du bassin versant, le type de sols et l'utilisation des terres (Figure II .25)

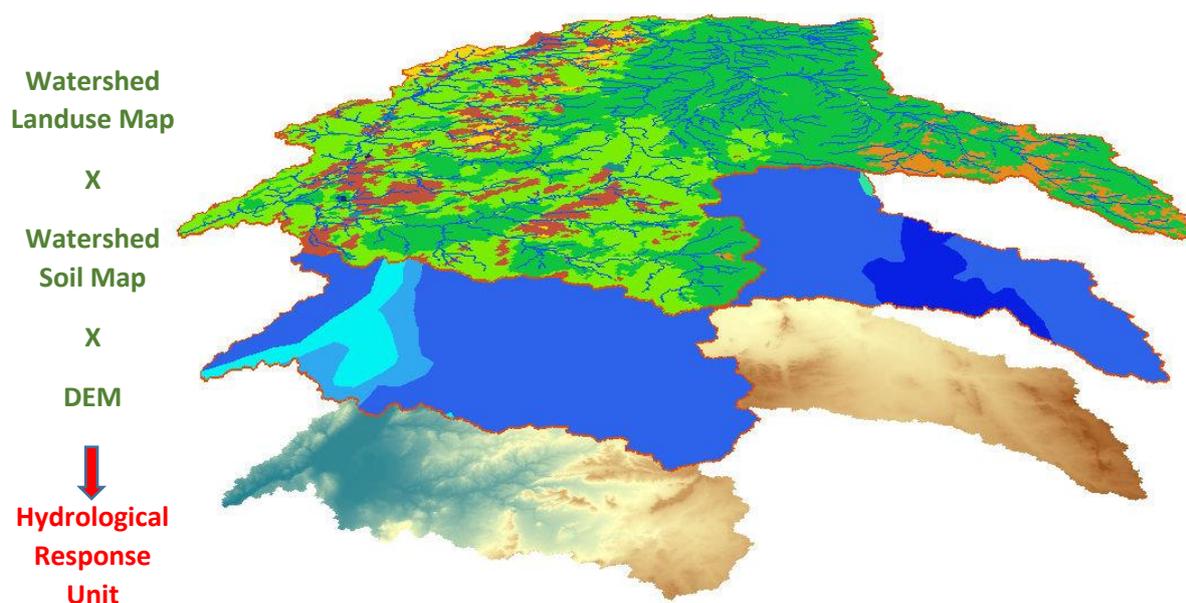


Figure II .25 | structure d'une unité de réponse hydrologique

Par Conséquent, chaque unité aura son propre comportement hydrologique. Pour chaque URH, les débits sont estimés quotidiennement, ils sont ensuite sommés par sous bassins pour donner la valeur totale à l'exutoire des différents bassins.

La mise en œuvre du modèle SWAT nécessite un nombre important de fichiers pour caractériser le bassin à étudier. On doit d'abord saisir la topographie sous forme d'un Modèle numérique du terrain (MNT), la carte pédologique et la carte d'occupation de sol de la zone d'étude. De même, il faut intégrer les données météorologiques quotidiennes.

II.7.4 Etapes de mise en œuvre du modèle

La mise en exécution du modèle SWAT se déroule en six étapes différentes (Kiniry et al., 2000)

- La délimitation du bassin versant qui consiste à corriger le MNT et l'extraction du réseau hydrographique. Dans cette phase, on peut rajouter les positions des barrages comme points de sorties.
- La création des HRU en combinant le bassin versant délimité dans la première étape avec la carte pédologique et la carte d'occupation de sols
- L'intégration des données météorologiques (Précipitations moyennes journalières, Températures maximales et minimales journalières, Humidité relative moyenne journalière, radiation solaire moyenne journalière, Vitesse moyenne journalière du vent et coordonnées des stations climatiques)

- La création des bases de données d'entrée qui renferment les différents paramètres et variables nécessaires pour la simulation (Sources, rejets, caractéristiques et lâchées des barrages, paramètres de calibration). Dans cette étape, on peut choisir la méthode de calcul de l'évapotranspiration potentielle ETP, la méthode de calcul des longueurs de courbes CN (*Curve Numbers*), le routage des oueds et la dégradation des rives)
- L'exécution de la simulation se fait en choisissant le pas de temps (journalier, mensuel ou annuel) des résultats de sortie ainsi que la période de chauffe et d'autres options liées aux fichiers de sortie
- L'étape de l'étalonnage du modèle vise à valider les simulations, notamment en ajustant certains paramètres de calcul pour obtenir une meilleure corrélation entre les données observées et les données simulées du modèle. Les paramètres nécessitant un réajustement comprennent les pratiques agricoles, le ruissellement, les étiages, la géométrie des cours d'eau et l'impact des niveaux des eaux souterraines.
- L'analyse des résultats de la simulation à l'aide de cartes et de graphiques. Ces résultats sont liés aux débits et flux de différents paramètres physico-chimiques. Ceux-ci sont disponibles à l'échelle du bassin en quantités spécifiques (kg/ha/temps) et pour chaque segment du cours d'eau en débit transporté par le lit du fleuve (kg/temps).

II.8 Données d'entrée du modèle

II.8.1 Données nécessaires pour la simulation hydrologique

Les données d'entrée de base requises pour une simulation SWAT comprennent une topographie matérialisée par un modèle numérique d'élévation (MNT) de résolution (100 m) issu du SRTM « *Shuttle Radar Topography Mission* » corrigé par (Rezak et al., 2012), une carte des sols « *FAO World Soil Map* », l'occupation des sols des terres à partir d'une couverture terrestre globale et des données météorologiques et hydrométriques de l'ANRH ainsi que les lâchers de barrages enregistrées par l'Agence Nationale des Barrages et des Transferts (ANBT).; l'outil ArcSWAT (USDA) a été utilisé pour appliquer le modèle SWAT dans un environnement ArcGIS. (Figure II. 26).

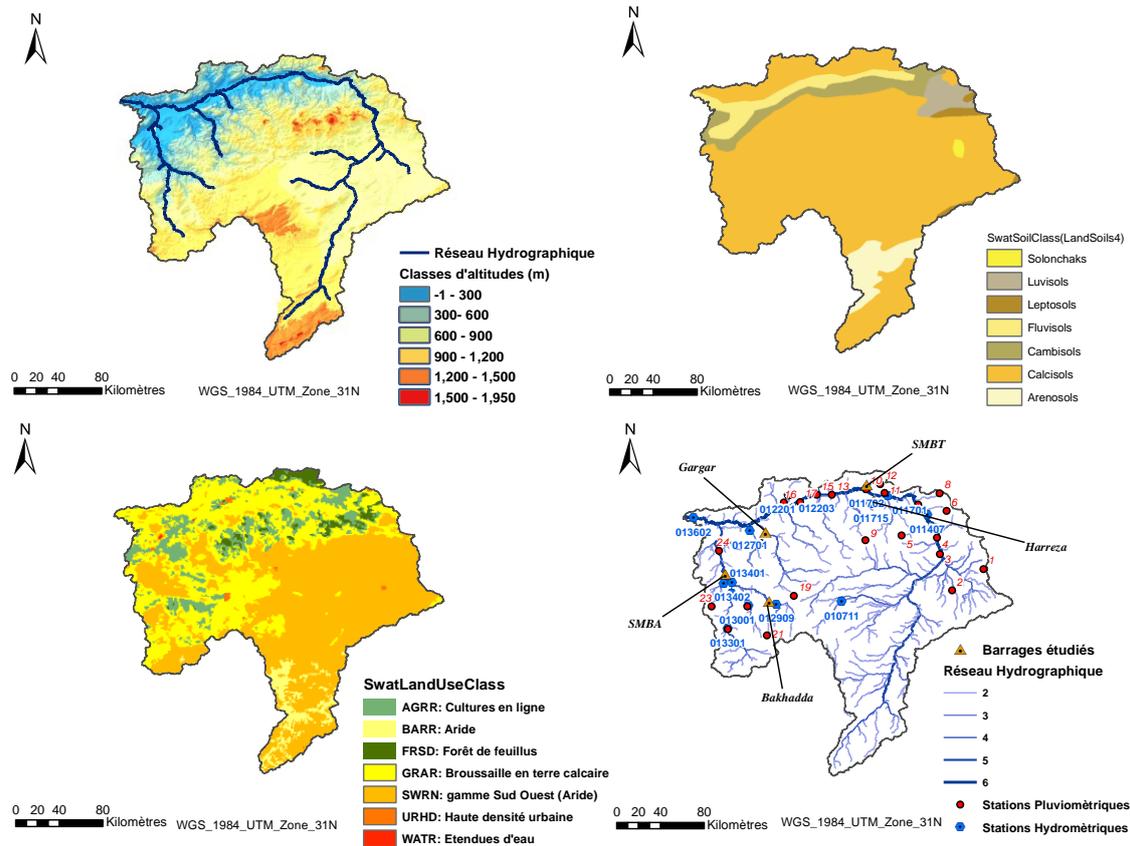


Figure II. 26 | (a)Modèle numérique du terrain (100m); (b)Carte pédologique de la FAO ; (c)carte d'occupation des sols ; (d)Cordonnées des stations climatiques et hydrométriques

II.8.1.1 Données pluviométriques

Après l'application de l'analyse en composantes principales sur 25 stations pluviométriques (Figure A 1,Annexe A), nous avons sélectionné 17 stations les mieux corrélées entre elles. Ensuite nous avons effectué des régressions linéaires entre plusieurs couples de stations voisines pour objectif de combler et de corriger des valeurs journalières. Cette étape était jugée indispensable afin de fournir à notre modèle des séries de données quotidiennes continues dans le temps.

Les stations pluviométriques sélectionnées comme entrées pour le modèle SWAT sont présentées dans le Tableau II. 5

Tableau II. 5 | caractéristiques des stations pluviométriques du grand bassin du Chélif

Id	Code Station ANRH	Nom	Latitude (Degré)	Longitude (Degré)	Altitude (m)	Période
1	011106	Birine Centre	35.63	3.22	547.3	1980-2013
2	011205	Ain Oussera	35.45	2.90	690	1913-2007
3	011208	Boughzoul	35.75	2.78	643	1948-2011
4	011301	Ksar El Boukhari	35.89	2.75	580	1933-2014
5	011302	Derrag	35.90	2.39	1150	1967-2008
6	011404	Zoubiria-Mongorno	36.111	2.844	932	1968-2008
7	011405	Ghrib Barrage	36.161	2.556	460	1966-2008
8	011509	Médéa Secteur	36.258	2.774	935	1976-2013
9	011605	Theniet El Had	35.861	2.022	1150	1966-2009
10	011702	Arib Chélif	36.287	2.024	230	1973-2009
11	011717	El Khemis DEMRH	36.256	2.210	300	1972-2009
12	011803	Sidi Mjahed	36.329	2.165	850	1968-2009
13	012001	El Abadia	36.237	1.672	162	1972-2009
14	012203	Ponteba Deffluent	36.237	1.517	140	1966-1999
15	012704	Ouled Ayche	35.823	0.963	281	1967-2006
16	012908	Tiaret GRHA	35.391	1.304	1100	1968-2004
17	013002	Frenda	35.055	1.038	990	1931-2004

L'analyse des données a décelé un manque de données sur la période totale de simulation (1980-2014). Cette période a été choisie en fonction de la période de disponibilité des données satellitaires.

Les caractéristiques statistiques des stations pluviométriques sont récapitulées dans le Tableau II. 6

Tableau II. 6 | Caractéristiques statistiques des stations pluviométriques

Code Station ANRH	Nombre d'observations	Médiane [mm]	Moyenne [mm]	Variance [mm]	Ecart type [mm]	Coefficient de variation
011106	491	2.6	4.25	19.08	4.37	1.03
011205	1117	3.66	5.74	37.45	6.12	1.07
011208	1285	3.50	5.65	36.87	6.07	1.07
011301	1430	3.83	6.14	45.46	6.74	1.09
011302	2291	4.54	7.48	69.83	8.36	1.12
011404	2512	4.00	6.77	62.48	7.90	1.17
011405	2067	4.60	7.35	67.25	8.20	1.12
011509	2289	5.70	9.18	117.84	10.86	1.18
011605	2363	4.60	7.66	81.61	9.03	1.18
011702	1945	4.6	7.43	63.87	7.99	1.07
011717	1944	4.2	6.91	56.71	7.53	1.09
011803	2189	5.40	8.99	104.04	10.20	1.13
012001	1562	4.70	7.28	55.06	7.42	1.02
012203	1767	4.60	7.17	54.34	7.37	1.03
012704	1354	3.4	5.07	32.48	5.70	1.12
012908	2234	5.00	7.66	71.00	8.43	1.10
013002	1976	4.10	6.57	49.22	7.02	1.07

Les pourcentages des années lacunaires de la période de simulation (1980-2014) sont représentés par l’histogramme suivant : (Figure II. 27)

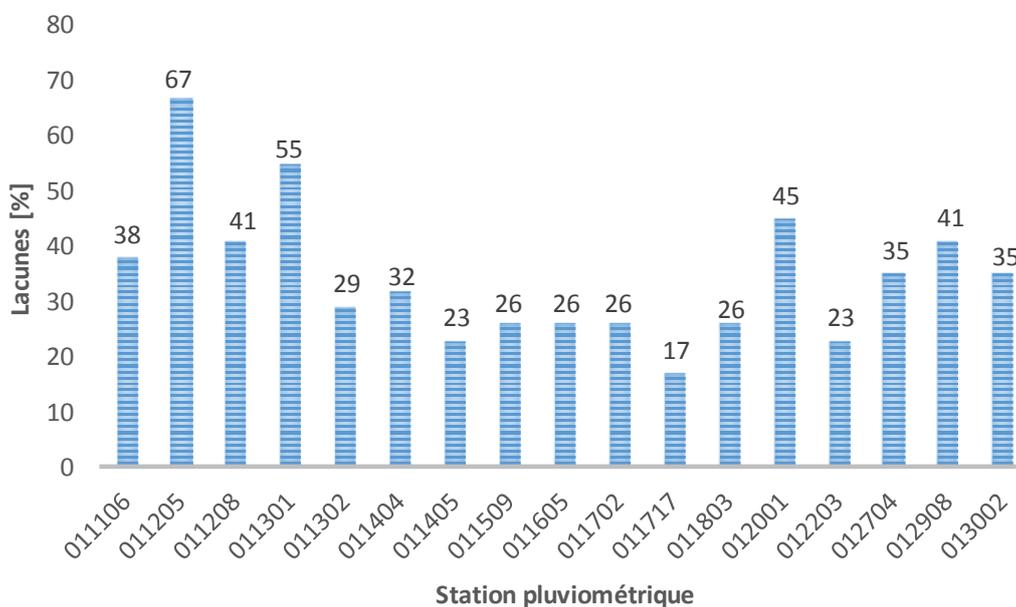


Figure II. 27 | Histogramme montrant le pourcentage des années lacunaires

Le reste des données météorologiques indispensables pour faire tourner le modèle couvrant (i) : températures minimales et maximales journalières, (ii) vitesse moyenne journalière du vent, (iii) : rayonnement solaire journalier : (iv) : humidité relative moyenne journalière

Ces données climatiques ont été générées à partir du site :<https://swat.tamu.edu/data/cfsr>. Ce sont des données satellitaires globales CFSR « *Climate Forecast System Reanalysis* » développées par le NCEP « *The National Centers for Environmental Prediction* ». L'applicabilité de ces données dans la modélisation hydrologique par le modèle **SWAT** a été justifiée par plusieurs études dans différents bassins à travers le monde (Dile & Srinivasan, 2014; Fuka et al., 2013) avec une résolution de (~38 km) et une période d'application (1979-2014).Le recours à ces données est incontournable vu le manque des données observées suffisantes pour notre étude.

II.8.1.2 Données hydrométriques disponibles

Les stations hydrométriques disponibles pour notre site d'étude appartiennent au réseau de surveillance de l'agence Nationale des ressources hydriques (ANRH). Les débits observés seront utilisés dans la phase calibration et validation du modèle Leurs caractéristiques sont récapitulées dans le tableau ci-dessous : (Tableau II. 7)

Tableau II. 7 | Caractéristiques des Stations Hydrométriques du Chélif

Nom de la Station	Code ANRH	Oued	Barrage/Exutoire	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Altitude (m)	Superficie (Km ²)
Arib Ebda	011801	Ebda	SMBT	36.302	1.995	584	266
El Ababsa	011715	Harreza	Harreza	36.164	2.074	320	125.3
Ammi moussa	012601	R'hiou	Gargar	35.928	0.999	477	2324
Sidi Ali Ben Amar	012909	Mina	Bakhadda	35.32	1.13	620	1278
Oued el Abtal	013402	Mina	SMBA	35.492	0.68	195	5450
Sidi Aek Djilali	013401	Haddad	Affluent SMBA	35.480	0.593	236	459.6
Sidi Belattar	013602	Chlef	Chlef	36.161	2.556	12	43750

II.8.2 Données nécessaires pour les prédictions des débits

Le modèle régional choisi pour notre étude est le RCA4 (Strandberg et al., 2014) dans le cadre du programme CORDEX « *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* » de l'institut suédois de la météorologie et de l'hydrologie (SMHI). CORDEX est un projet coordonné par plusieurs instituts et centres de recherche à l'échelle mondiale dans l'objectif de produire des données climatiques historiques et futures à une échelle régionale dans 14 domaines avec différentes résolutions <https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/>. Le domaine choisi est celui de l'Euro-CORDEX : <https://www.euro-cordex.net/> du « Cordex-Adjust » avec une résolution de $0.11^{\circ} \times 0.11^{\circ} \sim 12,5$ km codée EUR-11. Les données téléchargées sont corrigées avec différentes méthodes statistiques adaptées que ce soit pour les précipitations ou pour les températures.

La première version du modèle RCA « *Rosby Centre regional Atmospheric climate model* » (Rummukainen et al., 1998). Le modèle RCA est basé sur un codage parallèle du modèle opérationnel de prévision météorologique HIRLAM (Undén et al., 2002). Les anciennes versions du modèle RCA sont traitées par plusieurs auteurs dont (Jones et al., 2011; Samuelsson et al., 2009) avec les changements apportés sur chaque nouvelle version. Le modèle RCA4 a été largement utilisé et évalué dans différentes régions et sous le pilotage de plusieurs MCG (Collazo et al., 2018; Gnitou et al., 2019). La liste des MCG définissant les conditions aux limites du modèle régional choisi RCA4 sont représentés dans le Tableau II. 8

Tableau II. 8 | Liste des MCG définissant les conditions aux limites du modèle régional RCA4

Institute	Model (RCM)	Driving Model(AOGCM)	Modeling Center (or Group)	Short Name
SMHI	RCA4	ICHEC-EC-EARTH	EC-EARTH consortium (30 research institutes from 12 European countries)	EC-EARTH
		IPSL-IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL-CM5A-MR
		MOHC-HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre UK (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- Brazil)	HadGEM2-ES

Les méthodes des corrections des biais sont répertoriées dans le Tableau II. 9 :

Tableau II. 9 | Méthodes de correction des biais utilisées pour le modèle RCA4

MCG	MCR	Institut	Méthode de correction du biais
IPSL-CM5A-MR	RCA4_V1	SMHI	DBS45-MESAN
EC-EARTH	RCA4_V1	SMHI	DBS45-MESAN
HadGEM2	RCA4_V1	SMHI	METNO-QMAP

Les données pluviométriques quotidiennes et les températures maximales et minimales journalières de 1971 à 2100 sont de format Netcdf ont été téléchargées à partir du site : <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/> et l'extraction de ces dernières a été effectué à l'aide d'un script en langage R afin de pouvoir les intégrer directement dans le modèle SWAT. La période de référence prise pour l'évaluation des tendances des débits est située chronologiquement entre 1974 et 1993 pour tous les barrages.

II.9 Calibration et validation du modèle

Le calibrage consiste à ajuster les paramètres d'entrée du modèle en les adaptant au contexte particulier du bassin versant. Il est réalisé manuellement ou semi-automatiquement avec les procédures d'incertitude de calibration de SWAT (SWAT-CUP) ou l'évolution complexe de Shuffle - Université d'Arizona (Abbaspour, 2015; Duan et al., 1992; G. Arnold et al., 2012; Mulungu & Munishi, 2007). La validation du modèle SWAT est effectuée en comparant les sorties des paramètres du modèle avec les données réelles enregistrées (débits et qualité de l'eau). et en identifiant ensuite les paramètres à modifier pour que la simulation soit plus proche des observations. Le modèle doit donc être exploité pour la première fois avec des valeurs par défaut des paramètres dont les valeurs sont inconnues ou ont une faible influence (Ndomba et al., 2008).

Dans notre étude, la calibration sera effectuée en amont de cinq barrages du bassin du Cheliff, en fonction de la disponibilité des Débits mesurés pour les différentes périodes d'observation. Certains paramètres ont révélé le besoin d'être affinés et ont donc été ajustés en analysant les informations connues sur le bassin.

II.10 Evaluation du modèle

La performance du modèle est évaluée à l'aide du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE), du coefficient de détermination (R^2) et du pourcentage de Biais (PBIAS). Ces trois coefficients sont les plus recommandés pour le modèle SWAT (N. Moriasi et al., 2007) :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2]^{0.5}} \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)(100)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (5)$$

Où O_i et S_i sont les valeurs observées et simulées, n le nombre total de valeurs couplées, et \bar{O} est la moyenne des valeurs observées et \bar{S} est la moyenne des valeurs simulées. L'évaluation de la performance des coefficients NSE sont classés dans le Tableau II. 10 :

Tableau II. 10 / Critères de performances de Nash

Valeur de NSE	Critère de Performance	Phase de modélisation	Référence
>0.65	Très Bon	Calibration et Validation	(Saleh et al., 2000)
0.54 to 0.65	Adéquat	Calibration et validation	(Saleh et al., 2000)
>0.50	Satisfaisant	Calibration et validation	(Santhi et al., 2001); adapted by (Bracmort et al., 2006)
<0.50	Non Satisfaisant	Calibration et validation	(N. Moriasi et al., 2007)

Les critères du pourcentage du biais PBIAS sont récapitulés dans le Tableau II. 11

Tableau II. 11 / Critères de performances du PBIAS

Valeurs PBIAS	Critères de Performance	Phase de modélisation	Reference
<10%	Très Bon	Calibration et validation	(Van Liew et al., 2007)
10% to 15%	Adéquat	Calibration et validation	
15% to 25%	Satisfaisant	Calibration et validation	
>25%	Non Satisfaisant	Calibration et validation	

Conclusion

Dans l'objectif de répondre aux attentes de cette thèse, nous avons daigné à collecter toutes les informations et données nécessaires du bassin versant étudié afin de pouvoir réaliser les simulations hydrologiques, les prédictions des débits et la modélisation du transport solide. Nous avons débuté avec une description physique de la zone d'étude avec les caractéristiques et particularités de tous les bassins concernés du point de vue hydro-climatologique et géologiques nécessaire par la suite pour les phases de calibrage et validation du modèle. Ensuite, nous avons passé à présenter toutes les données d'entrée pour le fonctionnement du modèle avec les projections futures nécessaires pour la phase de prédiction.

*Chapitre III :
Modélisation Hydrologique*

Introduction

La compréhension du comportement hydrologique d'un grand bassin versant commence par l'élaboration du bilan hydrologique nécessaire à la gestion intégrée des ressources en eau. L'évaluation du potentiel hydrique passe par l'estimation des écoulements à l'entrée des ouvrages de stockage et aux exutoires de bassins est primordiale pour une gestion optimale des eaux de barrages et projection de réalisation d'ouvrages hydrotechniques. La modélisation hydrologique constitue un moyen pour répondre à ces besoins. De nombreux chercheurs ont utilisé modèles pour prédire les débits en fonction de la pluviométrie et des paramètres intrinsèques du milieu physique du bassin (Gude et al., 2020).

Parmi ces différents modèles, « *Soil and Water Assessment Tool* » (SWAT) a été largement utilisé de par le monde pour manipuler et analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques, en vue de prédire les effets de la gestion des terres sur la ressource hydrique (C.-H. Yu & McCarl, 2018) aux USA; (Shrestha et al., 2017) au Canada; En bassin méditerranéen (Perra et al., 2018) ; En Afrique du Nord (Bouslihim et al., 2016), en Afrique de l'Est (Baker & Miller, 2013) et en Asie (Shivhare et al., 2018). Il permet, également, de simuler les transferts de nutriments, de sédiments et pesticides vers le réseau de drainage et vers les aquifères (Wang et al., 2019; Wu et al., 2017).

Ce modèle a donné des résultats cohérents en Amérique du Nord (Ayivi & Jha, 2018; Sohoulane, 2018), en Europe (Grusson et al., 2018), en Asie (Paul et al., 2019) et en Afrique (Zettam et al., 2017).

La réduction des précipitations a eu un impact direct sur le remplissage des barrages ainsi que sur la recharge naturelle des aquifères (M. Meddi & Eslamian, 2020).

Les eaux des barrages en Algérie, en général, et dans le bassin du Cheliff, en particulier, sont utilisées pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable de plus de 5 millions d'habitants. Ce bassin compte 17 barrages au total. Le remplissage des barrages devient donc très difficile dans les cas de sécheresses répétées où le taux de remplissage ne dépasse guère 30% depuis des années. Cette situation pose de sérieux problèmes de gestion. Pour une gestion optimale et rigoureuse de ces ressources très limitées, la prévision devient un moyen indispensable. Grâce à cette étude, nous avons pu développer un outil mathématique pour les gestionnaires des ressources en eau afin de leur permettre d'estimer le débit de cinq barrages dans ce bassin. Ce modèle permettra de prédire les débits. Dans notre cas, le modèle SWAT sera considéré. Ce modèle a l'avantage d'inclure dans sa structure toutes les caractéristiques climatiques, pédologiques et géomorphologiques pour pouvoir prendre en compte les spécificités de chaque

bassin alimentant un barrage. Selon (Ndomba et al., 2008) et (Raihan et al., 2019), le modèle SWAT est mieux adapté aux régions où les données sont rares par rapport à d'autres modèles largement utilisés. Il est développé pour prédire et simuler l'impact de différentes méthodes de gestion sur le ruissellement et le transport des sédiments dans les bassins versants (Loukika et al., 2020; Raihan et al., 2019).

III.1 Résultats et Discussions

Les tests de fiabilité utilisés montrent que les résultats des sorties du modèle pour le calibrage et la validation sont satisfaisants pour les stations hydrométriques installées en amont des barrages et celle installée à la sortie du Cheliff (Tableau III. 1). Pour la période de calibration, les valeurs des coefficients NSE et R^2 varient de 0,70 à 0,89 et entre 0,71 à 0,89, respectivement. La meilleure valeur de NSE est 0.89 pour l'exutoire de Sidi Belattar et la plus basse avec une valeur de 0,70 pour les barrages de Bakhadda et SMBT. Ces critères d'évaluation indiquent une très bonne fiabilité du modèle avec une valeur de NSE supérieure à 0.65 (Saleh et al., 2000). Pour la période de validation, les valeurs de NSE et R^2 varient entre 0.62 à 0.78 et entre 0.69 à 0.79 respectivement. Les valeurs les plus basses de NSE et R^2 sont enregistrées pour le barrage de Bakhadda et sont jugées satisfaisantes pour le modèle SWAT en étant supérieures à 0,5 (Santhi et al., 2001) ; adapté par (Bracmort et al., 2006). Au contraire, les meilleures valeurs de NSE et R^2 (0.78 et 0.79) sont pour l'exutoire de Sidi Belattar pour la période de validation. En résumé, les valeurs calculées de Nash et R^2 montrent qu'il y a un bon ajustement entre les débits observés et simulés pour les cinq barrages et que la performance du modèle SWAT est satisfaisante.

A la sortie du bassin du Cheliff à la station de Sidi Belattar, la sortie hydrologique du modèle fournit une lame d'eau égale à 5,1 mm/an avec une pluviométrie annuelle de 390,1 mm/an et une évapotranspiration de 1435,1 mm/an. Dans la simulation, les lâchées (quatre barrages) étaient situées en amont de l'exutoire. Les débits simulés et observés à la sortie du Cheliff sont satisfaisants en termes de valeurs de calibration et de validation NSE et R^2 . Les résultats obtenus à l'entrée des barrages montrent une des différences exprimées par les comportements hydrologiques de chaque bassin et ceci est dû aux caractéristiques telles que l'hydro-climatique, la morpho-métrie, la géologie et la végétation couverte. La présence de karsts dans la région de Bakhadda justifie l'existence de voies d'écoulement préférentielles qui augmentent la recharge des eaux souterraines (Hartmann et al., 2015) ; (Amin et al., 2017). Les capacités d'infiltration élevées qui en résultent limitent l'écoulement de surface et réduisent

l'évapotranspiration réelle en conditions humides (Malard et al., 2016). On obtient ainsi des coefficients de Nash de 0,7 et 0,62 pour les périodes de calibration et de validation, respectivement. Les mêmes résultats ont été obtenus dans un contexte local au niveau des bassins de la Tafna et de la Mekerra (Zettam et al., 2017) ; (Otmame et al., 2019) et au niveau régional avec le sous-bassin de l'Oued Merzouka au Maroc (Bouslihim et al., 2016).

Tableau III. 1 / Résultats de calibrage et de validation sur les barrages étudiés

Periode	Coefficients	Stations					
		SMBT	Harreza	Gargar	Bakhadda	SMBA	S.Belattar
Calibration	R ²	0.73	0.87	0.75	0.71	0.80	0.89
	NSE	0.70	0.76	0.72	0.70	0.80	0.89
	PBIAS (%)	28	-13	3	16	2	-1
Validation	R ²	0.71	0.74	0.69	0.67	0.70	0.79
	NSE	0.68	0.72	0.68	0.62	0.70	0.78
	PBIAS (%)	18	-15	12	6	-1.5	-21

L'analyse de sensibilité a été réalisée par SWAT-CUP développé pour le modèle **SWAT** en utilisant la procédure SUFI-2 (Abbaspour, 2015). Cette approche permet l'analyse de sensibilité, la calibration, la validation et l'analyse d'incertitude des modèles SWAT. Elle a été largement utilisée dans différents bassins versants dans le monde (Tegegne et al., 2019)(L. Zhang et al., 2019) Ces derniers ont montré que les paramètres les plus importants correspondent aux six premiers paramètres:(Moreira et al., 2018; van Griensven et al., 2006) en commençant par la longueur de la pente pour la Vache latérale de sub-surface (SLSOIL.hru), suivie par la réserve d'eau disponible dans la couche superficielle du sol (SOL_AWC.sol), le troisième paramètre étant le temps associé à la recharge des aquifères (GW-DELAY.gw), la conductivité hydraulique réelle au niveau du canal principal (CH_K2.rte), le nombre de courbes de condition II du SCS (CN2.mgt) et enfin, un facteur de compensation de l'évaporation du sol (ESCO.bsn). Cette sensibilité est classée selon des variables p-value et t-stat (Abbaspour, 2015). Une valeur t-stat absolue élevée et une p-value faible sont attribuées aux paramètres les plus sensibles (Tableau III. 2).

Tableau III. 2 | analyse de sensibilité et détermination des paramètres effectifs du modèle ; v : remplacement de la valeur d'un paramètre par une nouvelle valeur d'un nouveau paramètre ; r : valeur du paramètre multiplié par (1 + valeur donnée)

Paramètre	Rang	P-Value	T-stat
V__SLSOIL.hru	1	0.00005	4.30
R__SOL_AWC.soL	2	0.00996	2.64
V__GW_DELAY.gw	3	0.01983	-2.38
V__CH_K2.rte	4	0.04592	-2.03
R__CN2.mgt	5	0.09576	-1.69
V__ESCO.bsn	6	0.13958	1.49
V__SLSUBBSN.hru	7	0.16363	1.41
V__EPCO.bsn	8	0.29806	1.05
V__HRU_SLP.hru	9	0.33750	-0.97
V__CH_N2.rte	10	0.45604	0.75
V__GW_REVAP.gw	11	0.50647	0.67
V__CH_K1.sub	12	0.51879	0.65
V__DEEPST.gw	13	0.56052	-0.58
V__CH_N1.sub	14	0.61706	0.50
V__SURLAG.bsn	15	0.64285	0.47
V__RCHRG_DP.gw	16	0.64844	-0.46
V__EPCO.hru	17	0.68506	-0.41
V__ALPHA_BF.gw	18	0.76184	0.30
V__OV_N.hru	19	0.81236	-0.24

Le paramètre SLSOIL.hru décrit la longueur de la pente pour la Vache latérale de sub-surface d'une HRU. Ce dernier est le paramètre le plus sensible et dépend principalement de la pente. Par défaut, la valeur de SLSOIL est égale à celle de SLSUBBSN, qui exprime la longueur moyenne des pentes auxquelles la même valeur est attribuée pour toutes les HRU d'un sous-bassin (Neitsch et al., 2011). Le ruissellement de surface augmente avec l'augmentation de la pente du versant. Les algorithmes actuellement implémentés dans le SWAT permettent un impact indirect du ruissellement latéral sur le ruissellement de surface (Bieger et al., 2014). Le paramètre SLSOIL est de 50m pour les quatre sous-bassins à l'exception du bassin SMTB. Ce bassin appartient à la classe de pente 50% et cela réduit le paramètre SLSOIL.hru à une valeur d'étalonnage égale à 10 m ; les quatre autres bassins ont une pente faible à moyenne.

Le deuxième paramètre le plus sensible du modèle est le SOL_AWC.soil qui représente la capacité en eau disponible dans le sol, il varie donc le long du profil du sol avec une valeur de 0,3 et qui est dans la gamme de variation de ce paramètre [0-1]. Le long du profil du sol avec une valeur de 0.3 et qui est dans la gamme de variation de ce paramètre [0-1]. Cette remarque est valable pour la quasi-totalité du bassin du Chélif de nature calcique.

Le troisième paramètre GW-DELAY.gw exprime le décalage entre le moment où l'eau sort du profil du sol et entre dans l'aquifère peu profond (Neitsch et al., 2011). Il prend la valeur moyenne de 120 jours pour tous les bassins ainsi que pour l'exutoire du Cheliff et montre une exception pour le bassin de Bakhadda avec une durée de 31 jours ce qui signifie une recharge assez rapide de l'aquifère profond. Le quatrième paramètre est la conductivité hydraulique efficace (CHK2.rte) du lit principal de l'oued qui contrôle la perte d'eau ; c'est-à-dire la perte de transmission où le lit du cours d'eau est un mécanisme de contrôle de débit dans ce système. La valeur de CHK2.rte est égale à 10mm/h dans tous les sous-bassins sauf dans le bassin SMBT où sa valeur est de 05 mm/h, ce qui montre la présence d'argiles dans le lit principal de l'oued. Le dernier paramètre le plus sensible étant le nombre de courbes (CN2.mgt) exprimant le nombre de courbes de ruissellement de condition II calculées par « *USDA Soil Conservation Service* » (1986) avec une amplitude (56-98) de 40% (onglet paramètres). Cette dernière montre une hétérogénéité spatiale de l'utilisation des terres dans le bassin du Cheliff, ce qui corrobore avec une étude de cas d'un bassin en Tunisie (Chaabane & Abida, 2016) et selon plusieurs études avec différents modèles, CN2.mgt dépend principalement de l'utilisation des terres et a été identifié comme un facteur important dans la production de ruissellement de surface (Lin et al., 2014). Dans le bassin du Cheliff et à l'exutoire (station de Sidi Belattar), le modèle SWAT a correctement simulé les débits observés et a donné des coefficients très satisfaisants : un NSE égal à 0,89 et 0,78 et avec un R^2 égal à 0,89 et 0,79, respectivement, pour la calibration et la validation. Les paramètres de calibration ont montré une certaine homogénéité par rapport aux cinq bassins à l'exception de certaines caractéristiques telles que la présence des karsts dans le bassin de Bakhadda ou une pente assez forte au niveau du bassin de SMBT.

Les paramètres de calibration sont présentés dans le Tableau III. 3.

Tableau III. 3 | Paramètres de calibration

Parameter	Catchment	Definition	Units	Initial Range	Calibrated Range
CN2.mgt	- Gargar Dam	SCS runoff curve number for moisture condition II		[35- 98]	[72; 89]
	- SMBT Dam				[88; 98]
	- SMBA Dam				[60; 98]
	- Harreza Dam				[64; 86]
	- Bakhadda Dam				[56; 91.67]
	- Sidi Belatar(Outlet)				[64; 86]
ALPHA_BF.gw	- Gargar Dam	Base flow alpha factor characterizes the groundwater recession curve	(days)	[0-1]	0.99
	- SMBT Dam				0.95
	- SMBA Dam				0.95
	- Harreza Dam				0.95
	- Bakhadda Dam				0.9
	- Sidi Belatar(Outlet)				0.99
GW_DELAY.gw	- Gargar Dam	Groundwater delay: time required for water leaving the bottom of the root zone to reach the shallow aquifer	(days)	[0-500]	150
	- SMBT Dam				71
	- SMBA Dam				150
	- Harreza Dam				150
	- Bakhadda Dam				31
	- Sidi Belatar(Outlet)				150
GW_REVAP.gw	- Gargar Dam	Groundwater “revap” coefficient: controls the amount of water which evaporates from the shallow aquifer		[0.02- 0.2]	0.1
	- SMBT Dam				0.1
	- SMBA Dam				0.2
	- Harreza Dam				0.2
	- Bakhadda Dam				0.2
	- Sidi Belatar(Outlet)				0.2
DEEPST.gw	- Gargar Dam	Initial depth of water in the deep aquifer	(mmH ₂ O)	[0-10000]	2000
	- SMBT Dam				1000
	- SMBA Dam				6700
	- Harreza Dam				6700
	- Bakhadda Dam				2000
	- Sidi Belatar(Outlet)				2000
ESCO.bsn	- Gargar Dam	Soil evaporation compensation factor		[0-1]	0.1
	- SMBT Dam				0.04
	- SMBA Dam				0.8
	- Harreza Dam				0.1
	- Bakhadda Dam				1
	- Sidi Belatar(Outlet)				0.1
EPCO.bsn;;	- Gargar Dam	Plant uptake compensation factor		[0-1]	0.1
	- SMBT Dam				0.82
	- SMBA Dam				0.9
	- Harreza Dam				0.1
	- Bakhadda Dam				0.5
	- Sidi Belatar(Outlet)				0.1
SURLAG.bsn	- Gargar Dam	Surface runoff lag coefficient		[0-24]	12
	- SMBT Dam				12
	- SMBA Dam				12
	- Harreza Dam				12
	- Bakhadda Dam				12
	- Sidi Belatar(Outlet)				12
CH_K (1).sub	- Gargar Dam	Effective hydraulic conductivity	(mm/hr)	[0-300]	200
	- SMBT Dam				2
	- SMBA Dam				100
	- Harreza Dam				100
	- Bakhadda Dam				200
	- Sidi Belatar(Outlet)				200
CH_N (1).sub	- Gargar Dam	Manning’s “n” value for the tributary channels		[0.01-30]	15
	- SMBT Dam				15
	- SMBA Dam				15
	- Harreza Dam				15
	- Bakhadda Dam				1
	- Sidi Belatar(Outlet)				10

Tableau III.3 | Paramètres de calibration (Suite)

CH_N (2).rte	- Gargar Dam	Manning's value for the main channel		[-0.01- 0.3]	0.3
	- SMBT Dam				0.26
	- SMBA Dam				0.1
	- Harreza Dam				0.01
	- Bakhadda Dam				0.3
	- Sidi Belatar(Outlet)				0.15
CH_K (2).rte	- Gargar Dam	Effective hydraulic conductivity for the main channel alluvium	(mm/hr)	[-0.01- 500]	10
	- SMBT Dam				5
	- SMBA Dam				10
	- Harreza Dam				10
	- Bakhadda Dam				10
	- Sidi Belatar(Outlet)				10
SOL_AWC	- Gargar Dam	Available water capacity of the soil layer	(mmH ₂ O/mm Soil)	[0-1]	0.3
	- SMBT Dam				0.5
	- SMBA Dam				0.3
	- Harreza Dam				0.5
	- Bakhadda Dam				0.3
	- Sidi Belatar(Outlet)				0.3
HRU_SLP	- Gargar Dam	Average slope steepness	(m/m)		0.6
	- SMBT Dam				0.3
	- SMBA Dam				0.17
	- Harreza Dam				0.17
	- Bakhadda Dam				0.3
	- Sidi Belatar(Outlet)				0.17
SLSUBBSN.hru	- Gargar Dam	Average slope length	(m)	[10-150]	50
	- SMBT Dam				18
	- SMBA Dam				50
	- Harreza Dam				60
	- Bakhadda Dam				50
	- Sidi Belatar(Outlet)				50
SLSOIL.hru	- Gargar Dam	Slope length for lateral subsurface flow	(m)	[0-150]	50
	- SMBT Dam				10
	- SMBA Dam				50
	- Harreza Dam				60
	- Bakhadda Dam				50
	- Sidi Belatar (Outlet)				50
OV_N.hru	- Gargar Dam	Manning's "n" value for overland flow		[0.01-30]	4
	- SMBT Dam				2
	- SMBA Dam				2
	- Harreza Dam				0.1
	- Bakhadda Dam				4
	- Sidi Belatar (Outlet)				4

L'application du modèle SWAT a facilité l'examen des résultats pour les différents bassins, qui sont caractérisés par deux périodes distinctes : le débit de base et le débit de crue. Généralement, les barrages des régions semi-arides sont remplis par les crues enregistrées au cours de l'année hydrologique, d'où l'importance de simuler correctement les phases d'écoulement des crues. Les résultats montrent que le modèle SWAT simule correctement les périodes de hautes eaux, ce qui permet une bonne prédiction du débit entrant dans les barrages.

La construction des barrages dans le bassin du Cheliff a considérablement modifié l'équilibre hydrologique à la sortie du bassin au niveau de la station de Sidi Belattar en réduisant considérablement le débit d'eau. Au contraire, aujourd'hui en Algérie, les écoulements

interceptés dans les barrages et les déversoirs détiennent ~5,2 milliards de m³, qui ne constituent que 42% des écoulements totaux (Ounissi & Bouchareb, 2013).

Les résultats obtenus montrent que le modèle SWAT simule correctement les écoulements au pas de temps mensuel (Figure III. 1) et (Figure III. 2) et peut être utilisé, par la suite, pour une analyse plus approfondie de l'effet du climat.

Les résultats obtenus montrent que le modèle SWAT simule correctement les flux au pas de temps mensuel et peut être utilisé, par la suite, pour une analyse plus approfondie de l'effet du changement climatique et de l'utilisation des terres, pour l'analyse de la qualité de l'eau et l'analyse du rendement sédimentaire, et constitue une base solide pour l'analyse quantitative des changements futurs du ruissellement (Vilaysane et al., 2015; Yang et al., 2013) .

Ces résultats peuvent être utilisés pour prédire les apports aux cinq barrages par les gestionnaires de barrages car le modèle SWAT est largement utilisé comme un modèle approprié pour la gestion et la planification des ressources en eau dans les bassins versants ainsi que pour la simulation de scénarios à court et long terme (Adib et al., 2020; Chen et al., 2020; Khayyun & Alwan, 2019; Marak et al., 2020; Nda et al., 2020) .Il devient ainsi un outil pratique d'aide à la décision pour les gestionnaires de barrages en offrant la possibilité, par exemple, de modéliser l'impact du climat futur sur les volumes des réservoirs (Beharry et al., 2021; Saedi et al., 2021), ce qui contribuera à la gestion des ressources en eau d'une manière qui utile pour le développement durable de la région la région et du pays.

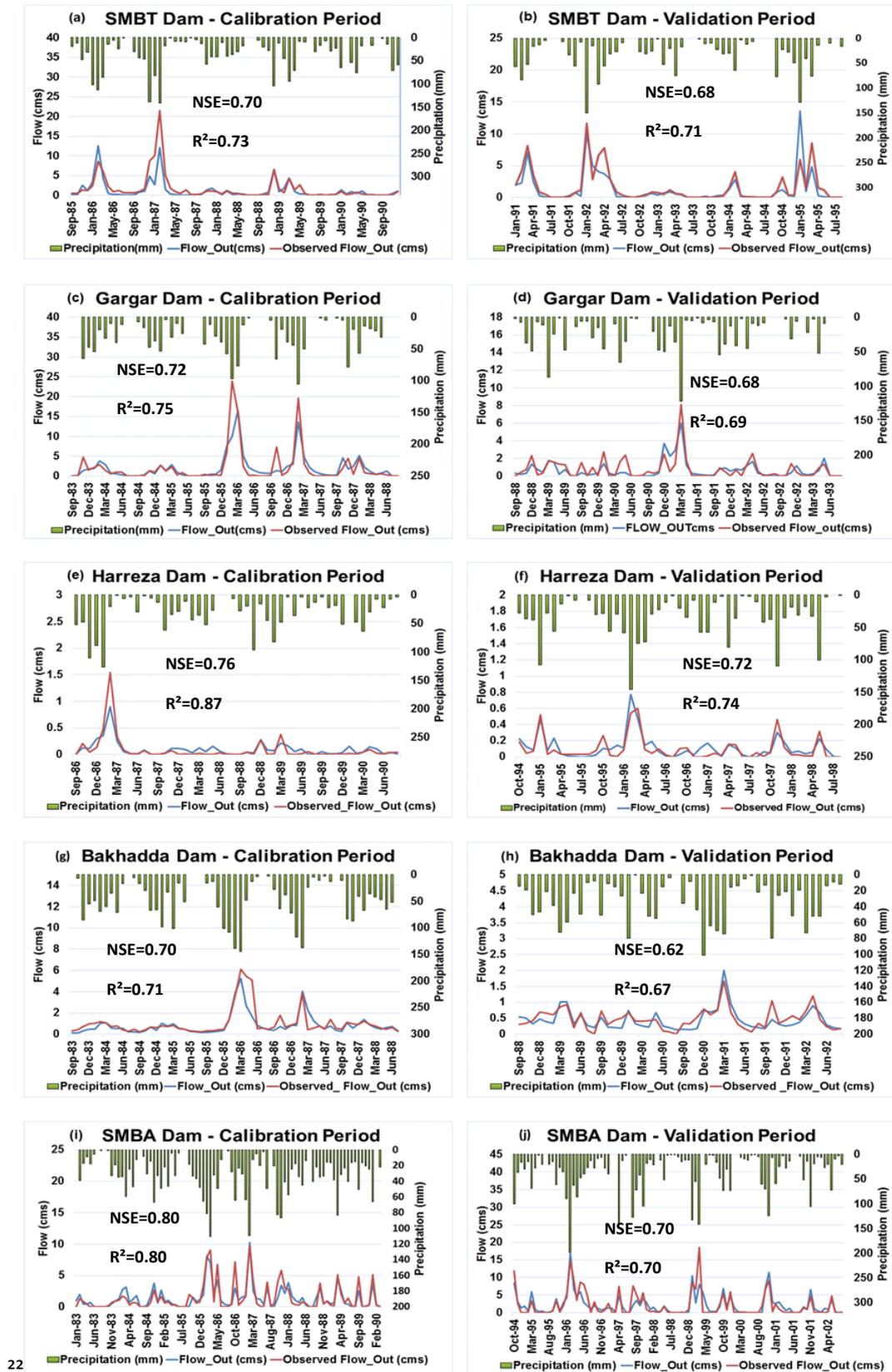


Figure III. 1 | Débit mensuel simulé et observé (m³/s) aux stations de barrages étudiées : (a et b) calibration et validation des barrages SMBT ; (c et d) calibration et validation du barrage Gargar ; (e et f) calibration et validation du barrage Harreza ; (g et h) calibration et validation du barrage Bakhadda et (i et j) calibration et validation du barrage SMBA. h) Calibration et validation du barrage de Bakhadda et (i et j) Calibration et validation du barrage de SMBA.

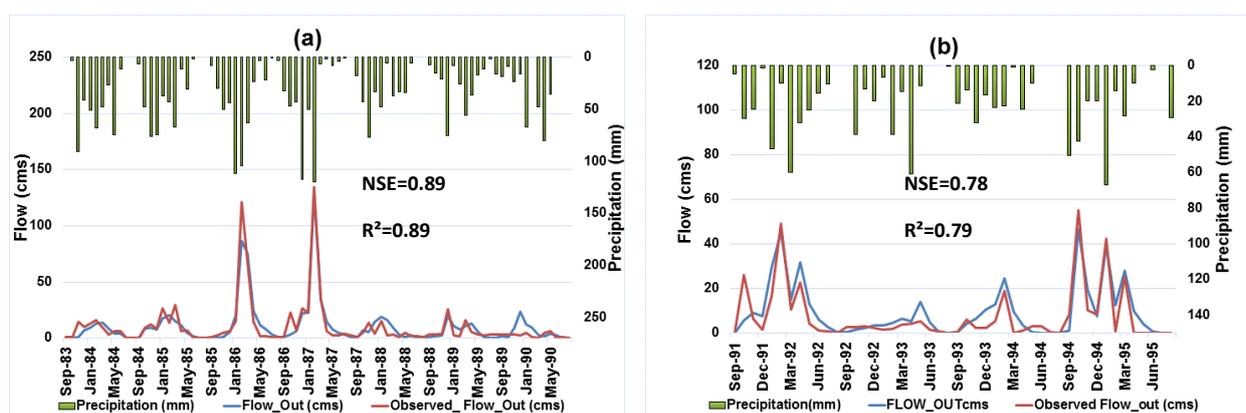


Figure III. 2 | : Débit mensuel simulé et observé ($m^3.s^{-1}$) à Sidi Belattar (Exutoire du Cheliff), (a) période de calibration et (b) période de validation.

Conclusion

L'importance et l'utilité d'une gestion rigoureuse de l'eau nécessite le développement d'un outil efficace de prévision des débits à l'entrée des barrages. La modélisation du bassin du Cheliff à l'aide du modèle hydro-agricole SWAT a montré sa capacité à simuler correctement le comportement hydrologique de ce bassin. La calibration du modèle SWAT s'est avérée très complexe compte tenu du nombre de paramètres utilisés et de la quantité de données d'entrée nécessaires à la calibration.

Après plusieurs tentatives d'ajustement des paramètres et de référence aux contextes de la région d'étude et de sa grande superficie, les résultats sont très satisfaisants avec des coefficients d'évaluation de la performance du modèle acceptables (R^2 allant de 0.67 à 0.79, NSE de 0.62 à 0.78 et PBIAS allant de 1,5% à 21%). En revanche, en amont du barrage de Bakhadda, la présence de karsts affecte légèrement la performance du modèle, résultant en un temps de recharge très court de l'aquifère profond (GW`DELAY.gw) par rapport à d'autres bassins où les coefficients sont inférieurs à ceux des autres bassins dont les valeurs : R^2 étant 0.67 ; NSE étant 0.62 et PBIAS égal à 6%. Les paramètres les plus importants dans le modèle sont la pente du sol à l'échelle d'une HRU (SLS`SOIL.hru), l'humidité du sol (SOL`AWC.soil), le temps de recharge de l'aquifère profond (GW`DELAY.gw), la perméabilité du canal principal (CHK2.rte) et le numéro de courbe condition II (CN2.mgt).

Le modèle mis en place pour les cinq barrages peut être utilisé comme un outil de prévision des débits entrants dans ces barrages et de gestion optimale de leurs eaux, ce qui est essentiel pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation des terres agricoles pour assurer la sécurité alimentaire de la population.

*Chapitre IV : Simulation
des Projections Futures des
Apports aux barrages*

Introduction

Dans le chapitre IV, la calibration et la validation du modèle **SWAT** sur le bassin versant du Chélif ont été établis dans le but d'étudier le comportement hydrologique du bassin versant à l'échelle mensuelle au niveau de cinq bassins alimentant des barrages ainsi qu'au niveau de l'exutoire du bassin du Chélif.

Dans ce qui suit, le modèle sera exécuté dans l'objectif de prédire les débits en utilisant des données de projections climatiques à échelle régionale en se focalisant sur deux scénarios (RCP4.5 ; RCP8.5) et pour deux périodes futures (2021-2040) et (2041-2060).

La tendance sera examinée en se référant à une période historique de 20 ans (1974-1993). Cette période de référence est impérativement commune pour les cinq (05) barrages étudiés.

L'analyse des résultats sera fondée sur les tendances des pluies et des températures selon le cinquième rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014).

IV.1 Résultats et discussions

Les résultats obtenus des différentes simulations à l'échelle annuelle sur les cinq barrages étudiés du Chélif ont montré que les débits ont tendances à diminuer de manière plus ou moins accentué sauf quelques exceptions.

Pour le scénario RCP 4.5 et au niveau du barrage SMBT, les débits diminuent de -16% à -26 % pour les deux périodes futures respectivement (2021-2040)(Figure IV 1)et (2041-2060) (Figure IV 2)avec le modèle IPSL et de manière très proche autour de -21% à -27% avec le modèle HadGEMS2 à l'exception du modèle EC-Earth qui a présenté des diminutions relativement faibles pour les mêmes périodes futures soit une variation de -5% et -7%.

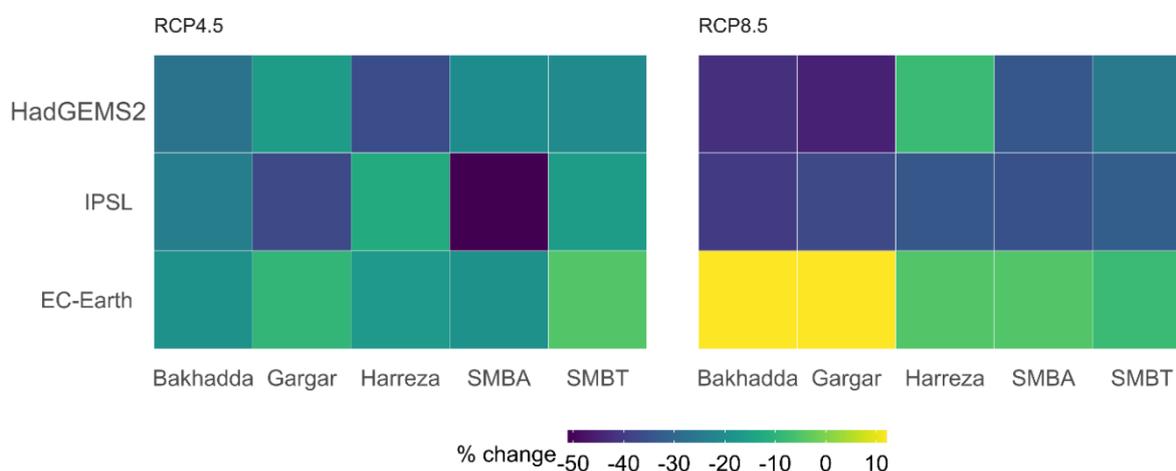


Figure IV 1 | Heat map montrant les tendances des débits en pourcentage période (2021-2040)

Pour le scénario RCP 8.5, les débits moyens annuels selon les simulations, connaîtront une tendance à la baisse plus importante par rapport au scénario précédent pour le modèle IPSL et cette diminution reste stable pour les modèles EC-Earth et HadGEMS2 (Tableau IV. 1).

Le barrage de Harreza enregistre une variation très proche que celle du SMBT avec le même modèle IPSL(RCP4.5) et sur les deux périodes (2021-2040) et (2041-2060) par contre, elle s'avère plus importante de l'ordre de -17% pour les deux périodes dans le modèle EC-Earth (RCP4.5) et encore plus accentuée pour le modèle HadGEMS2 (RCP4.5).

Le barrage de Gargar suit les mêmes tendances à la baisse pour les modèles IPSL, EC-Earth et HadGEMS2 (RCP4.5) et marque une exception avec une hausse des débits (+12%) pour le modèle EC-Earth durant la période (2021-2040) pour le scénario RCP8.5. Pour ce même GCM, une augmentation significative des débits au future (2021-2070) a été enregistrée au niveau du bassin d'Amur au Nord-Est d'Eurasie. +25.8 % en moyenne pour les scénarios SSP 2-4.5 et

19.8 % pour le scénario SSP 5-8.5. Cela a été constaté malgré la hausse des températures par rapport à la période historique de référence (Wen et al., 2021)

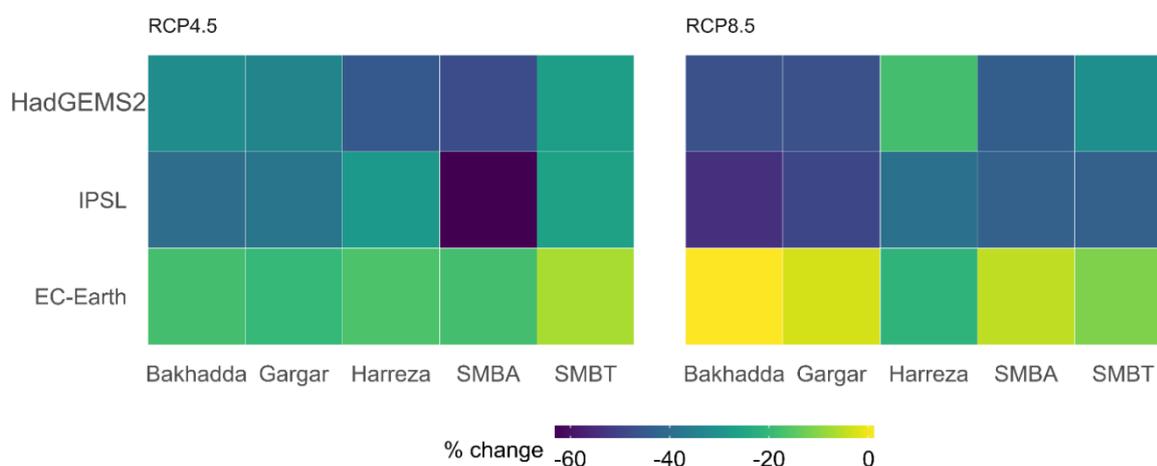


Figure IV 2/ Heat map montrant les tendances des débits en pourcentage période (2041-2060)

Le barrage de Bakhadda connaîtra la même tendance à la baisse plus importante en pourcentage pour tous les modèles pour le scénario RCP4.5 sauf pour le modèle EC-Earth (RCP8.5) pour les deux périodes avec des variations respectives +12% et +1% suivant les périodes (2021-2040) et (2041-2060).

Le barrage de SMBA a eu la particularité d’avoir les plus fortes baisses des débits au futures proche et moyen à l’exception du modèle EC-Earth (RCP8.5) avec des variations négatives mais très faibles (-5%) pour les deux périodes.

Nous pouvons donc, conclure que les conditions aux limites du Driving model EC-Earth n’offre pas des prédictions similaires aux deux autres IPSL et HadGEMS2 surtout pour scénario dit pessimiste RCP8.5 et ça a été enregistré sur tous les barrages modélisés.

L’illustration En « *Boxplot* » montre la combinaison des variations des débits des cinq barrages pour chaque modèle régional climatique utilisé. On peut déduire du Boxplot a) (Figure IV. 1) que les barrages expriment des tendances négatives variant de -5% à -51% pour la période (2021-2040) RCP 4.5 et de +12% à - 45% pour la même période selon le scénario RCP8.5. La tendance positive des débits a été enregistrée au niveau des deux barrages Gargar et Bakhadda et selon le modèle EC-Earth uniquement. Le *Boxplot* b) (Figure IV. 1), exprime les variations négatives de tous les débits à l’encontre du modèle IPSL de -7% à -63% pour la période (2041-2060) selon le RCP 4.5 et une petite variation positive de +1% à -54% pour la même période et selon le scénario RCP8.5.

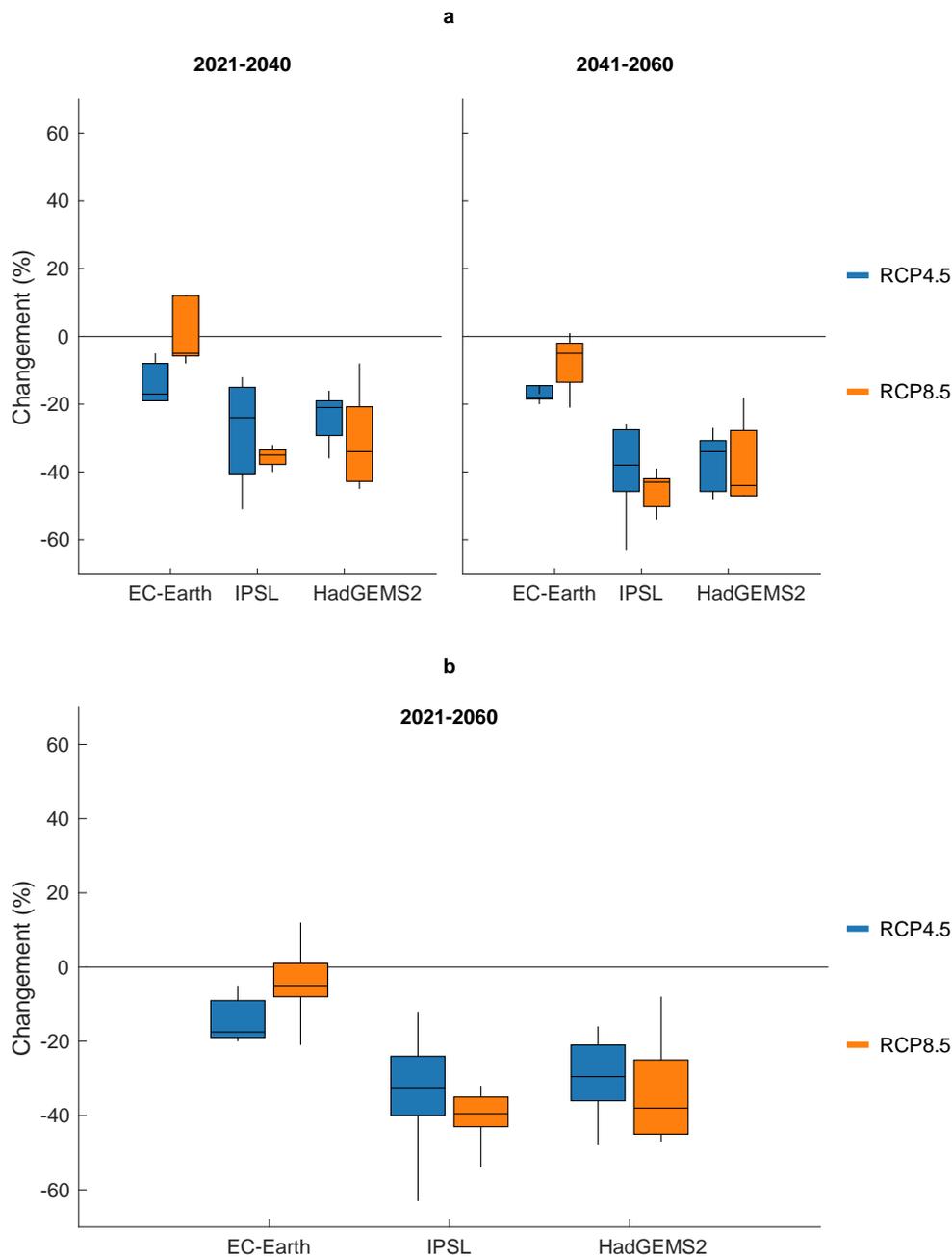


Figure IV. 1 / Combinaison des variations des débits à la sortie des cinq barrages en fonction des trois modèles RCM, a) période (2021-2040) ; (2041-2060) ; b) période totale (2021-2060)

Le maximum de cette diminution a été enregistré au niveau du barrage SMBA suivant le modèle IPSL et la petite variation positive a été observée au niveau du barrage Bakhadda et toujours suivant le modèle EC-Earth.

La combinaison des deux périodes par le *Boxplot* b) (Figure IV. 1) montre que tous les quartiles sont négatifs mis à part le modèle Ec-Earth représenté par la période totale (2021-2060).

Les diminutions des débits suivent fidèlement celles des précipitations futures prédites par les différents modèles climatiques régionaux (Figure IV. 2 ;Figure IV. 3 ;Figure IV. 6) est à noter que de manière générale et concernant tous les barrages selon tous les modèles et périodes, les débits prédits par le modèle SWAT suivent le forcing des précipitations prédites par les RCM utilisés.

L'exception est marquée comme cité dans le paragraphe précédent au niveau du barrage Gargar et Bakhadda avec le modèle EC-Earth scénario RCP85 et durant la période (2021-2040) avec une augmentation de débits de +12% (Figure IV. 4) et une seconde augmentation de +1% (Figure IV. 5).



Figure IV. 2 | Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage **SMBT** (a) : HadGEMS2-RCP45 (2021-2040) ; (b) : HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c):HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ; (e) :IPSL-RCP45(2021-2040) (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) :EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) : EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k) :EC-Earth-RCP85 (2021-2040) ; (l) :EC-Earth -RCP85 (2041-2060).



Figure IV. 3 | Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage Harreza (a) : HadGEMS2- RCP45 (2021-2040) ; (b) : HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c):HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ; (e) :IPSL-RCP45(2021-2040) ; (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) :EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) :EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k) :EC-Earth-RCP85 (2021-2040) ; (l) : EC-Earth –RCP85 (2041-2060) .

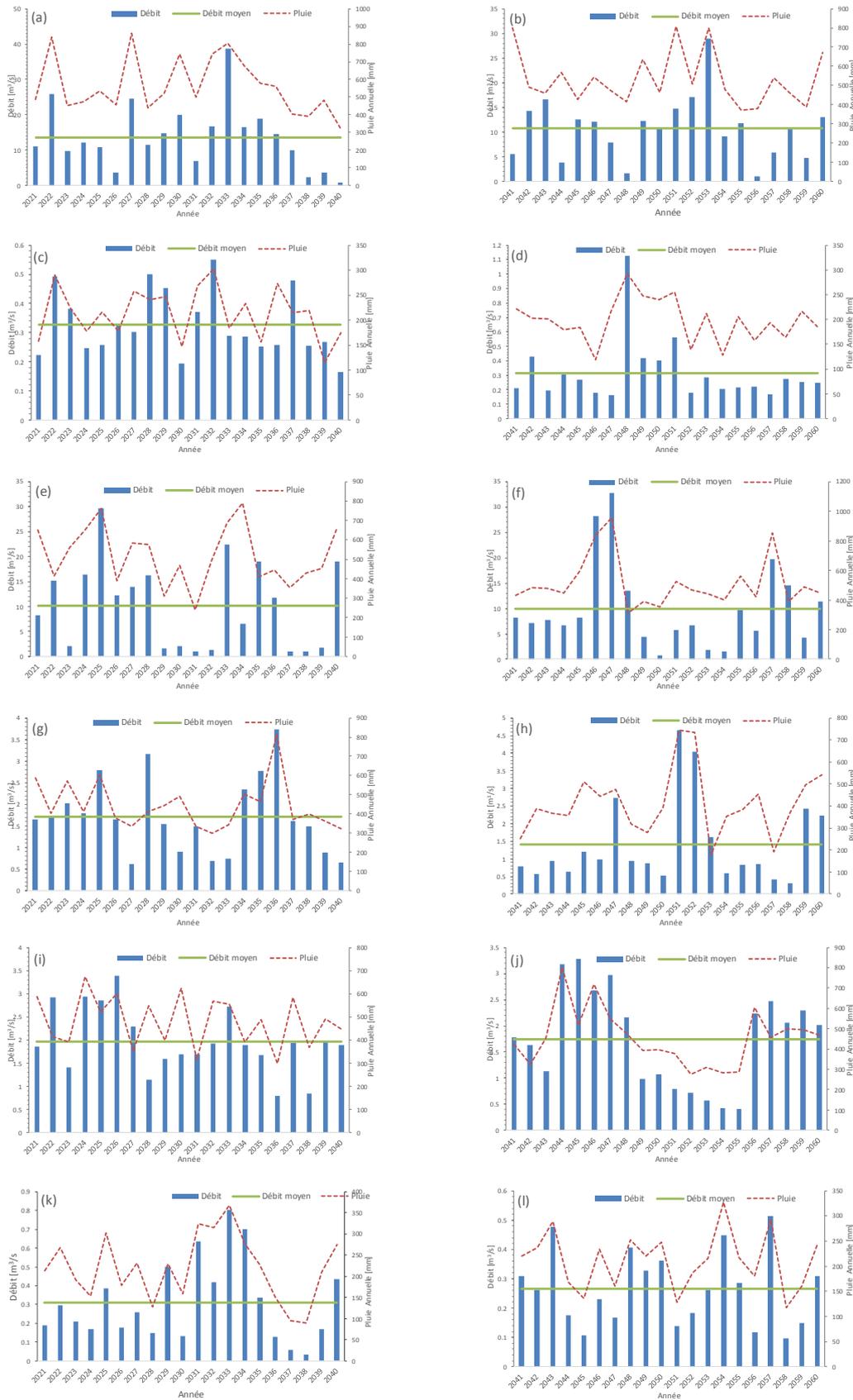


Figure IV. 4 | Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage **Gargar** (a) :HadGEMS2- RCP45 (2021-2040) ; (b) :HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c):HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ;(e) :IPSL-RCP45(2021-2040) ; (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) :EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) : EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k) :EC-Earth-RCP85 (2021-2040) ; (l) :EC-Earth –RCP85 (2041-2060).

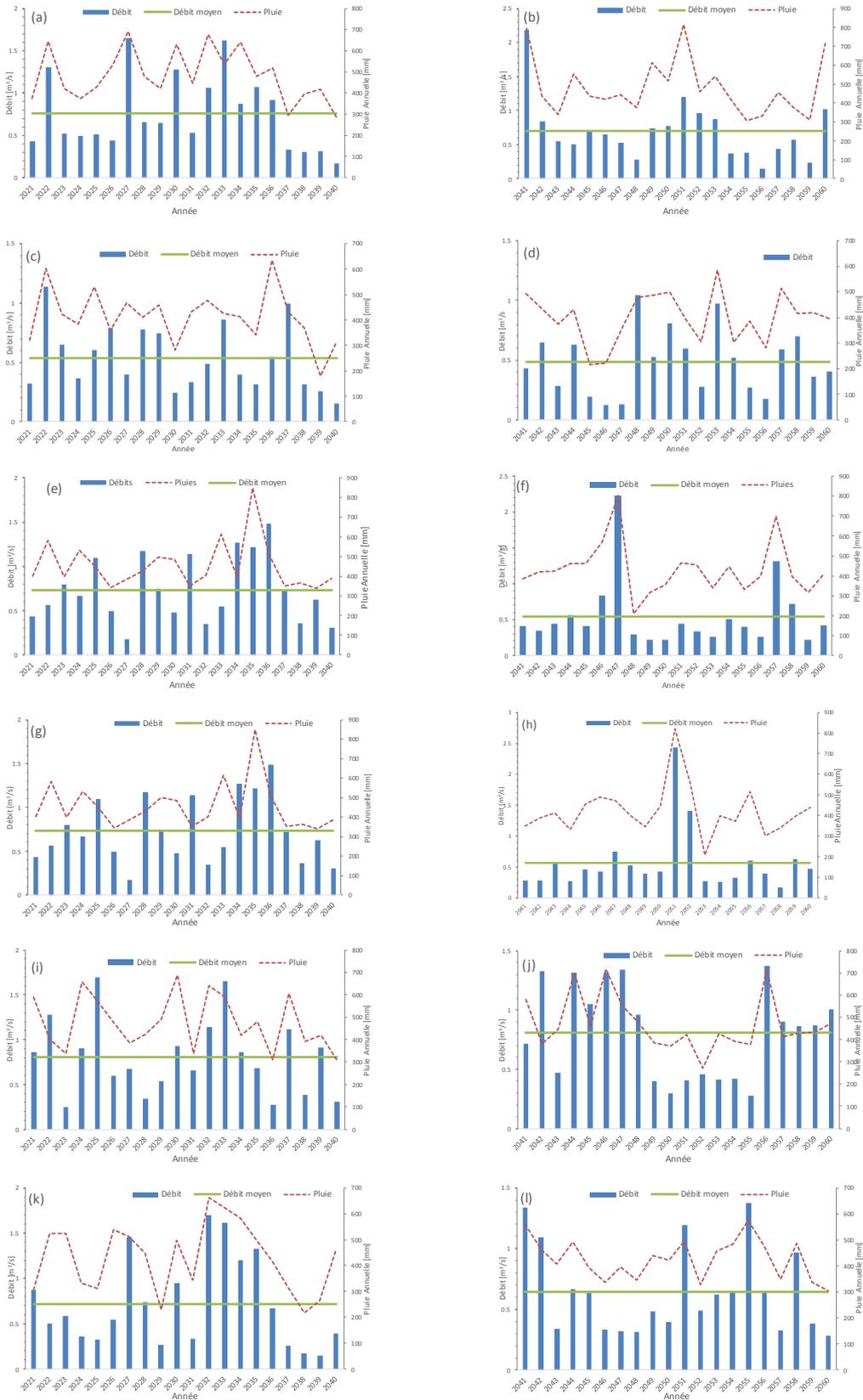


Figure IV. 5 / Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage **Bakhadda** (a) : HadGEMS2-RCP45 (2021-2040) ; (b) : HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c):HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ; (e) : IPSL-RCP45(2021-2040) ; (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) : EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) :EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k):EC-EarthRCP85 (2021-2040) ; (l) : EC-Earth -RCP85 (2041-2060) .

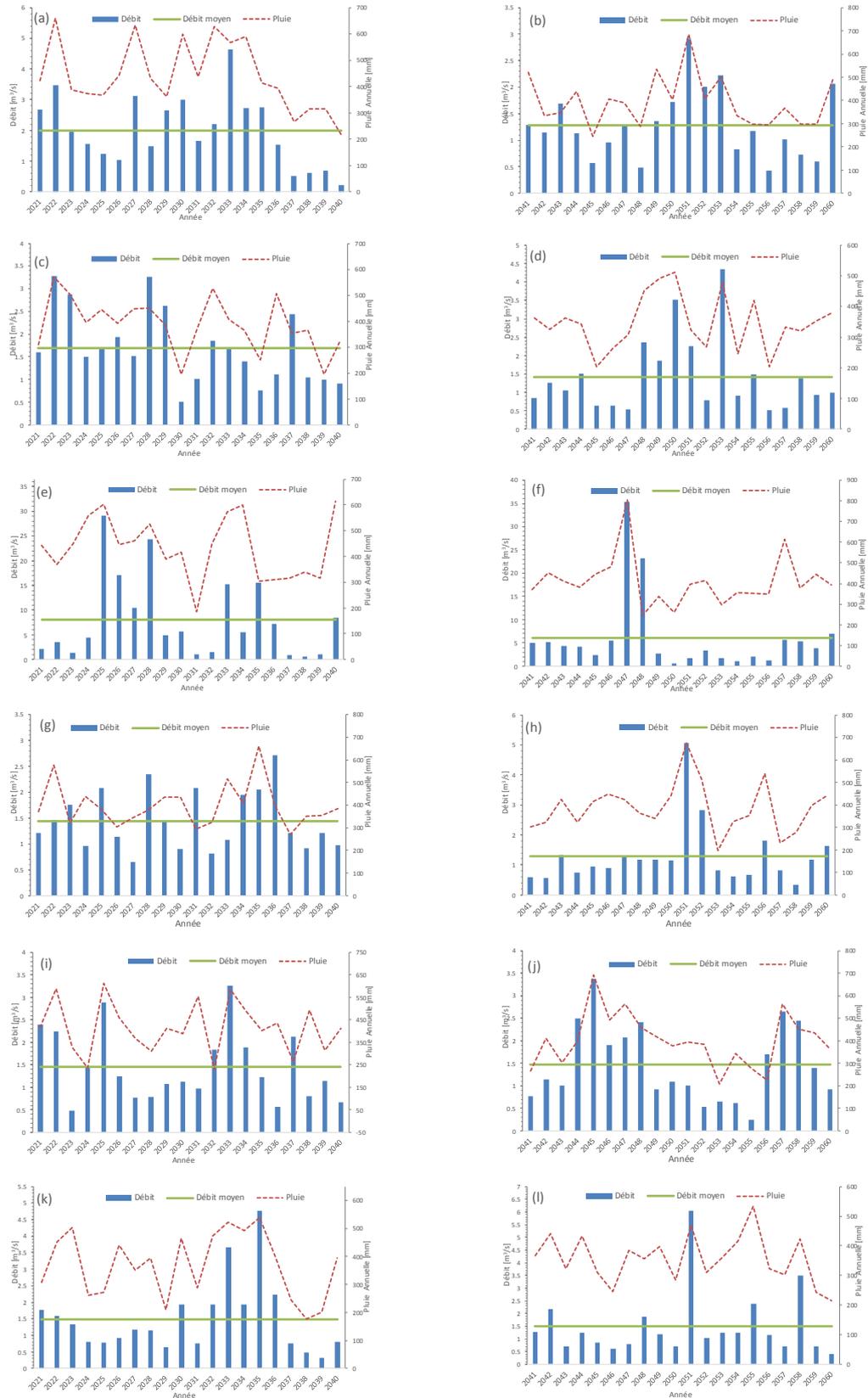


Figure IV. 6 | Variation des débits et des précipitation futurs dans le sous bassin du barrage SMBA (a) : HadGEMS2- RCP45 (2021-2040) ; (b) : HadGEMS2- RCP45 (2041-2060) ;(c) : HadGEMS2- RCP85 (2021-2040) ; (d) :HadGEMS2- RCP85 (2041-2060) ; (e) :IPSL-RCP45(2021-2040) ; (f) :IPSL-RCP45 (2041-2060) ;(g) :IPSL-RCP85 (2021-2040) ; (h) :IPSL-RCP85 (2041-2060) ; (i) : EC-Earth-RCP45 (2021-2040) ; (j) : EC-Earth -RCP45 (2041-2060) ;(k) :EC-Earth-RCP85 (2021-2040) ; (l) :EC-Earth –RCP85 (2041-2060).

Selon les « Radars plot » représentés par la (Figure IV. 7), les modèles fournissant le plus de réduction de débits futurs aux niveaux de tous les barrages sont le modèle IPSL suivi par HadGemS2 et les valeurs de débits les plus faibles voir une légère augmentation avec le modèle EC-Earth pour tous les barrages et tous les scénarios.

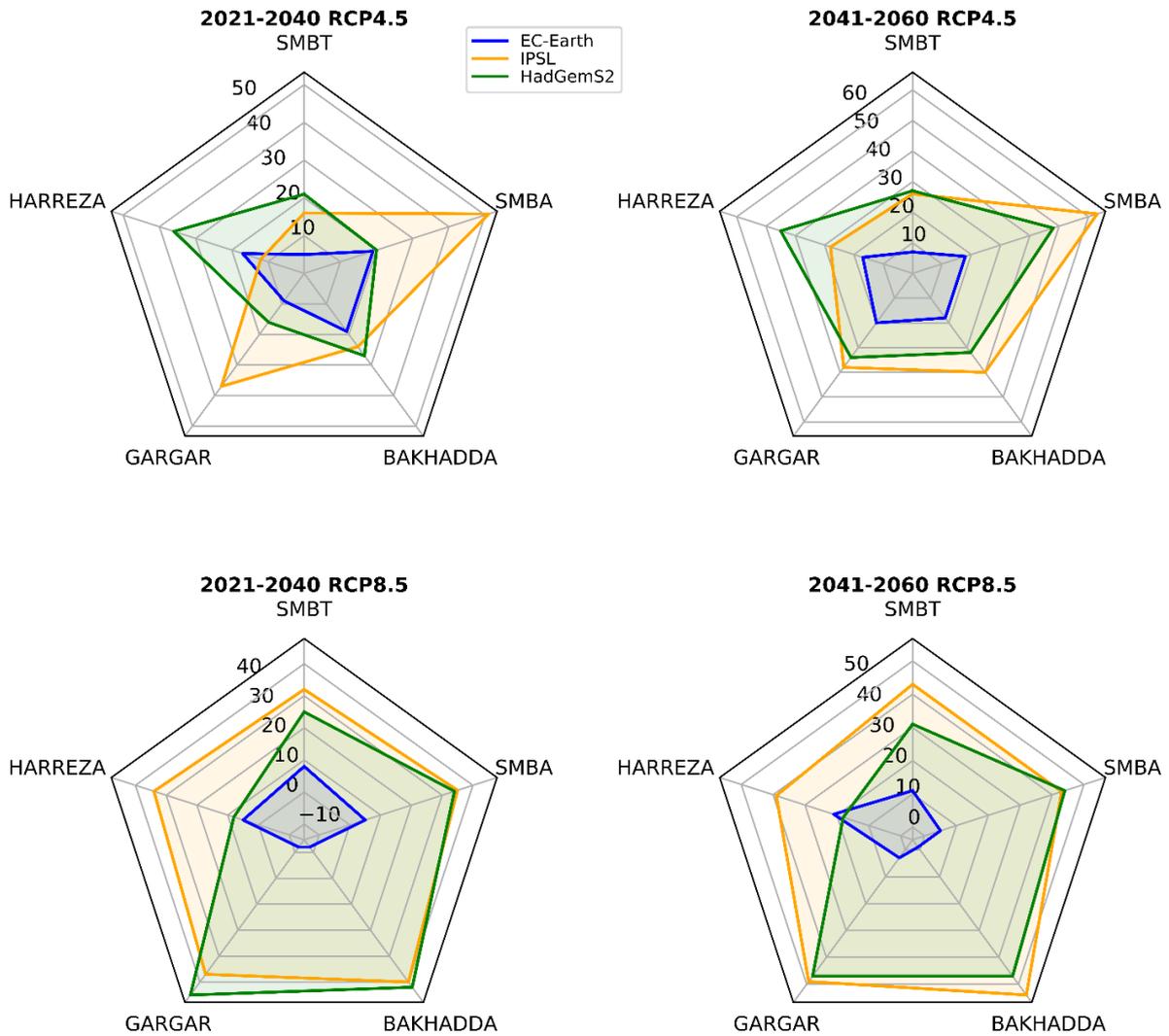


Figure IV. 7 | Radar Plot montrant un comparatif des variations négatives des débits pour les deux scénarios RCP4.5, RCP 8.5 et pour les deux périodes (2021-2040) ,(2041-2060)

Les variations des précipitations des différents modèles montrent des tendances à la baisse plus ou moins marquées selon les modèles utilisés.

Il a été observé que les prédictions des précipitations pour tous les modèles et tous les scénarios pour la période totale (2021-2060), suivent plus ou moins le même ordre des valeurs à l'exception du barrage Gargar pour le scénario RCP8.5 (Figure IV. 8) (f) et (h)) ou le décollement du modèle IPSL de manière très importante par rapport aux deux autres modèles, avec des précipitations futures qui dépassent l'ordre de 800 mm/an contre des valeurs ne dépassant point un max de 400 mm/an que ce soit le modèle EC-Earth ou le HadGemS2. Ce pic de précipitations futures a provoqué sans aucun doute l'augmentation des débits dans le même scénario pour le barrage Gargar et Bakhadda comme ça a été déjà signalé.

Quant aux variations des températures, dans tous les scénarios et pour les trois modèles, les tendances à la croissance est bien visible comme illustré dans la (Figure IV. 9) et les pourcentages de variations par rapport à la période de référence sont récapitulés dans le tableau



Figure IV. 8 | Evolution des précipitations futures des barrages : (a) : SMTB scénario RCP4.5 ; (b) : SMTB scénario RCP 8.5 ; (c) : Harreza scénario RCP 4.5 ; (d) : Harreza scénario RCP 8.5 ; (e) : Gargar scénario RCP 4.5 ; (f) : Gargar scénario RCP 8.5 ; (g) : Bakhadda scénario RCP 4.5 ; (h) : Bakhadda scénario RCP 8.5 ; (i) : SMBA scénario RCP 4.5 ; (j) : SMBA scénario RCP 8.5.

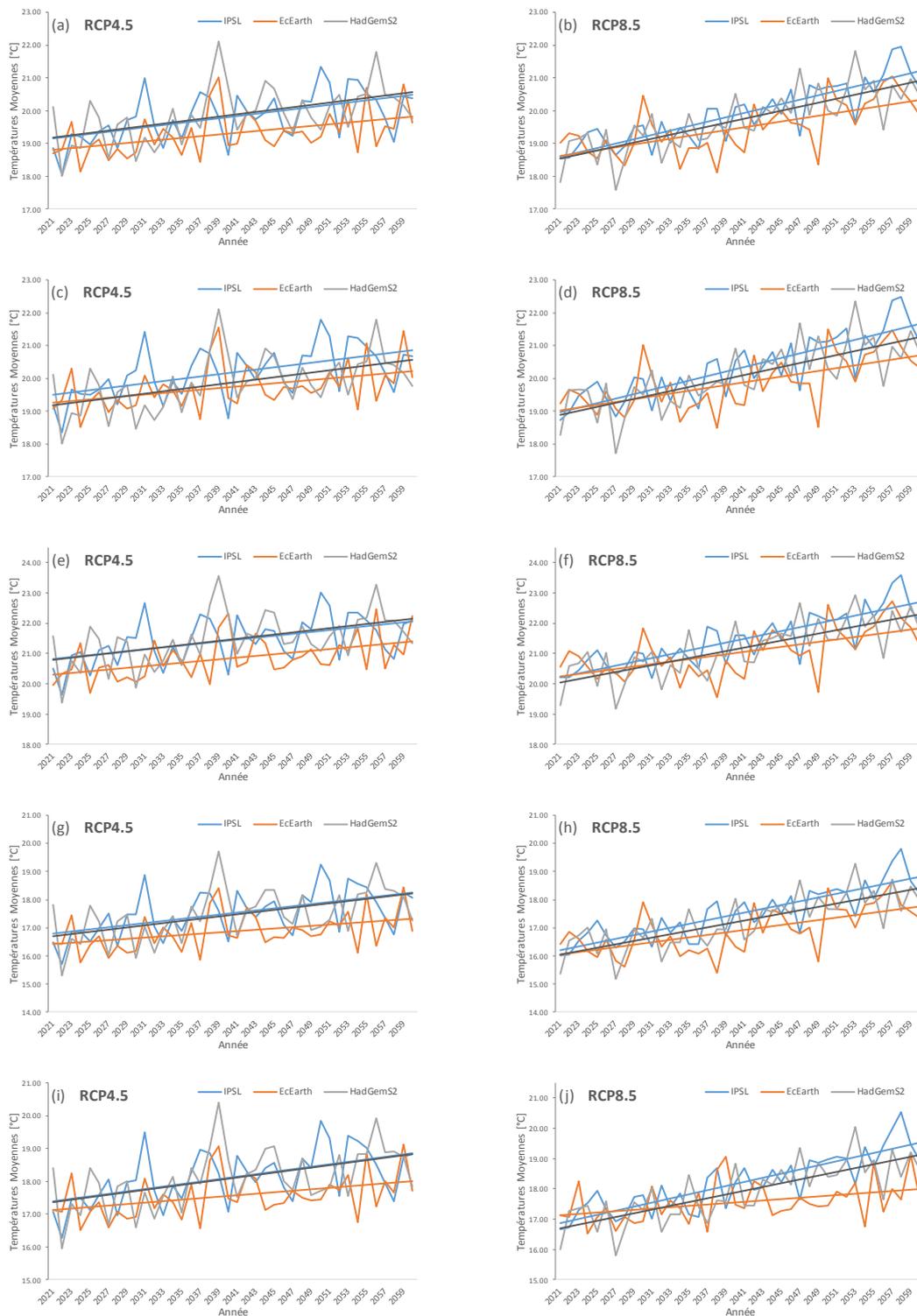


Figure IV.9 / Evolution des températures futures des barrages : (a) : SMT scénario RCP4.5 ; (b) : SMT scénario RCP 8.5 ; (c) : Harreza scénario RCP 4.5 ; (d) : Harreza scénario RCP 8.5 ; (e) : Gargar scénario RCP 4.5 ;(f) : Gargar scénario RCP 8.5 ; (g) : Bakhadda scénario RCP 4.5 ; (h) : Bakhadda scénario RCP 8.5 ; (i) : SMBA scénario RCP 4.5 ; (j) : SMBA scénario RCP 8.5.

Les résultats obtenus dans cette partie corroborent avec les rapports du GIEC et avec les conclusions de plusieurs auteurs. Les projections futures des précipitations observent une tendance négative en moyenne autour de 15% (Tableau. B 1, Annexe B) pour tous les barrages

et pour tous les scénarios. Ces tendances de baisse des précipitations annuelles correspondent aux conclusions de (M. Meddi & Eslamian, 2021) pour l'Algérie occidentale variant de 10 à 20% et de 10 à 30% pour le rapport du GIEC 2013 (Alexander et al., 2013).

Les températures futures projetées ont augmenté à l'horizon de (2021-2060) de 1.1 à 3.5°C (Tableau B. 2, Annexe B) ce qui est en accord avec le rapport de l'UNESCO paru en 2023 sur les changements climatiques dans la région du Maghreb (Larabi et al., 2023).

De même et selon le premier rapport d'évaluation sur la méditerranée (MAR1)(Cramer et al., 2020) les températures moyennes pourraient augmenter de 3.8 à 6.5°C pour le scénario le plus pessimiste (RCP8.5) jusqu'à l'horizon 2100.

Dans le quatrième rapport du GIEC (AR4) (Metz et al., 2007), le ruissellement de surface pourrait diminuer de -30% dans la région méditerranéenne contre 30% à 57% dans la même région pour la période (2041-2062) suivant les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) (Tramblay et al., 2013). Une seconde étude au Nord du Maroc sur le bassin de R'dom a révélé une réduction des rendements en eau de 26.4% jusqu'à 44.7% pour la période (2031-2050)(Brouziyne et al., 2018). Les résultats trouvés dans notre étude suivent le même ordre de ces résultats de manière plus ou moins proche selon les modèles utilisés (Tableau IV. 1).

Tableau IV. 1 | Variation des débits prédits (2021-2040) et (2041-2060) par rapport à la période de référence 1974-1993

	IPSL-RCP45		IPSL-RCP85		ECEARTH-RCP45		ECEARTH-RCP85		HadGemS2-RCP45		HadGemS2-RCP85		Moy RCP4.5	Moy RCP8.5
	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060		
SMBT	-16 %	- 26 %	- 32 %	- 43 %	- 5 %	- 7 %	-8 %	-11 %	- 21 %	- 27%	- 25 %	-31 %	-17%	-25%
Harreza	-12 %	-28 %	-34 %	-39%	-17 %	-17 %	-5%	-21 %	- 36 %	- 45%	- 8%	- 18 %	- 25.7%	- 21%
Gargar	- 37%	- 38 %	- 37 %	- 49 %	- 9 %	- 20 %	+ 12 %	- 3 %	16 %	34 %	-45 %	- 47 %	- 25.6%	- 28.2%
Bakhadda	- 24%	- 40 %	- 40 %	- 54 %	19 %	-18 %	+ 12 %	+ 1 %	- 27 %	- 32 %	- 42 %	- 47 %	- 26.6%	- 28.3%
SMBA	- 51%	- 63 %	- 35 %	- 43 %	19 %	-18 %	- 5 %	- 5 %	- 20 %	- 48 %	- 34 %	- 44 %	- 36.5	- 27.7%
Moyenne	- 28%	-39%	- 35.6%	- 45.6%	13.8%	- 16%	+ 1.2%	- 7.8 %	- 24 %	- 37.2 %	- 30.8 %	- 37.4 %	- 26.3 %	- 26%

Conclusion

A l'issue de ce chapitre, nous pouvons conclure que les projections futures selon les modèles climatiques régionaux utilisés ont montré une augmentation des températures et une diminution des précipitations et par conséquent la réduction des écoulements. Ces constatations sont dûment compatibles avec les différents rapports du GIEC pour la zone du Maghreb et de la région méditerranéenne.

Pour la projection des débits futurs, un modèle régional climatique a été utilisé (RCA4) conduit par trois modèles climatiques globaux (IPSL, Ec-Earth et HadGeMS2). Le forcing par le modèle **SWAT** au niveau de 05 sous bassins du Chélif a prédit des diminutions plus ou moins accentuées des débits avec les MCG (IPSL et HadGemS2) pour les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 mis à part un modèle qui a noté de très faibles diminutions (Ec-Earth) et même de faibles augmentations des débits et cela pour le scénario RCP8.5.

Les changements climatiques impactent considérablement la disponibilité de l'eau et rend la tâche déjà assez délicate de la gestion des ressources en eau encore plus compliquée afin de satisfaire les besoins des populations et des terres irrigables.

Il en devient impératif pour les décideurs de prendre en considération les différentes prédictions éditées par différents modèles adaptés au contexte du climat aride et semi-aride et basées sur les différents rapports du GIEC et orienter les décisions vers une meilleure gestion dans un objectif bien établi de préservation de la ressource en eau et s'orienter vers d'autres techniques de mobilisation non conventionnelles tel que le dessalement et la réutilisation des eaux usées en irrigation.

*Chapitre V : Simulation du
Transport Solide*

Introduction

L'érosion hydrique constitue un défi capital pour la productivité des terres arables ainsi que l'envasement des barrages. De ce fait, il s'avère très urgent de prendre les mesures nécessaires afin de préserver les ressources en eau et en sol. La sensibilité des sols à l'érosion hydrique est due à un ensemble de paramètres naturels et anthropiques liés aux modes d'occupation des sols et aux pratiques agricoles (Dumas, 2010). Le volume et la durée de la production de sédiments des bassins versants sont principalement causés par différents types d'érosion des sols, tels que l'érosion des lits et des berges, l'érosion de surface et l'érosion des glaciers (García-Ruiz et al., 2015). Comme l'érosion du sol génère une contrainte de cisaillement sous l'action des précipitations, le ruissellement de surface transporte la plupart des sédiments du sol érodé vers la surface, où ils sont généralement transportés en aval (Freebairn et al., 1996). Les conséquences de l'érosion hydrique causent à la fois la dégradation et l'appauvrissement des terres arables et l'envasement des barrages en réduisant leurs volumes utiles. En Algérie et selon une étude sur un échantillon de 19 barrages répartis entre l'Est, l'Ouest et le centre, la réduction du volume utile moyen est de 33.4% sur une période moyenne d'exploitation de 34 ans (Kassoul et al., 1997).

Selon (Remini et al., 2003), la dégradation de la qualité de l'eau causée par les sédiments déposés au niveau des barrages réservoirs. Ces derniers contiennent des produits chimiques comme les (nitrates, sulfates etc.) contenus dans les fertilisants agricoles. L'envasement peut atteindre la sécurité de l'ouvrage en diminuant sa stabilité si le volume mort dépasse le volume lors de son dimensionnement, l'obturation des ouvrages de vidange gênant l'exploitation du barrage et aussi l'envasement des canaux d'irrigation se situant à l'aval du barrage.

Le transport des sédiments dû à l'érosion des sols constitue un épineux problème économique et environnemental dans le bassin de la Mina et dans de nombreux bassins de la région semi-aride du Nord de l'Algérie. Ce bassin d'une superficie de plus de 6000 km² est situé dans une région très vulnérable où toutes les conditions sont réunies (Demmak, 1982; Hallouz, 2013) à citer :(i) des conditions climatiques caractérisées par des variations de températures très marquées et d'une pluviométrie assez irrégulière et intense,(ii) Une couverture végétale offrant une importante variabilité spatiale et une lithologie sensible à l'érosion formée majoritairement par des argiles et marnes schisteuses avec présence de roches calcaires(iii) Des cours d'eau caractérisés par des régimes d'écoulements très irréguliers avec l'existence de sapement des berges et alluvionnement des lits.(iv) un développement socio-économique observé après l'ère colonial amplifiant l'impact du surpâturage et des pratiques agricoles.

L'incidence du transport solide dans la Mina est d'une importance cruciale, car le phénomène contribue de manière significative à l'augmentation des volumes des sédiments au niveau des deux barrages qui l'occupent, en l'occurrence le barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda et le barrage de Bakhadda. Le phénomène atteint de manière effective la couche superficielle des terres arables de la région

Dans ce chapitre, l'objectif est de modéliser le phénomène d'érosion dans le bassin versant du Chélif. Pour ce faire, on utilise le modèle **SWAT**(Arnold et al., 1998) pour estimer les pertes en sol dans le bassin versant de la MINA au biais de la station hydrométrique de Oud el Abtal. Ce modèle distribué à base physique a été largement utilisé pour modéliser le phénomène d'érosion dans le monde (dos Santos et al., 2023; Y. Liu & Jiang, 2019).

V.1 Application du modèle SWAT

La modélisation des sédiments s'inscrit dans la continuité de la modélisation hydrologique. Le modèle SWAT utilise l'équation universelle de la perte en sol modifiée-MUSLE (Williams, 1974) basée sur USLE (Wischmeier & Smith, 1960).

USLE prédit l'érosion brute annuelle moyenne en fonction de l'énergie des précipitations et dans MUSLE, le facteur d'énergie des précipitations est remplacé par un facteur de ruissellement. Cela améliore la prédiction de la production de sédiments, élimine le besoin de ratios de livraison et permet à l'équation d'être appliquée à des événements pluvieux individuels. La prévision du rendement en sédiments est améliorée car le ruissellement est une fonction de l'état d'humidité antérieur ainsi que de l'énergie des précipitations.

L'équation MUSLE est formulée comme suit :

$$Sed = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times Area_{hru})^{0.56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (6)$$

Avec :

Sed : Quantité journalière des sédiments [tonnes]

Q_{surf} : Volume total de ruissellement [m^3]

q_{peak} : Débit de pointe ruisselé [$m^3.s^{-1}$]

$Area_{hru}$: Surface de l'HRU [ha]

K_{USLE} : Facteur d'érodibilité

C_{USLE} : Facteur de couverture végétale du sol

P_{USLE} : Facteur de pratique antiérosif

LS_{USLE} : Facteur topographique

$CFRG$: Facteur de Fragmentation Grossière

La démarche à suivre dans ce chapitre est de calibrer les sédiments au niveau d'un sous bassin situé en amont d'une station hydrométrique au niveau du bassin versant du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (SMBA). La station en question est la station hydrométrique d'Oued el Abtal.

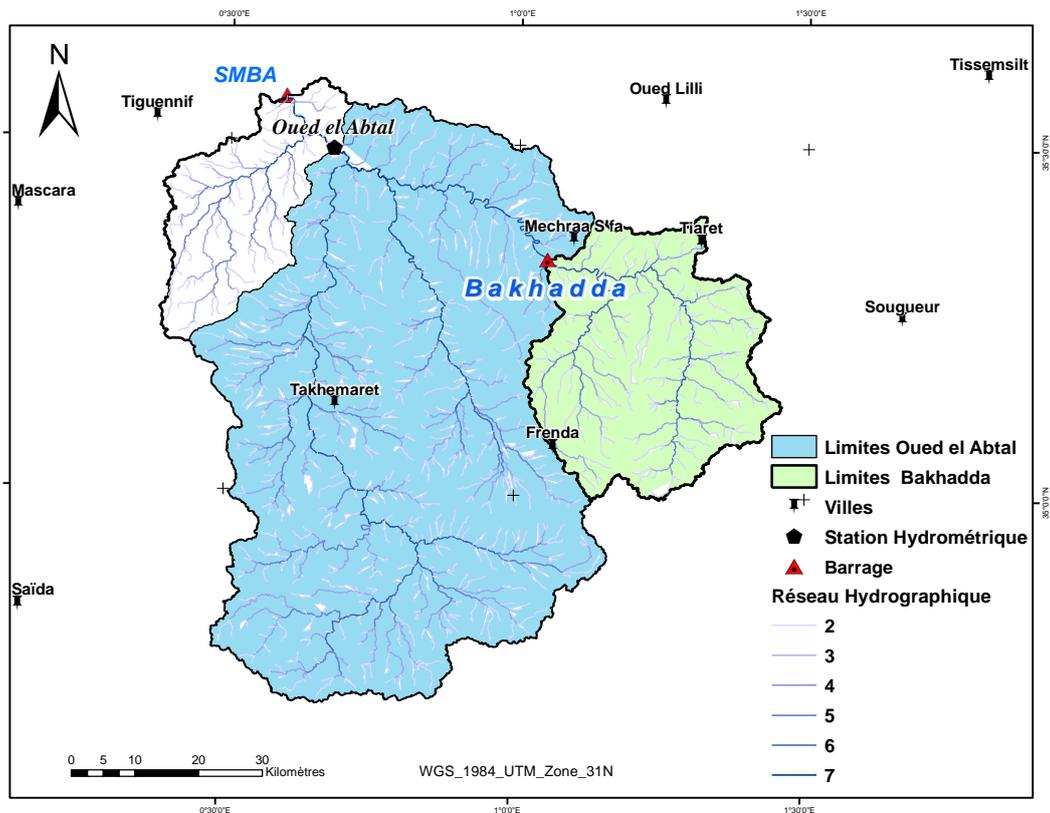


Figure V. 1 | Carte de situation du BV Oued el Abtal par rapport au bassin de la MINA

On cherche à ressortir les paramètres de calibration des sédiments qui ne perturbent pas la calibration hydrologique déjà exécutée au niveau du bassin de la MINA et qui a engendré des valeurs satisfaisantes des coefficients Nash, R^2 et PBIAS.

Les caractéristiques de la station sont récapitulées dans ce qui suit (Tableau V. 1)

Tableau V. 1 | Coordonnées de la station hydrométrique Oued el Abtal.

Station	Code ANRH	Longitude (Degrés)	Latitude (Degrés)	Superficie SBV (Km ²)
Oued el Abtal	013402	0.68	35.49	4172

Le paramètre USLE-K est une entité empirique liée directement à la texture du sol, à la teneur en matière organique, à la classe de perméabilité et à d'autres facteurs et il est principalement fixé par rapport au type de sol (Renard et al., 2000). La carte des sols de la région d'étude indique la présence des sols calciques sur toute bassin versant Oued el Abtal (Figure V. 2).

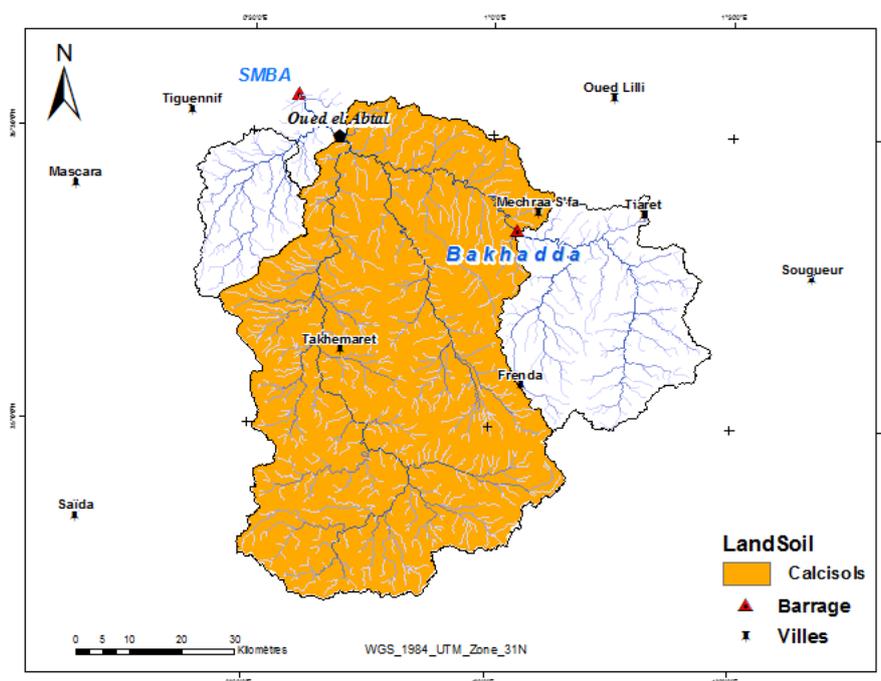


Figure V. 2 | Carte des sols du BV Oued el Abtal

Le paramètre USLE-P est lié aux pratiques agricoles (par exemple : sens de labour) ainsi qu'à la pente. Ce dernier est estimé en fonction de l'occupation du sol. Notre zone d'étude est composée de (2.58%) de forêts de feuillus (FRSD), de (32.65%) de broussailles en terre calcaire (GRAR), de (9.70%) de cultures en ligne (AGRR), de (3.75%) de zones arides (BARR) et de (0.34%) d'urbanisme haute densité (URHD) (Figure V. 3)

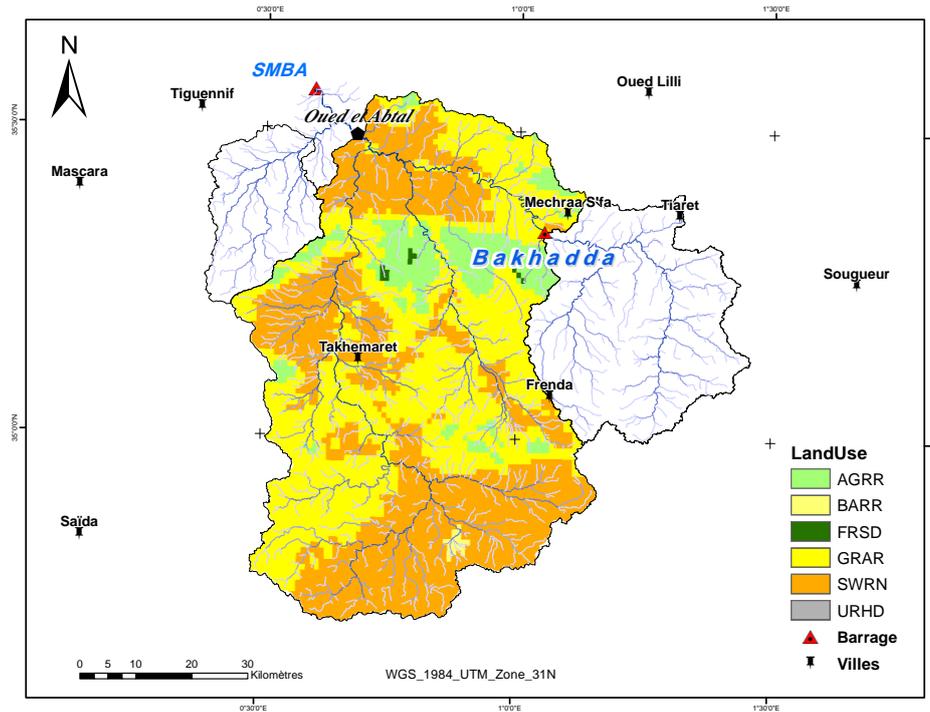


Figure V. 3 | Carte d'occupation du sol du BV Oued el Abtal

V.2 Résultats et discussions

La simulation des sédiments au niveau de la station de Oued el Abtal a permis d'avoir une dégradation spécifique de l'ordre de (57.2 T /Km²/an) Cette valeur représente une moyenne sur une période de 34 ans (1980 -2014) (Figure V. 4) qui est proche de la valeur observée de la même station (54.6 T/Km²/an) Une moyenne observée entre (1970-1988)(Meddi, 1992) ce qui représente une différence de (+5 %).

Dans le bassin de la Mina, le transport en suspension suit une variabilité spatio-temporelle assez importante. Cette variabilité est due principalement au régime des pluies, au couvert végétal et à la géologie du bassin (Achite & Meddi, 2005) ; les lâchées occasionnelles à partir du barrage Bakhadda contribuent à augmenter la charge sédimentaire transportée et déposées au niveau du barrage SMBA .

Les causes de l'érosion dans cette partie de la Mina sont la prépondérance des marnes chlorurés dans la partie Nord du bassin avec présence de calcaires et de grès ceci est confirmé par la carte mondiale des sols de la FAO (Sols calciques) dans la quasi-totalité de la Mina. Cependant, le couvert végétal et les pratiques agricoles tendent à diminuer l'érosion spécifique dans la partie Sud du bassin, caractérisé par la présence des forêts et de maquis et par des bancs calcaires qui ont tendance à limiter le phénomène d'érosion.

Nous avons constaté à travers plusieurs études d'érosion sur le même bassin que l'amont de la station d'Oued el Abtal est le moins érodé par rapport à Oued Haddad par exemple et c'est dû à l'absence de végétation, le contexte géologique et lithologique qui sont manifestement avec le régime des pluies et le relief les causes principales de l'érosion. ;

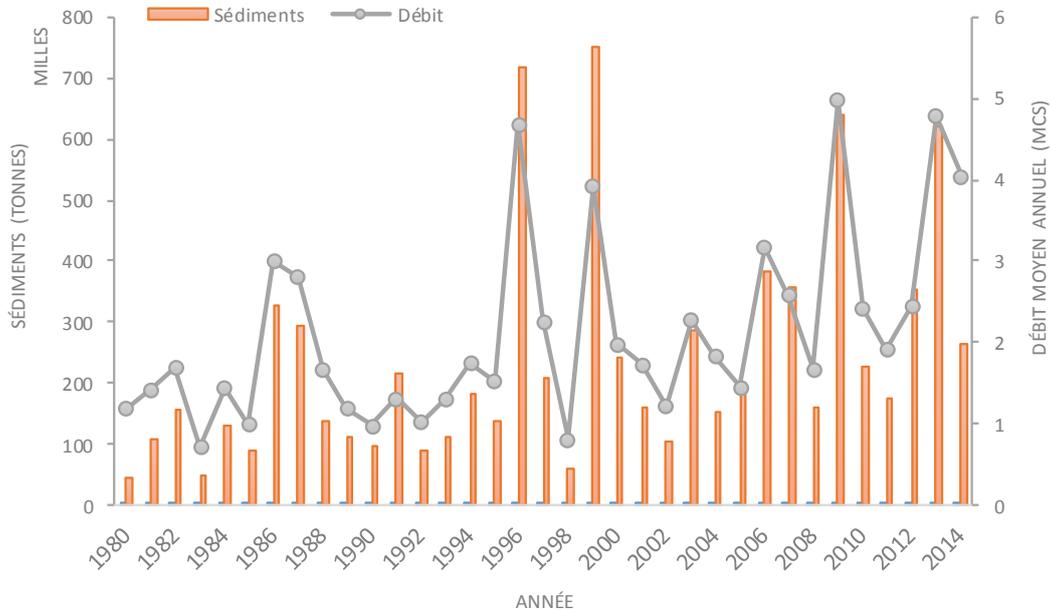


Figure V. 4 | Représentation des Sédiments simulés et des débits moyens annuels

La calibration manuelle des paramètres sédiments dans le modèle SWAT a montré que parmi plusieurs paramètres liés à l'érosion, seulement quatre ont montré une influence sur les quantités de sédiments arrivées au niveau de l'exutoire du bassin modélisé. Ces paramètres avec leurs définitions sont récapitulés dans le Tableau V. 2:

Tableau V. 2 / Paramètres de calibration des sédiments avec le modèle SWAT

Paramètre	Définition	Unité	Valeur Initial	Valeur calibré	Plage de calibration
USLE_K.sol	Facteur d'érodibilité du sol k de l'équation USLE	-	0.376	0.65	[0-0.65]
USLE-P.mgt	Facteur des pratiques agricoles		1	[0.5-1]	[0-1]
LAT_SED.hru	Concentration de sédiments dans l'écoulement latéral et souterrain	mg/l	0	5000	[0-5000]
CH_COV1.rte	Facteur d'érodibilité du chenal	-	0	0.6	[-0.05-0.6]
CH_COV2.rte	Facteur de couvertures du chenal	-	0	1	[-0.001-1]
PRF.bsn	Facteur d'ajustement de pointe pour l'acheminement des sédiments dans le chenal principal	-	0.5	1.5	[1-2]
SPCON.bsn	Paramètre linéaire permettant de calculer la quantité maximale de sédiments pouvant être réentraînés lors de l'acheminement des sédiments dans le chenal	-	0.0001	0.01	[0.0001-0.01]
SPEXP.bsn	Paramètre d'exposant pour le calcul des sédiments réentraînés dans le cheminement des sédiments dans le chenal	-	1	1	[1-1.5]

Conclusion

Le modèle **SWAT** a été testé dans cette partie de l'étude afin d'évaluer son applicabilité et comparer les résultats avec les mesures prises au biais de la station hydrométrique du bassin étudié. Le modèle quantifie les sédiments à l'entrée de la station avec les mêmes paramètres de calibration hydrologique.

L'entrave dans cette étape est la non disponibilité des données de mesure pour des périodes récentes ce qui rend la validation des résultats et nous avons jugé plus représentatif de prendre la période de simulation du transport solide assez étendue et sur un pas de temps annuel.

Connu pour une dégradation spécifique assez importante, les résultats obtenus dans cette partie du Chélif enregistrent une similarité à l'encontre des valeurs observées, ceci laisse un éventail entrouvert pour des futures recherches afin de généraliser son applicabilité sur d'autres sous bassins et de mieux simuler le phénomène de l'érosion qui demeure un phénomène assez complexe à cerner dans l'espace et dans le temps.

La modélisation des sédiments avec le modèle **SWAT** peut s'inscrire comme un outil d'estimation du volume des sédiments pour mieux comprendre le comportement du bassin versant. Cela permet de minimiser ce phénomène en installant des ouvrages de protection et de renforcer le reboisement et comme modèle de prédiction, il servira comme outil d'aide à la décision pour un emplacement optimal d'un barrage par rapport au volume mort.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

A travers cette thèse, l'applicabilité et la performance du modèle semi distribué **SWAT** (Arnold et al., 1998) a été étudiée pour le plus grand bassin du Nord-Ouest Algérien, le Chélif sur une étendue de 43750 Km². La modélisation a été organisée de la sorte à vérifier les sorties au niveau de Cinq (05) stations hydrométriques situées en amont de cinq barrages au sein du grand bassin

Aujourd'hui, Les modèles hydrologiques ne cessent de se développer pour le but principal d'apporter des solutions aux différentes problématiques de la gestion intégrée et durable de l'eau dans le cadre d'un bassin versant.

Souvent, le développement s'avère une tâche très difficile dans un environnement de manque de données observées notamment les données hydrométriques qui, même quand elles existent, elles représentent des ruptures d'enregistrement ou de de qualité discutable d'où la nécessité de donner plus d'importance à ce volet dit l'enregistrement et la collecte des données.

Par conséquent, la compréhension et la simulation du processus hydrologique d'un bassin versant dans un contexte climatique aride et semi-aride deviennent un challenge difficile à affronter. Le choix d'un modèle hydrologique est défini en fonction des résultats attendus des chercheurs afin de répondre aux différents soucis des gestionnaires du secteur hydraulique.

La mise en marche d'un modèle hydrologique nécessite un nombre important de données à savoir : un MNT de la région d'étude, une carte des sols et une carte d'occupation de sols et une compilation de données climatiques mesurées et satellitaires afin de combler le manque de données et leurs couvertures de longues périodes d'observation.

Dans cette thèse, l'applicabilité et la performance du modèle semi distribué **SWAT** (Arnold et al., 1998) a été étudiée pour le plus grand bassin du Nord-Ouest Algérien, le Chélif sur une étendue de 43750 Km². La modélisation a été organisée de la sorte à vérifier les sorties au niveau de Cinq (05) stations hydrométriques situées en amont de cinq barrages au sein du grand bassin

Le modèle **SWAT** a été utilisé pour simuler le débit au niveau de cinq barrages et au niveau de l'exutoire du grand bassin du Chélif. Les indicateurs de performances NSE , R^2 et $PBIAS$ ont donné des valeurs très satisfaisantes (R^2 allant de 0.69 à 0.79, NSE de 0.68 à 0.78 et $PBIAS$ de 21% à 50%), et $PBIAS$ allant de 21% à 1,5%) au niveau de tous les points de sorties cités. Par conséquent, la présence des Karsts en particulier en amont du barrage Bakhadda a été correctement simulé par le modèle **SWAT** en ajustant le paramètre de retardement des

infiltrations des eaux souterraines (GW-DELAY) qui avait une valeur particulièrement importante par rapport aux autres bassins

Une fois l'applicabilité du modèle SWAT a été vérifiée, la phase de projection future des débits est entamée. Les débits futurs générés par le modèle RCA4 suivent une tendance négative avec une moyenne de (-26.3 %) pour le scénario RCP4.5 sur la période totale (2021-2060) et (-26%) pour le scénario RCP8.5 ; Ces valeurs moyennes représentent tous les « *Driving Models* » et au niveau des cinq barrages étudiés. Ces résultats montrent que la tendance négative longuement évoquée par les différents rapports du GIEC n'est pas systématique pour tous les modèles régionaux MCR et leurs GCM's. En contrepartie, La synthétisation des résultats obtenus pour chaque barrage à part a ressorti une particularité avec une infime diminution des débits et même une petite augmentation de (+12 %) au biais du barrage Bakhadda pour le scénario RCP8.5 dit pessimiste.

Les résultats satisfaisants obtenus suite à la modélisation du bassin hydrographique (le Chéouli), nous a ouvert des horizons pour la prédiction des débits futurs afin de prendre les mesures nécessaires en prévenant contre à l'insuffisance de la ressource hydrique éventuelle et cela pour un futur très proche

La dernière phase de cette thèse est d'étaler l'utilisation du modèle pour quantifier l'érosion spécifique dans une des stations hydrométriques situé à l'Ouest du bassin (la station d'Oued el Abtal). Le transport solide étant un phénomène très complexe et cette complexité est palpée par la disparité des résultats de plusieurs chercheurs par des modèles et méthodes différents dans la même région. C'est ce qui a été constaté par plusieurs études traitant le bassin de la Mina.

A l'issue de ce travail, nous avons la certitude que l'Algérie et vu son emplacement géographique connaîtra dans l'avenir le plus proche un déficit hydrique qui pourrait pousser la population rurale des zones à faible potentiel pluviométrique à quitter leurs villages en exode ce qui va systématiquement surpeuplé les villes et diminuer les activités agricoles de leurs régions.

C'est dans cette perspective, qu'il faut orienter la réflexion dans un but de protéger ce qui existe comme patrimoine hydrique à la fois superficiel et souterrain et cela ne pourrait se concrétiser sans l'utilisation des modèles performants adaptés au contexte climatique et constituant un outil incontournable d'aide à la décision.

Perspectives et Recommandations :

Suivants les objectifs de cette étude, les recommandations qu'on peut tirer de cette étude sont comme suit :

- Etendre l'utilisation du modèle SWAT pour les autres bassins versant Algériens
- Prendre des mesures conséquence dans la planification et la gestion intégrée de la ressource en eau
- Utilisation des résultats de la prédiction des débits dans l'exploitation des barrages de la région d'étude en optimisant les lâchées.
- Définir des actions à mettre en œuvre afin de minimiser les effets des changements climatiques à court et à moyen terme
- Utilisation des sorties du modèle dans la préservation des sols arables et du couvert végétal
- Prévoir les mêmes actions précédentes dans d'autres sous bassins du Nord Algérien avec des conditions environnementales similaires.

Références
Bibliographiques

- A. Leonard, R., G. Knisel, W., & A. Still, D. (1987). GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1403–1418.
<https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.30578>
- Abbas, S. A., & Xuan, Y. (2019). Development of a New Quantile-Based Method for the Assessment of Regional Water Resources in a Highly-Regulated River Basin. *Water Resources Management*, 33(9), 3187–3210. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02290-z>
- Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT - CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs*.
- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O’Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1–2), 61–77. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)
- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O’Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1), 45–59.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)
- Abdi, I., & Meddi, M. (2020). Study on the applicability of the SCS-CN-based models to simulate floods in the semi-arid watersheds of northern Algeria. *Acta Geophysica*, 69. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00511-3>
- ABH-CZ 1.1. (2004). *Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Cheliff Première partie: Haut Cheliff-Algerie*.
- ABH-CZ 2.1. (2004). *Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Cheliff Deuxième Partie: Moyen Chélif-Algérie*.
- ABH-CZ 3.1. (2004). *Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Chélif Troisième Partie: Bas Chélif et la Mina- Algérie*.
- Acharyya, R., Pramanik, N., Mukherjee, S., Ghosh, S., Chanda, A., Pal, I., Mitra, D., & Mukhopadhyay, A. (2022). Evaluation of catchment hydrology and soil loss in non-perennial river system: a case study of Subarnarekha Basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01231-3>
- Achite, M., & Meddi, M. (2005). Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride . Cas du bassin versant de l’ oued Mina (nord-ouest algérien) Spatial and temporal variability of streamflow and solid yields in semiarid areas . Case of the oued Mina basin. *Water*, 18(December), 37–56.
- Adib, M. N. M., Rowshon, M., Mojid, M. A., & Habibu, I. (2020). Projected streamflow in the Kurau River Basin of Western Malaysia under future climate scenarios. *Sci. Rep*, 10, 8336.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-020-65114-w>

- Aga, A. O., Melesse, A. M., & Chane, B. (2020). An Alternative Empirical Model to Estimate Watershed Sediment Yield Based on Hydrology and Geomorphology of the Basin in Data-Scarce Rift Valley Lake Regions, Ethiopia. In *Geosciences* (Vol. 10, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/geosciences10010031>
- Alexander, L., Allen, S., Bindoff, N., Breon, F.-M., Church, J., Cubasch, U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J., Hartmann, D., Jansen, E., Kirtman, B., Knutti, R., Kanikicharla, K., Lemke, P., Marotzke, J., Masson-Delmotte, V., & Xie, S.-P. (2013). Climate change 2013: The physical science basis, in contribution of Working Group I (WGI) to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In *Climate Change 2013: The physical science basis*.
- Ambroise, B. (1999). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant: processus, facteurs, modeles. In *Bucharest, Romania: Editions HGA* (Issue 96).
- Amiar, S., Bouanani, A., & Baba-hamed, K. (2015). Modélisation pluie-débit: Calage et validation des modèles hydrologiques GR1A, GR2M et GR4J sur le bassin d'Oued Touil (Cheliff amont de Boughzoul, Algerie). *Proceedings of the Conférence Internationale FRIEND/UNESCO/Programme Hydrologique International Sur l'Hydrologie Des Grands Bassins Africains*, 26–30.
- Amin, M. G. M., Veith, T. L., Collick, A. S., Karsten, H. D., & Buda, A. R. (2017). Simulating hydrological and nonpoint source pollution processes in a karst watershed: A variable source area hydrology model evaluation. *Agricultural Water Management*, 180, 212–223.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.011>
- Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563–572.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Allen, P. M. (1999). Continental Scale Simulation Of The Hydrologic Balance I. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(5), 1037–1051.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb04192.x>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, S., & R., W. J. (1998). Large Area Hydrologic Modeling And Assesment Part I: Model Development. *Journal Of The American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
- Arnold, J. G., & Williams, J. R. (1987). Validation of SWRRB—Simulator for Water Resources in Rural Basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), 243–256.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1987\)113:2\(243\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1987)113:2(243))
- Arnold, J. G., Williams, J. R., & Maidment, D. R. (1995). Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), 171–183.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:2\(171\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:2(171))

- Ayivi, F., & Jha, M. (2018). Estimation of Water Balance and Water Yield in the Reedy Fork-Buffalo Creek Watershed in North Carolina using SWAT. *International Soil and Water Conservation Research*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.03.007>
- Baker, T., & Miller, S. (2013). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*, 486, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.041>
- Beharry, S., Gabriels, D., Lobo, L., Ramsewak, D., & Clarke, R. (2021). Use of the SWAT model for estimating reservoir volume in the Upper Navet watershed in Trinidad. *SN Appl. Sci*, 3. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42452-021-04201-7>.
- Benkaci, S., Abir, D., Oumellal, A., & Remini, B. (2018). Model builder sur ArcGis Modeling the erosion of the upper and middle Cheliff basin by the Model builder ... Modélisation de l' érosion du bassin haut et moyen Cheliff par l' application Model builder sur ArcGis. *Journal Of Materials And Engineering Structures*, 5(May 2020), 81–93.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43–69.
- Beven, K., Kirkby, M., E. Freer, J., & Lamb, R. (2021). A history of TOPMODEL. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 527–549. <https://doi.org/10.5194/hess-25-527-2021>
- Beven, K., Kirkby, M. J., Schofield, N., & Tagg, A. F. (1984). Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. *Journal of Hydrology*, 69(1), 119–143. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90159-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90159-8)
- Beven, K., & O'Connell, P. E. (1982). *On The Role Of Physically Based Distributed Modelling In Hydrology*.
- Bieger, K., Hörmann, G., & Fohrer, N. (2014). Simulation of Streamflow and Sediment with the Soil and Water Assessment Tool in a Data Scarce Catchment in the Three Gorges Region, China. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 37–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/jeq2011.0383>
- Biesbrouck, B., Wyseure, G., Van Orschoven, J., & Feyen, J. (2002). AVSWAT 2000. *Leuven: KU Leuven*.
- Boorman, D. (2003). Climate, Hydrochemistry and Economics of Surface-water Systems (CHESS): Adding a European dimension to the catchment modelling experience developed under LOIS. *The Science of the Total Environment*, 314–316, 411–437. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00066-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00066-4)
- Borah, D. K., Yagow, G., Saleh, A., Barnes, P. L., Rosenthal, W., Krug, E. C., & Hauck, L. M. (2013). *Sediment And Nutrient Modeling For TMDL Development And Implementation*. 49(4), 967–986. <https://doi.org/10.13031/2013.21742>
- Bouabdelli, S. (2021). *Caractérisation spatio-temporelle et prévision de la sécheresse dans le Nord de l'Algérie*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique, Blida.

- Bouanani, A., Baba-Hamed, K., & Fandi, W. (2013). Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna – nord-ouest Algérie). *Revue Des Sciences de l'eau*, 26, 119.
<https://doi.org/10.7202/1016063ar>
- Bouslihim, Y., Kacimi, I., Brirhet, H., Khatati, M., Rochdi, A., Pazza, N., Abdelhalim, M., & Yaslo, Z. (2016). Hydrologic Modeling Using SWAT and GIS, Application to Subwatershed Bab-Merzouka (Sebou, Morocco). *Journal of Geographic Information System*, 08, 20–27. <https://doi.org/10.4236/jgis.2016.81002>
- Bracmort, K. S., Arabi, M., R. Frankenberger, J., A. Engel, B., & G. Arnold, J. (2006). Modeling Long-Term Water Quality Impact Of Structural BMPs. *Transactions of the ASABE*, 49(2), 367–374.
<https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.20411>
- Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Hirich, A., Bouabid, R., & Zaaboul, R. (2018). Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. *Agricultural Systems*, 162(August 2017), 154–163.
<https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.01.024>
- Brown, L., & Barnwell, T. (1987). The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual. *Environmental Protection Agency*.
- Chaabane, N., & Abida, H. (2016). RunoA and sediment yield modeling using SWAT model: Case of Wadi Hatab basin, central Tunisia. *Arab. J. Geosci*, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12517-016-2607-3>.
- Chaney, N. W., Metcalfe, P., & Wood, E. F. (2016). HydroBlocks: a field-scale resolving land surface model for application over continental extents. *Hydrological Processes*, 30(20), 3543–3559.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.10891>
- Chaponnière, A. (2005). *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride : cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain)*. Thèse, INA-PG : Paris.
- Charney, J. G., Fjörtoft, R., & Von Neumann, J. (1950). Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation. *Tellus*, 2(4), 237–254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1950.tb00336.x>
- Chen, Y., Niu, J., Sun, Y., Qi, L., Li, S., Li, P., Sun, L., & Li, Q. (2020). Study on streamflow response to land use change over the upper reaches of Zhanghe Reservoir in the Yangtze River basin. *Geosci. Lett*, 7.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40562-020-00155-7>
- Christensen, F. D. (2004). Coupling Between The River Basin Management Model (Mike Basin) And The 3d Hydrological Model (MIKE SHE) With Use Of The Openmi System. In *Hydroinformatics* (pp. 126–133). World Scientific Publishing Company. https://doi.org/doi:10.1142/9789812702838_0016
- Collazo, S., Lhotka, O., Rusticucci, M., & Kysely, J. (2018). Capability of the SMHI-RCA4 RCM driven by the ERA-Interim reanalysis to simulate heat waves in Argentina. *International Journal of Climatology*, 38(1), 483–496. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.5190>

- Cormary, Y., & Guilbot, A. (1973). Etude des relations pluiedébit sur trois bassins versants représentatifs. *Proceedings of the IAHS Madrid Symposium*, 265–279.
- Cousino, L. K., Becker, R. H., & Zmijewski, K. A. (2015). Peer review report 1 On “Modeling the Effects of Climate Change on Water, Sediment, and Nutrient Yields from the Maumee River Watershed.” *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 113–114. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.12.039>
- Cramer, W., Guiot, J., & Marini, K. (2020). *Changement Climatique Et Environnemental Dans Le Bassin Méditerranéen Situation actuelle et risques pour le futur*. https://www.medecc.org/wp-content/uploads/2021/05/MedECC_MAR1_SPM_FRA.pdf
- Demetriou, C., & Punthakey, J. F. (1998). Evaluating sustainable groundwater management options using the MIKE SHE integrated hydrogeological modelling package. *Environmental Modelling & Software*, 14(2), 129–140. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00064-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00064-4)
- Demmak, A. (1982). *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie Septentrionale*. Thèse, Paris.
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Devred, D. (1989). *Etude pluviométrique du bassin de la Sambre : Etude hydrologique du sous-bassin de la Solre*. Université des Sciences et Techniques de Lille - Flandre – Artois.
- Dile, Y. T., & Srinivasan, R. (2014). *Evaluation Of CFSR Climate Data For Hydrologic Prediction In Data-Scarce Watersheds : An Application In The Blue Nile River Basin 1*. 77845. <https://doi.org/10.1111/jawr.12182>
- dos Santos, F. M., de Souza Pelinson, N., de Oliveira, R. P., & Di Lollo, J. A. (2023). Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. *CATENA*, 222, 106872. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106872>
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015–1031. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/91WR02985>
- Dubreuil, P., & Guiscafre, J. (1971). La planification du réseau Hydrométrique minimal. *Cah. O.R.S.T.O.M, Sér. Hydrol, VIII(2)*, 3–37.
- Dumas, P. (2010). Méthodologie de cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion appliquée à la région de Dumbéa à Païta - Bouloupari (Nouvelle-Calédonie). *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 63, 567–584. <https://doi.org/10.4000/com.6123>
- Dutta, D., Das, R., & Mazumdar, A. (2017). Assessment of Runoff and Sediment Yield in the Tilaya Reservoir, India Using SWAT Model. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 14, 9–18. <https://doi.org/10.3233/AJW-170021>

- Duvigneaud, P. (1974). *La synthèse écologique*. Doin. <https://books.google.dz/books?id=N1zQtAEACAAJ>
- Edijatno. (1987). *Amélioration des modèles simples de transformation pluie -débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants*. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur (Strasbourg), Cemagref (Antony).
- Elmeddahi, Y., Mahmoudi, H., Issaadi, A., Goosen, M., & Ragab, R. (2016). Evaluating the Effects of Climate Change and Variability on Water Resources: A Case Study of the Chelif Basin in Algeria. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2016.835.845>
- Famiglietti, J. S., & Wood, E. F. (1994). Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes. *Water Resources Research*, 30(11), 3061–3078. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/94WR01498>
- Ferrant, S. (2009). *Modélisation agro-hydrologique des transferts de nitrates à l'échelle des bassins versants agricoles gascons*. Thèse, Université Toulouse 3.
- Fontaine, T. A., Klassen, J. F., Cruickshank, T. S., & Hotchkiss, R. H. (2001). Hydrological response to climate change in the Black Hills of South Dakota, USA. *Hydrological Sciences Journal*, 46(1), 27–40. <https://doi.org/10.1080/02626660109492798>
- Fuka, D. R., Walter, M. T., Macalister, C., Degaetano, A. T., Steenhuis, T. S., & Easton, Z. M. (2013). *Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models*. <https://doi.org/10.1002/hyp.10073>
- G. Arnold, J., N. Moriasi, D., W. Gassman, P., C. Abbaspour, K., J. White, M., Srinivasan, R., Santhi, C., D. Harmel, R., van Griensven, A., W. Van Liew, M., Kannan, N., & K. Jha, M. (2012). SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Gachon, P. (2000). La modélisation du climat - où en sommes nous ? *Vertigo - La Revue Électronique En Sciences de l'environnement [En Ligne] Mis En Ligne Le 01 Septembre 2000, Consulté Le 05 Décembre 2022*, 1(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/vertigo.4044>
- Galdos Vegas, F. (2006). *Application d'un modèle hydrologique global à un bassin versant de haute montagne tropicale (Cordillère Blanche - Pérou)* ». Université de Montpellier II UFR Sciences.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Gautam, S., Costello, C., Baffaut, C., Thompson, A., & Sadler, E. (2021). Projection of future drought and extreme events occurrence in Goodwater Creek Experimental Watershed, Midwestern US. *Hydrological Sciences Journal*, 66. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1906878>
- Gherissi, R., & Bouanani, A. (2017). Validation des modèles hydrologiques GR2M et GR4J sur le bassin versant de l'oued Lakhdar. *Techniques Sciences Méthodes*, 5, 87–103.

- Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., & Goodess, C. M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209–224.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.06.001>
- GIEC, 2014. (2014). *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du clima* (Intergovernmental Panel on Climate Change (ed.)). Cambridge University Press.
<https://doi.org/DOI: 10.1017/CBO9781107415324.005>
- Girolamo, A., Drouiche, A., Ricci, G., GiuseppeParete, FrancescoGentile, & Taha-HocineDebieche. (2022). Characterising flow regimes in a semi-arid region with limited data availability: The Nil Wadi case study (Algeria). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101062>
- Gnitou, G. T., Ma, T., Tan, G., Ayugi, B., Nooni, I. K., Alabdulkarim, A., & Tian, Y. (2019). Evaluation of the Rossby Centre Regional Climate Model Rainfall Simulations over West Africa Using Large-Scale Spatial and Temporal Statistical Metrics. In *Atmosphere* (Vol. 10, Issue 12).
<https://doi.org/10.3390/atmos10120802>
- Gnouma, R. (2006). *Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron*. Thèse, INSA, LYON.
- Grusson, Y., Anctil, F., Sauvage, S., & Sánchez Pérez, J. (2018). Coevolution of Hydrological Cycle Components under Climate Change: The Case of the Garonne River in France. *Water*, 10, 1870.
<https://doi.org/10.3390/w10121870>
- Gude, V., Corns, S., & Long, S. (2020). Flood Prediction and Uncertainty Estimation Using Deep Learning. *Water*, 12, 884. <https://doi.org/10.3390/w12030884>
- GWP/TAC. (2000). *Integrated Water Resources Management. TAC Background Paper No4. GWP Publisher, Stockholm, Sweden.*
- GWP/TAC. (2003). *Sharing Knowledge for Equitable, Efficient and Sustainable Water Resources Management. GWP Publisher, Stockholm, Sweden.*
- Habibi, B., Meddi, M., Torfs, P. J. J. F., Remaoun, M., & Lanen, H. A. J. Van. (2018). Journal of Hydrology : Regional Studies Characterisation and prediction of meteorological drought using stochastic models in the semi-arid Chéli ff – Zahrez basin (Algeria). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 16(March), 15–31.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.005>
- Hallouz, F. (2013). *Transport Solide Dans Le Bassin D'el Oued MINA Et Sedimentation Du Barrage S.M.B.A*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique. Blida.

- Hanratty, M. P., & Stefan, H. G. (1998). Simulating Climate Change Effects in a Minnesota Agricultural Watershed. *Journal of Environmental Quality*, 27(6), 1524–1532. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700060032x>
- Hartmann, A., Gleeson, T., Rosolem, R., Pianosi, F., Wada, Y., & Wagener, T. (2015). A large-scale simulation model to assess karstic groundwater recharge over Europe and the Mediterranean. *Geosci. Model Dev.*, 8(6), 1729–1746. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1729-2015>
- Hemza, A., Elmeddahi, Y., & Tahar, T. (2022, May 23). Modélisation pluie-débit et évaluation du modèle HEC-HMS pour la gestion des ressources en eau dans le bassin de l’Oued Ouahrane, Nord-Ouest, Algérie. *The 1st International Hybrid Conference on Climate Change, Georesources and Sustainable Development 1st I2CGSD 2022 “23 May 2022” At: University of Khenchela.*
- Hourdin, F., Jeandel, Catherine, & Rémy, M. (2011). Les paramétrisations physiques. In *Le climat à découvert* (CNRS Éditi, pp. 162–165).
- Im, S., Kim, H., Kim, C., & Jang, C. (2009). Assessing the impacts of land use changes on watershed hydrology using MIKE SHE. *Environmental Geology*, 57(1), 231–239. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1303-3>
- Indarto, I. (2002). Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique. Application au bassin de l’Orb à travers une démarche de modélisation hydrologique distribuée. *L’Unité Mixte de Recherche Cemagref*, 253 + annexe. <https://hal.inrae.fr/tel-02582866>
- IPCC, 2008. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. IPCC expert meeting report, 19-21 september 2007.*
- Izaurrealde, R. C., Williams, J. R., McGill, W. B., Rosenberg, N. J., & Jakas, M. C. Q. (2006). Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 192(3), 362–384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.010>
- Jaimes-Correa, J., Munoz-Arriola, F., & Bartelt-Hunt, S. (2022). Modeling Water Quantity and Quality Nonlinearities for Watershed Adaptability to Hydroclimate Extremes in Agricultural Landscapes. *Hydrology*, 9, 80. <https://doi.org/10.3390/hydrology9050080>
- Jalowska, A., & Yuan, Y. (2018). Evaluation of SWAT Impoundment Modeling Methods in Water and Sediment Simulations. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 55. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12715>
- Jeannot, B. (2020). *Modélisation hydrologique intégrée de bassins versants fortement transitoires Développement d ’ outils numériques et applications.*Thèse. Université de Strasbourg
- Jones, C., Giorgi, F., & Asrar, G. (2011). *The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX; An international downscaling link to CMIP5.* CLIVAR Exchanges, International CLIVAR Project Office.
- Kabouya, M. (1990). *Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale.* Thèse de Doctorat, Université de Paris Sud, Laboratoire d’hydrologie et de géochimie isotopique Orsay.

- Kabouya, M., & Michel, C. (1991). Monthly water resources assessment, application to a semi-arid country. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 4(4), 569–587.
- Kassem, A. H., Doummar, J., & Gurdak, J. J. (2022). Sensitivity of an integrated groundwater flow model to model parameters—application to vulnerability assessment of karst aquifers. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100737. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100737>
- Khayyun, T., & Alwan, I. (2019). Hydrological model for Hemren dam reservoir catchment area at the middle River Diyala reach in Iraq using ArcSWAT model. *Appl. Water Sci*, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13201-019-1010-0>
- Khedimallah, A., Meddi, M., & Mahé, G. (2020). Characterization of the interannual variability of precipitation and runoff in the Cheliff and Medjerda basins (Algeria). *Journal of Earth System Science*, 129(1), 134. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01385-1>
- Kim, N., Lee, J., & Kim, J. (2012). Assessment of Flow Regulation Effects by Dams in the Han River, Korea, on the Downstream Flow Regimes Using SWAT. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138, 24–35. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000148](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000148)
- Kiniry, J., Williams, J., & Srinivasan, R. (2000). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*. 202.
- Knisel, W. G. (ed. . (1980). CREAMS: a field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems [USA]. In *United States. Dept. of Agriculture. Conservation research report (USA)*. Dept. of Agriculture, Science and Education Administration.
- Labbas, M., Branger, F., & Braud, I. (2015). *Développement et évaluation d ' un modèle hydrologique distribué pour des bassins périurbains – Application au bassin de l ' Yzeron (150 km 2)*. 84–91. <https://doi.org/10.1051/lhb/20150059>
- Laprise, R., de Elía, R., Caya, D., Biner, S., Lucas-Picher, P., Diaconescu, E., Leduc, M., Alexandru, A., Separovic, L., & Diagnostics, C. N. for R. C. M. and. (2008). Challenging some tenets of Regional Climate Modelling. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100(1), 3–22. <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0292-9>
- Larabi, A., Driouech, F., & Alaoui, M. (2023). *Un Danger Clair Et Immédiat - Les défis du Changement Climatique et de l'Eau au Maghreb*.
- Lebosse, A. (1986). *Exemple d'un modèle simplifié à réservoir; critères d'applications opérationnelles de modèles hydrologiques*.
- Leggett, J., Pepper, W. J., Swart, R. J., Edmonds, J., Meira Filho, L., Mintzer, I., Wang, M., & Wasson, J. (1992). Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. *Cambridge University Press, New York*, 69–96.
- Levesque, G. (2003). *Mise en œuvre du modèle SWAT sur le bassin versant de la rivière aux brochets*. Université et École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne,.

- Li, B., Shi, X., Lian, L., Yaning, C., Chen, Z., & Sun, X. (2020). Quantifying the effects of climate variability, direct and indirect land use cover change, and human activities on runoff. *Journal of Hydrology*, *584*, 124684. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124684>
- Lin, B., Chen, X., Chen, Y., & Liu, M. (2014). Simulations and analysis on the effects of landscape pattern change on flood and low flow based on SWAT model. *Acta Ecol. Sin*, *34*, 1772–1780. <https://doi.org/10.5846/stxb201304220769>.
- Liu, L., & Xu, Z. X. (2017). Hydrological implications of climate change on river basin water cycle: Case studies of the Yangtze River and Yellow River basins, China. *Applied Ecology and Environmental Research*, *15*, 683–704. https://doi.org/10.15666/aeer/1504_683704
- Liu, R., Li, Z., Xin, X., Liu, D., Zhang, J., & Yang, Z. (2021). Water balance computation and water quality improvement evaluation for Yanghe Basin in semiarid area of North China using coupled MIKE SHE/MIKE 11 modeling. *Water Supply*, *22*. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.214>
- Liu, Y., & Jiang, H. (2019). Sediment Yield Modeling Using SWAT Model: Case of Changjiang River Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *234*(1), 12031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/234/1/012031>
- Loukika, K., Keesara, V., K. H. V., D. R., & Singh, A. (2020). *Estimation of Groundwater Recharge Rate Using SWAT MODFLOW Model* (pp. 143–154). https://doi.org/10.1007/978-981-13-7067-0_10
- Loumagne, C. (1988). *Prise en compte d'un indice de l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit*. Thèse, Université de Paris Sud, Centre d'Orsay.
- Loumagne, C., Michel, C., Palagos, B., Baudez, J.-C., & Bartoli, F. (1999). D'une approche globale vers une approche semi-distribuée en modélisation pluie-débit. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1999075>, 85. <https://doi.org/10.1051/lhb/1999075>
- Mahoney, D. T., Fox, J. F., & Al Aamery, N. (2018). Watershed erosion modeling using the probability of sediment connectivity in a gently rolling system. *Journal of Hydrology*, *561*, 862–883. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.034>
- Makhlouf, Z., & Michel, C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, *162*, 299–318.
- Malard, A., Sinreich, M., & Jeannin, P.-Y. (2016). A novel approach for estimating karst groundwater recharge in mountainous regions and its application in Switzerland. *Hydrological Processes*, *30*, 2153–2166. <https://doi.org/10.1002/hyp.10765>
- Manabe, S., Smagorinsky, J., & Strickler, R. (1965). Simulated Climatology of a General Circulation Model with a Hydrologic Cycle. *Monthly Weather Review - MON WEATHER REV*, *93*. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1965\)093<0769:SCOAGC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1965)093<0769:SCOAGC>2.3.CO;2)

- Marak, J. D. K., Sarma, A. K., & Bhattacharjya, R. K. (2020). Assessing the impacts of interbasin water transfer reservoir on streamflow. *J. Hydrol. Eng.*, *25*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001984](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001984).
- Martínez-Salvador, A., Millares, A., Eekhout, J. P. C., & Conesa-García, C. (2021). Assessment of Streamflow from EURO-CORDEX Regional Climate Simulations in Semi-Arid Catchments Using the SWAT Model. *Sustainability*, *13*(13). <https://doi.org/10.3390/su13137120>
- Masud, M. B., Ferdous, J., & Faramarzi, M. (2018). Projected Changes in Hydrological Variables in the Agricultural Region of Alberta, Canada. *Water*, *10*, 1810. <https://doi.org/10.3390/w10121810>
- Mata Espinoza, S. V. (2017). *airGR un package de modélisation hydrologique à améliorer ? Évaluation sur un large échantillon de bassins versants*. Mémoire de Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Université Pierre et Marie Curie.
- Mausbach, M. J., & Dedrick, A. R. (2004). The length we go: Measuring environmental benefits of conservation practices. *Soil and Water Conservation Society*, *59*(5), 96A-103A.
- Meddi, H., Meddi, M., & Assani, A. A. (2014). Study of Drought in Seven Algerian Plains. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *39*(1), 339–359. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0827-3>
- Meddi, M. (1992). *Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued mina (algerie)*.
- Meddi, M., Assani, A., & Meddi, H. (2010). Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management*, *24*, 3817–3833. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9635-7>
- Meddi, M., & Eslamian, S. (2020). *Uncertainties in Rainfall and Water Resources in Maghreb Countries Under Climate Change*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42091-8_114-1
- Meddi, M., & Eslamian, S. (2021). Uncertainties in Rainfall and Water Resources in Maghreb Countries Under Climate Change. In *African Handbook of Climate Change Adaptation: With 610 Figures and 361 Tables*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45106-6_114
- Meddi, M., & P, H. (2003). Impact of pluviometric regime modification on the water resources of Northwest Algeria. *IAHS Publ*, *278*, 229–235.
- Meguenni, K., & Remini, B. (2008). Evaluation Du Debit Solide Dans Le Bassin Versant De Harreza (Algérie). *LARHYSS Journal*, *7*(1), 7–19. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/54793>
- Metcalfe, P., Beven, K., & Freer, J. (2015). Dynamic TOPMODEL: A new implementation in R and its sensitivity to time and space steps. *Environmental Modelling & Software*, *72*, 155–172. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.06.010>
- Metz, B., Davidson, O., PR, B., & al, E. (2007). IPCC AR4. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Climate change 2007: The physical science basis* (Vol. 4).

- Michel, C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*, 1, 39–44. <https://doi.org/10.1051/lhb/1983004>
- Moreira, L. L., Schwaback, D., & Rigo, D. (2018). Sensitivity analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model in streamflow modeling in a rural river basin. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 13(6), 1. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2221>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Mouelhi, S. (2003). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. Thèse, Université Paris VI, ENGREF, Ecole des Mines de Paris.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andreassian, V. (2002). Rainfall-runoff modeling at three large time-steps. *Proposal to Hydrological Sciences Journal*, 314–323.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Linking stream flow to rainfall at the annual time step: The Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology*, 328(1–2), 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.022>
- Mueller-Warrant, G. W., Phillips, C., & Trippe, K. (2019). Use of SWAT to Model Impact of Climate Change on Sediment Yield and Agricultural Productivity in Western Oregon, USA. *Open Journal of Modern Hydrology*, 09, 54–88. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2019.92004>
- Mulungu, D. M. M., & Munishi, S. E. (2007). Simiyu River catchment parameterization using SWAT model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(15), 1032–1039. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.053>
- N. Moriasi, D., G. Arnold, J., W. Van Liew, M., L. Bingner, R., D. Harmel, R., & L. Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., & Vries, B. (2000). Special report on Emissions Scenarios: a special report of the Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *PNNL-SA*.
- Nda, M., Adnan, M. S., Yusof, M. A. M., Jiya, G. S., & Ebenehi, I. Y. (2020). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for modeling and simulation in water resources engineering. In I. S. International (Ed.), *the 5th NA International conference on industrial engineering and operations management* (pp. 1625–1632). <http://www.ieomsociety.org/detroit2020/%0Apapers/389.pdf>.

- Ndomba, P., Mtaló, F., & Killingtveit, A. (2008). SWAT model application in a data scarce tropical complex catchment in Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(8), 626–632. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.06.013>
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., Williams, J. ., & King, K. . (2002). *Soil and Water Assessment Tool, theoretical documentation*.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J. R., & Williams, J. (2005). *Soil And Water Assesment Tool Theoretical Documentation Version 2005*.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. R. (2011). Soil and water asesment tool theoretical documentation: version 2009, Texas Water Resources Institute technical report No. 406. Texas Water Resources Institute, Texas A&M University, Texas. USA.
- Nerantzaki, S., Hristopulos, D., & Nikolaidis, N. (2020). Estimation of the uncertainty of hydrologic predictions in a karstic Mediterranean watershed. *Science of The Total Environment*, 717, 137131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137131>
- Nourani, V., Roughani, A., & Gebremichael, M. (2011). TOPMODEL Capability For Rainfall-Runoff Modeling Of The Ammameh Watershed At Different Time Scales Using Different Terrain Algorithms. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 5(1), 1–14.
- Otmane, A., Hamed, K. B., & Bouanani, A. (2019). Apport de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du bassin versant dans la modélisation hydrologique et les sous-produits du bilan hydrologique : cas du bassin versant de l’aval Mekerra, Algérie. *Revue Des Sciences de l’eau*, 32(2), 117A – 144. <https://doi.org/10.7202/1065203ar>
- Ouillon, S. (1998). Erosion et transport solide: ampleur et enjeux. *La Houille Blanche*, 2, 52–58.
- Ounissi, M., & Bouchareb, N. (2013). Nutrient distribution and Cuxes from three Mediterranean coastal rivers (NE Algeria) under large damming. *C.R. Geosci*, 345, 81–92. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.02.002>
- Pagano, T., Hapuarachchi, P., & Wang, Q. (2010). *Continuous rainfall-runoff model comparison and short-term daily streamflow forecast skill evaluation*.
- Papadimos, D., Demertzi, K., & Papamichail, D. (2022). Assessing Lake Response to Extreme Climate Change Using the Coupled MIKE SHE/MIKE 11 Model: Case Study of Lake Zazari in Greece. In *Water* (Vol. 14, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/w14060921>
- Pastori, M., Bminoungou, B., Hamatan, M., Cattaneo, L., Dondeynaz, C., Ali, A., & Carmona-Moreno, C. (2017). *E-WATER module: Analyses et simulations hydrologiques avec le modèle SWAT, Projet Mékrou*.
- Paul, P., Zhang, Y., Mishra, A., Panigrahy, N., & Singh, R. (2019). Comparative Study of Two State-of-the-Art Semi-Distributed Hydrological Models. *Water*, 11, 871. <https://doi.org/10.3390/w11050871>

- Pauwels, V. R. ., & Wood, E. F. (1999). A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for the modeling of water and energy balance processes in high latitudes: 1. Model improvements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D22), 27811–27822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999JD900005>
- Payraudeau, S. (2002). *Modélisation distribuée des flux d ' azote sur des petits bassins versants méditerranéens*. Thèse, Sciences de la Terre. ENGREF (AgroParisTech): HAL Id : tel-00005633.
- Peng, S., Chunying, W., Hatano, R., Eguchi, S., Kohyama, K., Yoshikawa, S., Itahashi, S., Igura, M., Ohkoshi, S., & Kuramochi, K. (2021). Response of hydrological processes to climate and land use changes in Hiso River watershed, Fukushima, Japan. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 123, 103010. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103010>
- Perra, E., Piras, M., Deidda, R., Paniconi, C., Mascaro, G., Vivoni, E., Cau, P., Marras, P., Ludwig, R., & Meyer, S. (2018). Multimodel assessment of climate change-induced hydrologic impacts for a Mediterranean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 4125–4143. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4125-2018>
- Perrin, C. (2000). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Prucha, B., Graham, D., Watson, M., Avenant, M., Esterhuysen, S., Joubert, A., Kemp, M., King, J., le Roux, P., & Redelinghuys, N. (2016). MIKE-SHE integrated groundwater and surface water model used to simulate scenario hydrology for input to DRIFT-ARID: the Mokolo River case study. *Water SA*, 42(3), 384–398. <https://doi.org/10.4314/wsa.v42i3.03>
- Quinn, P., & Beven, K. J. (1991). The Prediction Of Hillslope Flow Paths For Distributed Hydrological Modelling Using Digital Terrain Models. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, 5, 59–79.
- Rahim, B. E. A., Yusoff, I., Jafri, A. M., Othman, Z., & Abdul Ghani, A. (2012). Application of MIKE SHE modelling system to set up a detailed water balance computation. *Water and Environment Journal*, 26(4), 490–503. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2012.00309.x>
- Raihan, F., Beaumont, L., Maina, J., Islam, A., & Harrison, S. (2019). Simulating streamflow in the Upper Halda Basin of southeastern Bangladesh using SWAT model. *Hydrological Sciences Journal*, 65, 1–14. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1682149>
- Refsgaard, J. C., Stisen, S., & Koch, J. (2022). Hydrological process knowledge in catchment modelling – Lessons and perspectives from 60 years development. *Hydrological Processes*, 36(1), e14463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.14463>
- Refsgaard, J. K. (1996). Operational Validation and Intercomparison of Different Types of Hydrological Models No Title. *Water Resources Research*, 32(7), 2189–2202. <https://doi.org/10.1029/96WR00896>
- Remini, B. (2005). *La Problématique De L'eau En Algérie*.
- Remini, B. (2010). La Problematique De L'eau En Algerie Du Nord. *LARHYSS Journal*, 8(1), 27–46. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/54846>

- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., Mccool, D. K., & Yoder, D. C. (2000). *Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning With The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*.
- Rezak, S., Laborde, J.-P., & Errih, M. (2012). Validation d'un modèle numérique de terrain adapté à la modélisation hydrologique régionale sur l'Algérie du Nord. *Hydrological Sciences Journal*, 57(5), 928–941. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.685742>
- Richardson, L. F. (2007). *Weather Prediction by Numerical Process*. In *Cambridge Mathematical Library* (2nd ed.). Cambridge University Press. [https://doi.org/DOI: 10.1017/CBO9780511618291](https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9780511618291)
- Rocha, J., Carvalho-Santos, C., Diogo, P. A., Beça, P., Keizer, J., & Nunes, J. P. (2020). Impacts of climate change on reservoir water availability, quality and irrigation needs in a water scarce Mediterranean region (southern Portugal). *Science of The Total Environment*, 736, 139477. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139477>
- Rummukainen, M., Ullerstig, A., Hansson, U., Graham, P., & Willen, U. (1998). RCA - Rossby Centre regional Atmospheric climate model: *Smhi*, 83.
- Saedi, F., Ahmadi, A., & Abbaspour, K. (2021). Optimal water allocation of the Zayandeh-Roud Reservoir in Iran based on inflow projection under climate change scenarios. *J. Water Clim. Change*. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wcc.2021.219>.
- Saleh, A., Arnold, J., Gassman, P., Hauck, L., Rosenthal, W., Williams, J., & McFarland, A. (2000). Application of SWAT for the Upper North Bosque Watershed. *Transactions of the ASAE*, 43, 1077–1087. <https://doi.org/10.13031/2013.3000>
- Salhi, C., Touaibia, B., Zeroual, A., Benblida, N., & Assani, A. (2022). Evaluation of soil erosion in Northern Algeria watershed using SWAT and RUSLE models. *Geocarto International*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2060314>
- Sambou, S., Sané, M. L., Leye, I., Ndione, D., Kane, S., & Badji, M. (2021). Calage et validation de SWAT sur le bassin versant du Bafing (Fleuve Sénégal) en amont de BAFING MAKANA : vers une application à la gestion du barrage de Manantali. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 384, 363–366. <https://doi.org/10.5194/piahs-384-363-2021>
- Samuelsson, P., Willén, U., Kjellström, E., & Jones, C. (2009). *Applying the Rossby Centre Regional Climate Model (RCA3.5) over the ENSEMBLES-AMMA region: Sensitivity studies and future scenarios*.
- Sandu, M.-A., & Virsta, A. (2015). Applicability of MIKE SHE to Simulate Hydrology in Argesel River Catchment. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.135>
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation Of The Swat Model On A Large Rwer Basin With Point And Nonpoint Sources1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169–1188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>

- Sehgal, V., & Sridhar, V. (2018). Watershed-scale retrospective drought analysis and seasonal forecasting using multi-layer, high-resolution simulated soil moisture for Southeastern U.S. *Weather and Climate Extremes*, 23, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.100191>
- Shivhare, N., Dikshit, P., & Dwivedi, S. B. (2018). A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed. *Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.08.012>
- Shrestha, N., Du, X., & Wang, J. (2017). Assessing climate change impacts on fresh water resources of the Athabasca River Basin, Canada. *Science of The Total Environment*, 601, 425–440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.013>
- Sohoulande, C. (2018). Assessment of sediment inflow to a reservoir using the SWAT model under undammed conditions: A case study for the Somerville reservoir, Texas, USA. *International Soil and Water Conservation Research*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.03.003>
- Soo, E. Z. X., Jaafar, W., Chin, R. J., Ling, L., Ng, C. Y., & Prashant, S. (2022). Streamflow evaluation using IHACRES model in Kelantan river basin, Malaysia. *E3S Web of Conferences*, 347, 4008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234704008>
- Strandberg, G., Barring, L., Hansson, U., Jansson, C., Jones, C., Kjellström, E., Kolax, M., Kupiainen, M., Nikulin, G., Samuelsson, P., Ullerstig, A., & Wang, S. (2014). *CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4*.
- Taïbi, S., Meddi, M., Mahe, G., & Assani, A. (2015). Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1626-4>
- Takle, E., Jha, M., Lu, E., Arritt, R., & Gutowski, W. (2010). Streamflow in the Upper Mississippi River Basin as simulated by SWAT driven by 20th century contemporary results of global climate models and NARCCAP regional climate models. *Meteorologische Zeitschrift*, 19, 341–346. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0464>
- Taleb, R., Naimi, M., Chikhaoui, M., & Sabir, M. (2021). *Utilisation de SWAT pour la modélisation hydrologique et l'évaluation du rendement des sédiments dans le bassin versant de Nakhla, Maroc*. 9, 616–628.
- Taylor, K., Ronald, S., & Meehl, G. (2011). An overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Tegegne, G., Kim, Y.-O., Seo, S. B., & Kim, Y. (2019). Hydrological modelling uncertainty analysis for different flow quantiles: a case study in two hydro-geographically different watersheds. *Hydrological Sciences Journal/Journal Des Sciences Hydrologiques*, 64, 476–489. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1587562>

- Touazi, M., & Laborde, J. (2004). Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du nord. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 17(4), 503–516.
<https://doi.org/https://doi.org/10.7202/705546ar>
- Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., & Brou, Y. T. (2013). Remote sensing and GIS applied to the mapping of soil loss by erosion in the Wadi Mina catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1542–1558.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>
- Tramblay, Y., El Adlouni, S., & Servat, E. (2013). Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 3235–3248.
<https://doi.org/10.5194/nhess-13-3235-2013>
- UN-Water. (2008). *Rapport de situation sur les plans de gestion intégrée des ressources en eau et d'efficacité de l'eau à la CDD 16*.
- Undén, P., Rontu, L., Järvinen, H., Lynch, P., Calvo-Sanchez, J., Cats, G., Cuxart, J., Eerola, K., Fortelius, C., & García-Moya, J. (2002). *HIRLAM-5 scientific documentation*.
- 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. *Journal of Hydrology*, 324(1), 10–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008>
- Van Liew, W. M., L., V. T., D., B. D., & G., A. J. (2007). Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(2), 173–189. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:2\(173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(173))
- Vélez, J. J., Puricelli, M., López Unzu, F., & Francés, F. (2009). Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 229–246. <https://doi.org/10.5194/hess-13-229-2009>
- Vilaysane, B., Takara, K., Luo, P., Akkharath, I., & Duan, W. (2015). Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 380–390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.047>
- Villeneuve, J.-P., Duchesne, S., Fortin, J. P., & Rousseau, A. N. (2008). De l'hydrologie du bassin à la gestion intégrée par bassin versant. *IAHS-AISH Publication*, 1–39.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132556483>
- Villeneuve, J.-P., Hubert, P., Mailhot, A., & Rousseau, A. (1998). La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. *Revue Des Sciences de l'eau*, 19–39.
- W. Gassman, P., R. Reyes, M., H. Green, C., & G. Arnold, J. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.23637>

- Waha, K., Krummenauer, L., Adams, S., Marcia, P., Alexander, R., & Adams, S. (2017). *Climate change impacts in the Middle East and Northern Africa (MENA) region and their implications for vulnerable population groups*. 1623–1638. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1144-2>
- Wang, R., Yuan, Y., Yen, H., Grieneisen, M., Arnold, J., Wang, D., Wang, C., & Zhang, M. (2019). A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns. *Science of The Total Environment*, 669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.141>
- Wen, K., Gao, B., & Li, M. (2021). Quantifying the Impact of Future Climate Change on Runoff in the Amur River Basin Using a Distributed Hydrological Model and CMIP6 GCM Projections. *Atmosphere*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/atmos12121560>
- Williams, J. R. (1974). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor¹. *ARS-S.*, 40–49, 244.
- Williams, J. R. (1990). The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) Model: A Case History. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 329(1255), 421–428. <http://www.jstor.org/stable/76847>
- Wischmeier, W. ., & Smith, D. . (1960). A Universal Soil Loss Estimation Equation to Guide Conservation Farm Planning. *7th Inter. Cong. Soil Sci*, 418–425.
- Wu, Y., Shi, X., Li, C., Zhao, S., Pen, F., & Green, T. (2017). Simulation of Hydrology and Nutrient Transport in the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, China. *Water*, 9, 169. <https://doi.org/10.3390/w9030169>
- Yang, S., Xu, Z., & Kong, K. (2013). The Flow Simulation Based on SWAT Model in Wohushan Reservoir Basin. *Applied Mechanics and Materials*, 353–356, 2637–2640. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.2637>
- Yang, X. (1993). *Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie -débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel*. Thèse de Doctorat, ENPC (Paris), Cemagref (Antony).
- Yu, C.-H., & McCarl, B. (2018). The Water Implications of Greenhouse Gas Mitigation: Effects on Land Use, Land Use Change, and Forestry. *Sustainability*, 10, 2367. <https://doi.org/10.3390/su10072367>
- Yu, D., Xie, P., Dong, X., Hu, X., Liu, J., Li, Y., Peng, T., Ma, H., Wang, K., & Xu, S. (2018). Improvement of the SWAT model for event-based flood simulation on a sub-daily timescale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 5001–5019. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5001-2018>
- Yuan, Y., & Koropecj-Cox, L. (2022). SWAT model application for evaluating agricultural conservation practice effectiveness in reducing phosphorous loss from the Western Lake Erie Basin. *Journal of Environmental Management*, 302, 114000. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114000>
- Zaibak, I., & Meddi, M. (2022). Simulating streamflow in the Cheliff basin of west northern Algeria using the SWAT model. *Journal of Earth System Science*, 131(1), 25. <https://doi.org/10.1007/s12040-021-01777-x>

- Zakaria, K., Bouchelkia, H., Benmansour, A., & Belarbi, F. (2019). Hydrological modeling using the SWAT model based on two types of data from the watershed of Beni Haroun dam, Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 43, 76–89. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0065>
- Zang, C., & Mao, G. (2019). A Spatial and Temporal Study of the Green and Blue Water Flow Distribution in Typical Ecosystems and its Ecosystem Services Function in an Arid Basin. In *Water* (Vol. 11, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/w11010097>
- Zeroual, A., Assani, A. A., & Meddi, M. (2016). Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972–2013 period. *Hydrology Research*, 48(2), 584–595. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.244>
- Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, M., & Alkama, R. (2019). Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. *Climate Dynamics*, 52(1), 227–243. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0>
- Zettam, A., Briak, H., Kebede, F., Ouallali, A., Hallouz, F., & Amina, T. (2021). Efficiencies of best management practices in reducing nitrate pollution of the Sebdou River, a semi-arid Mediterranean agricultural catchment (North Africa). *River Research and Applications*, 38. <https://doi.org/10.1002/rra.3924>
- Zettam, A., Taleb, A., Sauvage, S., Boithias, L., Belaidi, N., & Sánchez-Pérez, J. M. (2017). Modelling Hydrology and Sediment Transport in a Semi-Arid and Anthropized Catchment Using the SWAT Model: The Case of the Tafna River (Northwest Algeria). In *Water* (Vol. 9, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/w9030216>
- Zhang, L., Xue, B., Yan, Y., Wang, G., Sun, W., Li, Z., Yu, J., Xie, G., & Shi, H. (2019). Model Uncertainty Analysis Methods for Semi-Arid Watersheds with Different Characteristics: A Comparative SWAT Case Study. In *Water* (Vol. 11, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/w11061177>
- Zhang, Z., Montas, H., Shirmohammadi, A., Leisnham, P., & Negahban-Azar, M. (2023). Impacts of Land Cover Change on the Spatial Distribution of Nonpoint Source Pollution Based on SWAT Model. *Water*, 15, 1174. <https://doi.org/10.3390/w15061174>.

Annexes

Annexe A

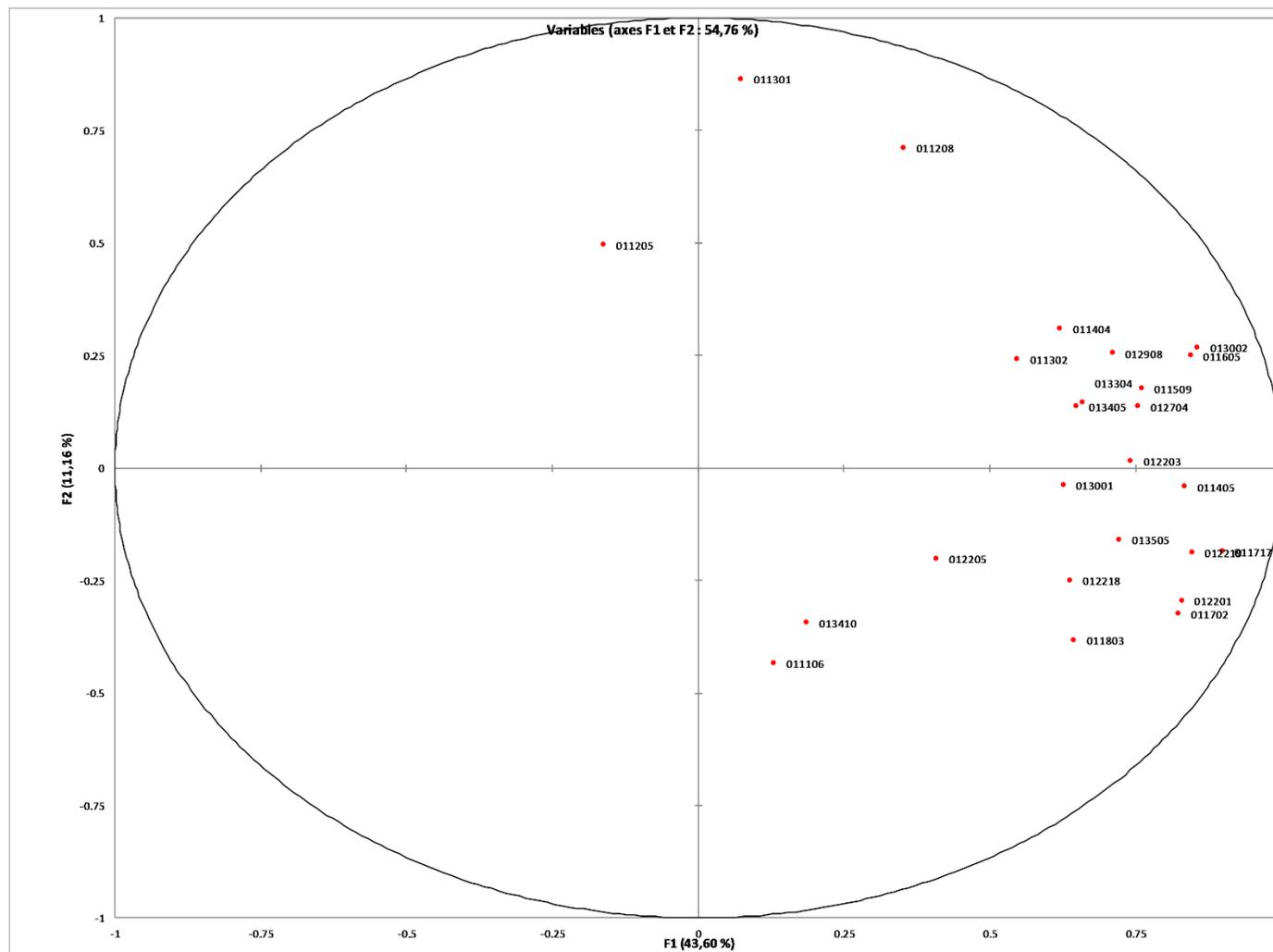


Figure A 1 | Cercle des corrélations des stations pluviométrique

Annexe B

Tableau. B 1/ Variation des précipitations prédites (2021-2040) et (2041-2060) par rapport à la période de référence 1974-1993

	IPSL-RCP45		IPSL-RCP85		ECEARTH-RCP45		ECEARTH-RCP85		HadGemS2-RCP45		HadGemS2-RCP85		Moy RCP4.5	Moy RCP8.5
	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060		
SMBT	- 39 %	- 43 %	- 20 %	- 26 %	- 6 %	- 10 %	- 9 %	- 9 %	- 9 %	- 17 %	- 13 %	- 19 %	- 21%	-16%
Harreza	- 7 %	- 15 %	- 21 %	- 25 %	- 12 %	- 13 %	- 10 %	- 11 %	- 16 %	- 12 %	- 8 %	- 11 %	- 13%	- 14%
Gargar	- 16 %	- 16 %	- 25 %	- 28 %	- 4 %	- 9 %	- 2 %	- 5 %	-5 %	10 %	- 15 %	- 21 %	-10%	- 16%
Bakhadda	- 15 %	- 20 %	- 21 %	- 27 %	8 %	- 9 %	- 1 %	- 2 %	- 13%	- 13 %	- 19 %	- 21 %	-13%	- 15%
SMBA	- 12 %	- 17 %	- 19 %	- 21 %	8 %	- 9 %	- 4 %	- 8 %	- 11 %	- 21 %	- 15 %	- 24 %	-13%	-15%
Moyenne	- 18 %	- 22%	- 21 %	- 25 %	- 8 %	- 10 %	- 5 %	- 7 %	- 11 %	- 15 %	- 14 %	- 19 %	-14%	- 15%

Tableau B. 2 / Variation des températures prédites (2021-2040) et (2041-2060) par rapport à la période de référence 1974-1993

	IPSL-RCP45		IPSL-RCP85		ECEARTH-RCP45		ECEARTH-RCP85		HadGemS2-RCP45		HadGemS2-RCP85		Moy RCP4.5	Moy RCP8.5
	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060		
SMBT	+ 10 %	+ 14 %	+11 %	+ 19 %	+ 7%	+ 10 %	+ 7 %	+ 13 %	+ 9 %	+ 13 %	+ 8 %	+ 15 %	+11%	+12%
Harreza	+10 %	+14 %	+11 %	+19 %	+8 %	+10%	+7%	+12 %	+ 10 %	+ 13 %	+7 %	+14 %	+11%	+12%
Gargar	+9 %	+12 %	+10 %	+16 %	+6%	+9 %	+ 6 %	+11 %	+8 %	+11 %	+7 %	+13 %	+9%	+11%
Bakhadda	+13 %	+17 %	+13 %	+22 %	+ 9 %	+ 12 %	+ 8 %	+ 15 %	+ 11 %	+15 %	+9 %	+17 %	+13%	+14%
SMBA	+ 12 %	+ 17 %	+ 14 %	+ 22 %	+9 %	+12 %	+7 %	+14 %	+ 11 %	+ 15 %	+ 9 %	+ 17 %	+13	+14%
Moyenne	+ 11%	+15%	+12%	+20%	+8%	+11%	+7%	+13%	+10%	+13%	+8%	+15%	+11%	+13%