جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم والتقنيات فاس
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FÈS

N° d'ordre : 81/2022

Centre des Etudes Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales
Formation Doctorale : Sciences et Génie de la Matière, de la Terre et de la Vie
Discipline : Géologie
Spécialité : Hydrologie et modélisation
Laboratoire : Ecologie Fonctionnelle et Génie de l'Environnement

Thèse pour l'obtention de DOCTORAT

Apport de la modélisation hydrologique spatiale à l'étude des ressources en eau d'un bassin versant au Nord-Ouest du Maroc dans un contexte de climat semi-aride

(Cas du bassin versant d'Oued Beht)

Préparée par : Mlle Fatima DAIDE

Soutenue le 31/12/2022 devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Fatima EL HAMMICHI	PES	Faculté polydisciplinaire de Taza	Présidente
Mohamed HILALI	PES	Faculté des Sciences de Meknès	Rapporteur
El Mostafa MILI	PES	Faculté des Sciences de Meknès	Rapporteur
Hassan TABYAOUI	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Rapporteur
Mohamed BENABDELHADI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examinateur
Lahcen BENAABIDATE	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examinateur
Alae-Eddine BARKAOUI	PH	Ecole Supérieure de Technologie d'Oujda	Examinateur
Abderrahim LAHRACH	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Directeurs de thèse
Abdel-Ali CHAOUNI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	

جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES
كلية العلوم والتقنيات فاس
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FÈS

Résumé de la thèse

La présente étude a pour objectif de développer un modèle hydrologique du bassin versant de l'Oued Beht situé au Nord-Ouest du Maroc et couvrant une superficie de 4560km2, en appliquant deux types de modélisation événementielle par le modèle HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) et une modélisation continue par le modèle agro-hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Les deux modèles ont prouvé leur capacité à simuler et reproduire le comportement hydrologique du bassin versant et ont donné des résultats qui ont révélé que les modèles sont valides et peuvent être régionalisés à d'autres bassins versants similaires d'un point de vue climatique et morphologique.

La modélisation du bassin versant par HEC-HMS a nécessité en premier temps à la préparation d'une base de données qui est une étape très importante dans l'élaboration du modèle, ainsi des données des événements sélectionnés au pas de temps journalier. Les résultats ont montré qu'il y a une différence entre les débits de pointe observés et simulés et le volume total avant l'optimisation. Ensuite, une calibration du modèle avec une méthode d'optimisation et une analyse de sensibilité a été effectuée ; l'abstraction initiale (Ia) suivie par le curve number (CN) étaient les paramètres les plus sensibles. Pour la calibration, la moyenne des débits de pointe de tous les 4 évènements après optimisation (394.75m3/s), sont très comparables aux données observées (404.25m3/s), ainsi que la moyenne du volume total (21.59mm, 20.76mm). Pour la validation, la moyenne des débits de pointe et de volume simulés est similaire à ceux observés avec des valeurs respectivement de (202.3m3/s, 184.5m3/s) et (12.95mm,13.67mm). La comparaison des hydrogrammes observés et simulés et la performance du modèle en se basant sur les différents critères d'évaluations (ERQ%=9.6, ERV%=1.69%, NSE=0.63, R2=0.87 et RSR=0.36) ont montré une bonne simulation et le modèle était capable de reproduire la réalité des débits observés à l'exutoire du bassin versant.

La modélisation par le modèle SWAT, quant à elle, a nécessité une longue période pour la préparation d'une large base de données spatiales, avec des données climatiques sur un pas de temps journalier. Le modèle a été exécuté sur une période de 17 ans, avec deux années de réchauffement (warm-up) (1998-1999) qui est recommandée afin d'optimiser le calage, avec la période de calibration de Jan. 2000 à Déc. 2007 et la période de validation de Jan. 2008 à Juil. 2014. L'analyse de sensibilité a permis de classer les paramètres sensibles du modèle en fonction de leur influence, dont les plus sensibles sont CN2, GW_DELAY, ESCO, EPCO, GWREVAP, GWQMN, ALPHA BF, SOL_AWC, REVAPMN, la plupart de ces paramètres sont liés aux eaux souterraines. Les sorties du modèle sont produites à un pas de temps journalier et mensuel ; les deux ont montré une performance satisfaisante pour la période de calibration ainsi de validation, en termes de critères statistiques (NSE, R2, et RSR), malgré les nombreuses limitations et contraintes rencontrées dans cette étude.

Le modèle SWAT a permis aussi de générer le bilan hydrologique et d'identifier la part de chaque processus sur le bassin versant de Beht, avec une prédominance de l'évapotranspiration (183.35mm), qui est caractéristique des conditions semi-arides, et ainsi d'estimer les apports en eau au barrage El Kansera, qui révèle une bonne performance du modèle et une bonne corrélation (R2=0.86) entre les apports simulés 3340Mm3 et ceux observés 4629Mm3.

Les débits simulés par le modèle SWAT, ont permis ainsi d'évaluer le degré d'altération, les impacts des différents changements sur le régime hydrologique et les composantes en débit environnemental qui est considéré comme l'un des indicateurs essentiels de la qualité des écosystèmes aquatiques, par l'utilisation du modèle IHA (Indicateurs d'Altération Hydrologiques). Cette analyse IHA a révélé une forte altération positive des différents paramètres analysés et est considérée comme une étape préliminaire dans une étude écologique complète, pour l'estimation des débits environnementaux nécessaires pour la préservation et la conservation du système éco-hydrologique.

Mots clés :
Modélisation hydrologique, HEC-HMS, SWAT, Oued Beht, modélisation évènementielle et continue, IHA, débit environnemental, éco-hydrologie.

Abstract

The present study aims at developing a hydrological model of the Beht watershed located in the North-West of Morocco and covering an area of 4560km2, by using two types of modeling: event-based modeling by the HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) model and continuous modeling by the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) agro-hydrological model. Both models proved their ability to simulate and reproduce the hydrological behavior of the watershed and provided results that revealed that the models are valid and can be regionalized to other climatically and morphologically similar watersheds.

The modeling of the watershed by HEC-HMS firstly required the preparation of a database which is a very important step in the development of the model, as well as the selected events data at daily time step. The results showed that there is a difference between the observed and simulated peak flows and the total volume before optimization. Then, a calibration of the model with an optimization method and a sensitivity analysis was performed; the initial abstraction (Ia) followed by the curve number (CN) were the most sensitive parameters. The peak discharge and total volume of all events after optimization were found to be very comparable to the observed data. During the calibration, the mean peak flows of all 4 events after optimization (394.75m3/s), are very comparable to the observed data (404.25m3/s), as well as the mean total volume (21.59mm, 20.76mm). For the validation, the mean simulated peak and volume flows are similar to those observed with values of (202.3m3/s, 184.5m3/s) and (12.95mm,13.67mm) respectively. The comparison of the observed and simulated hydrographs and the performance of the model based on the different evaluation criteria (REP%=9.6, REV%=1.69%, NSE=0.63, R2=0.87 and RSR=0.36) showed a good simulation and the model was able to reproduce the reality of the observed flows at the watershed outlet.

The SWAT modeling, on the other hand, required a long period for the preparation of a large spatial database, with climatic data on a daily time step. The model was run over a period of 17 years, with two warm-up years (1998-1999) recommended to optimize the calibration, with the calibration period from Jan. 2000 to Dec. 2010 and the validation period from Jan. 2011 to Jul. 2014. The sensitivity analysis classified the sensitive parameters for the model according to their degrees of influence, where the most sensitive are CN2, GW_DELAY, ESCO, EPCO, GWREVAP, GWQMN, ALPHA BF, SOL_AWC, REVAPMN, most of them are related to groundwater. The model outputs are produced at a daily and monthly time step; both showed satisfactory performance for the calibration period as well as validation, in terms of statistical criteria (NSE, R2, and RSR), despite the many limitations and constraints encountered in this study.

The SWAT model has also allowed to generate the water balance and to identify the contribution of each process in the Beht watershed, with a prevalence of evapotranspiration (183.35mm), which is characteristic of semi-arid regions, and therefore to estimate the water supply to El Kansera dam, showing a good performance of the model as well as a good correlation (R2=0.86) between simulated 3340Mm3 and observed water supply 4629Mm3.

The flows simulated by the SWAT model, were used to assess the degree of alteration, the impacts of the various changes on the hydrological regime and the environmental flow components, which is considered to be one of the most important indicators of the aquatic ecosystems quality, by using the IHA model (Indicators of Hydrologic Alterations). This IHA analysis showed a high positive alteration of the different parameters analyzed and is considered as a first step in a more detailed study to estimate the required environmental flows in order to preserve and conserve the eco-hydrological system.

Keywords :

Hydrological modeling, HEC-HMS, SWAT, Oued Beht, event and continuous modeling, IHA, environmental flow, eco-hydrology.

Dédicace

Je dédie cette thèse

A mes très chers parents

Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait refléter adéquatement ma gratitude et mon amour pour vous. Vous m'avez appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais exprimer ma gratitude pour votre amour, votre compréhension et votre compassion... Vos encouragements et votre soutien ont été une lumière qui m'a guidé tout au long de mon parcours. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que vous avez déployé pour mon éducation et ma formation.

A mes chers frères Hamza et Aymane

A tous les moments passés d'enfance avec vous. Vous m'avez soutenu, encouragé et supporté tout au long de mes années d'études. Que ce travail soit l'expression de mon estime pour vous et que Dieu vous accorde santé, succès et de joie dans votre vie.

A mes grands-parents maternels et paternels

Pour vos attentions particulières, vos prières et votre amour inconditionnel.

A toute ma famille

Pour leur amour, soutien et encouragements.

Remerciements

Je tiens à remercier profondément ***Monsieur Abderrahim LAHRACH***, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, et Directeur de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées (ENSA-Fès), qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses conseils judicieux. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodiguée.

Je remercie profondément ***Monsieur Abdel-Ali CHAOUNI***, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour son aide énorme et sa disponibilité, sa flexibilité, et ses précieux conseils dans la réalisation de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier ***Monsieur Lahcen BENAABIDATE***, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour sa gentillesse, son soutien, son dynamisme et son aide tout au long de mon parcours.

Je remercie également les rapporteurs ***Messieurs Mohamed HILALI, El Mostafa MILI et Hassan TABYAOUI***, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de l'évaluer, et les examinateurs ***Messieurs Mohamed BENABDELHADI, Lahcen BENAABIDATE et Alae-Eddine BARKAOUI*** pour avoir accepté d'examiner mon travail, et enfin la présidente ***Madame Fatima EL HAMMICHI*** pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

Merci aussi à tous mes professeurs du laboratoire écologie fonctionnelle et génie d'environnement, ainsi que mes collègues du laboratoire.

Les mots ne peuvent exprimer ma gratitude envers mes très chers ami(e)s et ma deuxième famille : Nabih Soumaya, Moumen Zineb, Afgane Rachida, Jalouni Abdessamad, c'est grâce à leurs encouragements, aides et avis pertinents ce travail a été amélioré. Sans oublier mes confidentes amies et sœurs de cœur : Er-Raoui Sara, Slimani Sara, Benabdejlil Soukaina, Es-sehemy Saida pour m'avoir soutenu et supporté tout au long de la réalisation de cette thèse.

Sommaire

Dédicace ..... **I**
Remerciements ..... **II**
Sommaire ..... **III**
Résumé ..... **VII**
Abstract ..... **VIII**
ملخص ..... **IX**
Liste des figures ..... **X**
Liste des tableaux ..... **XII**
Liste des abreviations ..... **XIII**
Introduction générale **1**
Chapitre I : Revue Bibliographique **5**
Introduction **5**
I. Cycle hydrologique **5**
I.1 Définition 5
I.2 Bilan hydrologique 6
II. Définitions générales **7**
II.1 Modèle hydrologique 7
II.2 Modélisation hydrologique 7
II.3 La modélisation pluie-débit 8
III. Typologie de modèles hydrologiques **9**
IV. Calage et validation du modèle hydrologique **12**
V. Critères d'évaluation **13**
VI. Débit environnemental **17**
VI.1 Définition 17
VI.2 Aperçu des méthodes de flux environnementaux 18
VI.2.1 Les méthodologies basées sur les données hydrologiques 18
VI.2.2 Méthodes d'évaluation hydraulique 19
VI.2.3 Méthodes de simulation de l'habitat 20
VI.2.4 Méthodes holistiques 20
Conclusion **21**
Chapitre II : Description des modèles utilisés **23**
Introduction **23**
I. Description du modèle HEC-HMS **23**
I.1 Le processus de fonctionnement 24
I.2 L'organisation du modèle 25
I.2.1 Le module de la structure du bassin 25
I.2.2 Le module météorologique 25
I.2.3 Le module de la fonction de production 26
I.2.4 Le module de la fonction de transfert 27
I.2.5 Le module du débit de base 28
I.2.6 Le module de routage 28
I.2.7 La fonction objective 29
I.2.8 La fonction d'optimisation automatique 29
I.3 Présentation du modèle conceptuel utilisé 30
 La fonction de production : SCS CN 30

- Fonction objective: Peak- Weighted RMS Error 33
II. Description du modèle SWAT 33
II.1 Les composantes hydrologiques du modèle SWAT 34
II.1.1 Phase terrestre 35
II.1.2 Phase du routage 38
II.2 SWAT CUP 40
II.2.1 Principe de l'analyse de sensibilité 40
II.2.2 Les types d'analyse de sensibilité 41
Conclusion 42
Chapitre III : Zone d'étude 43
Introduction 43
I. Cadre géographique 43
II. Caractéristiques physiques du bassin versant de Beht 44
II.1 Caractéristiques morpho-métriques 44
II.1.1 Surface et périmètre 44
II.1.2 Caractéristiques de forme 44
II.1.3 Le rectangle équivalent 45
II.1.4 Longueur du cours d'eau principal 45
II.2 Le relief 45
III. Aperçu géologique 49
III.1 Cadre géologique général 49
III.1.1 Maroc Central 50
III.1.2 Causse moyen atlasique 50
III.1.3 Couloir sud-rifain 51
III.2 Tectonique 51
III.3 Lithologie 52
IV. Pédologie 55
V. Occupation du sol 57
VI. Cadre Climatique 60
VI.1 Précipitations 62
VI.1.1 Précipitations annuelles 62
VI.1.2 Précipitations saisonnières 63
VI.1.3 Précipitations moyennes mensuelles 63
VI.1.4 Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières 64
VI.2 Températures 65
VI.2.1 Température moyenne mensuelle 65
VI.2.2 Digramme ombrothermique de Gaussen 66
VII. Cadre hydrologique 67
VII.1 Variations interannuelles des débits 67
VII.2 Variation interannuelle par méthode des écarts (Ec) des débits moyens annuels (Qma) au débit moyen interannuel (Qmi) 68
VII.3 Débits moyens mensuels 70
VII.4 Coefficient mensuel des débits 70
VII.5 Crues 71
VII.5.1 Historiques des crues 71
VII.5.2 Analyse fréquentielle des crues 73
Conclusion 78
Chapitre IV : Méthodologie 80

Introduction **80**
I. Application du modèle HEC-HMS sur le bassin versant de Beht **80**
I.1 Préparation des données nécessaires à la modélisation 80
I.1.1 Délimitation automatique du bassin versant 80
I.1.2 Occupation du sol 83
I.1.3 Pédologie 84
I.1.4 Estimation des paramètres d'entrées 86
I.2 Importation du modèle sous HEC-HMS 91
I.3 Simulation 92
II. Application du modèle SWAT sur le bassin versant de Beht **93**
II.1 Préparation et intégration des données d'entrée 94
II.1.1 Relief 94
II.1.2 Unité de réponse hydrologique (HRU) 95
II.1.3 Données climatiques 99
II.2 Analyse de sensibilité 99
II.3 Calibration 101
II.4 Validation 101
III. Application du modèle IHA sur bassin versant de Beht **102**
III.1 Aperçu sur le modèle IHA 102
III.2 Application du modèle 103
III.2.1 Données requises 104
Conclusion **104**
Chapitre V : Résultats et discussions **106**
Introduction **106**
I. Modélisation hydrologique par HEC-HMS **106**
I.1 Calibration 106
I.2 Validation 110
II. Modélisation hydrologique par SWAT **113**
II.1 Analyse de sensibilité 113
II.2 Calibration 115
II.3 Validation 118
II.4 Bilan hydrologique du bassin versant de Beht 121
II.4.1 Variation mensuelle du bilan hydrique 122
II.4.2 Variation interannuelle du bilan hydrologique 123
II.4.3 Variation des unités spatiales du bilan hydrologique du bassin de Beht 124
II.4.4 Estimation des apports en eau au barrage El Kansera 127
III. Evaluation du degré d'altération et des composantes en débit environnemental **128**
III.1 Les composantes IHA 128
III.1.1 Magnitude des débits mensuels 128
III.1.2 Magnitude et durée des conditions extrêmes 131
III.1.3 Timing des eaux extrêmes annuelles 133
III.1.4 Impulsions hautes et basses du débit 133
III.1.5 Taux et fréquence des modifications du débit 134
III.2 Composantes du débit environnemental, durée et timing 136
III.2.1 Composantes du débit environnemental 136
III.2.2 Durée du flux et timing des composantes du débit environnemental 137
Conclusion **139**
Conclusion gÉnÉrale **142**

Perspectives futurs 145
Références bibliographiques 146
ANNEXES 159

Résumé

La présente étude a pour objectif de développer un modèle hydrologique du bassin versant de l'Oued Beht situé au Nord-Ouest du Maroc et couvrant une superficie de 4560km2, en appliquant deux types de modélisation événementielle par le modèle HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) et une modélisation continue par le modèle agro-hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Les deux modèles ont prouvé leur capacité à simuler et reproduire le comportement hydrologique du bassin versant et ont donné des résultats qui ont révélé que les modèles sont valides et peuvent être régionalisés à d'autres bassins versants similaires d'un point de vue climatique et morphologique.

La modélisation du bassin versant par HEC-HMS a nécessité en premier temps à la préparation d'une base de données qui est une étape très importante dans l'élaboration du modèle, ainsi des données des événements sélectionnés au pas de temps journalier. Les résultats ont montré qu'il y a une différence entre les débits de pointe observés et simulés et le volume total avant l'optimisation. Ensuite, une calibration du modèle avec une méthode d'optimisation et une analyse de sensibilité a été effectuée ; l'abstraction initiale (Ia) suivie par le curve number (CN) étaient les paramètres les plus sensibles. Pour la calibration, la moyenne des débits de pointe de tous les 4 évènements après optimisation (394.75m3/s), sont très comparables aux données observées (404.25m3/s), ainsi que la moyenne du volume total (21.59mm, 20.76mm). Pour la validation, la moyenne des débits de pointe et de volume simulés est similaire à ceux observés avec des valeurs respectivement de (202.3m3/s, 184.5m3/s) et (12.95mm,13.67mm). La comparaison des hydrogrammes observés et simulés et la performance du modèle en se basant sur les différents critères d'évaluations (ERQ%=9.6, ERV%=1.69%, NSE=0.63, R2=0.87 et RSR=0.36) ont montré une bonne simulation et le modèle était capable de reproduire la réalité des débits observés à l'exutoire du bassin versant.

La modélisation par le modèle SWAT, quant à elle, a nécessité une longue période pour la préparation d'une large base de données spatiales, avec des données climatiques sur un pas de temps journalier. Le modèle a été exécuté sur une période de 17 ans, avec deux années de réchauffement (warm-up) (1998-1999), avec la période de calibration de Jan. 2000 à Déc. 2007 et la période de validation de Jan. 2008 à Juil. 2014. Les paramètres les plus sensibles en fonction de leur influence sont : CN2, GW_DELAY, ESCO, EPCO, GWREVAP, GWQMN, ALPHA BF, SOL_AWC, REVAPMN, la plupart de ces paramètres sont liés aux eaux souterraines. Les sorties du modèle sont produites à un pas de temps journalier et mensuel ; les deux ont montré une performance satisfaisante pour la période de calibration ainsi de validation, en termes de critères statistiques (NSE, R2, et RSR), malgré les nombreuses limitations et contraintes rencontrées dans cette étude.

Le modèle SWAT a permis aussi de générer le bilan hydrologique et d'identifier la part de chaque processus sur le bassin versant de Beht, avec une prédominance de l'évapotranspiration (183.35mm), qui est caractéristique des conditions semi-arides, et ainsi d'estimer les apports en eau au barrage El Kansera, qui révèle une bonne performance du modèle et une bonne corrélation (R2=0.86) entre les apports simulés 3340Mm3 et ceux observés 4629Mm3.

Les débits simulés par le modèle SWAT, ont permis ainsi d'évaluer le degré d'altération, les impacts des différents changements sur le régime hydrologique et les composantes en débit environnemental qui est considéré comme l'un des indicateurs essentiels de la qualité des écosystèmes aquatiques, par l'utilisation du modèle IHA (Indicateurs d'Altération Hydrologiques). Cette analyse IHA a révélé une forte altération positive des différents paramètres analysés et est considérée comme une étape préliminaire dans une étude écologique complète, pour l'estimation des débits environnementaux nécessaires pour la préservation et la conservation du système éco-hydrologique.

Mots clés :

Modélisation hydrologique, HEC-HMS, SWAT, Oued Beht, modélisation évènementielle et continue, IHA, débit environnemental, éco-hydrologie.

Abstract

The present study aims at developing a hydrological model of the Beht watershed located in the North-West of Morocco and covering an area of 4560km2, by using two types of modeling: event-based modeling by the HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) model and continuous modeling by the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) agro-hydrological model. Both models proved their ability to simulate and reproduce the hydrological behavior of the watershed and provided results that revealed that the models are valid and can be regionalized to other climatically and morphologically similar watersheds.

The modeling of the watershed by HEC-HMS firstly required the preparation of a database which is a very important step in the development of the model, as well as the selected events data at daily time step. The results showed that there is a difference between the observed and simulated peak flows and the total volume before optimization. Then, a calibration of the model with an optimization method and a sensitivity analysis was performed; the initial abstraction (Ia) followed by the curve number (CN) were the most sensitive parameters. The peak discharge and total volume of all events after optimization were found to be very comparable to the observed data. During the calibration, the mean peak flows of all 4 events after optimization (394.75m3/s), are very comparable to the observed data (404.25m3/s), as well as the mean total volume (21.59mm, 20.76mm). For the validation, the mean simulated peak and volume flows are similar to those observed with values of (202.3m3/s, 184.5m3/s) and (12.95mm,13.67mm) respectively. The comparison of the observed and simulated hydrographs and the performance of the model based on the different evaluation criteria (REP%=9.6, REV%=1.69%, NSE=0.63, R2=0.87 and RSR=0.36) showed a good simulation and the model was able to reproduce the reality of the observed flows at the watershed outlet.

The SWAT modeling, on the other hand, required a long period for the preparation of a large spatial database, with climatic data on a daily time step. The model was run over a period of 17 years, with two warm-up years (1998-1999), with the calibration period from Jan. 2000 to Dec. 2010 and the validation period from Jan. 2011 to Jul. 2014. The sensitivity analysis classified the sensitive parameters for the model according to their degrees of influence, where the most sensitive are CN2, GW_DELAY, ESCO, EPCO, GWREVAP, GWQMN, ALPHA BF, SOL_AWC, REVAPMN, most of them are related to groundwater. The model outputs are produced at a daily and monthly time step; both showed satisfactory performance for the calibration period as well as validation, in terms of statistical criteria (NSE, R2, and RSR), despite the many limitations and constraints encountered in this study.

The SWAT model has also allowed to generate the water balance and to identify the contribution of each process in the Beht watershed, with a prevalence of evapotranspiration (183.35mm), which is characteristic of semi-arid regions, and therefore to estimate the water supply to El Kansera dam, showing a good performance of the model as well as a good correlation (R2=0.86) between simulated 3340Mm3 and observed water supply 4629Mm3.

The flows simulated by the SWAT model, were used to assess the degree of alteration, the impacts of the various changes on the hydrological regime and the environmental flow components, which is considered to be one of the most important indicators of the aquatic ecosystems quality, by using the IHA model (Indicators of Hydrologic Alterations). This IHA analysis showed a high positive alteration of the different parameters analyzed and is considered as a first step in a more detailed study to estimate the required environmental flows in order to preserve and conserve the eco-hydrological system.

Keywords:

Hydrological modeling, HEC-HMS, SWAT, Oued Beht, event and continuous modeling, IHA, environmental flow, eco-hydrology.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تطوير نموذج هيدرولوجي لوادي بهت الواقع في شمال غرب المغرب ويغطي مساحة 4560 كيلومتر مربع، من خلال تطبيق نوعين من نمذجة الأحداث بواسطة نموذج HEC-HMS (نظام النمذجة الهيدرولوجية) والنمذجة المستمرة بواسطة النموذج الهيدرولوجي الزراعي SWAT (أداة تقييم التربة والمياه). أثبت كلا النموذجين قدرتهما على محاكاة وإعادة إنتاج السلوك الهيدرولوجي لمنطقة الدراسة وأعطيا نتائج كشفت أن النموذجين صالحان ويمكن تحويلهما على مناطق أخرى مماثلة من وجهة نظر مناخية ومورفولوجية.

تطلبت نمذجة مستجمعات المياه من قبل HEC-HMS أولا إعداد قاعدة بيانات وهي خطوة مهمة للغاية في تطوير النموذج ، بالإضافة إلى بيانات من أحداث مختارة في خطوة زمنية يومية. أظهرت النتائج أن هناك فرقا بين معدلات تدفق الذروة المرصودة والمحاكاة والحجم الكلي قبل التحسين. بعد ذلك ، تم إجراء معايرة للنموذج بطريقة التحسين وتحليل الحساسية ؛ كان التجريد الأولي (Ia) متبوعا برقم المنحنى (CN) أكثر المعلمات حساسية. بالنسبة للمعايرة ، فإن متوسط معدلات تدفق الذروة لجميع الأحداث الأربعة بعد التحسين (394. 75 م 3 / ثانية) ، يمكن مقارنته جدا بالبيانات المرصودة (404. 25 م 3 / ثانية) ، بالإضافة إلى متوسط الحجم الإجمالي (21. 59 مم ، 20. 76 مم). للتحقق من الصحة ، فإن متوسط معدلات تدفق الذروة والحجم المحاكاة مشابه لتلك التي لوحظت بقيم (202. 3 م 3 / ثانية ، 184. 5 م 3 / ث) و (12. 95 مم ، 13. 67 مم) على التوالي. أظهرت المقارنة بين الهيدروغرافات المرصودة والمحاكاة وأداء النموذج بناء على معايير التقييم المختلفة (ERQ٪ = 9. 6 ، ERV٪ = 1. 69٪ ، NSE = 0. 63 ، R2 = 0. 87 و RSR = 0. 36) محاكاة جيدة وكان النموذج قادرا على إعادة إنتاج واقع التدفقات .

من ناحية أخرى ، تتطلب نمذجة SWAT فترة طويلة من الوقت لإعداد قاعدة بيانات مكانية كبيرة ، مع بيانات المناخ في خطوة زمنية يومية. تم تشغيل النموذج على مدى 17 عاما ، مع عامين من الإحماء (1998-1999) موصى به لتحسين المعايرة ، مع فترة المعايرة من يناير 2000 إلى ديسمبر 2007 وفترة التحقق من الصحة من يناير 2008 إلى يوليو 2014. أتاح تحليل الحساسية تصنيف المعلمات الحساسة للنموذج بالترتيب وفقا لدرجات تأثيرها ، وأكثرها حساسية هي CN2 و GW_DELAY و ESCO و EPCO و GWREVAP و GWQMN و BF ALPHA و SOL_AWC و REVAPMN ، وترتبط معظم هذه المعلمات بالمياه الجوفية. يتم إنتاج مخرجات النموذج في خطوة زمنية يومية وشهرية ؛ أظهر كلاهما أداء مرضيا لفترة المعايرة والتحقق من الصحة ، من حيث المعايير الإحصائية (NSE و R2 و RSR) ، على الرغم من العديد من القيود والقيود التي تمت مواجهتها في هذه الدراسة.

أتاحت التدفقات التي تمت محاكاتها بواسطة نموذج SWAT تقييم درجة التغيير وتأثيرات التغييرات المختلفة على النظام الهيدرولوجي ومكونات التدفق البيئي ، والتي تعتبر أحد المؤشرات الأساسية لجودة النظم الإيكولوجية المائية ، باستخدام نموذج IHA (مؤشرات التغيير الهيدرولوجي). كشف تحليل IHA هذا عن تغيير إيجابي قوي في المعلمات المختلفة التي تم تحليلها ويعتبر خطوة أولية في دراسة بيئية كاملة ، لتقدير التدفقات البيئية اللازمة للحفاظ على النظام البيئي الهيدرولوجي والحفاظ عليه.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma du cycle hydrologique (Laborde, 2009) 6
Figure 2:Bilan du cycle hydrologique à l'échelle d'un système (Musy, 2005) 6
Figure 3: Les variables d'un modèle hydrologique (Gaume, 2002) 8
Figure 4: Composants d'un modèle (Singh, 1995) 9
Figure 5: Classification des modèles proposée par Singh (1995) 10
Figure 6: Classification des modèles hydrologiques (Gaume, 2002) 12
Figure 7: Les différentes composantes dans le cas d'une modélisation événementielle sous HEC-HMS (Cunderlik, 2004) 24
Figure 8: Schéma du cycle hydrologique simulé par SWAT (Neitsch et al., 2005) 34
Figure 9: Schéma du cycle hydrologique simulé par SWAT (Neitsch et al., 2005) 38
Figure 10: Relation entre l'incertitude des paramètres d'entrée et des paramètres simulés 41
Figure 11: Localisation géographique du bassin versant d'Oued Beht 44
Figure 12: Courbe hypsométrique de l'oued Beht 46
Figure 13: Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Beht 47
Figure 14: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Beht 49
Figure 15: Domaines géologiques du bassin versant du Beht (Marghich, 1989) 50
Figure 16: Carte lithologique du bassin versant (in : DREF, 2007) 54
Figure 17: Carte pédologique du bassin versant 57
Figure 18: Carte d'occupation du sol du bassin versant 60
Figure 19: Situations géographiques des stations climatiques 61
Figure 20:Variations des précipitations moyennes annuelles du bassin versant de Beht 63
Figure 21: Précipitations saisonnières du bassin versant d'oued Beht 63
Figure 22: Variations des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin d'oued Beht 64
Figure 23: Ajustement par la loi de Gumbel des Précipitations maximales journalières des stations Elkansera (a) et Ouljet Soltane (b) 65
Figure 24:Variations mensuelles des températures maximales, minimales et moyennes des stations d'Ifrane, Khemisset et El Kansera 66
Figure 25:Diagramme ombrothermique de Gaussen (Station barrage El Kansera) 67
Figure 26: Variation interannuel du débit dans la station du barrage El Kansera 68
Figure 27: Variation interannuel dans la station Ouljet Soltane 68
Figure 28: Répartition annuelle des écarts des débits dans la station du barrage El Kansera 69
Figure 29: Répartition annuelle des écarts des débits dans la station d'Ouljet Soltane 70
Figure 30:Débits moyens mensuels des stations barrage El Kansera (A) et Ouljet Soltane (B) 70
Figure 31: Répartition des coefficients moyens de débits mensuels 71
Figure 32: Hydrogrammes des crues du Beht à la station Ouljet Soltane (ABHS, 2010) 73
Figure 33: Comparaison des courbes d'ajustement 75
Figure 34: Extrait du modèle numérique de terrain présentant le relief du bassin versant de Beht 81
Figure 35: Etapes de la délimitation automatique des sous bassins 82
Figure 36: Distribution des types d'occupation du sol du bassin versant d'Oued Beht 83
Figure 37: Pédologie du bassin versant de Beht selon la classification hydrologique 86
Figure 38: Carte du Curve Number du bassin versant de Beht 88
Figure 39: Carte du Curve Number du bassin versant de Beht à l'état sec (I) et à l'état humide (III) 89
Figure 40: Schématisation du modèle final du bassin de Beht sous HEC-HMS 91
Figure 41: Carte des sous-bassins du bassin versant générée par SWAT 95
Figure 42: Carte des pentes du bassin versant d'Oued Beht 98

Figure 43: Hydrogrammes simulés et observés en période de calibration 107
Figure 44: Régression linéaire pendant la calibration 109
Figure 45: Hydrogrammes des événements de validation 111
Figure 46: Régression linéaire pendant la validation 112
Figure 47: Débits journaliers observé Vs simulé des stations ElKansera (a) Ouljet Soltane (b) Sidi El Mokhefi (c) après calibration 117
Figure 48: Débits mensuels observé Vs simulé après calibration des stations El Kansera (a) et Ouljet Soltane (b) 117
Figure 49: Débits journaliers observé Vs simulé des stations ElKansera (a) Ouljet Soltane (b) Sidi El Mokhefi (c) après validation 119
Figure 50: Débits mensuels observé Vs simulé après validation des stations El Kansera (a) et Ouljet Soltane (b) 119
Figure 51: Répartition du bilan hydrologique mensuel du bassin de Beht 123
Figure 52: Bilan hydrologique annuel du bassin de Beht généré par SWAT 123
Figure 53: Distribution de la moyenne annuelle des précipitations (a) de percolation (b) et de ruissellement (c) 126
Figure 54:Apports en eau mesurés et simulés au barrage El Kansera 127
Figure 55: Corrélation entre les apports simulés et observés 128
Figure 56: Courbe durée-débit annuelle 129
Figure 57: Pré et post-impact sur les débits mensuels 130
Figure 58: Débit mensuel des mois de Janvier (a) et Juillet (b) 131
Figure 59: Catégorisation RVA des plus grands facteurs d'altération hydrologique 133
Figure 60: Les composantes en débit environnemental du bassin de Beht (1970-2013) 137
Figure 61: durée des composantes du débit environnemental 138
Figure 62: Timing des composantes du débit environnemental 139

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les différentes conditions initiales d'humidité du sol 31
Tableau 2: Superficie des classes des altitudes 46
Tableau 3: Détails des bandes ASTER 58
Tableau 4: Les stations météorologiques implantées au niveau de la zone d'étude 61
Tableau 5: Pluies maximales journalières par période de retour aux stations Barrage El Kansera et Ouljet Soltane 64
Tableau 6: Méthodes empiriques pour le calcul des débits de pointe 73
Tableau 7: Résultats des débits de pointe par les formules empiriques 74
Tableau 8: Résultats d'ajustement aux différentes lois des Qp 75
Tableau 9:Résultats de l'ajustement des débits de crues en période de retour par la loi de Gamma 76
Tableau 10: Gradex des pluies (mm) 77
Tableau 11: Débits de pointe par la méthode du Gradex 77
Tableau 12: Résultats des débits de pointe calculés par les différentes méthodes de l'analyse fréquentielle 78
Tableau 13: Reclassification des classes d'occupation du sol 84
Tableau 14: Classes texturales des sols et leurs associations selon leur correspondance en classe hydrologique 85
Tableau 15: Tableau de correspondance entre l'utilisation des sols et le type de sol (NRCS) 87
Tableau 16: Temps de concentration et temps de lag du bassin versant de Beht 90
Tableau 17: Paramètres d'entrée du modèle 92
Tableau 18: Caractéristiques des événements utilisés pour le modèle 93
Tableau 19: Correspondance de l'occupation du sol dans le modèle SWAT 96
Tableau 20: Composants de la table attributaire 97
Tableau 21: Coordonnées des stations utilisées 99
Tableau 22: Paramètres de calage qui influent le débit 100
Tableau 23: Débits de pointe et volumes simulés et observés 108
Tableau 24: Critères d'évaluation pendant la calibration 109
Tableau 25: Débits de pointe et volumes calculés et mesurés pendant la validation 110
Tableau 26: Critères d'évaluation pendant la validation 110
Tableau 27: Classement des paramètres les plus sensibles au modèle 113
Tableau 28: Indices de performance de la phase de calibration 117
Tableau 29: Indices de performance de la phase de validation 119
Tableau 30: Les principales composantes hydrologiques simulées par le modèle SWAT 121
Tableau 31: illustre les moyennes mensuelles des composantes du bilan hydrique du bassin de Beht (2000-2014) 122
Tableau 32: Répartition du bilan hydrologique à l'échelle annuelle par sous-bassins 124
Tableau 33: Résultats des paramètres IHA 134

LISTE DES ABREVIATIONS

95PPU 95 Percent Prediction Uncertainty (Pourcentage des données encadrées par la marge d'incertitude de prédiction de 95 %)

AAT All At Time

AIC Critère d'Information d'Akaike

BIC Critère d'Information Bayésien

CD Coefficient de Dispersion

CFSR Climate Forecast System Reanalysis

CMD Coefficient Mensuel des Débits

DREF Direction Régionale des Eaux et Forets

EFC Composantes de flux Environnemental

ENVI Environment for Visualizing Images

ER Erreur Relative

ET Evapotranspiration Potentielle

GDEM-ASTER Global Digital Elevation Model -Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

HEC-HMS Hydrologic Engineering Center's – Hydrologic Modeling System

HRU Unité de Réponse Hydrologique

HU Hydrogramme Unitaire

IHA Indicateurs d'Altération Hydrologique

INRA Institut Nationale de la Recherche Agronomique

LAI Leaf Area Index

MNT Modèle Numérique de Terrain

NCEP National Centers for Environmental Prediction

NRCS Natural Resources Conservation Service

NSE Coefficient d'Efficacité de Nash-Sutcliffe

OAT Once At Time

R2 Coefficient de corrélation

RMSE Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne

RSR Ratio de l'Erreur Quadratique RMSE et Ecart type

SCS CN Soil Conservation Service Curve Number

SCS Soil Conservation Service

SIG Système d'Information Géographique

SMA Soil Moisture Accounting

SUFI-2 Sequential Uncertainty Fitting Version 2

SWAT Soil and Water Assessment Tool

TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission

USDA United States Department of Agriculture

INTRODUCTION GENERALE

Au Maroc, le changement climatique a entraîné une aggravation des phénomènes extrêmes par l'apparition de longues sécheresses suivies par des épisodes pluvieux intenses provoquant des inondations dévastatrices qui endommagent les infrastructures ainsi que les zones agricoles(IPCC, 2014; World Bank Group, 2021).

De plus, les besoins en ressources en eau sont en augmentation avec l'évolution démographique, le développement économique et le changement climatique, de ce fait, il est clair qu'il faut mettre en place toutes les mesures nécessaires afin d'assurer une gestion rationnelle et intégrée des ressources en eau (World Bank Group, 2022). Cette gestion est d'une importance capitale dans la valorisation, la mobilisation et la protection de l'eau contre les aléas climatiques et anthropiques et aussi la préservation du système aquatique des rivières. Dans cette optique, la modélisation hydrologique représente un outil indispensable dans l'évaluation de cette ressource, aussi bien dans son aspect quantitatif que qualitatif, afin de comprendre son fonctionnement hydrologique et d'évaluer son degré d'altération et ses composantes en débit environnemental qui est considéré comme l'un des indicateurs essentiels de la qualité des écosystèmes aquatiques (Sood et al., 2017).

La compréhension et la modélisation du comportement hydrologique d'un bassin versant est un défi à relever spécialement dans les pays sous-développés et/ou en cours de développements comme le Maroc, à cause de la qualité dégradée et le manque des données pluviométriques et hydrométriques fournies par les agences des bassins hydrauliques, d'une part, et la complexité des systèmes hydrologiques d'autre part. Ceci entraîne des difficultés d'étalonnage et des incertitudes importantes dans les résultats de simulation.

Cette problématique nous a amené à penser à l'étude et l'estimation des ressources en eau au niveau du bassin versant méditerranéen de l'oued Beht, qui est caractérisé par un climat semi-aride très vulnérable aux effets du changement climatique (Abdallaoui, 1998; Lakhili et al., 2015; El Gaatib, 2017). Pour bien caractériser et quantifier cette ressource, deux modèles hydrologiques (pluie-débit) ont été testés et validés, à savoir le modèle semi-distribué HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center) et le modèle spatial SWAT (Soil Water Assessment Tool) semi-distribué à base physique.

Dans ce contexte, l'objectif global de cette thèse est la modélisation du bassin versant de Beht à travers deux approches ; événementielle et continue, par les deux modèles HEC-HMS et SWAT, afin de vérifier leur applicabilité à la simulation des apports en eau du bassin. Les débits fournis par le modèle SWAT seront d'une importance capitale dans l'évaluation des différents impacts sur le régime hydrologique et des composantes en débit environnemental, en utilisant le modèle IHA.

La modélisation hydrologique évènementielle pluie-débit permet de répondre relativement aux questions qui se posent au niveau du bassin versant de Beht, dans le cadre de la gestion des ressources en eau et la prévention contre les inondations, qui connait depuis longtemps de fortes crues qui touchent principalement le Bas Beht dans la plaine du Gharb (Abdallaoui, 1998).

La sélection de la simulation du comportement du bassin versant avec le modèle HEC-HMS, est fondée sur les critères suivants : Le modèle est complet, capable de simuler à la fois les pertes, le débit de surface, l'écoulement souterrain et l'écoulement fluvial, ainsi que son adaptation à tous les types de climat et notamment au climat des régions semi-arides.

Concernant la modélisation continue par le modèle SWAT, il s'agit de la simulation sur une période longue et continue, permettant ainsi de reproduire le fonctionnement de l'hydrosystème d'une manière plus proche de la réalité, ce qui requiert toutefois un effort important pour la collecte et la préparation des données d'entrée, qui doivent être spatialement et temporellement distribuées pour représenter l'hétérogénéité spatiale du bassin versant, afin d'expliquer les variations des quantités d'eau pour une ou plusieurs années hydrologiques.

De cet objectif global, il découle un ensemble d'objectifs spécifiques qui peuvent être présentés comme suit :

- L'application du modèle HEC-HMS afin de vérifier son applicabilité dans le contexte semi-aride et de calculer le ruissellement et les débits de pointe, pour des événements de crue qu'a connu la zone d'étude.
- L'application du modèle SWAT et le test de sa performance dans ce bassin connu par son hétérogénéité spatio-temporelle.
- L'établissement du bilan hydrologique du bassin avec sa répartition spatio-temporelle
- L'estimation des apports en eau au barrage El Kansera.

- L'évaluation du degré d'altération, des impacts des différents changements sur le régime hydrologique et des composantes en débit environnemental par le modèle IHA, en utilisant les débits simulés par SWAT.

Ce rapport de thèse est constitué de cinq chapitres :

Chapitre I : Revue bibliographique

Ce chapitre présente, tout d'abord, une revue bibliographique sur la modélisation hydrologique à savoir les différentes étapes pour l'élaboration d'un modèle, ces différentes classifications, les procédures de calages et de validation des modèles et les critères d'évaluation de leurs qualités, ainsi qu'un aperçu sur les différentes méthodes d'évaluation du débit environnemental.

Chapitre II : Description des modèles utilisés

Ce chapitre est consacré à la présentation des deux modèles utilisés HEC-HMS et SWAT, en décrivant leurs processus de fonctionnement, la description de ses différentes composantes, leurs concepts de base, ainsi que les types d'analyse de sensibilité des deux modèles.

Chapitre III : Zone d'étude

Ce chapitre présente les principales caractéristiques physiques de la zone d'étude, à savoir, sa situation géographique, sa géomorphologie, son réseau hydrographique et sa géologie ainsi que l'analyse de l'occupation du sol et de type des sols. Ce chapitre est consacré aussi à l'étude climatique en analysant la variation des précipitations et de température, ensuite, la caractérisation du régime de l'écoulement du bassin versant.

Chapitre IV : Méthodologie

Ce chapitre décrit la méthodologie adoptée, à savoir, la préparation des données d'entrée pour la modélisation hydrologique par HEC-HMS. Ensuite, la démarche de génération et de préparation des données nécessaires à la modélisation du bassin, ainsi la constitution de la base de données SWAT du bassin, l'analyse de sensibilité et des incertitudes du modèle, le calage et la validation du modèle. Enfin, la collecte des données requises par le modèle IHA (Indicateurs d'altération hydrologique) pour l'évaluation du degré d'altération du régime hydrologique, de l'impact des différents changements entre les deux périodes comparées et des composantes en débit environnemental, nécessaires pour maintenir la totalité de la

biodiversité naturelle, comme première étape dans une étude détaillée future visant à proposer et à fixer des débits environnementaux appropriés pour le bassin de Beht.

Chapitre V : Résultats et discussions

Ce chapitre est consacré à la présentation de tous les résultats obtenus, leurs analyses et discussions.

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Dans de nombreux domaines, notamment la résolution des problèmes de gestion des ressources en eau, la prévision des inondations, l'aménagement de l'environnement (ponts, barrages, etc.), la prévision des catastrophes naturelles et la protection de l'écosystème aquatique, la modélisation hydrologique est devenue incontournable. D'où la nécessité de la création d'un modèle pour le calcul et l'estimation du débit au niveau du bassin versant.

Les différentes phases de la transformation des précipitations en débits, en particulier les processus impliqués dans la formation des crues et des étiages, sont à prendre en compte dans la modélisation du comportement hydrologique. Des approximations sont faites à chaque étape du processus de modélisation, depuis la perception du phénomène jusqu'à sa formalisation dans un cadre conceptuel et sa traduction dans un langage de programmation (Ambroise, 1999).

Dans ce chapitre, nous allons donner, dans un premier lieu, quelques définitions du modèle hydrologique, de la modélisation pluie-débit et ses principes, ainsi, définir les étapes pour élaborer un modèle et ces différentes classifications selon plusieurs processus, ensuite présenter les différentes procédures pour caler un modèle et le valider et enfin les critères de performances pour évaluer sa qualité. Cependant, il est utile de rappeler brièvement le cycle hydrologique, sur lequel repose toute modélisation hydrologique, tout d'abord avant de présenter cette synthèse. Ensuite, un aperçu sur les différentes méthodes d'évaluation des débits environnementaux.

I. Cycle hydrologique

I.1 Définition

Le cycle hydrologique, connu sous le nom de cycle de l'eau, est constitué de l'ensemble des processus de transformation de l'eau (Gray, 1972) (Fig.1).

Toute étude hydrologique commence par une étude du cycle hydrologique. Le mouvement de l'eau entre la terre et l'atmosphère est continu (Anctil et al., 2005) et s'appuie, selon (Musy, 2005), sur trois actions cruciales telles que le mode de déplacement de l'eau dans l'atmosphère ou sous forme liquide, sa capacité à changer d'état et son mode de stockage.

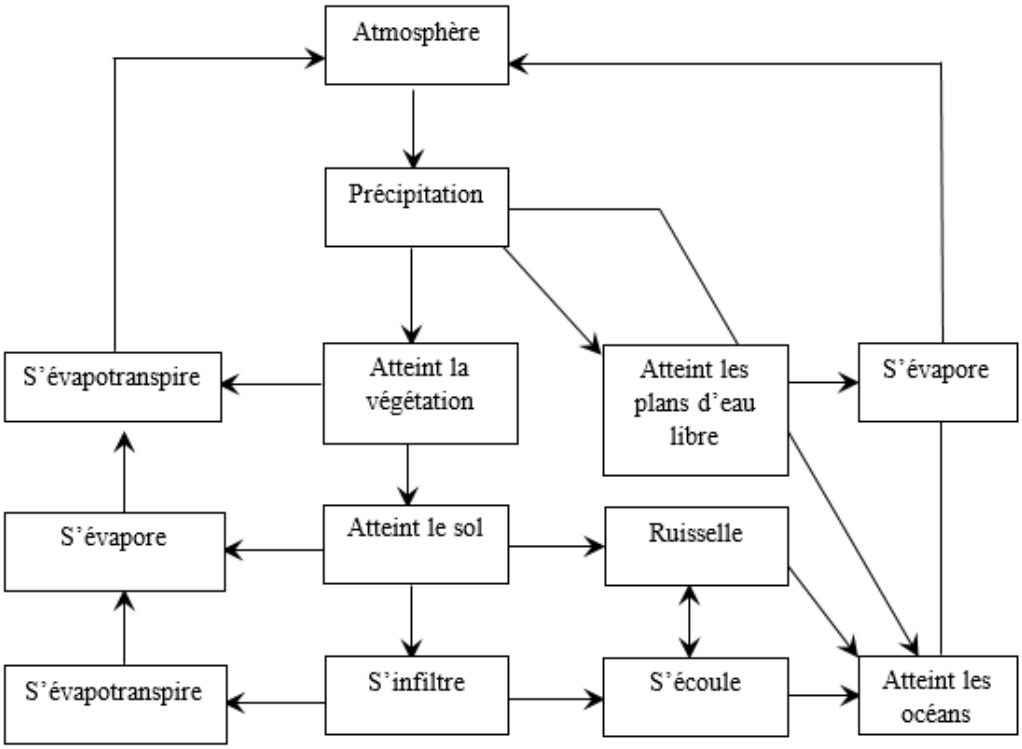


Figure 1: Schéma du cycle hydrologique (Laborde, 2009)

I.2 Bilan hydrologique

Le cycle hydrologique est lié à un espace physique (Ambroise, 1999), qui est un bassin déterminé par ses différentes caractéristiques physiques, ainsi que par les quantités d'eau qui peuvent y être stockées et transportées (Musy, 2005).

Ce bassin est représenté par des entrées (les précipitations) et des sorties (l'évaporation, la transpiration, l'infiltration …), du système équivalentes pendant une période de temps déterminée (Fig.2) (Ambroise, 1999).

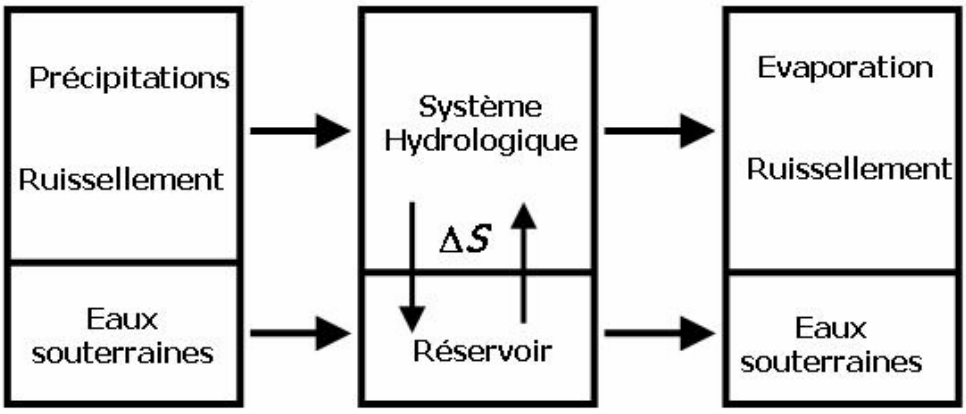


Figure 2:Bilan du cycle hydrologique à l'échelle d'un système (Musy, 2005)

Pour un bassin versant le bilan de l'eau est (Gray, 1972) :

$$P + S = R + \mathbf{I} + E + (S \pm \Delta S) \qquad \textbf{(1)}$$

- ✓ P : Précipitation (mm)
- ✓ S : Accumulation de la période précédente (mm)
- ✓ R : Ruissellement (mm)
- ✓ I : Infiltration (mm)
- ✓ E : évaporation (mm)
- ✓ $S \pm \Delta S$: Accumulation à la fin de la période (mm).

II. Définitions générales

II.1 Modèle hydrologique

Afin de bien comprendre les mécanismes qui régissent un phénomène physique, les modèles hydrologiques sont des représentations (physiques, analogiques ou mathématiques) de ce phénomène.

- Le modèle physique est une représentation de la réalité qui la reproduit plus ou moins fidèlement.
- Le modèle analogique est fondé sur les similarités qui existent entre le phénomène étudié avec un autre phénomène physique.
- Le modèle mathématique vise à relier les variables d'entrée et de sortie à l'aide de relations mathématiques, afin de comprendre les processus naturels. Les études sur les prévisions des crues, les études d'aménagement et la délimitation des zones inondables sont des domaines qui peuvent utiliser ce type de modèle.

II.2 Modélisation hydrologique

Le cycle hydrologique est représenté plus simplement par la modélisation hydrologique (Marchandise, 2007). Une série d'équations mathématiques est utilisée pour représenter le système à travers cette représentation. Pour réduire la précision liée aux hypothèses simplificatrices de la modélisation, le modélisateur inclut souvent les composantes qui lui semblent significatives. D'après (Gaume, 2002), chaque modèle comporte une ou plusieurs des quatre catégories de variables suivantes, à savoir les variables d'entrées (précipitation, évapotranspiration, température, humidité relative…), les variables de sorties (débits, concentration en nutriments, teneurs en polluants …), les variables d'état (quantité et niveau d'eau dans les réservoirs des bassins versants, pentes, profondeurs des nappes et des sols…). En plus de ces variables, des paramètres de calage sont également à prendre ne compte.

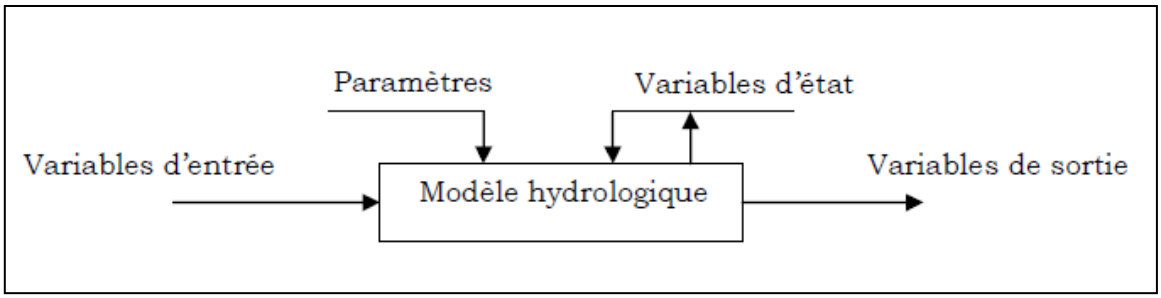


Figure 3: Les variables d'un modèle hydrologique (Gaume, 2002)

Les variables précitées sont intégrées dans la modélisation hydrologique par le biais de deux fonctions :

- *La fonction de production :* est une représentation simple mais réaliste, des différentes voies que l'eau de pluie parcourt avant d'atteindre le cours d'eau (Morin, 1991), elle permet d'estimer le volume d'eau qui s'écoulera d'un bassin versant jusqu'à son exutoire.
- *La fonction de transfert :* est le mécanisme de transfert de la quantité d'eau définie par la fonction de production vers le cours d'eau. En simulant l'hydrogramme de la crue à l'exutoire, elle permet de transformer la pluie nette en hydrogramme à l'exutoire du bassin versant.

II.3 La modélisation pluie-débit

Il est essentiel de convertir les données pluviométriques en données hydrométriques, du fait que les données des débits sont rarement disponibles, afin d'améliorer la gestion des ressources en eau par une compréhension plus précise des quantités d'eau disponibles. Ceci explique le grand intérêt des modèles de transformation pluie-débit reposant sur des simulations réalistes.

Les différentes composantes du cycle hydrologique sont intégrées dans la modélisation de la transformation pluie-débit dans son contexte. Pour certains types de modèles, la modélisation de chaque composante est nécessaire avant de créer le modèle final pluie-débit.

De nombreuses problématiques liées à l'eau et relatives à la gestion des ressources et des risques peuvent être résolues grâce à la modélisation pluie-débit. Michel (1989) et Refsgaard et Abbott (1996) ont récapitulé comme suit ces questions :

- Reconstitution des données en comblant les lacunes des séries historiques pour permettre un traitement statistique

- Détermination des effets de divers aménagements sur la réponse hydrologique.
- Prévision de la durée et de la fréquence des débits potentiellement extrêmes
- Prédiction de la réponse hydrologique d'un bassin versant à l'avance pour permettre la création d'un système d'alarme de type préventif

III. Typologie de modèles hydrologiques

Beaucoup d'auteurs ont abordé le sujet de la classification des modèles. Les références suivantes peuvent être citées : (Beven, 1989), (Singh, 1995), (Refsgaard, 1997), (Ambroise, 1998).

Selon (Refsgaard, 1997), les modèles hydrologiques peuvent être caractérisés comme conceptuels ou physiques en termes de description des processus physiques, et comme globaux ou distribués en termes de représentation spatiale des processus au niveau du bassin versant.

Selon Singh, (Fig.4), un modèle est défini par cinq composantes : la géométrie du système (bassin versant), les entrées dans le système, les lois de formalisations des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système ainsi que les sorties.

Singh a défini une classification des modèles hydrologiques, selon la description des processus, sur plusieurs niveaux à savoir le modèle global ou distribué, déterministe ou stochastique (Fig.5)

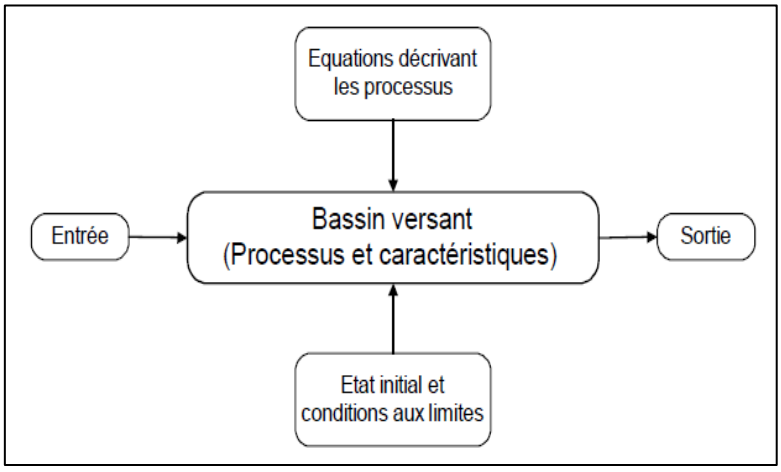


Figure 4: Composants d'un modèle (Singh, 1995)

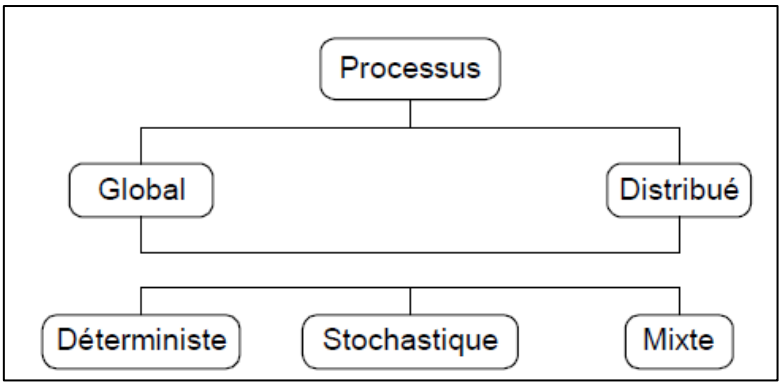


Figure 5: Classification des modèles proposée par Singh (1995)

Ces modèles donc seront classés selon différents critères et sont présentés dans la figure 6, à savoir :

a) Selon le degré d'abstraction

Modèles physiques Seules les équations de la physique sont utilisées dans ce type de modèle. Cependant, l'application de ces modèles est difficile, parfois impossible, en raison de l'importance de la variabilité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants. En particulier en ce qui concerne les types et les profondeurs de sol, la précision spatiale des données actuellement accessibles est insuffisante. Ces paramètres doivent être déterminées par calage et se transforment en paramètres plutôt qu'en données (Maison, 2000).

Modèles mathématiques : Ils utilisent des équations mathématiques qui établissent un lien entre les variables d'entrée et de sortie pour décrire le processus hydrologique.

b) Selon la nature des variables

Modèles déterministes : Si aucune des variables d'un modèle n'est traitée comme aléatoire, on dit qu'il est déterministe. En d'autres termes, lorsque la relation entre les variables d'entrée et de sortie ne tient pas compte du caractère aléatoire de la variable, la même entrée fournit toujours la même sortie, on dit alors qu'un modèle est déterministe. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes.

Modèles stochastiques (probabilistes) : Stochastique est un terme statistique qui décrit le caractère aléatoire du modèle. Afin d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions, Jensen (1992) estime que l'approche stochastique est la plus logique pour traiter la caractérisation spatiale de la variabilité. Mais cette méthode, qui apparaît comme la plus efficace pour décrire la variabilité des grandeurs, nécessite de connaître les lois de probabilité les plus répandues pour la variabilité en question (Vauclin, 1991).

c) Selon la discrétisation spatiale

Modèles globaux : Selon (Maison, 2000), un bassin versant est traité comme une entité unique et homogène, et le modèle global est appliqué globalement à l'ensemble du bassin versant. Des valeurs moyennes représentatives sont utilisées dans ce type de modèle. De nombreux modèles globaux utilisent des équations simplifiées ou des équations dérivées de raisonnements empiriques pour décrire les processus (Singh, 1995).

Les modèles globaux sont faciles à utiliser, ne nécessitent pas trop de données et sont faciles à calibrer. Pour les études de prévision des crues, ce type de modèle présente des résultats satisfaisants.

Modèles spatialisés : Par rapport aux modèles globaux, ils sont meilleurs car ils tiennent compte de l'hétérogénéité spatiale des processus et des paramètres d'entrée. Nous utilisons le terme "modèles semi-spatialisés ou semi-distribués" lorsque les composants du système ne sont pas entièrement spatialisés.

d) Selon la description des sous processus

Modèles conceptuels : La compréhension des phénomènes physiques qui affectent les entrées pour produire les sorties est la base de ce modèle (Ambroise, 1991). Afin de simplifier la représentation du concept physique du comportement du système, les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes. Ce type de modèle consiste à créer des structures empiriques destinées à reproduire les sorties du système à partir de ses variables d'entrée.

Modèles empiriques : Ils servent à simuler le comportement global du système sans en décrire les opérations fondamentales. Ils se présentent en général sous la forme d'une "boîte noire" : $débit = e\ (pluie)^f$ où e et f sont déterminées par une régression effectuée sur les mesures pluies-débits (Ambroise, 1991).

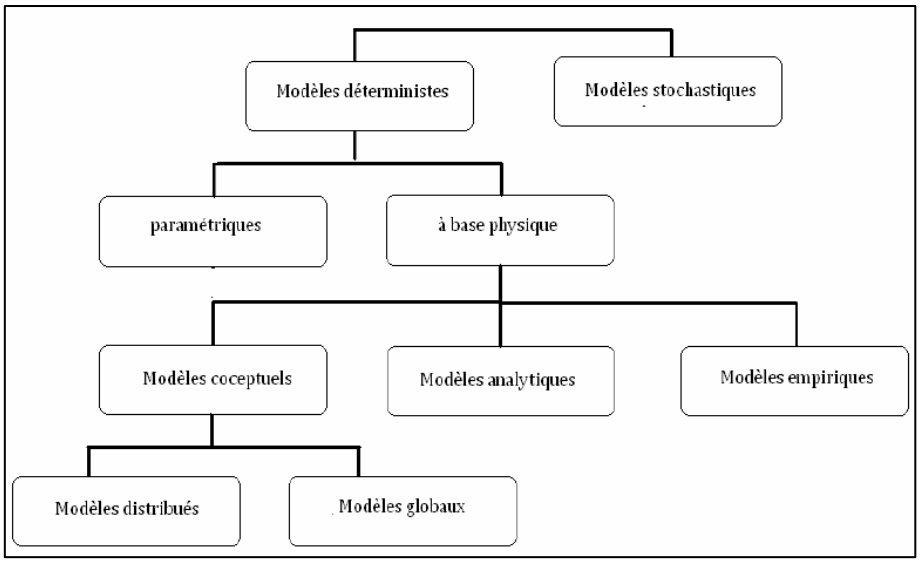


Figure 6: Classification des modèles hydrologiques (Gaume, 2002)

e) Classification selon la discrétisation temporelle

Modèles événementiels : sont conçus pour reproduire la réponse du bassin par rapport au débit durant un événement pluvieux. La capacité à déterminer l'état initial du bassin en fonction des conditions climatiques antérieures est nécessaire pour ce type de modèle, qui n'est actif qu'au moment des précipitations.

Modèles continus : permettent un suivi à long terme de l'évolution des variables d'état et de sortie (Payraudeau, 2002) et portent sur la simulation sur une longue période et d'une façon continue y compris les périodes où les précipitations ne tombent pas (Hingray et al., 2009). De ce fait, certains processus, notamment l'évapotranspiration, sont incontournables dans les modèles continus. Par conséquent, afin de décrire l'évolution des stocks d'eau dans le bassin, ces modèles ont besoin de plus de variables aux limites (telles que les précipitations, la température, le rayonnement solaire, le vent, etc.) contrairement aux modèles basés sur les événements.

IV. Calage et validation du modèle hydrologique

Le calage est une des étapes fondamentales dans la démarche de la modélisation hydrologique, en effet, pour obtenir le meilleur accord possible entre les résultats simulés et les données observées, la procédure de calage utilise une approche déterministe pour ajuster les valeurs des paramètres. Autrement dit, la calibration d'un modèle vise à déterminer les

valeurs de ces paramètres qui réduisent au minimum les erreurs de simulation, qui représentent la différence entre les valeurs observées des débits et les valeurs calculées, pour les différentes variables de sortie prises en compte. Cela peut se faire soit manuellement en réglant les paramètres du modèle et en calculant manuellement l'erreur entre les valeurs de sortie et les valeurs observées et l'échantillon de référence, soit automatiquement par une procédure d'optimisation qui recherche la valeur optimale d'un critère donné (fonction objectif) qui améliore la cohérence entre la réponse du bassin observée et simulée (Madsen, 2000). Cependant, l'utilisation de ces méthodes atteint rapidement ses limites en raison de l'existence de multiples valeurs optimales et de la forte dépendance entre les différentes valeurs des paramètres. Ce calage peut aussi se faire en déterminant manuellement l'intervalle de variation des paramètres, puis automatiquement pour trouver les valeurs de paramètres optimales.

En ce qui concerne la validation du modèle, elle permet de savoir sa capacité à simuler le présent ou le futur, en d'autres termes, elle consiste à vérifier la reproductibilité des résultats par le modèle et la représentativité des paramètres calés. Son principe est de tester le modèle sur une série de données non utilisées dans la phase de calage.

Les hydrologues utilisent principalement deux méthodes :

Une méthode classique de la validation des modèles qui consiste à sélectionner aléatoirement un groupe de données pour la calibration des paramètres et un autre pour la validation des paramètres sans modifier les valeurs de ces derniers.

Une méthode basée sur l'application d'une validation multicritères à plusieurs échelles sur l'ensemble du bassin. Elle consiste à relier les sorties du modèle à la réalité, notamment à des données non utilisées dans l'élaboration du modèle (hydrogrammes obtenus à partir de stations intermédiaires, niveaux piézométriques, etc.)

Une méthode qui applique la validation à plusieurs échelles et multi-critère à l'ensemble du bassin. Elle consiste à comparer les prédictions du modèle aux données réelles, qui n'ont pas été utilisées pour développer le modèle.

V. Critères d'évaluation

Dès les premières étapes de la modélisation hydrologique, il a été nécessaire d'évaluer les résultats des modèles et de quantifier leur efficacité pour la prédiction des débits. Dans leurs premières propositions de modèles conceptuels, Linsley et Crawford (1960) et Dawdy et

O'Donnell (1965) identifiaient déjà les résidus de leurs modèles, simplement en traçant les hydrogrammes observés et simulés ou en calculant le pourcentage de différence entre les débits observés et simulés.

A cette époque, les temps de calcul étaient une contrainte réelle et limitaient probablement le calcul des différents critères d'évaluation. Cependant, la question de l'évaluation des modèles a rapidement été identifiée comme un problème clé et Nash et Sutcliffe (1970) ont été parmi les premiers à proposer un indice d'efficacité pour évaluer les simulations hydrologiques. Leur but était de fournir une moyenne objective pour donner une note à une simulation. Rétrospectivement, cela s'est avéré être un très bon essai puisque leur indice reste le plus largement utilisé dans la modélisation hydrologique malgré ses faiblesses identifiées (Gupta et al, 2009).

Depuis lors, une grande variété de critères et d'outils d'évaluation ont été introduits dans la littérature, correspondant à divers objectifs de modélisation ou variables cibles. Ceci a conduit les chercheurs de diverses disciplines environnementales à recommander l'introduction de normes et de références communes dans l'évaluation des modèles (Rykiel, 1996 ; Seibert, 2001 ; Perrin et al., 2006 ; Moriasi et al., 2007). En réponse à ce besoin de consensus dans l'évaluation des modèles, plusieurs articles ont tenté d'établir des recommandations :

- En proposant des schémas de tests systématiques, (Klemes, 1986 ; Refsgaard et Henriksen, 2004 ; Bennett et al., 2010)
- En recommandant des critères spécifiques ou des ensembles de critères (Willmott, 1984 ; ASCE, 1993 ; Moriasi et al., 2007)
- Et en proposant des plages de valeurs de critères qui correspondent à des simulations jugées acceptables (Chiew et McMahon, 1993 ; Moriasi et al., 2007 ; Refsgaard et al., 2010).

Malgré ces efforts, l'évaluation des modèles reste un processus assez ponctuel et fortement lié aux objectifs de la modélisation, comme le soulignent plusieurs auteurs (Mayer et Butler, 1993 ; Perrin et al., 2006). Ceci rend les résultats des différentes études existantes le plus souvent très difficiles à comparer, en raison du large panel de critères existants, même lorsque les objectifs de modélisation sont similaires.

Pour quantifier les performances des modèles, il n'y a pas de critère universel d'évaluation. Le principe général est de comparer les débits calculés aux débits observés. On peut interpréter les critères en termes de qualité, de robustesse, et de fiabilité. (Miossec, 2004).

Pour satisfaire les différents objectifs, plusieurs critères d'évaluation ont été développés, qui sont soit des critères graphiques, soit des critères analytiques. Les plus utilisés en hydrologie sont :

- Le Critère de Nash-Sutcliffe

De nombreux travaux dans la littérature ont examiné le critère largement utilisé connu sous le nom de coefficient de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) : (Criss et Winston, 2008 ; Jain et Sudheer, 2008 ; Legates et McCabe, 1999 ; McCue et al., 2006 ; Moriasi et al., 2007 ; Schaefli et Gupta, 2007).

Le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) représente la proportion de la variance résiduelle entre les valeurs simulées et observées par rapport à de la variance expliquée des valeurs observées. Le coefficient NSE varie entre -∞ et 1. Un NSE de 1 indique que les données simulées sont parfaitement identiques aux données observées. Un NSE de zéro indique que les données simulées sont aussi précises que la moyenne des données observées, tandis qu'un NSE inférieur à zéro signifie que la valeur moyenne des données observées est un meilleur estimateur que les données simulées. (Bajamgnigni, 2016).

Cependant, le NSE est très sensible aux valeurs extrêmes car les différences sont prises au carré (e.g. Legates et McCabe, 1999 ; Moriasi et al., 2007). Des versions modifiées du NSE ont été proposées pour le rendre moins sensible aux valeurs élevées (Moriasi et al., 2007).

Il est donné par la formule suivante (Nash et Sutcliffe, 1970) :

$$\boldsymbol{NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Qci - Qoi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Qci - Qm)^2}} \qquad \textbf{(2)}$$

Avec :

Qm : débit moyen observé

Qci : débit calculé

Qoi : débit observé

n : nombre d'observation

- Le coefficient de corrélation R

Le coefficient de corrélation de Pearson est habituellement utilisé pour évaluer la performance des modèles hydrogéologiques et hydrologiques (Legates et McCabe, 1999). Il est obtenu en calculant la régression linéaire entre les valeurs (débits) calculées et les valeurs (débits) observées ou mesurées. Sa formulation est la suivante (Moriasi et al.2012) :

$$\mathbf{r} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})(Pi-\bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Pi-\bar{P})^2}} \qquad \textbf{(3)}$$

Tel que : "r" toujours compris entre – (1) et + (1) ainsi :

O et P sont les valeurs observées et prédites, respectivement.

- Le coefficient de détermination R^2

R2 est la valeur au carré de r, bien qu'il puisse également être exprimé comme le rapport au carré entre la covariance et les écarts types multipliés des valeurs observées et prédites (Krause et al., 2005).

$$\boldsymbol{R^2} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})(Pi-\bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Pi-\bar{P})^2}}\right]^2 \qquad \textbf{(4)}$$

O et P sont les valeurs observées et prédites, respectivement.

Plus R^2 est proche de 1, meilleure est la prédiction

- L'erreur quadratique moyenne (RMSE)

L'erreur quadratique moyenne (MSE en anglais) est généralement utilisée pour mesurer la performance de l'étape de calage pendant le développement du modèle. Plus cette erreur quadratique tend vers zéro, plus l'estimation est meilleure. C'est l'une des statistiques d'indice d'erreur les plus couramment utilisées (Chu and Shirmohammadi, 2004 ; Singh et al., 2004 ; Vasquez-Amábile et Engel, 2005).

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N}(Q_{obs}^{n} - Q_{sim}^{n})^2}{N}} \qquad \textbf{(5)}$$

N : nombre d'observation

Qobs : débit calculé

Qsim : débit observé

- Le ratio de l'erreur quadratique RMSE et Ecart type (RSR)

Bien qu'il soit communément admis que plus la RMSE est faible, meilleure est la performance du modèle, seuls Singh et al. (2004) ont publié un guide pour qualifier ce qui est considéré comme une RMSE faible sur la base de l'écart type des observations. Sur la base de la recommandation de Singh et al. (2004), une statistique d'évaluation de modèle, appelée le rapport RMSE-écart-type des observations (RSR), a été développée. Par Moriasi et al, (2007).

Le RSR normalise le RMSE en utilisant l'écart type des observations, et il combine à la fois un indice d'erreur et les informations supplémentaires recommandées par Legates et McCabe (1999). Le RSR est calculé comme le rapport de la RMSE et de l'écart type des données mesurées, comme l'indique l'équation suivante :

$$\mathbf{RSR} = \frac{\mathbf{RMSE}}{\mathbf{STDEV_{obs}}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}\right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2}\right]} \qquad \textbf{(6)}$$

Plus sa valeur est faible, plus les performances de simulation du modèle sont bonnes.

- L'erreur relative (ER)

C'est le rapport entre l'erreur absolue des données simulées et les données observées. Elle indique le décalage qui se produit entre les valeurs observées et modélisées, exprimé en termes de ratios et de pourcentages. Selon Moriasi et al. (2007) la formule est la suivante :

$$\mathbf{RE\ ou\ PE} = \left|\frac{Oi - Pi}{Oi}\right| \times 100 \qquad \textbf{(7)}$$

O et P sont les valeurs observées et prédites, respectivement.

VI. Débit environnemental

VI.1 Définition

Selon la Déclaration de Brisbane (2007), " les débits environnementaux décrivent la quantité, la qualité et la durée des flux d'eau nécessaires au maintien des écosystèmes d'eau douce et océaniques ainsi que des moyens de subsistance et du bien-être des populations qui dépendent de ces écosystèmes ".

Les débits environnementaux peuvent également être définis comme les débits à maintenir dans les rivières en gérant l'ampleur, la fréquence, la durée, le moment et le taux de changement des événements de débit (O'Keeffe, 2009).

Le besoin en débit environnemental ou débit réservé est souvent défini comme la proportion du régime d'écoulement original d'une rivière qui doit continuer à s'écouler afin de maintenir l'écosystème fluvial dans un état prescrit (par exemple, vierge, bon, satisfaisant) (Wallingford, H. R., 2003).

VI.2 Aperçu des méthodes de flux environnementaux

Il existe actuellement plus de 200 méthodes de flux environnementaux (Tharme, 2003). La majorité des méthodologies des débits environnementaux peuvent être regroupées en 4 catégories distinctes :

- Les méthodes hydrologiques
- Les méthodes d'évaluation hydraulique
- Les méthodes de simulation d'habitat
- Les méthodes holistiques

La plupart des méthodes ont été développées à l'échelle d'une rivière ou d'un bassin dans le contexte de projets de restauration de débit (Richter et al., 2006) ou pour évaluer l'état écologique des rivières au niveau régional, national ou continental (Council, 2000). Les méthodes globales sont principalement basées sur des méthodes hydrologiques en raison du manque de données écohydrologiques globales (Richter et al., 2006, Poff et Zimmerman, 2010).

VI.2.1 Les méthodologies basées sur les données hydrologiques

La plupart des méthodologies de débits environnementaux les plus simples reposent sur l'utilisation de données historiques de débit, pour formuler des recommandations de débits environnementaux. Selon cette méthode, une proportion fixe de débit, dite débit minimum (Cavendish & Duncan 1986 ; Milhous et al., 1989), représente la recommandation de débit environnemental destinée à maintenir, à un niveau acceptable, la caractéristique écologique concernée.

Il existe de nombreuses méthodologies qui s'appuient principalement ou uniquement sur des données hydrologiques pour élaborer des recommandations de débits environnementaux (Tharme (1996, 1997a, 2000) et Dunbar et al. (1998)). Parmi ces méthodologies, la méthode Tennant (ou méthode Montana) (Tennant 1976) reste actuellement la deuxième méthodologie de débit environnemental la plus utilisée (Reiser et al., 1989a).

Une autre méthodologie hydrologique courante, appliquée dans le monde entier sous sa forme générale, est l'analyse des courbes débit-durée. Cette méthode présente la relation entre le débit et le pourcentage de temps pendant lequel il est dépassé. Lorsque les enregistrements historiques de débit sont analysés sur des durées spécifiques dans l'analyse des courbes débit-durée (Gordon et al., 1992), les courbes débit-durée sont utilisées pour dériver des percentiles

de débit spécifiques (valeurs de dépassement en pourcentage) associés à des conditions de rivière appropriées requises, souvent en combinaison avec un avis de spécialistes, pour produire des recommandations de débit environnemental. (Pastor, A. V., 2013).

Il existe d'autres méthodologies plus récentes, basées principalement sur des indices hydrologiques (Richter et al., 1996, 1997), qui vise à fournir une caractérisation statistique complète des caractéristiques écologiquement pertinentes d'un régime d'écoulement. Ces indices, appelés Indicateurs d'Altération Hydrologique (IHA ; Richter et al., 1996) sont classés en cinq catégories basées sur les caractéristiques du régime : magnitude, timing, durée, fréquence et taux de changement du débit (Pastor, A. V., 2013). Cette méthode va être détaillée par la suite.

Ces méthodes sont généralement peu coûteuses et rapides, et ne nécessitent que des données historiques sur les débits. De ce fait, elles sont très appropriées au niveau de la reconnaissance du développement des ressources en eau, en fournissant des estimations simples, mais à faible résolution, des quantités d'eau à réserver pour le maintien de l'environnement. De plus, ces méthodologies sont fortement limitées par l'absence d'informations écologiques comme données d'entrée. Cela restreint leur flexibilité, leur degré de résolution et leur champ d'application par rapport à d'autres types de méthodologie, tout en les exposants à de nombreuses critiques. Ces inconvénients font que les méthodologies hydrologiques ne sont appropriées qu'au niveau de la planification, d'où l'importance de faire intervenir une expertise professionnelle (Pastor, A. V., 2013).

VI.2.2 Méthodes d'évaluation hydraulique

Les méthodes d'évaluation hydraulique mesurent les changements de diverses variables hydrauliques d'une rivière, telles que le périmètre mouillé ou la profondeur maximale, au niveau d'une section transversale précise. Cette mesure est utilisée comme substitut des facteurs d'habitat qui sont déterminants pour le milieu fluvial, afin de développer une relation entre l'habitat et le débit permettant d'établir des recommandations de débit environnemental (Loar et al., 1986).

Les méthodes d'évaluation hydraulique intègrent des informations fondées sur l'écologie concernant l'habitat physique du milieu naturel des espèces. Elles permettent une évaluation assez rapide, bien que simple, des débits nécessaires au maintien de ces zones d'habitat pour des besoins tels que la production d'invertébrés, la reproduction et le passage des poissons, mais les besoins en débit environnemental des organismes cibles ne sont déterminés que par approximation, en utilisant des variables hydrauliques comme substituts. L'emplacement de la

section transversale unique et la qualité des relations entre le débit et les paramètres hydrauliques sont essentiels aux résultats obtenus.

VI.2.3 Méthodes de simulation de l'habitat

Les méthodes de simulation de l'habitat, également appelées méthodes d'évaluation de l'habitat (Loar et al., 1986), visent à évaluer les exigences de débit environnemental sur la base des réponses biotiques au débit au niveau de l'habitat dans le cours d'eau. Dans ces méthodologies, les changements dans le microhabitat physique en fonction du débit sont modélisés selon Tharme 1996, à l'aide de données sur une ou plusieurs variables hydrauliques, le plus souvent la profondeur, la vitesse et la composition du substrat, etc. Ces données sont collectées à plusieurs sections transversales dans la zone de l'étude.

Comme les méthodologies de simulation de l'habitat sont capables d'évaluer les impacts sur l'habitat physique de changements progressifs du débit, et qu'elles ont généralement des composantes hydrologiques dynamiques et des séries chronologiques d'habitats, elles peuvent être utilisées pour examiner une variété de scénarios alternatifs de débit environnemental pour plusieurs espèces, modes de vie et/ou assemblages. Toutefois, le haut degré de complexité de la plupart des méthodologies de simulation d'habitat les rend difficiles à comprendre ou à utiliser, du fait qu'ils sont informatisés, donc le risque de mauvaise utilisation par des personnes n'ayant pas reçu de formation adéquate est considérable et il faut consacrer beaucoup de temps et d'efforts dès le départ avant d'obtenir des résultats appropriés.

VI.2.4 Méthodes holistiques

Le terme holistique fait référence aux méthodologies qui prennent en compte l'ensemble de l'écosystème fluvial. Conceptuellement, cela signifie que le besoin en débit environnemental est évalué pour toutes les composantes abiotiques et biotiques de l'écosystème fluvial, y compris les zones humides, les eaux souterraines et les estuaires associés, au lieu de se concentrer sur quelques éléments physiques et organismes.

De nombreux chercheurs en débits environnementaux considèrent qu'une approche holistique de l'évaluation des débits environnementaux est l'une des principales orientations futures des progrès de la science (Tharme 1996 ; Dunbar et al., 1998 ; Arthington 1998a). Dans une telle approche, les événements de débit sont identifiés en termes de critères tels que la magnitude et le moment du débit, pour tous les composants de l'écosystème fluvial.

Il existe actuellement au moins neuf méthodes holistiques au niveau international (Tharme 1996, 2000 ; Dunbar et al. 1998 ; Arthington 1998a), telles que :

- La méthode BBM (Building Block Methodology) décrite par Tharme & King (1998) et King & Louw (1998). En bref, elle est basée sur le concept que certains débits dans le régime hydrologique complet d'une rivière sont plus importants que d'autres pour le maintien de l'écosystème fluvial, et que ces débits peuvent être identifiés et décrits en termes de magnitude, durée, moment et fréquence. En combinaison, ces débits constituent l'Exigence en matière de débit environnemental en tant que débit modifié spécifique à une rivière, lié à un état futur prédéterminé.
- L'approche holistique (décrite dans Arthington et al. (1992), Tharme (1996) et Arthington (1998a)
- Méthodologie de la réponse en aval aux transformations de flux imposées DRIFT ((Brown et al., 2000, Brown & King 1999, 2000)).
- La méthode d'évaluation du groupe d'experts EPAM (développé par les départements de la pêche et des ressources en eau de la Nouvelle-Galles du Sud (Swales et al., 1994 ; Swales & Harris 1995)).
- La méthode d'évaluation du groupe scientifique SPAM (Thoms *et al.*, 1996).
- La méthode d'analyse de l'habitat et la procédure d'évaluation comparative de la planification de la gestion des allocations d'eau WAMP (développé par le département des ressources naturelles. (Arthington 1998a)).
- La méthodologie de restauration des flux FLOWRESM (développé en Australie, lors d'une évaluation des flux environnementaux pour la rivière Brisbane. (Arthington 1998a)).
- La méthode de la rivière « Babingley » (Petts (1996) et Petts et al. (1999)).
- Plan de gestion des flux FMP (développé en Afrique du Sud, par l'intermédiaire de l'Institut de recherche sur l'eau (IWR)).

Conclusion

Cette étude bibliographique a montré qu'il est nécessaire de bien comprendre plusieurs variables, paramètres et données parfois inaccessibles pour décrire les processus impliqués dans la réponse hydrologique d'un bassin versant. Nous pouvons déduire aussi, que la modélisation pluie-débit est l'outil nécessaire, pour l'anticipation des conséquences

hydrométriques des pluies aux exutoires des bassins versants, ainsi que pour comprendre les variations de la réponse d'un système hydrologique suite à un changement des conditions climatiques. L'importance de la modélisation hydrologique réside aussi dans l'étude des débits environnementaux et leur degré d'altération, du fait que la plupart des méthodologies les plus simples de ces débits, reposent sur l'utilisation de données observées historiques de débit, par conséquent, les débits simulés sont utilisés pour combler le manque des données éco-hydrologiques.

CHAPITRE II : DESCRIPTION DES MODELES UTILISES

Introduction

Pour une modélisation réussie, il est essentiel de comprendre et de maîtriser les fonctions du modèle et de ses composants. Dans ce sens, le présent chapitre est consacré à la présentation du modèle HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's – Hydrologic Modeling System) en abordant son processus de fonctionnement, ses modules, et ses formalismes, ainsi la présentation des concepts de base du modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool), la description de ses différentes composantes, en présentant ses différentes équations décrivant le comportement physique des différents processus du bassin versant et de son fonctionnement. Il présente aussi le principe et les types d'analyse de sensibilité qu'offre les modèles.

I. Description du modèle HEC-HMS

Le système de modélisation hydrologique HEC-HMS, qui est un logiciel de modélisation hydrologique développé par l'US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC), est un outil de modélisation intégré pour tous les processus hydrologiques des systèmes de bassins versants. Il se compose de différents processus de perte de pluie, de ruissellement direct et de routage. HEC-HMS est devenu très populaire et a été adopté dans de nombreuses études hydrologiques en raison de sa capacité à simuler le ruissellement à la fois dans les événements de courte et de longue durée, de sa simplicité à manipuler et de l'utilisation de méthodes simples (Halwatura, D et al., 2013). Les hydrogrammes développés par HEC-HMS, soit directement, soit en combinaison avec d'autres logiciels, sont utilisés pour des études sur le drainage urbain, la gestion des ressources en eau, l'impact de l'urbanisation future, la prévision des débits, la réduction des dommages causés par les inondations, la régulation des plaines inondables et l'exploitation des systèmes (USACE, 2015). Des études antérieures sur le logiciel HEC-HMS ont prouvé sa capacité à simuler et à prévoir le débit des cours d'eau à partir de différents ensembles de données et de types de bassins versants (Chu, X. et Steinman, A., 2009). La plupart de ces études ont clairement indiqué que les résultats de la simulation du modèle étaient spécifiques à l'emplacement, en ce sens que différentes combinaisons d'un ensemble de modèles contenant les méthodes de perte,

les méthodes de transformation du ruissellement et les techniques de séparation du débit de base ont donné des résultats variables (Zelelew, D.et Melesse, A., 2018).

I.1 Le processus de fonctionnement

Chaque module de HEC-HMS correspond à une étape de la transformation pluie-débit, et l'hydrogramme final est produit en combinant les résultats des modules. La figure suivante montre l'enchaînement suivi pour aboutir au débit de l'exutoire dans le cas d'une modélisation événementielle :

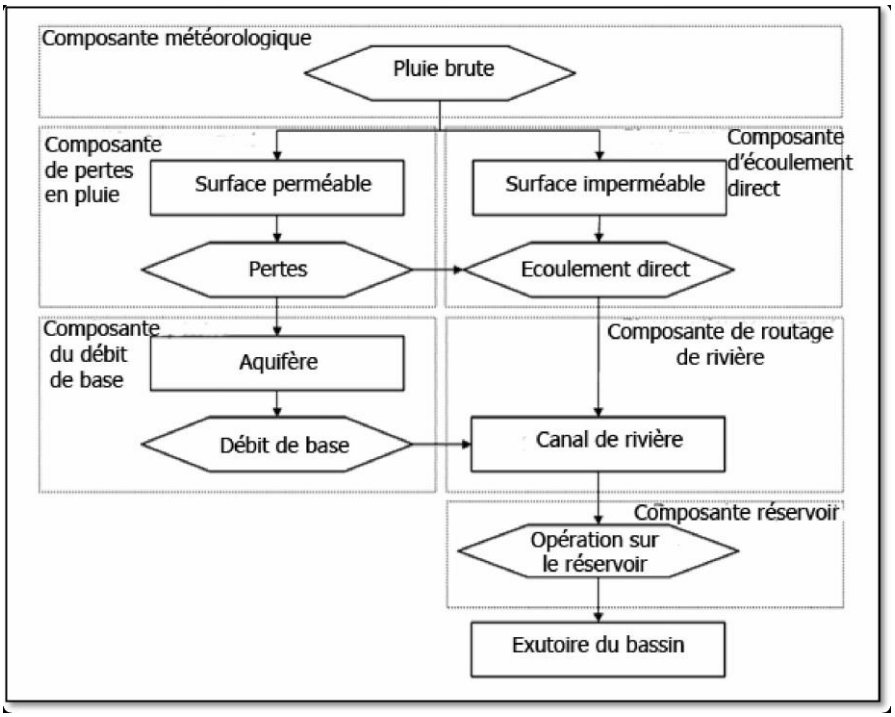


Figure 7: Les différentes composantes dans le cas d'une modélisation événementielle sous HEC-HMS (Cunderlik, 2004)

La première composante est le module météorologique, son objectif est de distribuer uniformément la hauteur des précipitations brutes qui entrent dans le bassin. Ainsi, la perméabilité de la surface affecte le comportement de ces précipitations ; En raison des pertes par interception, infiltration et évapotranspiration sur les surfaces perméables, les précipitations brutes seront réduites. L'écoulement direct et l'écoulement des eaux souterraines dans l'aquifère sont tous deux influencés par les précipitations nettes qui en résultent. Alors que sur les surfaces imperméables, les précipitations ne sont pas affectées et deviennent des écoulements superficiels.

Pour la composante du débit de base, l'écoulement de surface et l'écoulement de souterrain vont intégrer le cours d'eau, auquel vont se produire les phénomènes d'atténuation et de

translation dont la composante de routage assure le contrôle. Enfin, la composante réservoir détermine l'effet des ouvrages hydrauliques (Ahbari, 2013).

I.2 L'organisation du modèle

Le modèle doit absolument comprendre au moins quatre modules et deux fonctions qui sont des composantes essentielles de la modélisation du système HEC-HMS afin de simplifier le processus de création d'un modèle complet qui satisfait aux exigences des études de cas. Ces constituants sont classés, ci-après :

I.2.1 Le module de la structure du bassin

Il s'agit de décomposer le bassin versant en ses composantes de base et de relier chacune d'entre elles à la suivante sous la forme d'un arbre. HEC-HMS offre la possibilité de représenter toutes les entités naturelles ou artificielles installées dans un bassin qui ont un impact sur la transformation pluie-débit. Ces entités vont des sous-bassins, des exutoires, des canaux fluviaux et des canaux de dérivation de l'eau, aux réservoirs, barrages et autres structures. Ces éléments sont les suivants :

- Sous-bassins avec leurs éléments de base (la surface, les fonctions de production et de transfert associées)
- L'élément rivière avec sa fonction de routage.
- Les réservoirs, les retenues de barrage, …etc.
- L'élément Source pour ajouter les stations de mesure de débit.
- Les jonctions, comme à la confluence de deux rivières, qui combinent au moins deux débits transportés par deux éléments.
- L'exutoire des sous bassins versants.

I.2.2 Le module météorologique

Le facteur le plus important à prendre en compte lors de la modélisation hydrologique d'un bassin versant est la précipitation. Selon les objectifs et la disponibilité des données, HEC-HMS propose huit méthodes différentes :

- L'hyétogramme spécifié, cette méthode permet de traiter ces propres données saisies par l''utilisateur et de fournir un hyétogramme que le programme peut utiliser.
- La méthode de pondération inverse, qui comprend des procédures permettant d'utiliser automatiquement les données des stations disponibles les plus proches, mais de passer à des stations plus éloignées si des données manquent.

- Les précipitations en maille, a pour fonction de présenter les précipitations sous forme de grille de mesure. L'utilisation la plus courante des précipitations maillées est de loin celle des données recueillies par les radars météorologiques.
- L’averse de fréquence, son objectif est de définir un événement pour lequel les hauteurs de précipitation pour diverses durées au sein de l’averse ont une probabilité de dépassement constante.
- L’averse de projet standard, correspond à une relation entre les précipitations et le temps qui est censée être raisonnablement caractéristique des grands orages qui se sont produits ou pourraient se produire dans la zone concernée.
- Les stations pondérées, calcule la moyenne surfacique des précipitations puis détermine un coefficient de pondération au niveau de chaque station de mesure.
- L’averse SCS, est souvent effectuée en utilisant des averses hypothétiques développés par le Natural Resources Conservation Service (NRCS).

I.2.3 Le module de la fonction de production

La fonction de production permet de transformer les précipitations brutes en précipitations nettes en y soustrayant ces pertes (interceptés, infiltrés ou évaporés).

Les surfaces du bassin versant sont partagées en surfaces imperméables et directement connectées où l'écoulement est direct, et en surfaces perméables soumises à des pertes décrites par les différents formalismes suivants (USACE, 2010) :

- Modèle à déficit et à taux de perte constant, utilise une seule couche pour représenter le sol. Les précipitations pénètrent dans la couche pendant les averses. L'évapotranspiration retire l'eau de la couche entre les averses. Les précipitations qui dépassent la capacité de la couche à retenir l'eau deviennent un ruissellement direct. Ce modèle peut être utilisé pour une simulation continue.
- Modèle Green and Ampt, est un modèle conceptuel d'infiltration des précipitations dans un bassin versant, fondé sur la loi de Darcy et la conservation de la masse.
- Modèle à pertes initiales, à taux constant, son principe est que le taux potentiel maximal de perte de précipitations est constant tout au long d'un événement.
- Modèle Soil Moisture Accounting, formalisme qui simule le mouvement de l'eau et son stockage sur la végétation, à la surface du sol, dans le profil du sol et dans les couches d'eau souterraine. Compte tenu des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ET), le modèle calcule le ruissellement de surface du bassin, l'écoulement

des eaux souterraines, les pertes dues à l'ET et la percolation profonde sur l'ensemble du bassin.

- Modèle SCS CN basé sur Curve Number, estime l'excès de précipitations en fonction des précipitations cumulées, de la couverture du sol, de son occupation et de l'humidité antécédente.

I.2.4 Le module de la fonction de transfert

Il s'agit du processus de transformer l'excès de précipitation pour chaque sous-bassins en ruissellement direct à son exutoire. HEC-HMS propose différents méthodes (USACE, 2010) :

- Le modèle de l'hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur, un modèle empirique bien connu et couramment utilisé de la relation entre le ruissellement direct et l'excès de précipitations et qui consiste en la détermination de l'hydrogramme à partir des données complètes relatives à un événement pluvieux.
- Le modèle de l'hydrogramme unitaire de Snyder. Il fournit des relations pour estimer les paramètres de l'HU à partir des caractéristiques du bassin versant. Les caractéristiques critiques de ce modèle sont : le décalage entre le maximum de l'excès de précipitations et le pic de l'HU, le débit de pointe et la base de temps totale.
- Le modèle de l'hydrogramme unitaire de la SCS, est basé sur les moyennes d'HU dérivées des précipitations et du ruissellement mesurés de divers bassins.
- Le modèle de l'hydrogramme unitaire de Clark. Il dérive un HU de bassin versant en représentant explicitement deux processus critiques dans la transformation de l'excès de précipitation en ruissellement : La translation ou le déplacement de l'excès depuis son origine jusqu'à l'exutoire du bassin versant, l'atténuation ou la réduction de l'ampleur du débit à mesure que l'excès est stocké dans le bassin.
- Le modèle Clark modifié. Il s'agit du même type de modèle que celui de Clark, sauf qu'il utilise un maillage de bassin versant qui permet une meilleure modélisation des temps de parcours.
- Le modèle de l'onde cinématique est conçu principalement pour représenter les zones urbaines, bien qu'il puisse également être utilisé pour les régions non bâties. Le modèle peut également être utilisé pour simuler le comportement de l'écoulement dans les canaux du bassin versant.

I.2.5 Le module du débit de base

Il s'agit de l'un des modules complémentaires du modèle, qui nous permet de mieux comprendre les processus qui régulent le ruissellement dans le bassin d'étude (USACE, 2010). La connaissance du débit de base est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme avant et après la pointe de débit et permettre une meilleure estimation du volume de la crue. Trois modèles d'écoulement souterrain sont fournis par le logiciel :

- Le modèle constant mensuel, il s'agit du modèle de débit de base le plus simple inclus dans le programme. Il représente le débit de base comme un débit constant, qui peut varier mensuellement. Ce débit spécifié par l'utilisateur est ajouté au ruissellement direct calculé à partir des précipitations pour chaque pas de temps de la simulation. Afin d'utiliser ce modèle, la valeur de ces écoulements souterrains en temps normal doit être connue à partir de mesures sur le terrain.
- Le modèle à récession exponentielle du débit de base, est souvent utilisé pour expliquer le drainage du stockage naturel dans un bassin versant. Il définit la relation entre le débit de base à tout moment t, par rapport à une valeur initiale.
- Le modèle à réservoir linéaire. Il compare le stockage et le mouvement de l'eau souterraine aux stockages et aux mouvements de l'eau dans un réservoir. Il est souvent utilisé avec le modèle type SMA.

I.2.6 Le module de routage

Chacun de ces modèles calcule un hydrogramme en aval, étant donné un hydrogramme en amont comme condition limite. Pour ce faire, ils résolvent les équations de continuité et de quantité de mouvement (USACE, 1994).

- Le modèle Modified Puls, également connue sous le nom d'acheminement par stockage, est basé sur une approximation par différences finies de l'équation de continuité, couplée à une représentation empirique de l'équation de quantité de mouvement.
- Le modèle Muskingum, utilise comme le modèle précédent une approximation simple en différences finies de l'équation de continuité.
- Le modèle Lag, est le plus simple des modèles de routage fournis. Il permet d'obtenir l'hydrogramme du débit sortant simplement à partir de l'hydrogramme du débit entrant, décalées dans le temps (lag) par une durée spécifiée. Les débits ne sont pas atténués, la forme n'est donc pas modifiée. Ce modèle est largement utilisé, notamment dans les canaux de drainage urbains.

- Le modèle de l'onde cinématique, basé sur une approche différences finies de l'équation de continuité et une approche simplifiée de l'équation du mouvement (Boudiaf, 2014).
- Le modèle Muskingum Cunge, basé sur l'équation de continuité incluant un débit latéral et sur la forme diffusive de l'équation de quantité de mouvement. Il évite les erreurs dus aux paramètres d'entrées qui sont difficiles à évaluer.

I.2.7 La fonction objective

Elle évalue dans quelle mesure l'hydrogramme simulé a été ajusté à l'hydrogramme observé. Les fonctions que présente le logiciel sont les suivants :

- L'erreur sur la racine moyenne des carrés de débit (Peak weighted RMS error), compare les amplitudes des pics, les volumes et les temps de pic des deux hydrogrammes et accorde plus de poids aux débits supérieurs à la moyenne.
- La somme des résidus au carré (Sum of squared residuals), réduit au minimum la distance moyenne entre les données observées et simulées, en accordant un poids plus important aux erreurs les plus grandes.
- La somme des résidus absolus (Sum of Absolute Residuals), Minimise la distance moyenne entre les données observées et celles simulées.
- Le pourcentage d'erreur sur le débit de pointe (Percent Error in Peak Flow), mesure uniquement la qualité de l'ajustement du pic de l'hydrogramme calculé au pic observé.
- Le pourcentage d'erreur sur le volume (Percent Error in Volume), mesure uniquement la qualité de l'ajustement du volume calculé par rapport à l'observé.
- L'erreur sur la moyenne de la racine carrée des logs des débits (RMS Log Error), met en phase les débits faibles et forts.

I.2.8 La fonction d'optimisation automatique

Le but de la calibration est d'identifier les paramètres raisonnables qui donnent la meilleure correspondance entre l'hydrogramme calculé et l'hydrogramme observé, tel que mesuré par l'une des fonctions objectives. Cela revient mathématiquement à rechercher les paramètres qui minimisent la valeur de la fonction objective.

HEC-HMS possède une fonction d'optimisation interne pour caler le modèle hydrologique, qui est utilisée pour identifier automatiquement le jeu de paramètres idéal qui donnera à la fonction objective la meilleure valeur possible. Le logiciel présente deux modes de fonctionnement :

- La méthode du gradient uni-varié apporte des corrections successives aux paramètres estimés, elle est appliquée successivement à chaque paramètre, en maintenant tous les autres constants. Cet ajustement est répété quatre fois. Ensuite, l'algorithme évalue le dernier ajustement pour tous les paramètres afin d'identifier le paramètre pour lequel l'ajustement a donné la meilleure réduction de la fonction objective. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que des ajustements supplémentaires ne diminuent pas la fonction objective d'au moins 1%.
- La méthode (Nelder et Mead) qui recherche la valeur optimale du paramètre sans utiliser les dérivées de la fonction objective pour guider la recherche. Au lieu de cela, cet algorithme s'appuie sur une recherche directe plus simple ; les estimations des paramètres sont sélectionnées à l'aide d'une stratégie qui utilise les connaissances acquises lors des itérations précédentes pour identifier les bonnes estimations, rejeter celles qui sont mauvaises et générer les meilleures possibles.

I.3 Présentation du modèle conceptuel utilisé

- Le type de modélisation : événementielle

- La fonction de production : SCS CN

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode SCS CN (USDA-SCS, 1985), qui a été développée par l'U.S. Soil Conservation Service pour estimer le ruissellement direct. Ce modèle a été appliqué avec succès dans plusieurs études dans les régions semi-arides méditerranéennes (Brocca et al., 2009 ; Tramblay et al., 2010). En outre, ce modèle a été modifié de manière à prendre en compte à une échelle événementielle les conditions initiales d'humidité des bassins versants. Le paramètre du Curve Number peut être connecté à divers indicateurs d'humidité du sol qui sont obtenus à partir de modèles (Marchandise et Viel, 2009), de données satellitaires ou de mesures effectuées sur le terrain (Huang et al., 2007, Brocca et al., 2009, Tramblay et al., 2010 et Brocca et al., 2010). La méthode du CN SCS est une méthode simple, largement utilisée et efficace pour déterminer la quantité approximative de ruissellement d'une pluie, même dans une zone spécifique. Bien que la méthode soit conçue pour un seul événement pluvial, elle peut être mise à l'échelle pour trouver des valeurs de ruissellement annuel moyen. Le type de sol et l'occupation du sol représentent les seules informations requises. Le volume de ruissellement est calculé à partir des pluies cumulées depuis le début de l'événement pluvieux, l'abstraction initiale et le potentiel maximum de rétention dans bassin versant.

$$\mathbf{\Sigma Pe = \frac{(\Sigma P - Ia)^2}{\Sigma P - Ia + S}} \quad \textbf{(8)}$$

Où ΣPe = Pluie efficace cumulée (mm) ; ΣP = Pluie précipitée cumulée (mm) ; Ia = Abstraction initiale et S = potentiel maximum de rétention.

La perte en eau initiale due au stockage en surface, à l'infiltration et à l'interception est représentée par le paramètre Ia. L'absorption potentielle et un paramètre empirique **α**, qui est par défaut fixé à 0.2, sont utilisés afin de l'obtenir directement (SCS, 1971). **S** désigne la capacité maximale d'infiltration du sol et est directement relié au Curve Number.

$$\boldsymbol{Ia = \alpha * S} \quad \textbf{(9)}$$

$$\mathbf{S = \frac{254400 - 254CN}{CN}} \quad \textbf{(10)}$$

Où CN = Curve Number (sans unité). Il est compris entre 0 et 100. Le ruissellement est plus important avec l'augmentation du Curve Number. Selon les tableaux créés par l'USDA, il est calculé en combinant l'occupation du sol et les caractéristiques du sol (groupe hydrologique des sols) (United States Department of Agriculture, 1986). En allant du plus drainant au plus imperméable, les classes vont de A à D.

Les conditions initiales d'humidité du sol sont prises en considération par la méthode SCS-CN car elles affectent la capacité de ruissellement du sol (SCS, 1972). En effet, la valeur du Cuvre Number de chaque unité de sol, est modifiée en fonction des précipitations des cinq jours précédents. (Tab.1)

Tableau 1: Les différentes conditions initiales d'humidité du sol

Humidité du sol	Pluie tombée pendant les 5 derniers jours	Curve Number
Sec	0 à 12.7 mm	$CNI = \frac{4.2 * CNII}{10 - 0.058 * CNII}$
Moyen	12.7 à 28 mm	CNII = moyenne des CN attribués à chaque occupation du sol par croisement de l'occupation du sol et de la classe d'hydrologie des sols
Humide	> 28 mm	$CNIII = \frac{23 * CNII}{10 + 0.13 * CNII}$

- La fonction de transfert : SCS UH

Ce modèle est basé sur l'hydrogramme unitaire normalisé, il représente le débit d'écoulement comme une fraction du débit maximal, U_p, et, T_p, l'instant du pic. Nous avons par ailleurs les relations empiriques suivantes :

$$\begin{cases} \mathbf{Up} = \mathbf{2.08}\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{Tp}} \\ \mathbf{Tp} = \frac{\mathbf{\Delta t}}{\mathbf{2}} + \mathbf{0.6Tc} \end{cases} \qquad \textbf{(11)}$$

Où Δt est la durée de l'excès de précipitation, T_c est le temps de concentration du bassin versant. Connaître le temps de concentration est tout ce qui est nécessaire pour revenir à Tp et Up et multiplier l'hydrogramme unitaire normalisé pour obtenir l'hydrogramme unitaire souhaité.

Avec U_p la valeur maximum de l'UH, T_p le temps du pic.

En fait, le calcul du paramètre T_{lag} par la méthode SCS dépend du CN, de la longueur et de la pente moyenne du bassin versant et le plus long talweg.

- Le module de routage : Modèle de Muskingum

Au niveau de HEC-HMS, il existe plusieurs méthodes de calcul des écoulements fluviaux et nous en avons choisi le Muskingum, alors il s'agit d'un modèle qui utilise une approximation simple en différences finies de l'équation de continuité (USACE, 2000) :

$$\left(\frac{\mathbf{I_{t-1}+I_t}}{\mathbf{2}}\right) - \left(\frac{\mathbf{O_{t-1}+O_t}}{\mathbf{2}}\right) = \left(\frac{\mathbf{S_t+S_{t-1}}}{\mathbf{\Delta t}}\right) \qquad \textbf{(12)}$$

On écrit ensuite :

$$\mathbf{S_t = T_pO_t + T_pX(I_t - O_t) = T_p(XI_t + (1-X)O_t)} \qquad \textbf{(13)}$$

Avec, T p : Temps de parcours et X paramètre permettant une pondération (0<X <0.5). Ainsi, si le stockage d'eau dans la rivière est contrôlé par les conditions aval, on met X = 0 (On retrouve alors le modèle de réservoir linéaire présenté plus haut). Au contraire, on prendra X= 0.5, pour donner un poids similaire aux débits entrants et sortants. (DAI pour USAID, 2003)

On obtient alors :

$$\mathbf{Q_t} = \left(\frac{\mathbf{\Delta_t - 2KX}}{\mathbf{2K(1-X)+\Delta_t}}\right)\boldsymbol{I_t} + \left(\frac{\mathbf{\Delta_t + 2KX}}{\mathbf{2K(1-X)+\Delta_t}}\right)\boldsymbol{I_{t-1}} + \left(\frac{\mathbf{2K(1-X)-\Delta_t}}{\mathbf{2K(1-X)+\Delta_t}}\right)\boldsymbol{O_{t-1}} \qquad \textbf{(14)}$$

Connaissant les valeurs de Tp, X, Δt pour tous les instants t, et de la condition initiale (O0), HEC-HMS calcule par récurrence l'hydrogramme amont.

- Fonction objective: Peak- Weighted RMS Error

Cette fonction a été choisie car elle permet une meilleure optimisation au niveau de la pointe de la crue.

II. Description du modèle SWAT

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) est un modèle agro-hydrologique, développé par le service de la recherche agricole de (USDA : United States Department of Agriculture). C'est un modèle semi-distribué, à l'échelle du bassin et à temps continu, conçu pour prédire l'impact de la gestion sur l'eau, les sédiments et les rendements agricoles dans des bassins non jaugés à pas de temps journalier(Arnold et al., 1998). Les principales composantes du modèle comprennent l'hydrologie, les propriétés du sol, la végétation, les nutriments, les pesticides, les bactéries et les pathogènes, la gestion des terres agricoles et les données climatiques (P. W. Gassman et al., 2007).

Le but de ce modèle est d'utiliser des équations conceptuelles d'une manière qui soit utile pour la planification et la prise de décision pour la gestion des bassins versants, et d'utiliser les données d'entrée disponibles pour décrire les fonctions physiques et les interactions de ces diverses composantes de la manière la plus réaliste possible(Ogden et al., 2001).

Selon le relief, le bassin versant est divisé en plusieurs bassins spatialement liés par un réseau de cours d'eau. Chaque sous-bassin est subdivisé en plusieurs unités de réponse hydrologique homogènes (HRU) en fonction des caractéristiques du sol, l'occupation du sol, du type de sol et de la pente. Le HRU est utilisé par le modèle SWAT comme unité de prévision du bilan hydrique et du rendement des cultures (Arnold et al., 2012).

Les composantes hydrologiques modélisées comprennent le ruissellement de surface, la percolation, l'écoulement latéral, l'écoulement des eaux souterraines, l'évapotranspiration (ET) et les pertes de transmission. La simulation de l'hydrologie des bassins versants avec SWAT

est divisée en phase terrestre, qui contrôle la quantité d'eau, de sédiments et de nutriments dans le chenal principal de chaque sous-bassin, et en phase de routage du cycle hydrologique qui concerne le transport de l'eau, des sédiments, des nutriments vers l'exutoire (Neitsch, Arnold, Kiniry, et Williams, 2005).

SWAT estime le bilan hydrique en utilisant cette formule (Neitsch et al., 2011) :

$$\mathbf{SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})} \qquad \mathbf{(15)}$$

SWt: Contenu en eau du sol [mm];
SW0: Contenu initial en eau du sol [mm];
Rday: Précipitation journalière [mm];
Qsurf: Ruissellement de surface [mm];
Ea: Evapotranspiration [mm];
Wseep: Infiltration [mm];
Qgw: Débit de base [mm];
t: Temps [j].

II.1 Les composantes hydrologiques du modèle SWAT

Le modèle SWAT divise le système en partie majeurs ; composante atmosphérique où se reproduit le processus d'évaporation et d'évapotranspiration, composante terrestre qui inclue le ruissellement, l'écoulement latérale, l'interception et la composante souterraine qui groupe l'infiltration, les mouvements gravitaires de l'eau et la percolation (Fig.8).

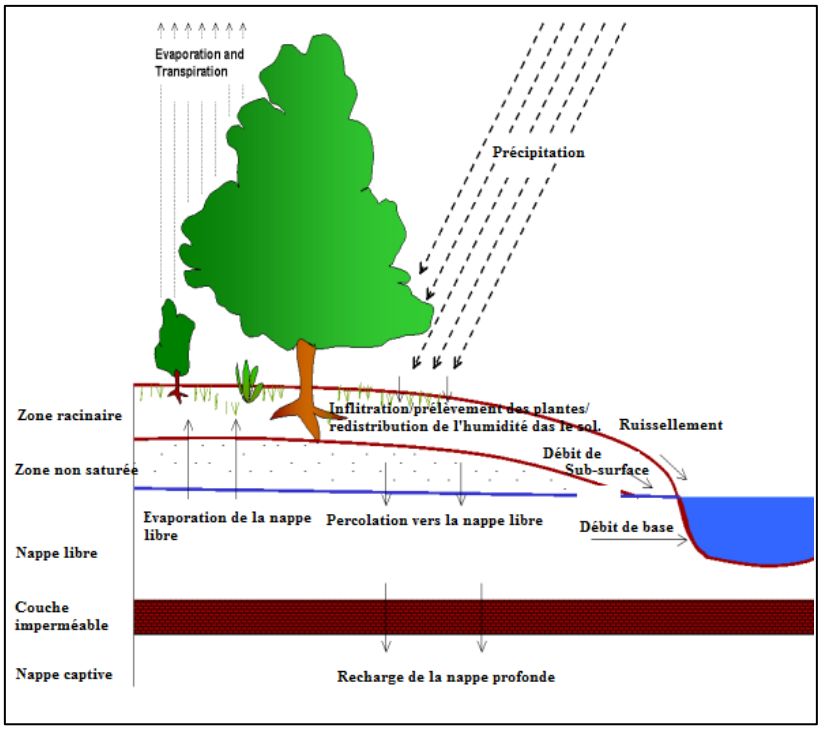


Figure 8: Schéma du cycle hydrologique simulé par SWAT (Neitsch et al., 2005)

II.1.1 Phase terrestre

La schématisation de cette composante est réalisée par l'équation de préservation de mass du bilan hydrique.

II.1.1.1 Précipitations

Elles représentent le facteur essentiel qui déclenche les différents processus du cycle hydrologique.

SWAT permet de représenter cette composante en 2 éléments distincts : la pluie et la neige. La collecte de ces données au pas de temps journalier et à des stations de mesure bien réparties dans le bassin est nécessaire pour représenter avec précision la variabilité climatique.

II.1.1.2 Interception

L'eau interceptée fait référence à toute eau stockée et piégée dans la partie visible dans les branches des végétaux, également appelée canopée, qui fournit une quantité d'eau non négligeable contribuant au cycle hydrologique sous forme de pluie interceptée après l'arrêt d'un évènement pluvieux. Ce paramètre est directement lié à la densité et la phénologie du couvert végétale, qui est de son rôle dépendante à l'indice de surface foliaire ou Leaf Area Index(LAI), qui est un indicateur important des échanges d'énergie, d'eau et de carbone entre la végétation et l'atmosphère.

II.1.1.3 Evapotranspiration

L'estimation de l'évapotranspiration réelle par le modèle est basée sur le calcul de l'évapotranspiration potentiel. Elle est estimée selon Neitsch et al., 2005 par trois méthodes : La méthode de Priestley-Taylor (Priestley-Taylor, 1972), la méthode d'Hargreaves (Hargreaves, et al. 1985) et la méthode Penman-Monteith (Monteith, 1965 ; Allen, 1986 ; Allen, 1989). SWAT adopte la méthode de ce dernier pour estimer ETP, par la formule suivante :

$$E_0 = \frac{\Delta \times (R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_w - e)}{r_a}}{\Delta + \gamma(\frac{r_s}{r_a} + 1)} \qquad (16)$$

Rn : rayonnement net
G : flux de chaleur du sol
ρ a : densité moyenne de l'air
cp : chaleur spécifique d'air
λ : chaleur latente de changement d'état (2450 kJ.kg-1)
e : tension de vapeur à la température t
ew : tension de vapeur saturante à la température t
Δ : la pente de la courbe de tension de vapeur saturante

ra : la résistance aérodynamique
rs : la résistance du couvert végétal
γ : la constante psychrométrique

Cette méthode nécessite des données sur la température journalière et le rayonnement solaire. Dans le processus de calcul, le modèle élimine l'évaporation de l'eau interceptée par la canopée, estime la transpiration et l'ajoute à l'eau évaporée du sol.

II.1.1.4 Ruissellement

Le ruissellement de surface, ou écoulement de surface, est un écoulement qui se produit le long d'une surface en pente. En utilisant les quantités de précipitations journalières ou infra-journalières, SWAT simule les volumes de ruissellement de surface et les taux de débit de pointe pour chaque HRU.

Le ruissellement comporte trois parties, il peut être alimenté par une seule ou une combinaison de deux ou trois ;

- Les ruissellements hortoniens : qui prend lieu lorsque l'intensité de précipitation dépasse la force gravitationnelle et donc la capacité d'infiltration
- Les ruissellements dus à la saturation du sol ; l'excès en eau qui s'écoule après saturation du sol et de la nappe souterraines
- Les flux dus aux vidanges des nappes souterraines : fait référence à l'eau retournant aux cours d'eau de surface par la résurgence des nappes.

Le ruissellement ($Qsurf$) est calculé par la méthode du Soil conservation service SCS curve number (SCS, 1972), qui permet de déterminer la quantité de l'eau ruisselée en fonction de la teneur d'eau retenu par le sol. La formule empirique du modèle SCS-CN assume que le rapport entre la rétention réelle et la rétention maximale potentielle est égale au rapport entre le ruissellement réel et l'écoulement potentiel maximal, ce dernier est dérivé de la différence entre la précipitation et l'abstraction initial :

$$\frac{R}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \qquad (17)$$

Où ;

R = rétention réelle (mm)
S = rétention maximale potentielle (mm)
Q = profondeur de ruissellement accumulée (mm)
P = Pluie accumulée (mm)
Ia = Abstraction initiale (mm)

D'autre part la rétention réelle correspond à la soustraction de l'initial abstract, et du ruissellement cumulé et du totale de la précipitation cumulée

$$\boldsymbol{R = P - Ia - Q} \qquad \textbf{(18)}$$

L'expression du ruissellement directe devient alors :

$$\boldsymbol{Q = \frac{(P-Ia)^2}{(P-I_a)+S}} \qquad \textbf{(19)}$$

II.1.1.5 Percolation

La percolation est le mouvement d'eau dans les couches de sol, confiné entre la nappe phréatique et la pédosphère, la percolation a lieu lorsque la teneur en eau dépasse la capacité du champ et la zone en dessous est non saturée, il est calculé par la formule suivante :

$$\boldsymbol{SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly}} \quad \textbf{Si} \quad \boldsymbol{SW_{ly} > FC_{ly}} \qquad \textbf{(20)}$$

$$\boldsymbol{SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly}} \quad \textbf{Si} \quad \boldsymbol{SW_{ly} < FC_{ly}} \qquad \textbf{(21)}$$

Avec,

$SW_{ly,excess}$ est le volume d'eau drainé en une journée exprimée en mm d'H2O,
SW_{ly} est l'eau contenu dans la couche du sol pour un jour en mm d'H2O,
FC_{ly} la teneur en eau pour la capacité du champ en mm d'H2O.

La quantité d'eau qui rejoint les horizons inférieures est une expression en fonction de l'exponentiel du temps d'infiltration, ce dernier est le ratio de la différence entre la quantité d'eau dans le sol saturée et le teneur en eau da la capacité du champ en mm d'H2O en mm d'H2O par la conductivité hydraulique du sol à saturation en mm/h.(Neitsch et al., 2009).

II.1.1.6 Débit de base

Le débit de retour, ou débit de base (Qgw), est le volume du débit des cours d'eau provenant des eaux souterraines. SWAT divise les eaux souterraines en deux systèmes aquifères : un aquifère peu profond et non confiné qui produit le débit de retour vers les cours d'eau du bassin versant et un aquifère profond et confiné qui le fournit en dehors du bassin versant (Arnold et al., 1993). L'eau stockée dans l'aquifère peu profond peut reconstituer l'humidité du sol dans des conditions très sèches ou être directement prélevée.

- ***Aquifère peu profond***

L'équation de l'équilibre en eau de cette partie est décrite par ;

$$\boldsymbol{aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{rchrg,sh} + Q_{gw} - W_{revap} - W_{pump,sh}} \qquad \textbf{(22)}$$

Où :

$\boldsymbol{aq_{sh,i}}$: *Est la quantité d'eau stockée dans l'aquifère peu profond le jour i (mm H2O),*

$aq_{sh,i-1}$: *Est la quantité d'eau stockée dans l'aquifère peu profond le jour i-1 (mm H2O),*
$W_{rchrg,sh}$: *Est la quantité de recharge entrant dans l'aquifère peu profond le jour i (mm H2O),* Q_{gw}: *Est le débit de l'eau souterraine, ou débit de base, dans le canal principal le jour i (mm H2O),*
W_{revap} *: Est la quantité d'eau se déplaçant dans la zone de sol en réponse aux carences en eau le jour i (mm H2O),*
$W_{pump,sh}$ *: Est la quantité d'eau retirée de l'aquifère peu profond par pompage le jour i (mm H2O).*

- ***Aquifère profond***

L'équation de l'équilibre en eau de cette partie est décrite par :

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{deep} - W_{pump,sh} \qquad (23)$$

W_{deep}: *Est la quantité d'eau percolant de l'aquifère peu profond dans la profondeur aquifère le jour i (mm H2O)*

Les autres paramètres sont les mêmes de la zone saturée.

Le seuil $aq_{sh,i}$, est un paramètre du modèle SWAT fixé par l'utilisateur (il correspond au paramètre « GWQMN » dans la liste des paramètres de SWAT) et αgw est un indice qui décrit directement la réponse de l'aquifère suite au changement de la recharge (il correspond au paramètre « ALPHA_BF » du SWAT).

II.1.2 Phase du routage

Une fois que SWAT a déterminé les charges d'eau, de sédiments, de nutriments et de pesticides dans le canal principal, ces charges sont acheminées à travers le réseau de cours d'eau du bassin versant en utilisant une structure de commande similaire à celle du modèle hydrologique HYMO (Wiliams et Hann, 1972).

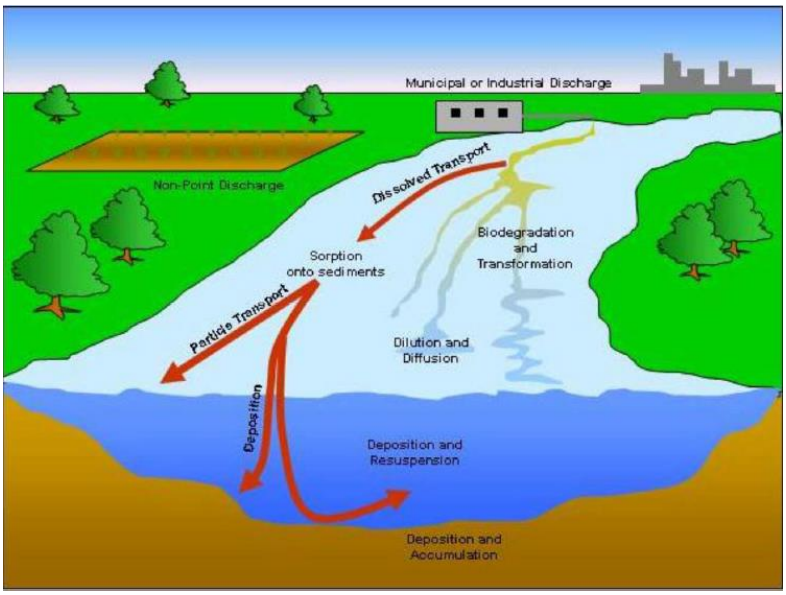


Figure 9: Schéma du cycle hydrologique simulé par SWAT (Neitsch et al., 2005)

Lorsque l'eau s'écoule vers l'aval, une partie peut être perdue par évaporation, transmission à travers le lit du cours d'eau et par l'usage agricole ou domestique.
SWAT achemine le volume d'eau sur le long du réseau en utilisant la méthode de routage de coefficient de variable de stockage développée par Williams (1969) ou la méthode Muskingum.

- ***Méthode du stockage variable***

Cette è été développé par williams McCarthy en 1969, il diffère de la méthode Muskingum par sa considération de stockage en prisme, il est basé sur l'équation de continuité :

$$\boldsymbol{V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored}} \qquad \textbf{(24)}$$

Où

Vin: Le volume d'entrée pendant le pas de temps (m3 H2O),
Vout: Le volume de sortie pendant le pas de temps (m3 H2O),
Vstored : Le changement de volume de stockage par pas de temps (m3 H2O).

- ***Méthode de Muskingum***

La méthode de routage de Muskingum, mise en œuvre en 1939 par McCarthy, modélise le volume de stockage dans une longueur de canal comme une combinaison de stockage en coin et en prisme, elle est basée sur l'équation de l'onde cinématique équivalent de l'équation différentielle du volume stocké dans un système.

Tel que défini par l'équation de Manning la section transversale de la zone d'écoulement est supposée être directement proportionnelle au débit pour un segment de tronçon donné. Donc le volume de stockage du prisme (une section) peut être exprimé en fonction de la décharge, K. qout, où K est le rapport de stockage décharger et à la dimension du temps, le volume de stockage en coin peut être exprimé comme K X. (qin-qout), où X est une pondération facteur qui contrôle l'importance relative des entrées et sorties dans la détermination du stockage dans un tronçon. La somme de ces termes donne une valeur pour le stockage total V(Neitsch et al., 2009)

$$\boldsymbol{V_{stored} = K.q_{out} + K.X.(q_{in} - q_{out})} \qquad \textbf{(25)}$$

II.2 SWAT CUP

II.2.1 Principe de l'analyse de sensibilité

SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Procedures) (Abbaspour et al., 2007) est un programme développé pour la calibration de SWAT. Le programme contient cinq méthodes de calibration différentes (SUFI-2, PSO, GLUE, ParaSol, MCMC) et inclut des fonctionnalités pour la validation et l'analyse de sensibilité.

Dans le présent travail, nous avons utilisé le programme SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) (Abbaspour et al., 2004 ; Abbaspour et al., 2007) pour la calibration des modèles et l'analyse de sensibilté. Pour les modèles à grande échelle qui prennent beaucoup de temps, SUFI-2 s'est avéré être assez efficace (Yang et al., 2008).

Les incertitudes des variables (les précipitations), du modèle, des paramètres et des données observées (le débit) sont toutes prises en compte dans l'incertitude des paramètres pendant une analyse de calibration/sensibilté de SUFI-2. La mesure du degré de prise en compte de ces incertitudes est définie comme le facteur P (le pourcentage des données encadrées par la marge d'incertitude de prédiction de 95 %, 95PPU) et le facteur R (le rapport de l'épaisseur moyenne de la bande 95PPU à l'écart type des données mesurées). Ces deux mesures fonctionnent ensemble pour encadrer la plupart des données mesurées avec la plus petite marge d'incertitude possible. Le coefficient de corrélation de régression (R2) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) entre les données observées et la meilleure simulation finale sont des indicateurs supplémentaires de la qualité de l'ajustement pendant la procédure de calibration et d'analyse de sensibilité de SUFI-2. Alors que R2 (plage de 0 à 1) mesure le degré de corrélation entre les données observées et les valeurs simulées, NSE (plage de -∞ à 1) mesure le degré de correspondance entre les données observées et simulées. Pour les deux statistiques, des valeurs proches de 1 indiquent un modèle bien calibré et validé.

Le principe de l'analyse de sensibilité de l'algorithme SUFI 2 est décrit graphiquement dans la figure ci-dessous (Abbaspour et al., 2004 ;2007). Cette figure montre qu'une seule valeur de paramètre (représentée par un point) conduit à une seule réponse du modèle (figure a), tandis que la propagation de l'incertitude d'un paramètre (représentée par une ligne) conduit à la 95PPU illustrée par la région ombrée de la figure b. Lorsque l'incertitude du paramètre augmente, l'incertitude de la variable de sortie augmente également (pas nécessairement de façon linéaire) (figure c). Par conséquent, SUFI-2 commence par supposer une grande incertitude des paramètres (dans une plage physiquement significative), de sorte que les données mesurées se situent initialement à l'intérieur de la 95PPU, puis diminue cette

incertitude tout en surveillant le facteur P et le facteur R. Si, au départ, nous fixons des plages de paramètres égales aux plages maximales physiquement significatives et que nous ne parvenons toujours pas à trouver un 95PPU qui englobe une partie ou la totalité des données, par exemple, si la situation de la figure d se produit, alors le problème n'est pas lié à la calibration des paramètres et le modèle conceptuel doit être réexaminé.

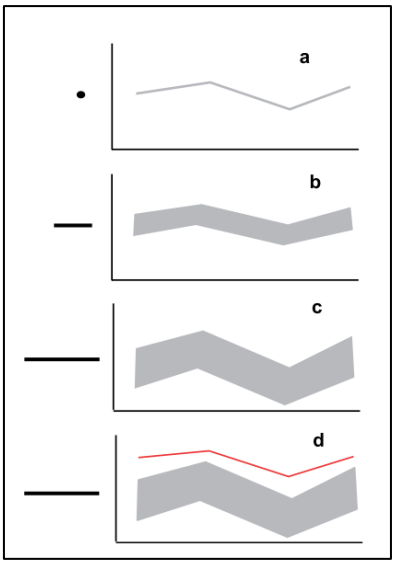


Figure 10: Relation entre l'incertitude des paramètres d'entrée et des paramètres simulés

II.2.2 Les types d'analyse de sensibilité

Abbasapour et al, 2017 propose deux approches pour calibrer les débits sous SWAT CUP ;

AAT : All at time, cette approche consiste à faire une analyse de sensibilité globale de tous les paramètres à calibrer à la fois en mesurant la marge de variabilité de chacun et son impact sur le résultat final, elle prend en considération l'interaction inter-paramétrique. L'inconvénient majeur de cette approche est la procédure fastidieuse de simulation ; le nombre élevé d'itération nécessaire pour estimer l'effet de ces paramètres, en outre la marge de variation des paramètres peut dépasser la limite de leurs intervalles de variation et aboutissent à des résultats théoriquement erronés mais pratiquement adoptables.

OAT : Once at time, cette approche consiste à choisir un seul paramètre, les autres sont maintenus fixes, bien que cette approche est simple est n'exige qu'un nombre limité d'itération, il ne prend pas en compte l'interaction entre les paramètres du modèle.

Pour la présente étude on a adopté les deux approches suivant la procédure décrite dans le papier d'Abbasapour (Abbaspour et al. 2015). Après la simulation de la variable de sortie

sous ARC-SWAT, le fichier est transporté vers SWAT CUP, les paramètres à calibrer sont choisis en référant aux études bibliographiques déjà élaborées et qui visent à déterminer les paramètres les plus signifiants, les marges de variation de chaque paramètre sont déterminé par l'approche OAT, par la suite procéder à l'approche AAT avec des itérations de nombre entre 200 et 1000. La meilleure simulation est représentée après le calcul de la fonction objective choisi, la nouvelle marge de paramètre de la meilleure simulation antécédente est attribuée à nouveau au paramètre et une nouvelle itération est lancée jusqu'à l'obtention des résultats satisfaisants.

En introduisant les paramètres dans SWAT CUP, 3 mode de variation sont disponible ;

- r : multiplier le paramètre par (1+ les valeurs données),
- a : ajouter les valeurs attribuées à la valeur du paramètre,
- v : remplacer l'ancienne valeur du paramètre par les nouvelles valeurs attribué lors du calage.

Conclusion

Il est évident que la description des processus intervenant dans la réponse hydrologique d'un bassin versant n'est pas si simple, cette description nécessite une connaissance d'un certain nombre de facteurs et de paramètres. Ces facteurs sont l'objectif de la modélisation, la compréhension des processus hydrologiques et la disponibilité de données.

L'utilisation de la méthode NRCS CN sur plusieurs bassins au Maroc a permis de valider le modèle HEC-HMS dans notre zone d'étude, et les exigences du modèle en matière de données étant plus ou moins simples, qui ont conduit à son choix. De plus, il intègre un certain nombre de variables qui affectent la transformation des précipitations en ruissellement, ce qui permet d'obtenir des résultats plus précis.

Le modèle choisi, SWAT, est un modèle physique semi-distribué qui permet de simuler le processus hydrologique à partir de l'établissement du bilan hydrique ainsi qu'une compréhension approfondie des caractéristiques physiques du bassin étudié (Neitsch et al., 2005). (Kharchaf, 2013).

CHAPITRE III : ZONE D'ETUDE

Introduction

Les eaux du bassin versant de l'oued Beht drainé, d'amont en aval, sont stockées dans le barrage El Kansera. Cette retenue joue un rôle économique dans le cadre de l'alimentation en eau potable des villes de Khémisset et de Tiflet. L'objectif de ce chapitre est de présenter, dans un premier temps, des données générales sur la zone d'étude, en particulier, sa situation géographique, sa géomorphologie, son réseau hydrographique et sa géologie, ainsi que décrire les principales caractéristiques physiographiques qui présentent une importance majeure car elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans les modalités de l'écoulement superficiel, suivis d'une analyse de l'occupation du sol et de type des sols. Ensuite, étudier le contexte climatique de la zone d'étude en analysant la variation des précipitations et de température afin de comprendre les mécanismes intervenant dans la circulation des eaux et l'évolution des ressources en eau, ces éléments influencent largement le bilan et le comportement hydrologique du bassin versant. Enfin, une étude hydrologique a été nécessaire pour la caractérisation du régime de l'écoulement en analysant des séries chronologiques des débits, ainsi que l'analyse fréquentielle des débits en se basant sur des ajustements statistiques et des méthodes empiriques.

I. Cadre géographique

Le bassin versant d'Oued Beht en amont du barrage El Kansera, se situe au Nord-Ouest du Maroc et occupe une superficie d'environ 4560 Km2 au niveau de la partie Sud-ouest du bassin du Sebou (Fig.11). Il est limité au Nord par la plaine du Gharb et le plateau de Meknès, au Sud par le bassin d'Oum-Erbia, à l'Ouest par le bassin de Bouregreg et à l'Est par le Moyen Atlas. Ses limites s'inscrivent entre les méridiens 5° et 6° Ouest et les parallèles 33° et 34° Nord (Abdallaoui, 1998).

Ce bassin se localise entre les coordonnées Lambert (X1 = 430347.24 ; Y1 = 281864.43) et (X2 = 529704.23 ; Y2 = 386110.82).

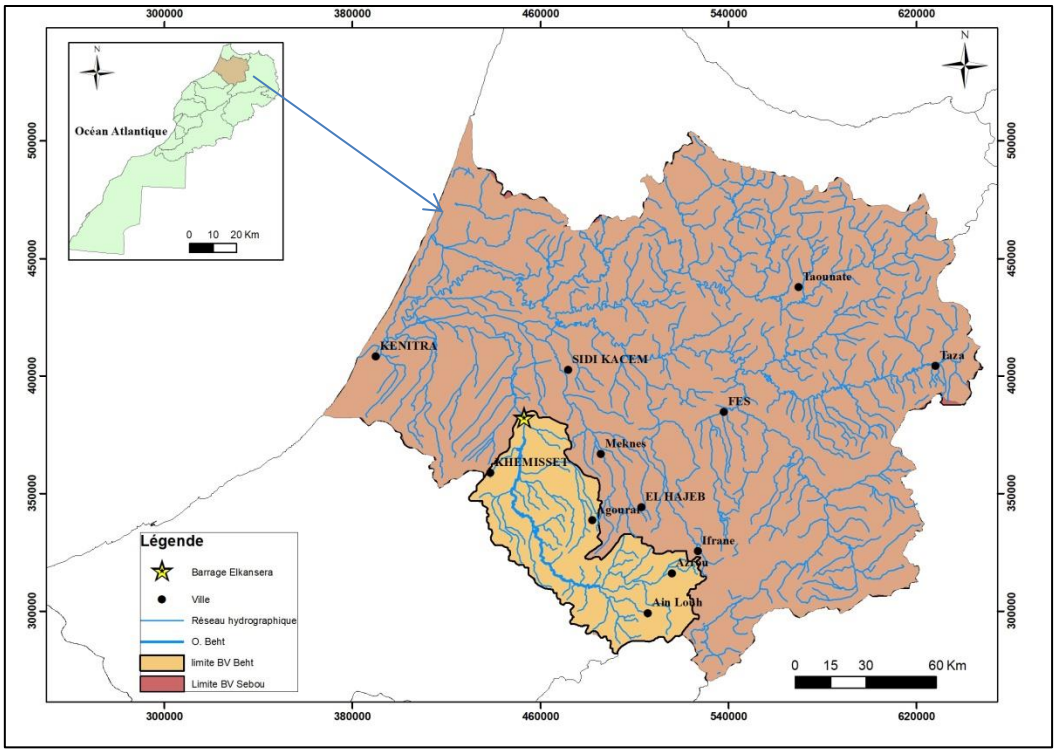


Figure 11: Localisation géographique du bassin versant d'Oued Beht

II. Caractéristiques physiques du bassin versant de Beht

II.1 Caractéristiques morpho-métriques

II.1.1 Surface et périmètre

La superficie d'un bassin versant ainsi que son périmètre jouent un rôle primordial dans les études des bassins versants. Leur influence se manifeste dans la nature de la relation entre le débit et le temps de concentration. Le bassin versant de l'Oued Beht à une superficie de 4561 km^2 et un périmètre de 450 km.

II.1.2 Caractéristiques de forme

L'indice de compacité (KG) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (ROCHE, 1963) :

$$KG = 0.28 * P/\sqrt{A} \qquad (26)$$

Avec:

A: Surface du bassin en km²;

P: périmètre stylisé en Km du bassin versant;

KG: Indice de compacité de Gravelius sans unité.

Le bassin versant de l'Oued Beht a une forme allongée suivant une direction SW-NE. L'indice de compacité de Gravelius, est de l'ordre 1.86.

II.1.3 Le rectangle équivalent

On assimile par convention le bassin versant à un rectangle qui lui est équivalent en superficie. Ses dimensions sont définies à partir de son indice de compacité Kc et de sa superficie S, par ce qui suit :

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right) \quad si \quad K_G \geq 1{,}12$$

$$l = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right) \quad si \quad K_G \geq 1{,}12$$

Avec :

K_G: indice de compacité de Gravelius ;

A : surface du bassin versant en Km^2 ;

L : longueur du rectangle équivalent en Km ;

l : largeur du rectangle équivalent en Km.

Pour le bassin versant de Beht : ***L= 202.5 km ; l = 22.5 km.***

II.1.4 Longueur du cours d'eau principal

C'est la distance mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à la ligne des partages des eaux d'un bassin versant. Cette distance parcourue est exprimée en km. Si les segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface. Pour le bassin Beht la longueur du cours d'eau principal mesuré est de 169 km.

II.2 Le relief

L'influence du relief sur 1'hydrogramme est encore plus évidente, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude et la morphologie du bassin versant. Le relief du bassin a été caractérisé sur la base d'un modèle numérique de terrain MNT à résolution de 30m, établi sur la base de la carte topographique digitalisée au 1/50.000.

Pour mieux comprendre les variations d'altitude au sein du bassin versant de Beht, on va appliquer une méthode qui permet grâce à un histogramme, une courbe et une carte hypsométrique de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude.

La courbe hypsométrique est obtenue par planimétrage des surfaces comprises entre les courbes de niveau et qui différencient les différentes tranches d'altitudes.

Chaque tranche d'altitude correspond à une superficie et un pourcentage de la surface totale du bassin (Fig.12).

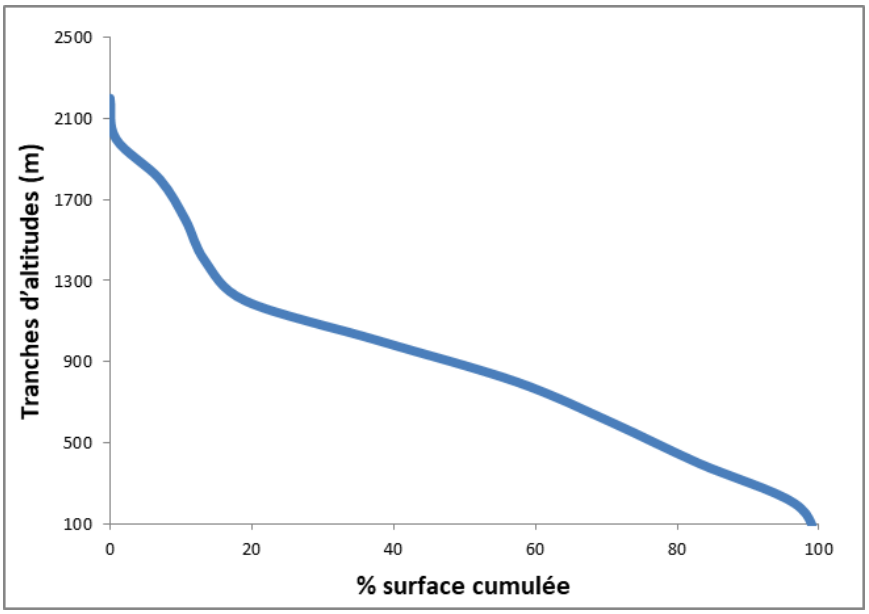


Figure 12: Courbe hypsométrique de l'oued Beht

La carte hypsométrique est réalisée après visualisation de la courbe hypsométrique. Elle montre que l'allure générale des altitudes du bassin versant est plus au moins régulière et suit un gradient décroissant de l'amont vers l'aval sous formes de bandes perpendiculaires au sens d'écoulement d'Oued Beht (Fig.13).

Le tableau 2 récapitule la répartition du bassin versant de Beht (en ha et en % de la superficie totale) par tranches d'altitude.

Tableau 2: Superficie des classes des altitudes

Tranches d'altitudes (m)	Surface (ha)	% des surfaces
0-200	15606.24	3.42
200-400	62192.46	13.63
400-600	55659.76	12.20
600-800	61107.55	13.40
800-1000	87249.80	19.13
1000-1200	87224.54	19.12
1200-1400	26312.43	5.77
1400-1600	12344.70	2.71
1600-1800	16471.64	3.61
1800-2000	28222.06	6.19
2000-2200	3784.61	0.83
Total	456175.79	100

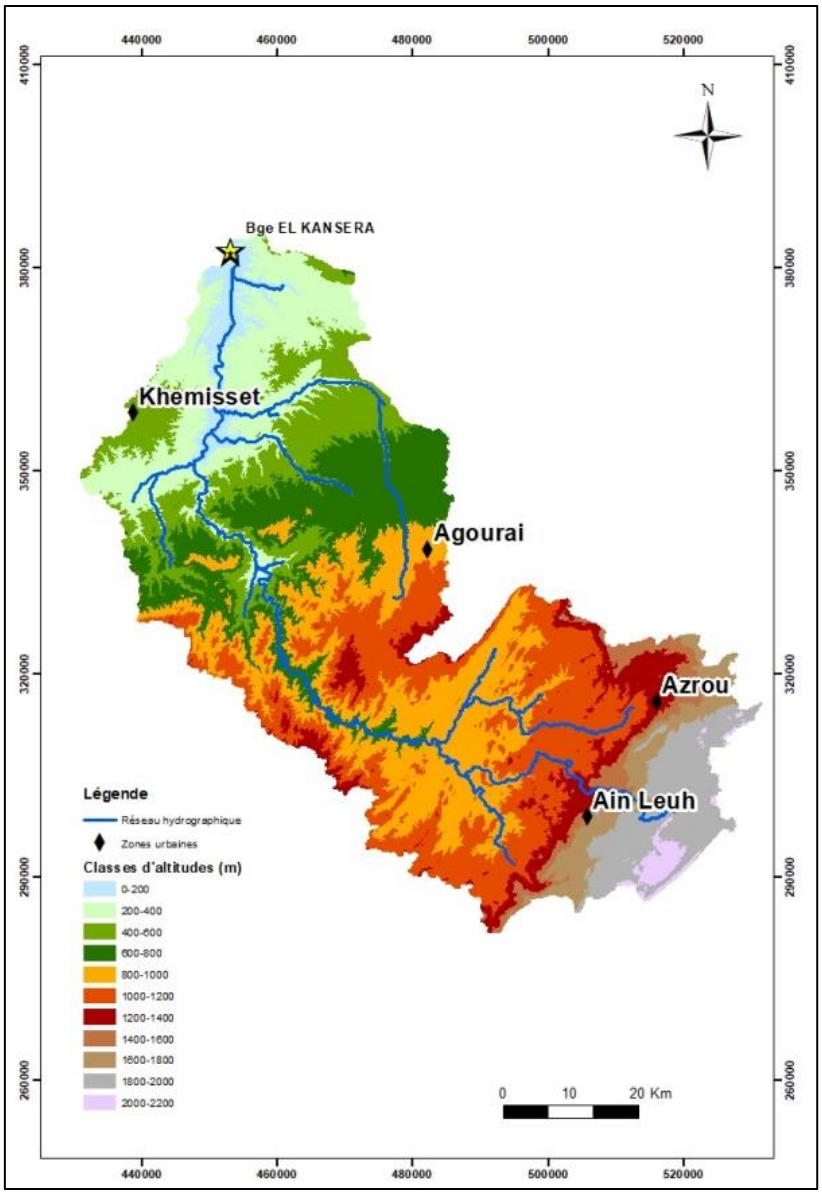


Figure 13: Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Beht

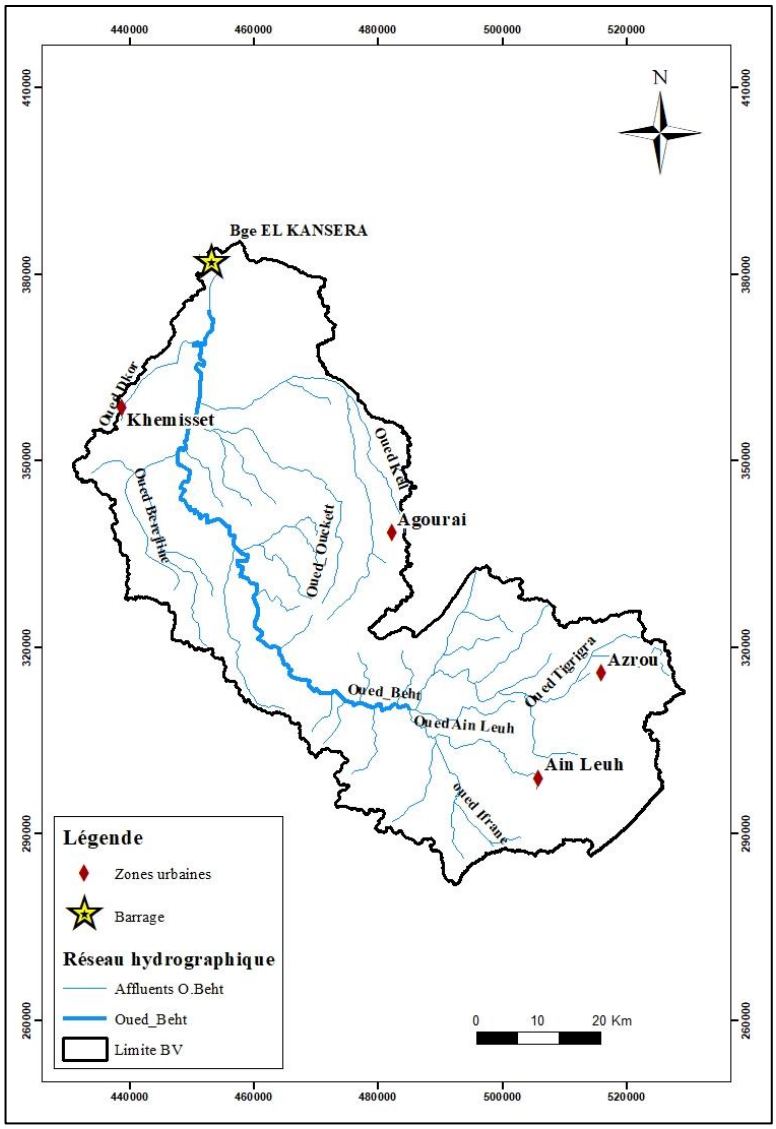


Figure 14: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Beht

III. Aperçu géologique

Cette étude a été élaborée à partir des travaux antérieurs dont les principaux auteurs sont Beaudet (1969), Michard (1976), Bouabdelli (1989), Marghich (1989) et Piqué (1994).

III.1 Cadre géologique général

Le bassin du Beht occupe la partie Nord-Ouest du bassin versant de Sebou. Sur le plan géologique, il s'est installé sur trois domaines géologiques et structuraux : Le Maroc central, causse moyen atlasique et le couloir Sud Rifain (Fig.15). Il est formé de terrains allant du Paléozoïque jusqu'au Quaternaire (J.Burger et al. 1951).

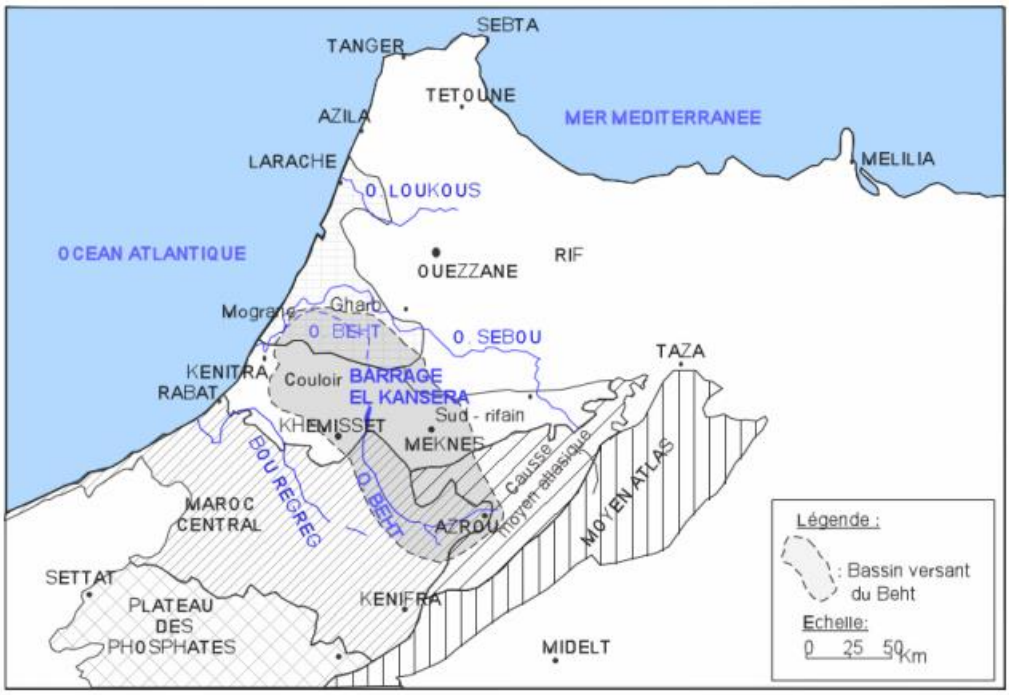


Figure 15: Domaines géologiques du bassin versant du Beht (Marghich, 1989)

III.1.1 Maroc Central

Il est appelé aussi massif hercynien central ou Plateau Central. Celui-ci est caractérisé par une zone considérable qu'il occupe (c'est le plus étendu des affleurements hercyniens de la Meseta marocaine). Il est aussi considéré comme massif ancien et présente une série primaire à peu près complète, où dominent les faciès sédimentaires détritiques (Beaudet 1969). On distingue dans ce domaine cinq grandes zones structurales, grossièrement orientées SW-NE, les unes relativement simples, les autres complexes (Michard, 1976) : A l'Ouest s'étend l'anticlinorium de Casablanca à matériel cambro-ordovicien, plus à l'Est se développe une zone synclinoriale occidentale avec deux zones à flysch dévéno-dinantiens, encore plus à l'Est, le Massif Central proprement dit débute par l'anticlinorium central Khourigba-Oulmès, et au milieu du Massif Central court la zone synclinoriale axiale, ou du Fourhal-Telt, occupée par des flysch néo-visiens, tout à l'Est, en pays Zaïan, la zone Kasba-Tadla-Azrou.

La plus grande partie des formations superficielles du bassin appartient à ce domaine structural. Il s'agit des terrains de la terminaison NE de la zone anticlinoriale de Kasba-Tadla-Azrou, du synclinorium axial et de l'anticlinorium de Khourigba-Oulmés.

III.1.2 Causse moyen atlasique

Le causse moyen atlasique qui couvre le reste de la partie Sud-Ouest du bassin versant et une petite surface autour d'Agouraï. Le socle hercynien est l'aspect le plus important qui se représente dans cette partie du bassin, recouvert en discordance majeure dans sa partie NE par

le Trias et le Lias. Le Trias se présente sous forme d'argilite, siltites et grès rouges débutant localement par un conglomérat à galets empruntés au socle Paléozoïque. Le causse moyen atlasique est peu tectonisé, la tectonique s'y manifeste par des plis à grand rayon de courbure et de faille de direction NE-SW. Seule la bordure Ouest du causse moyen atlasique fait partie du bassin versant de l'Oued Beht.

III.1.3 Couloir sud-rifain

Le sillon sud-rifain est individualisé à partir du Miocène moyen, ou de la base du Miocène supérieur, par le jeu de failles qui ont entrainé l'enfoncement des bordures septentrionales de la Meseta à l'Ouest et du Moyen-Atlas à l'Est (Marghich, 1989).

III.2 Tectonique

La tectonique du Haut bassin du Beht s'est manifestée généralement par des plis à grands rayon de courbures qui ont affecté les terrains paléozoïques de la Meseta ; ces terrains sont également affectés par des failles de direction sud-ouest/ nord-est proche de N45. Il s'agit principalement d'accidents tectoniques de directions hercyniennes réactivées par la tectonique alpine, qui individualisent des compartiments abaissés ou soulevés (Beaudet, 1969). Leur jeu vertical est de l'ordre de quelques dizaines de mètres, mais la présence locale de stries horizontales semble indiquer qu'elles aient fonctionné également en décrochement. L'âge de cette tectonique est post-Miocène supérieur. (Boumir, 1990). Dans les rides prérifaines, la tectonique a été violente, elle s'est manifesté par d'importants chevauchements observés dans la région de Moulay Idriss et Aîn Jemaà; par ailleurs le secteur de sfassif-kansera est situé sur une écaille de tectonique boueuse prérifaines limitée au Sud par une faille de chevauchement visible le long de l'Oued Beht et à Jbel Fellous (Faugères, 1978). Cette faille se prolonge vers l'Est, mais elle semble être masquée par les marnes Miocènes et sépare la région Nord à pendage généralement Nord-Est de la région Sud à pendage Ouest. D'une manière générale, cette tectonique s'est manifestée par quelques rides anticlinales, mais elle n'a conduit à aucun désordre notable dans les séries stratigraphiques dans la région de Beht. Dans la Maamora, le relief est monotone et les couches sablo-marneuses penchent faiblement vers le Nord. (in : Mint Chevie, 2011).

III.3 Lithologie

Les principales séries de formations rencontrées dans le bassin de Beht (Bentayeb A. et Leclerc, 1977 ; Chamayou et al., 1975 ; Combe, Ferré et Thauvin, 1975) sont (Fig.16) :

- ***Silurien***

Le Silurien dans cette zone est généralement représenté par un dépôt important de schistes fins noirâtres dites « Argilites noires », contenant des fossiles de graptolites (Beaudet, 1969). Les principaux affleurements siluriens du bassin versant du Beht se trouvent dans sa partie haute, appartenant à la terminaison NE de l'anticlinorium de Kasbatadla-Azrou.

- ***Dévonien***

Il est représenté par des schistes et calcaires en amont du bassin (région d'Azrou), il entre en contact avec les formations du Viséen sous forme des filons de direction NNE-SSW. Dans cette région on distingue (Bouabdelli, 1989) :

- Le Dévonien inférieur ; qui se caractérise par une variation latérale de faciès. En tenant compte de ce caractère, on distingue deux ensembles lithologiquement différents ; le premier se caractérise par une sédimentation essentiellement carbonatée et le deuxième ensemble est principalement détritique ;

- Le Dévonien moyen ; d'une épaisseur moyenne de 75 cm, composé de pélites en intercalation avec les grauwackes, surmonté par une alternance de calcaire pélites de 40 cm d'épaisseur ;

- Le Dévonien supérieur ; où seul le Fransnien est représenté dans la région d'Azrou, par une unité calcaro-gréseuse de 50 m.

- ***Carbonifère***

C'est la période qui occupe la plus grande étendue dans le bassin versant de l'oued Beht, Toutes ses formations sont reparties entre le Namurien, le Viséen.

- Le Namurien se compose de schistes gris qui alternent avec des grès fins ;

- Le Viséen se focalise dans le Sud du bassin, représenté par des schistes à passage calcaires, sous forme des bandes, s'étalent en direction NNE-SSW en alternance avec des formations des conglomérats rouges, schistes et grès de l'âge Namurien.

- ***Permien***

Les terrains permiens sont très peu représentés dans le bassin versant de l'oued Beht. On ne les rencontre que dans la zone ouest d'Agouraï et dans la zone de Souk-el-Had.

- ***Tri**as*

Il est constitué par une série d'argiles rougeâtres, gypsifère et salifères, au sein de laquelle s'intercalent des coulées de basaltes doléritiques. Il représente au Nord et Nord-Est du bassin une épaisseur qui peut atteindre les 700m.

- ***Lias***

Les dépôts liasiques affleurent dans le Sud et le Nord-Est du bassin versant de l'Oued Beht couvrant les régions du causse Avec le Lias inférieur débute la formation des dolomies et calcaires, qui constituent le principal matériau du causse d'une épaisseur de 200m.

Dans la région de Souk-el-Arba, le Lias est représenté par des dolomies assez friables, finement litées, à joint localement argileux. Elles sont surmontées dans la moitié supérieure, par des dolomies beaucoup plus compactes, soit bien litées et à joint argileux plus ou moins développés, soit massives. Elles constituent les parois verticales des gorges entaillées par l'oued Beht (Marghich, 1989).

- ***Jurassique inférieur et moyen***

Dans le Moyen Atlas plissé, ces formations sont dominées par les carbonates, qui sont parfois masquées par des formations basaltiques du Quaternaire et sont localisées en amont du bassin versant dans le moyen atlas plissé. Ainsi, les formations du Jurassique inferieur ou du Lias sont à base de calcaires, dolomites et calcaires dolomitiques. Quant au Jurassique moyen, il est composé de l'aalénien à faciès calcaire, du Bajocien inferieur marneux et du Bajocien moyen et supérieur calcaireux.

- ***Tertiaire***

Le Miocène n'est représenté dans le bassin versant que par le Tortonien composé de calcaires, des marnes blanches, de grès et de marnes bleues, avec une épaisseur qui peut atteindre 1000 m. Il se trouve principalement dans le Nord du bassin dans la vallée d'Oued Beht.

Les dépôts du Pliocène affleurent dans la partie basse du bassin versant, où se déposent des calcaires lacustres, des poudingues et des sables fauves. Dans le bassin versant d'Oued Beht se rencontrent des dépôts fluviatiles appelés poudingues qui recouvrent les sables fauves. Ils sont représentés par des conglomérats, grès calcaires et argiles sableuses qui se focalisent au Nord Est du bassin, avec une épaisseur moyenne de 20 mètres.

- ***Quaternaire***

Le Quaternaire est représenté par des dépôts variés : cônes de déjection et d'éboulis au pied du Causse moyen-atlasique, travertins d'El-Hajeb, et des coulées basaltiques volcaniques sur la bordure et sur le causse moyen-atlasique. Ces coulées sont épais d'environ 150 à 200 m. Cette épaisseur va en diminuant vers la périphérie du plateau pour atteindre quelques dizaines de mètres. Dans la vallée de l'oued Tigrigra à l'Ouest d'Azrou, la coulée atteint 90 m, mais se trouve réduite vers l'Ouest à une épaisseur de 3,5 m. Les formations quaternaires dans le bassin sont surtout sous forme de dépôts alluviaux à dominance limoneuse.(Taia, 2015).

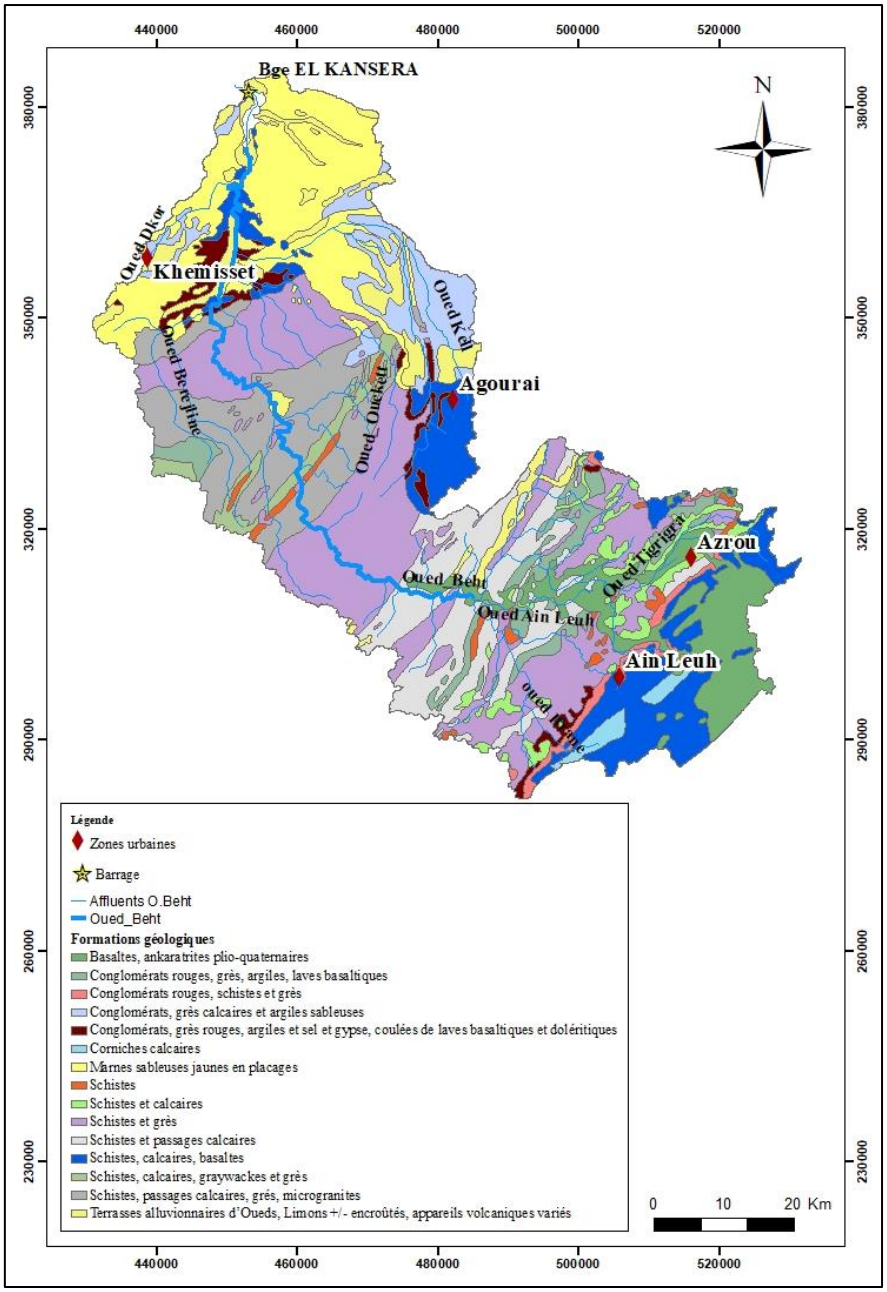


Figure 16: Carte lithologique du bassin versant (in : DREF, 2007)

L’ère primaire est le plus dominant dans le bassin versant, avec une superficie de 54% de la surface totale. Le Quaternaire et le tertiaire occupent un tiers de la superficie (34%) suivi de l’ère secondaire avec un pourcentage de 12%.

IV. Pédologie

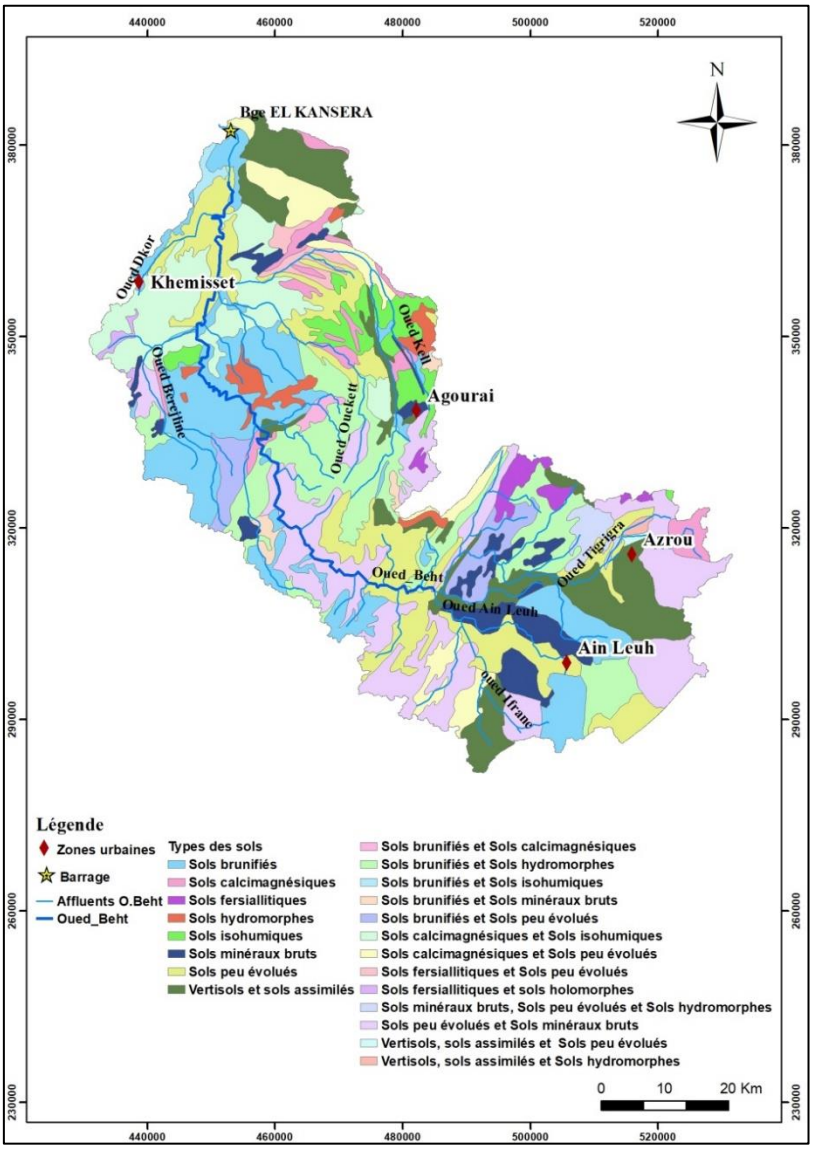


Figure 17: Carte pédologique du bassin versant

V. Occupation du sol

Les différents types de sol du bassin versant de Beht ont été extraits à partir des images satellitaires de type ASTER, à haute résolution de 30m qui contiennent 11 bandes séparées

(Tab.3) et complété par les données délivrées par la Direction Régionale des Eaux et Forêt du Nord-Ouest à Kenitra.

Tableau 3: Détails des bandes ASTER

Bande	Longueur d'onde µm	Résolution
B1	0.52-0.60	15m
B2	0.63-0.69	15m
B3	0.76-0.86	15m
B4	0.76-0.86	15m
B5	1.60-1.70	30m
B6	2.145-2.185	30m
B7	2.185-2.225	30m
B8	2.235-2.285	30m
B9	2.295-2.365	30m
B10	2.36-2.43	30m
B11	8.125-8.475	90m
B12	8.475-8.825	90m
B13	8.925-9.275	90m
B14	10.25-10.95	90m
B15	10.95-11.65	90m

Ces images ont subi, tout d'abord, des prétraitements (correction géométrique et atmosphérique).

Après le découpage des images ASTER, on a entamé à leur classification qui consiste à affecter les pixels de l'image à des classes homogènes. Elle a pour objectif la traduction des informations spectrales en classes thématiques.

La classification qu'on a adopté, est la classification supervisée, c'est le type de classification le plus adaptée aux images de haute résolution. C'est une classification qui présuppose que l'on connaisse la localisation et la nature de certaines zones d'entrainement dans l'image pour définir les classes. On cherche alors, sur l'image, des objets (groupes de pixels) dont on connait la nature, donc semblables à des objets de référence qui sont les sites d'entrainement.

La répartition des classes d'occupations des sols dans le bassin versant, sont présentés dans la figure ci-dessous (Fig.18).

D'après cette figure, on constate que les terrains parcours constituent le type d'occupation du sol le plus répandu dans le bassin avec une superficie de de 1471 km2. Ils sont concentrés dans les parties amont et centrale du bassin versant. Dans ce sens, l'élevage extensif constitue l'activité principale de la population locale surtout que la végétation spontanée est bien développée en fin d'hiver et printemps (El Gaatib,. 2017).

Les sols nus viennent en deuxième positions avec une surface de l'ordre de 1052 km2.

Les forêts représentent 20.6% de la superficie totale du bassin. Ils sont concentrés essentiellement dans la partie centrale et l'extrémité Sud du bassin versant. D'après El Gaatib R., 2017, l'analyse du milieu naturel a dégagé deux grandes formations forestières :

- Les formations de haute altitude, localisées à l'extrême Sud du bassin versant de l'Oued Beht, relevant des provinces d'Ifrane et El Hajeb. Ces écosystèmes forestiers sont en état pur ou en mélange et sont à base de Cèdre, Chêne Vert, Chêne Zen et Thuya.
- Les formations de basse altitude sont localisées dans le plateau central et le sous-bassin aval relevant essentiellement de la province de Khémisset. Il s'agit de forêts de plaine qui sont composées de peuplements de chêne.

Les zones agricoles sont étalées sur une surface de 745 km2. Elles sont principalement situées en amont du bassin, ainsi qu'au niveau des dépressions et des bas-fonds fertiles de la région d'Azrou ainsi qu'à proximité du barrage d'El Kansera. L'agriculture à cette zone, est dominée par l'arboriculture (l'olivier, l'amandier et le figuier), la céréaliculture (blé tendre, blé dur, l'avoine et l'orge), les cultures fourragères, légumineuses (fève, le petit pois et les lentilles) et le maraîchage.

Les matorrals occupent la partie extrême nord-ouest du bassin et représentent 5,6% de la superficie totale de la zone.

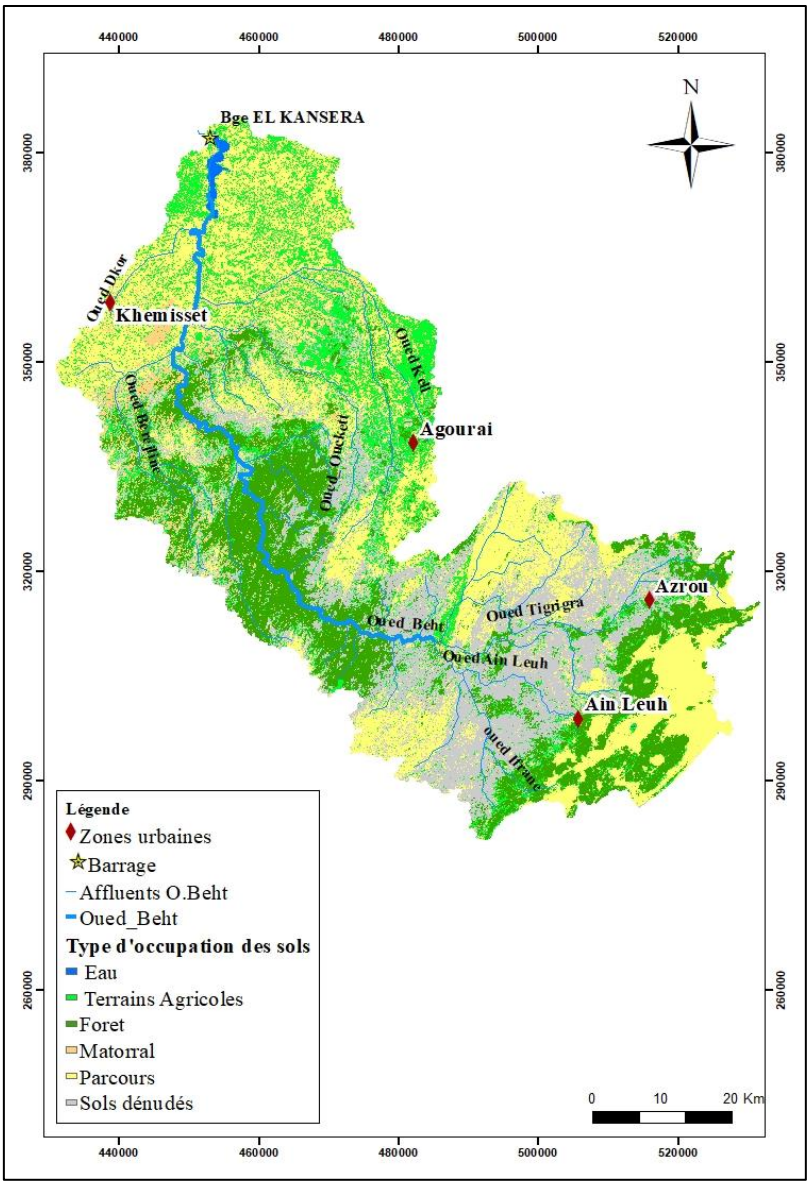


Figure 18: Carte d'occupation du sol du bassin versant

VI. Cadre Climatique

Le bassin versant de Beht a un climat méditerranéen. Il est marqué par des épisodes fréquents de sécheresse estivale et par des orages très forts.

Les données enregistrées par les stations climatiques (Fig.19) situées dans le bassin versant de l'Oued Beht ont servi de base à l'analyse de son contexte climatique. Dans cette optique, les stations pluviométriques prises en compte sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tab.4).

Tableau 4: Les stations météorologiques implantées au niveau de la zone d'étude

Stations	Coordonnées			Période d'observation	Données disponibles
	X (m)	Y (m)	Z (m)		
El Kansera	452 358	382 001	100	(1990-2017)	P (mm) et T (°C)
Khemisset	439 206	357 838	230	(1970-1996)	T (°C)
Ouljet Soltane	456 334	337 651	305	(1981-2016)	P (mm)
Sidi El Mokhfi	507 413	311 347	1 075	(1983-2018)	P (mm)
Ifrane	526 071	322 969	1640	(1961-2003)	T (°C)

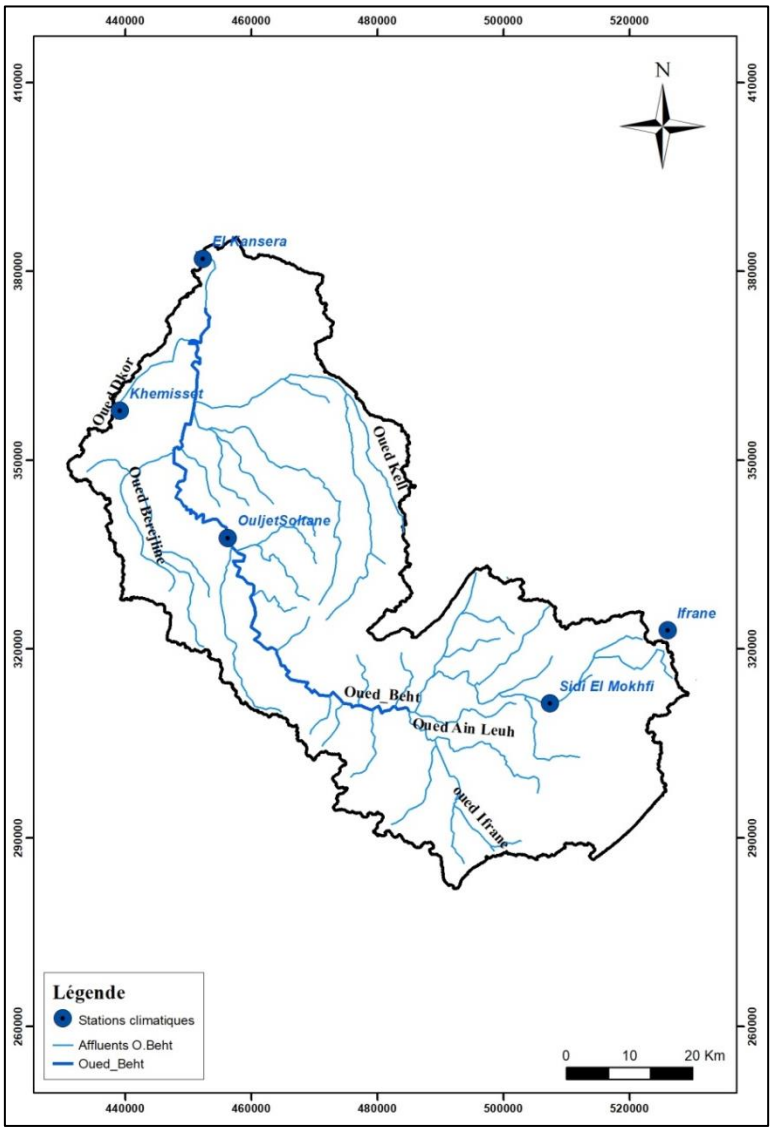


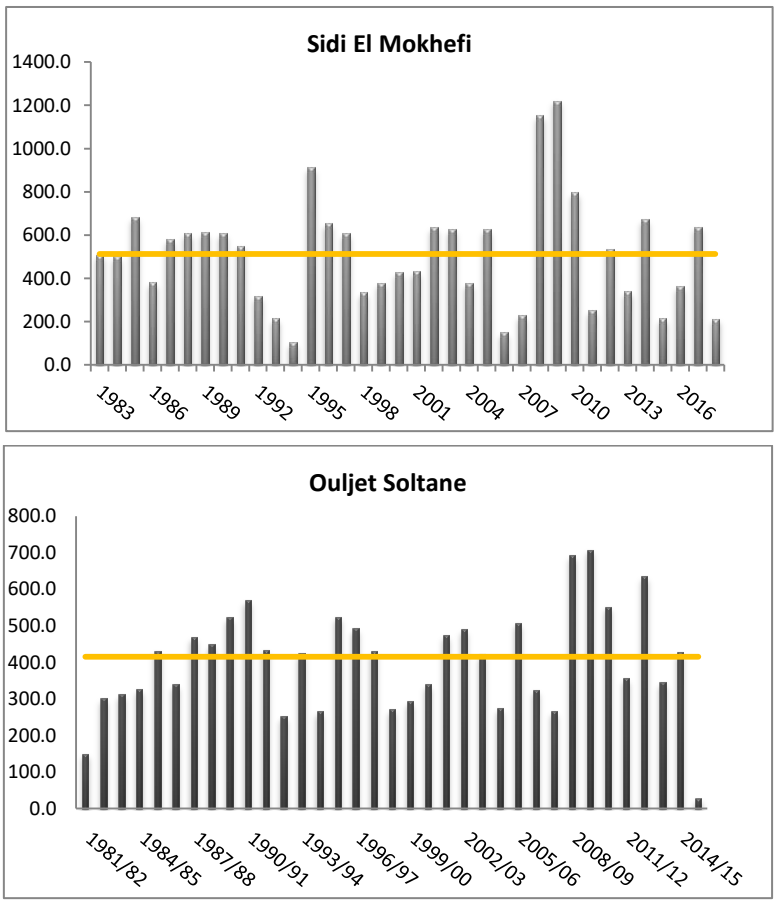
Figure 19: Situations géographiques des stations climatiques

VI.1 Précipitations

Les précipitations forment un paramètre hydrologique de grande importance dans le fonctionnement d'un bassin versant. Elles désignent toutes les eaux météorologiques qui tombent sur la surface de la terre sous différent forme (liquide et solide).

VI.1.1 Précipitations annuelles

La répartition annuelle des précipitations dans les stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Beht révèle des irrégularités dans le temps et une hétérogénéité spatiale. En allant de l'amont vers l'aval, les précipitations moyennes annuelles des stations Sidi El Mokhefi, Ouljet Soltane et du barrage El Kansera sont successivement 513 mm, 415.5 mm et 340.7mm (Fig.20). Ceci traduit l'effet des altitudes et l'exposition des versants que l'on retrouve notamment dans les régions en altitude qui sont les plus arrosées, en passant par le centre et la rive gauche vers l'amont du bassin.



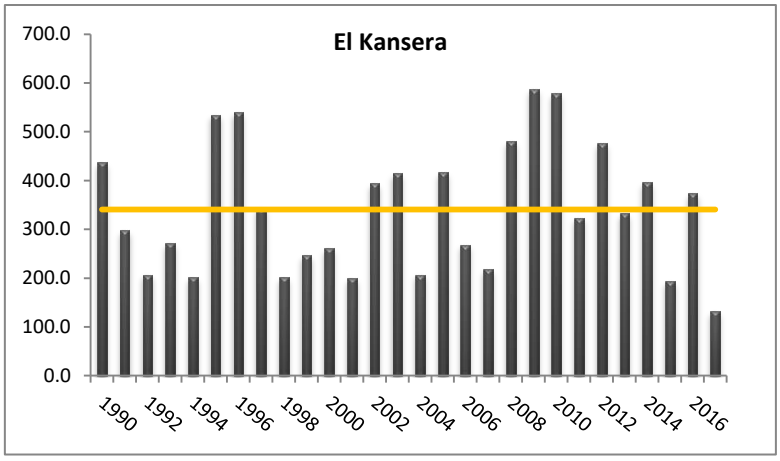
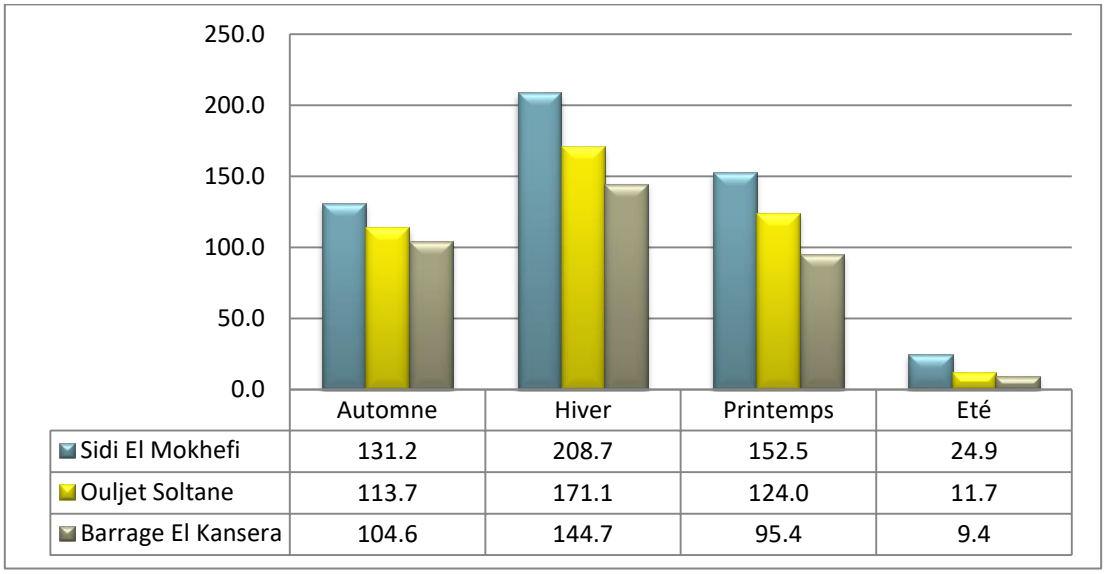


Figure 20:Variations des précipitations moyennes annuelles du bassin versant de Beht

VI.1.2 Précipitations saisonnières

La variation saisonnière des précipitations révèle que l'hiver suivi du printemps sont les saisons les plus pluvieuses de l'année, tandis que l'été, notamment en juillet et août est le moins arrosé pour les trois stations (Fig.21), ce qui explique le type méditerranéen du régime pluviométrique du bassin d'Oued Beht.



	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Sidi El Mokhefi	131.2	208.7	152.5	24.9
Ouljet Soltane	113.7	171.1	124.0	11.7
Barrage El Kansera	104.6	144.7	95.4	9.4

Figure 21: Précipitations saisonnières du bassin versant d'oued Beht

VI.1.3 Précipitations moyennes mensuelles

L'analyse des précipitations mensuelles a révélé une période hivernale pluvieuse et une période estivale sèche. La période pluvieuse se situe principalement entre les mois d'octobre et de mai, et la période sèche, qui n'enregistre que de faibles précipitations, souvent de type orageux, se concentre entre juin et août (Fig.22). Les valeurs moyennes mensuelles maximales sont enregistrées en décembre pour toutes les stations pluviométriques, tandis que les valeurs minimales sont enregistrées en juillet.

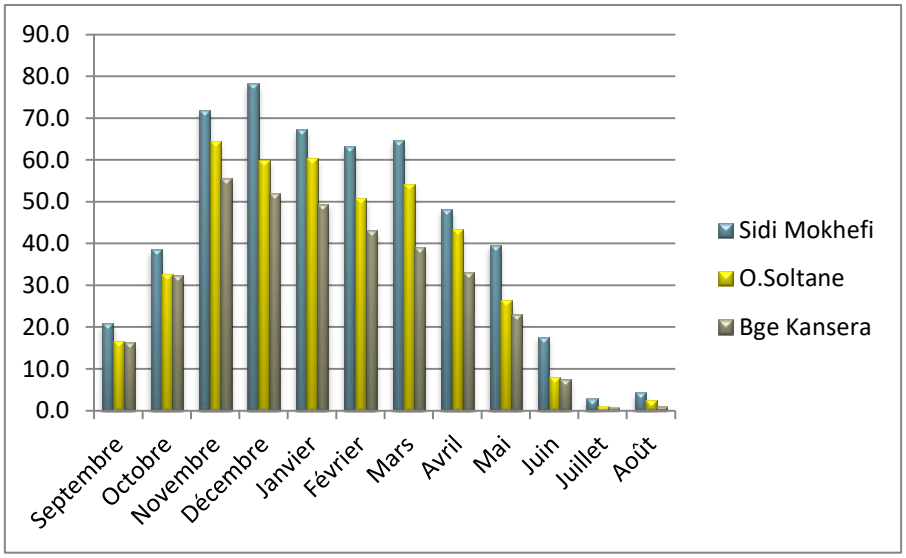


Figure 22: Variations des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin d'oued Beht

VI.1.4 Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières

L'analyse fréquentielle des pluies maximales journalières du bassin versant d'Oued Beht a été réalisée en ajustant les données des 2 stations pluviométriques El Kansera (43 ans) et Ouljet Soltane (30ans), par la loi de Gumbel. Cet ajustement a permis d'estimer les valeurs des précipitations pour différentes fréquences de retour (Tab.5, fig.23).

Tableau 5: Pluies maximales journalières par période de retour aux stations Barrage El Kansera et Ouljet Soltane

a. Station Barrage EL Kansera

Période de retour T (ans)	***2***	***5***	***10***	***20***	***50***	***100***	***500***
Probabilité de non dépassement de P	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.998
Variable réduite de Gumbel	0.37	1.50	2.25	2.97	3.90	4.60	6.21
P pour période de retour T	**33.9**	**52.6**	**65**	**76.9**	**92.3**	**103.8**	**130.5**

b. Station Ouljet Soltane

Période de retour T (ans)	***2***	***5***	***10***	***20***	***50***	***100***	***500***
Probabilité de non dépassement de P	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.998
Variable réduite de Gumbel	0.37	1.50	2.25	2.97	3.90	4.60	6.21
P pour période de retour T	**42.9**	**65.3**	**80**	**94.2**	**112.6**	**126.4**	**158.1**

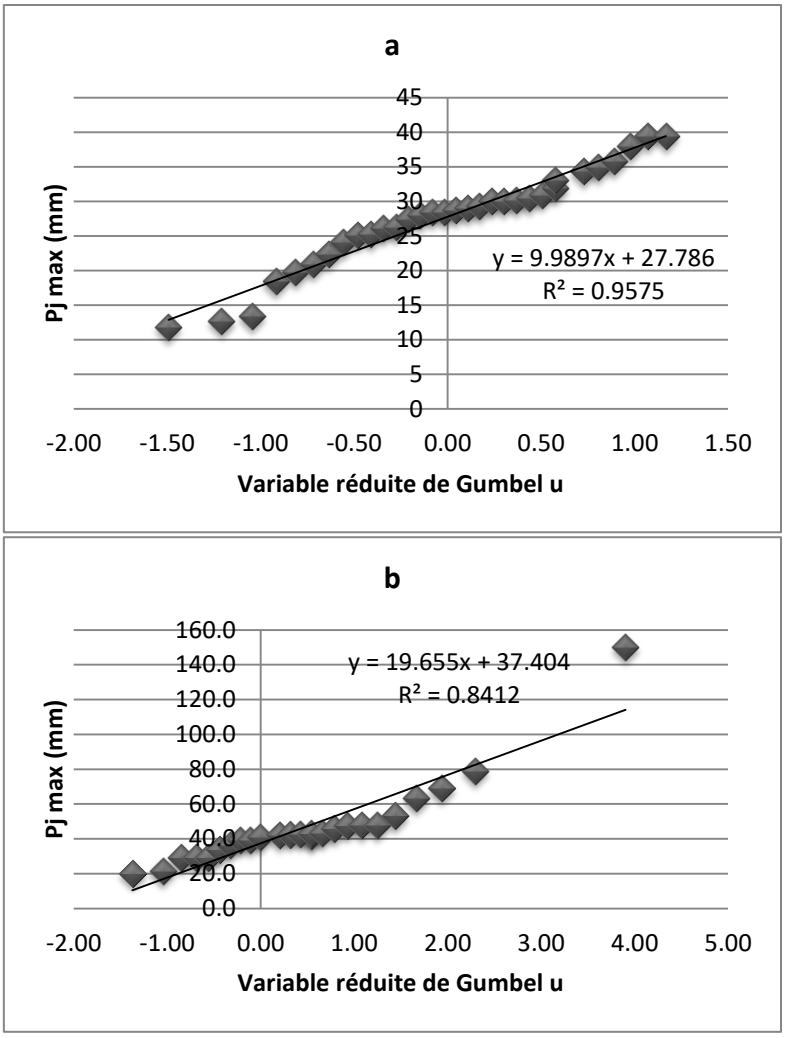


Figure 23: Ajustement par la loi de Gumbel des Précipitations maximales journalières des stations Elkansera (a) et Ouljet Soltane (b)

VI.2 Températures

La température est un paramètre très important, vu qu'elle intervient d'une part comme élément déterminant pour la spécification du climat et d'autre part comme facteur essentiel pour l'estimation des potentialités hydrologiques d'une région donnée.

VI.2.1 Température moyenne mensuelle

Les données de température ont été collectées dans les stations de mesures situées au sein du bassin (El Kansera et Khémisset) et dans la station la plus proche (Ifrane).

Les moyennes mensuelles des températures sont clairement variables d'amont en aval. La station d'Ifrane montre que les températures moyennes varient entre 4.1°C et 21.9°C, la station de Khemisset enregistre des moyennes entre 11°C et 26.6°C et celle du barrage El Kansera a une moyenne qui varie 11.3°C et 30.4°C. Il est a noté que la température de l'air ambiant du bassin versant de l'Oued Beht est dépendante de l'altitude et la latitude. Les mois

de Juillet et Août étant les plus chauds et les températures maximales sont enregistrées dans la station du barrage El Kansera 47°C, dépassant celles de la station de Khemisset 34°C. Tandis que la station d'Ifrane qui enregistre des températures minimales les plus basses (-0.9°C), dont le mois de Janvier est le plus froid.(Fig.24).

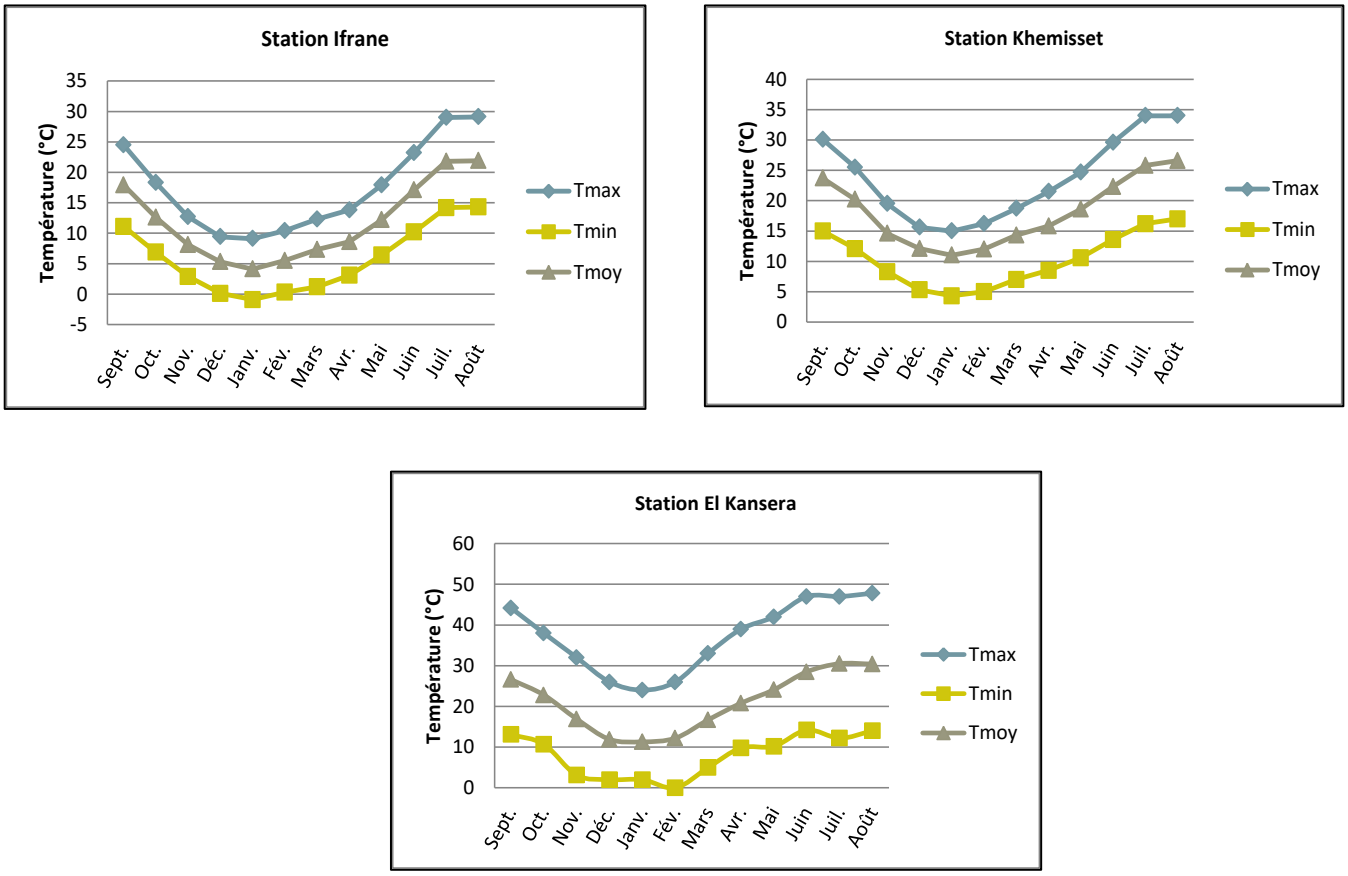


Figure 24:Variations mensuelles des températures maximales, minimales et moyennes des stations d'Ifrane, Khemisset et El Kansera

VI.2.2 Digramme ombrothermique de Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Gaussen permet de distinguer les périodes sèches des périodes humides. Une période est considérée comme sèche, lorsque le total des précipitations est inférieur ou égal au double de la température moyenne mensuelle, dans le cas contraire la période est considérée comme humide, par contre lorsqu'il y a une égalité entre les précipitations et le double de la température, les besoins en eau sont satisfaisants. Cet indice est facilement représenté par le diagramme ombrothermique de Gaussen (Fig.25). Ce dernier est un mode de représentation, sur le même graphique, des températures et des précipitations moyennes mensuelles.

L'analyse de ce diagramme permet de définir une égalité entre la période humide et la période sèche. Le temps humide s'étend d'octobre à avril, puis une période de sécheresse s'installe.

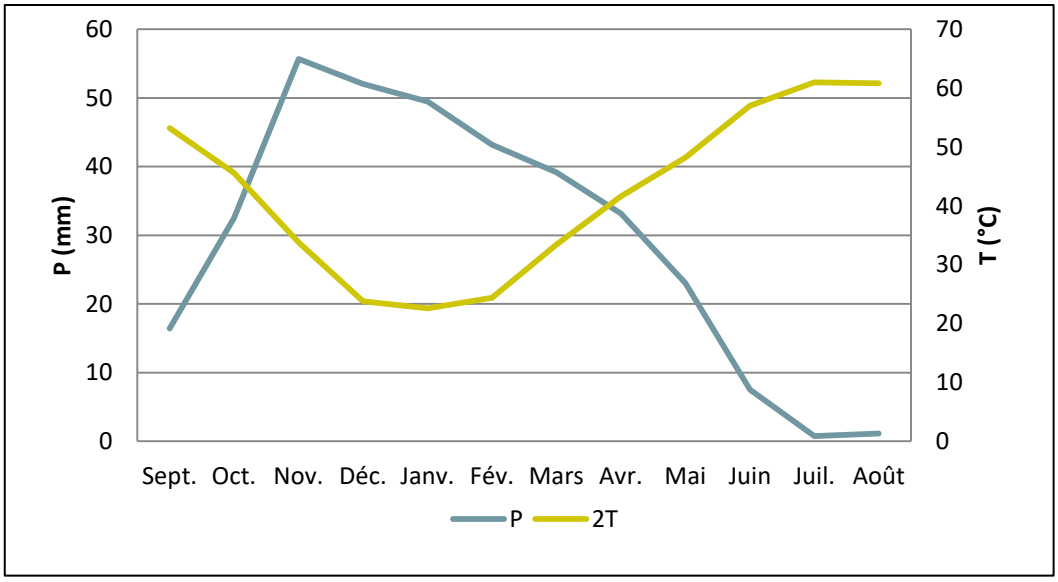


Figure 25:Diagramme ombrothermique de Gaussen (Station barrage El Kansera)

VII. Cadre hydrologique

L'étude du régime hydrologique du bassin versant d'Oued Beht est basée sur les séries des données de débits enregistrées au niveau de deux stations hydrométriques, telles que, la station du barrage El Kansera (1991-2014) située en exutoire du bassin versant dont les coordonnées sont (X= 452 450m, Y=382 500m), elle est mise en service depuis 1939 et contrôle une superficie de 4560 Km2. Elle permet d'enregistrer les débits, les précipitations et les températures. Ainsi, la station de Ouljet Soltane (1991-2014) située au centre du bassin de coordonnées (X=456250m, Y=358060m), elle contrôle une superficie de 2433 Km2 depuis l'année 1981 et matérialise un poste d'annonce de crues.

VII.1 Variations interannuelles des débits

Les figures 26 et 27 montrent la variation des débits interannuels des deux stations du bassin versant d'Oued Beht indiquant ainsi une hétérogénéité spatio-temporelle d'une année à l'autre, compte tenu de la situation amont aval des stations et de la succession des périodes humides et sèches.

Pour la station du barrage El Kansera, le module interannuel est de l'ordre de 8.83 m3/s. Les années 1996, 2009, 2010 et 2013 ont enregistrées des débits moyens annuels très élevés jusqu'à 28.9 m3/s, par contre les années 1993, 1995, 1999, 2000, 2005, 2006 et 2007 ont enregistrées des débits très faibles ne dépassant pas 3.4 m3/s.

Pour la station d'Ouljet Soltane, elle a enregistré un débit moyen annuel de 7.9 m3/s, moins important que celui de la station située en Amont.

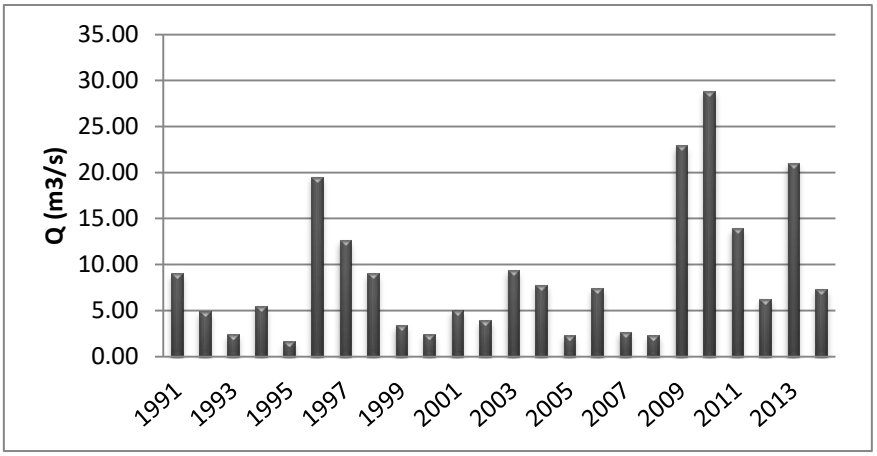


Figure 26: Variation interannuel du débit dans la station du barrage El Kansera

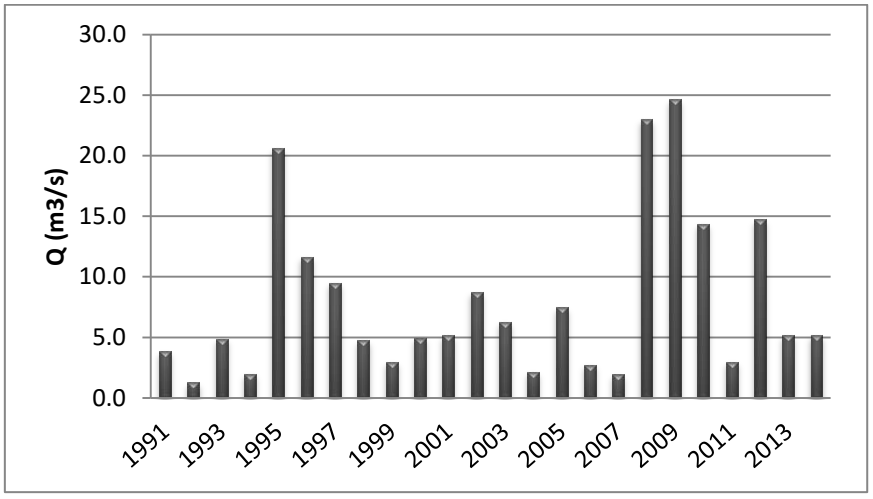


Figure 27: Variation interannuel dans la station Ouljet Soltane

VII.2 Variation interannuelle par méthode des écarts (Ec) des débits moyens annuels (Qma) au débit moyen interannuel (Qmi)

La méthode des écarts (Ec) des débits moyens annuels (Q_{ma}) au débit moyen interannuel (Q_{mi}) permet de relever les variations hydroclimatiques du bassin versant de Beht. La formule utilisée est la suivante :

$$E_c = \frac{Q_{ma} - Q_{mi}}{Q_{mi}} \times 100 \qquad (27)$$

Avec :

Ec : Ecarts (%)
Q_{ma} : Débit moyen annuel (m3/s)
Q_{mi} : Débit moyen interannuel (m3/s)

L'analyse des résultats obtenus en appliquant la méthode des écarts au niveau des deux stations montre une succession des périodes excédentaires et des périodes déficitaires sur une

longue période (Figures 28 et 29). On note deux longues périodes sèches entre 1991 à 1995 puis entre 1997 à 2008, avec des déficits de plus de 80%. Les périodes humides représentent les années 1996, 1997, 2008, 2009, 2010, 2013 avec des excédents atteignant 227% pour la station El Kansera ainsi que 217% pour la station d'Ouljet Soltane.

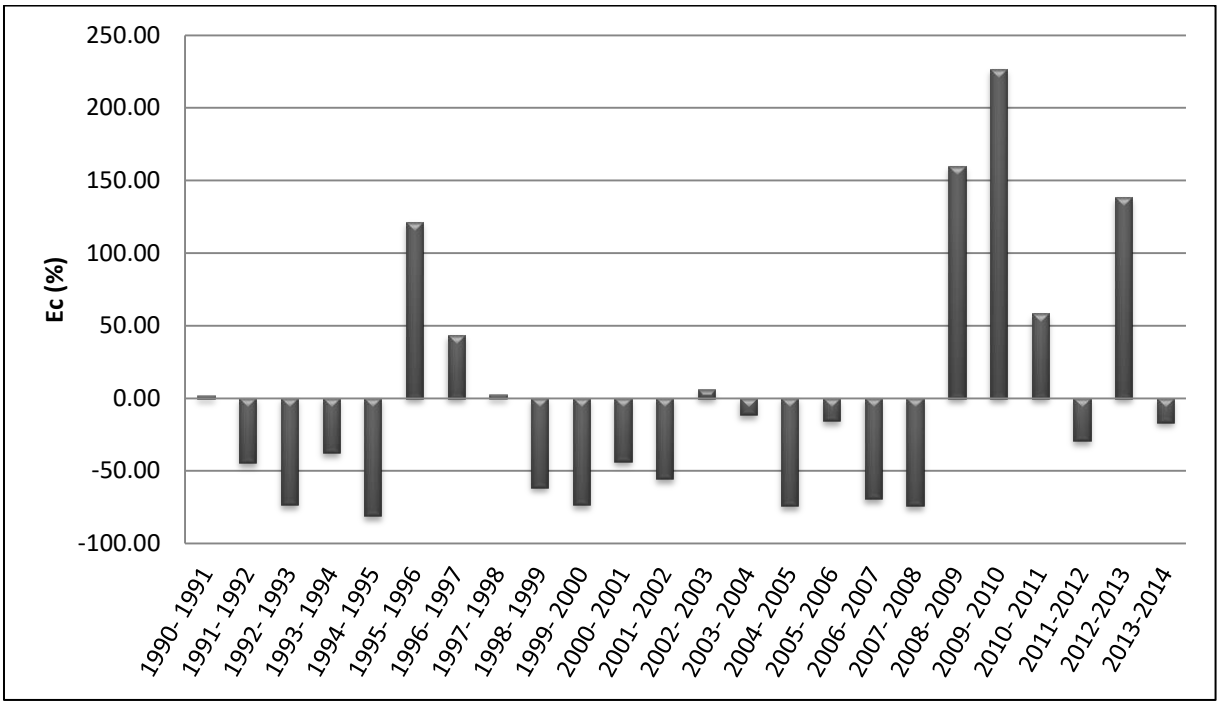


Figure 28: Répartition annuelle des écarts des débits dans la station du barrage El Kansera

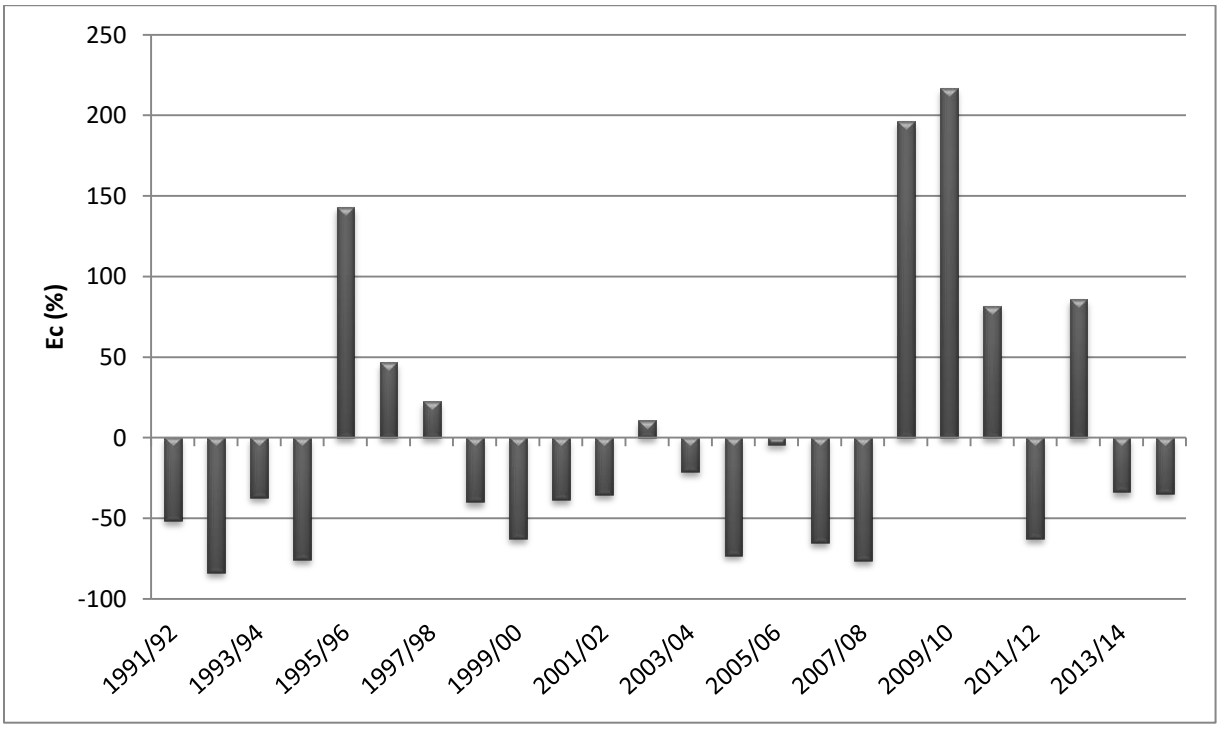


Figure 29: Répartition annuelle des écarts des débits dans la station d'Ouljet Soltane

VII.3 Débits moyens mensuels

Les variations moyennes des débits mensuels du bassin d'Oued Beht, montrent un seul maximum et un seul minium pour les deux stations (Fig.30). Le maximum est enregistré dans le mois de Février, il est de l'ordre de 19.53 m3/s pour la station El Kansera, et 16.5 m3/s pour la station d'Ouljet Soltane, tandis que le minimum correspond au mois de Juillet. Cela signifie que la majeure partie du débit liquide concerne aux saisons de l'hiver et le printemps avec une période d'étiage allant du mois de Mai à Octobre.

Par conséquent, le régime hydrologique d'Oued Beht est caractérisé par des périodes humides et sèches reflétant un climat semi-aride.

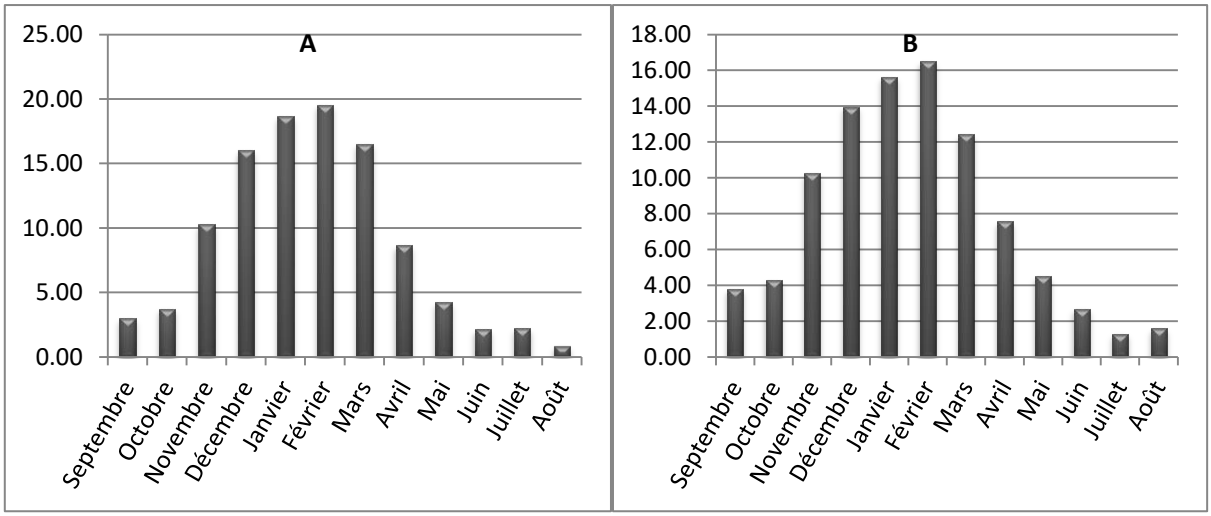


Figure 30:Débits moyens mensuels des stations barrage El Kansera (A) et Ouljet Soltane (B)

VII.4 Coefficient mensuel des débits

Le coefficient mensuel des débits met en évidence la variabilité des écoulements qui se manifestent par des périodes de hautes et basses eaux, il exprime la relation entre le débit moyen mensuel et le module interannuel. Il est donné par la formule suivante :

$$C = \frac{Q_{mi}}{Q_{mi}} \qquad (28)$$

Avec :
C : Coefficient mensuel des débits ;
Q_m: Débits moyens mensuels ;
Q_{mi}: Débit moyen interannuel.

La figure 31 illustre les variations du coefficient mensuel des débits au niveau des deux stations de l'oued Beht, indiquant que le régime hydrologique du bassin est distingué par une période des hautes eaux (CMD > 1) et des basses eaux (CMD < 1).

Pour la station du barrage El Kansera, les hautes eaux correspondent au mois de Novembre jusqu'à mois d'avril et les basses eaux représentent les mois de Mai jusqu'à Octobre.

Pour la station d'Ouljet Soltane, on note que la période des hautes eaux commence dès le mois de novembre et se prolonge jusqu'à mois d'avril, tandis que les basses eaux se répartissent sur les mois de juin à septembre, avec des étiages plus sévères pendant le mois de juillet, août.

Le régime hydrologique d'Oued Beht est donc considéré comme un régime simple (un seul maximum au cours de l'année) de type pluvial (caractérisé par un coefficient mensuel des débits élevés pendant la période pluviale).

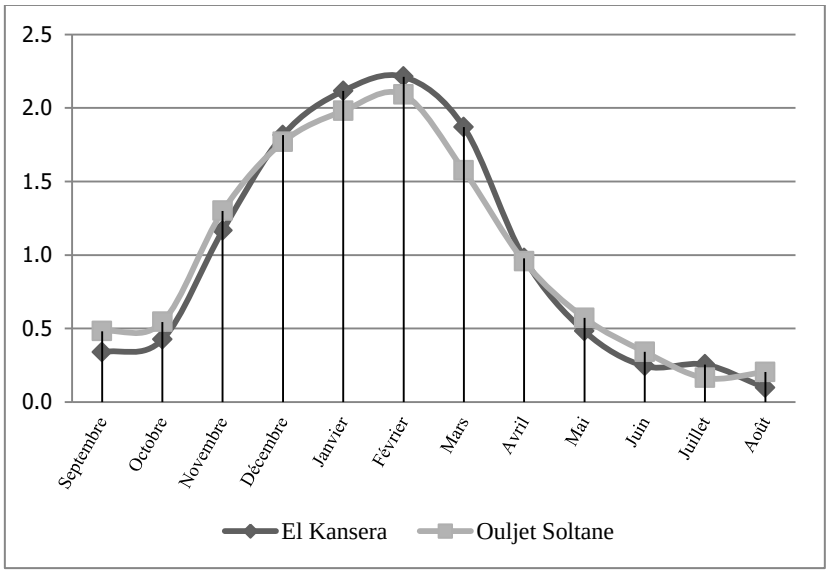


Figure 31: Répartition des coefficients moyens de débits mensuels

VII.5 Crues

Lors d'une crue, l'inondation se produit lorsque l'eau déborde dans des zones qui sont normalement hors de l'eau. Ces crues sont susceptibles de provoquer d'importants dégâts matériels et, bien souvent, des pertes de vies humaines.

VII.5.1 Historiques des crues

L'Oued Beht est un cours d'eau qui connait depuis longtemps de fortes crues et des inondations qui touchent principalement le Bas Beht dans la plaine du Gharb. C'est ainsi que la réalisation du barrage El Kansera entre 1927 et 1935 a été nécessaire. Pourtant, Oued Beht a toujours connu des inondations catastrophiques, même après la mise en place de ce barrage, engendrant des dommages matériels considérables et même des pertes de vies humaines.

- **Crue du 12/02/1987 « A »**

Cette crue d'hiver est caractérisée par un débit de pointe de l'ordre de 450 m3/s et le volume sous la pointe est de 30 Mm3. Le temps de pointe est de 15 heures, avec un temps de base de 40 heures. La pointe de l'hydrogramme est bien marquée ce qui indique que le bassin versant a subi des précipitations homogènes.

- **Crue du 25/02/1988 « B »**

Il s'agit d'une crue d'hiver, constituée de deux pointes, signifiant ainsi un épisode pluvieux discontinu dans le temps. Ainsi, le temps de montée est de 10 heures, le temps de base est de 35 heures et le volume sous la pointe est de 35 Mm3.

- **Crue du 10/05/1990 « C »**

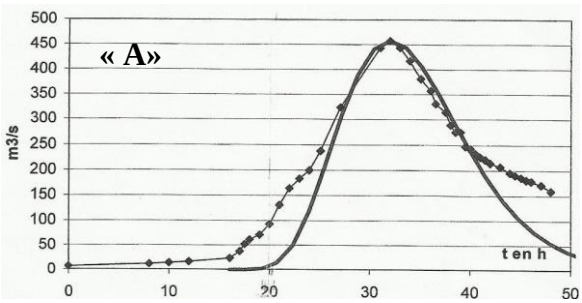
Il s'agit d'une crue du printemps (Mai), son débit de pointe est de l'ordre de 650 m3/s et le volume sous la pointe est de 23 Mm3. De ce fait, le temps de montée est de 8 heures et le temps de base est de 18 heures.

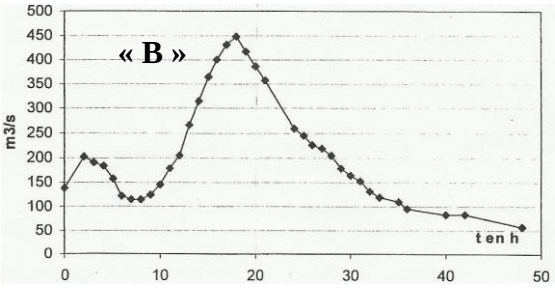
- **Crues du 07/03/1991 « D » et 28/12/1995 « E »**

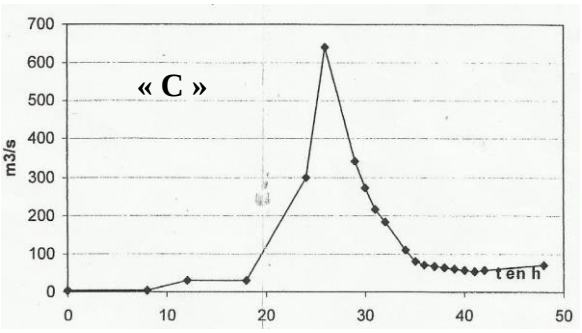
Les deux crues sont caractérisées par le même comportement hydrologique malgré la remontée à la fin du tarissement de l'hydrogramme enregistré en date du 07/03/1991. Ainsi, le temps de pointe est de l'ordre de 15 heures et celui de base est de 25 heures.

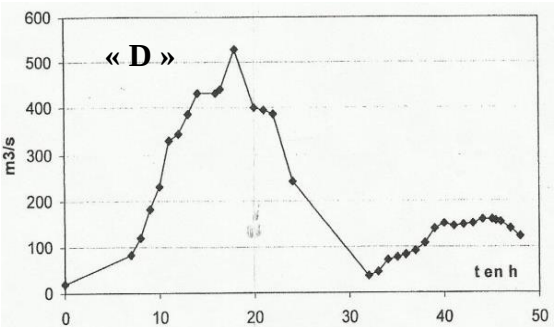
- **Crues du 29/01/1996 « F », 03/02/1998 « G » et 24/12/2001 « H »**

Malgré quelques aspérités sur les hydrogrammes des crues, les trois événements présentent la même allure surtout pour l'ordre de grandeur de débit de pointe (500 m3/s). Ainsi, le temps de montée et de décrue est respectivement de 10 heures et 30 heures.









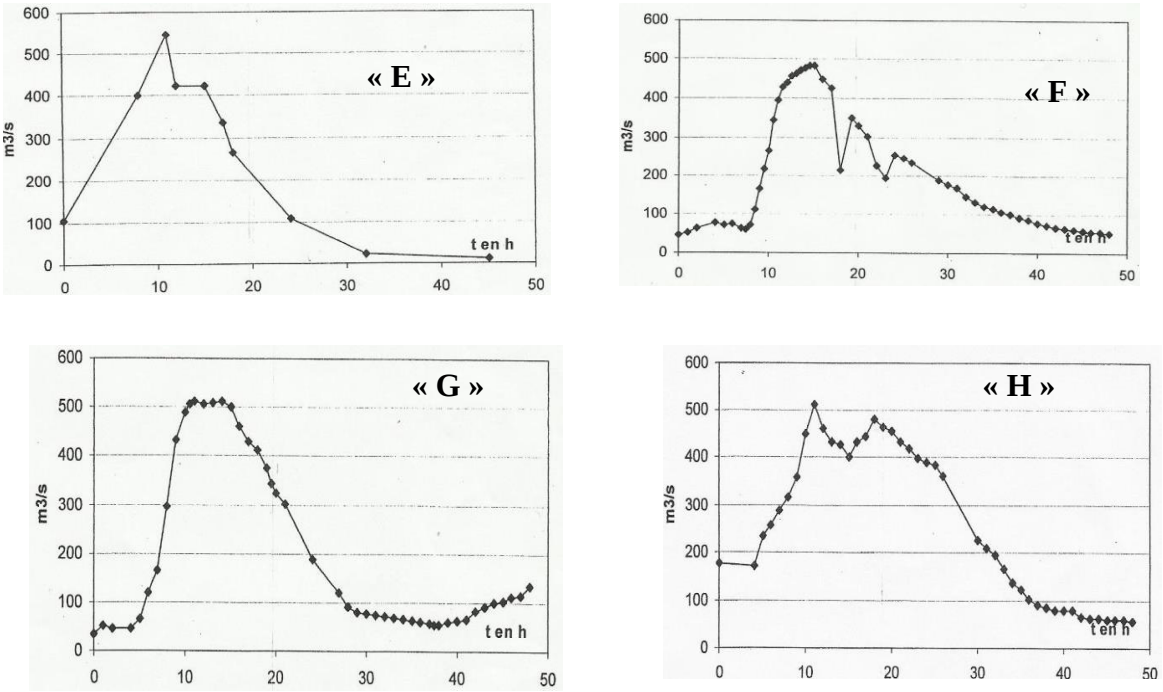


Figure 32: Hydrogrammes des crues du Beht à la station Ouljet Soltane (ABHS, 2010)

VII.5.2 Analyse fréquentielle des crues

Notre étude est consacrée, à une étude hydrologique au niveau du bassin versant de l'Oued Beht afin d'estimer les débits de pointe (Qp), pour différentes périodes de retour qui sont calculées par différents méthodes statistiques. Les débits retenus seront d'une importance capitale pour la simulation hydraulique de l'oued et l'anticipation des inondations qui menacent cette région.

VII.5.2.1 Méthodes empiriques

Les méthodes de calcul recensées en utilisant différentes formules empiriques (Tab.6) tiennent compte de deux facteurs essentiels :

- Le gradient topographique du bassin versant, par le biais de sa pente ou de sa dénivelée.
- La taille du bassin versant, par le biais de sa surface et/ou de sa longueur.

Les débits retenus sont ceux calculés par ces formules dont les limites de validités dépendent essentiellement de la taille des bassins.

Tableau 6: Méthodes empiriques pour le calcul des débits de pointe

Formule de Mallet Gautier	$Q_t = 2 \times k \times \log_{10}(1 + aH) \times \frac{A}{\sqrt{L}} \times \sqrt{1 + 4 \times \log_{10} T - \log_{10} A}$ Q(T) : Débit de pointe en m3/s pour la période de retour ; L : longueur du plus long talweg (km) ;

	A : superficie du bassin versant ; H : Pluie moyenne annuelle ; *(P=515.7mm)* a: Coefficient variant de 20 à 30 (au Maroc, on prend *a = 20*) ; K: Coefficient variant de 0,50 à 6,00 (au Maroc, on prend *k = 2*)
Formule de Fuller II	$Q_t = (1 + a * \log(T)) * (S^{0.8} + 8/3 * S^{0.5}) * 4/3 * N/100$ Q_t : Débit de pointe en m³/s de récurrence T. T: Période de retour égale à (10, 20, 50 et 100 ans). a: Coefficient variant entre 0,7 et 0,8 au Maroc. Nous adoptons a = 0,8. S: Superficie du bassin versant en Km². N: Coefficient régional pris égal à 80 en plaine, 85 en région accidentée et 100 en montagne. Nous prenons N = 85.
Formule de HAZAN - LAZAREVICK	$Q_t(T) = Q(1000) * (1 + a * \log(T))/(1 + a * \log(1000))$ Q (T) : Débit de pointe en m³/s de récurrence T. a : Coefficient régional variant de 0,8 à 2 pour la partie nord du Maroc, 2 à 3,5 pour le Rif Occidental. Nous prenons a = 2

Les résultats des différentes formules régionales décrits dans le tableau 7 suivant :

Tableau 7: Résultats des débits de pointe par les formules empiriques

	Mallet Gautier	***Fuller II***	***Hazan-Lazarevick***
Q(10)	15.43	586	457.2
Q(20)	15.98	746	548.9
Q(50)	16.41	807	670.2
Q(100)	16.63	982	762.05
Q(500)	16.99	1021	975.1

Les débits calculés par la méthode de Fuller II et Hazan Lazarevick donnent des résultats similaires, tandis que ceux calculés par Mallet Gauthier donnent des valeurs sous-estimées que l'on ne va pas retenir.

VII.5.2.2 Ajustement statistique des débits maximums instantanés

Cette méthode est basée sur autant de données que l'on a d'années à disposition des débits instantanés maximaux annuels. Dans le cas de notre zone d'étude, on va ajuster par les débits de la station hydrologique d'Ouljet Sultane. Le rapport entre les débits maximums journaliers et les débits maximums instantanés de la station d'Ouljet Sultane permettant de définir le coefficient de pointe qui est de 1.5.

Dans le but de vérifier des hypothèses d'homogénéité entre une variable aléatoire et un modèle calculé, on procède à l'ajustement statistique. Si ce modèle est bien superposé à l'échantillon étudié, on peut le considérer comme étant bien ajusté. L'objectif de cette

méthode est la réduction de la masse de données, qui si importante devrait être remplacée par un nombre réduit de paramètres statistiques pouvant représenter correctement cette masse (DADI, 1998).

Ces données ont été ajustées à l'aide du logiciel HYFRAN, par plusieurs modèles probabilistes, pour en retenir le meilleur. La série des débits enregistrés a été ajustée avec les lois suivantes : Gamma, GEV, Gumbel, Pearson III, Normale ; Pour chaque loi, nous obtenons un tableau récapitulatif des paramètres statistiques. Le choix de la loi qui s'ajuste le mieux à la série de données se base sur des tests d'adéquations qui jugent la validité de la loi. Ces critères sont : le critère d'information Bayésien (BIC) et le Critère d'information d'Akaike (AIC). Le choix de la loi qui s'ajuste le mieux doit avoir un AIC et BIC les plus faibles.

Après avoir appliqué les différentes lois statistique (la normale, Gamma, Gumbel, GEV, Pearson type III) par le logiciel HYFRAN, on a trouvé que la loi normale est celle qui s'ajuste le mieux aux données de la station, et ceci en se basant sur le graphe de comparaison de différentes lois (Fig. 33) ainsi sur les critères BIC et AIC qui sont les plus faibles (Tab.8).

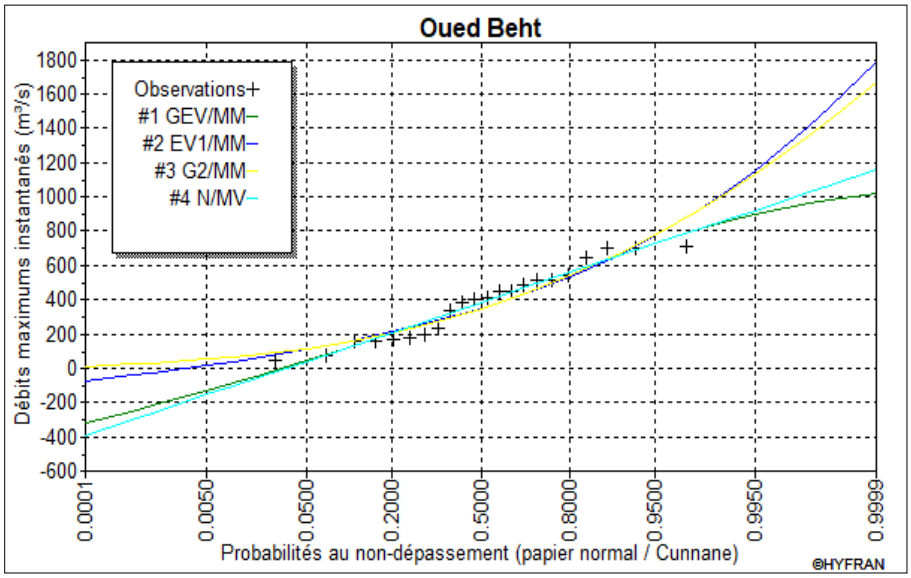


Figure 33: Comparaison des courbes d'ajustement

Tableau 8: Résultats d'ajustement aux différentes lois des Qp

Modèle	***BIC***	***AIC***
Normale	302.647	300.465
Gamma	304.309	302.127

Gumbel	304.649	302.467
GEV	305.178	301.905
Pearson type III	305.734	302.461

Les valeurs de débit résultant de cet ajustement sont données dans le tableau suivant :

Tableau 9:Résultats de l'ajustement des débits de crues en période de retour par la loi de Gamma

Période de retour T	***2***	***10***	***20***	***50***	***100***	***500***	***1000***
Probabilité de non dépassement de Qp	0.5	0.9	0.95	0.98	0.99	0.998	0.999
Qp pour période de retour T	**383**	**651**	**727**	**812**	**869**	**984**	**1030**

VII.5.2.3 Méthode du Gradex

La méthode du Gradex, a donc pour but de rechercher les débits maximaux de crues pour des fréquences d'apparition rares à très rares >100 ans. Elle s'applique notamment lorsque l'on dispose d'une longue série de pluie sur le bassin, permettant ainsi de valoriser au maximum l'ensemble des données disponibles. De manière générale, on dispose souvent de plus d'informations pluviométriques (Meylan et Musy, 1999). Cette méthode introduite par Guillot et Duband (1967) depuis, elle est utilisée par plusieurs auteurs tels que Naghettini et al (1996).

La conduite de la méthode du Gradex est comme suit :

- Ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières et détermination, des Pjmax(T) pour T allant de 2 à 1000 ans.

- Détermination du gradex journalier (Gp (24)) ; Le passage aux pluies en 24 heures se fera en multipliant les valeurs par un coefficient égal à 1,15 et ceci pour tenir compte des erreurs systématiques dans la mesure. La valeur de Gradex doit aussi être changée avec la multiplication de Gradex des pluies journalières par le même coefficient de 1.15.

- Calcul du Gradex des pluies sur le temps de concentration Gp (Tc) à partir du Gradex des pluies en 24 heures par la formule :

$$\mathbf{Gp(Tc) = Gp(24) \times \left(\frac{Tc}{24}\right)^{(0.33)}} \qquad \mathbf{(29)}$$

- Calcul du débit moyen Q(T) par la méthode du Gradex s'énonce comme suit :

$$\mathbf{Qmoy(T) = Gd\ (Tc)[y(T) - y(T0)] + Q0} \qquad \mathbf{(30)}$$

Gd(tc) : Gradex des débits pour la durée tc (m3/s)

y (T) : Variable de Gumbel pour la période de retour (T)

Q0 : Débit de référence de (m3/s)

T0 : Période de référence (10ans)

Le débit de pointe de référence Q_{10} (T0) (pivot du Gradex) est pris égale au débit décennal résultant de la méthode rationnelle. (Q_{10}= 488 m3/s)

- Calcul des débits de pointe pour chaque période de retour par la méthode du Gradex :

Pour chercher les débits de pointes de crues d'un cours d'eau, il faudra associer ces débits moyens à un coefficient de pointe (Cp=1.5).

Concernant la méthode du Gradex, l'ajustement des précipitations journalières maximales (Tab.10) nous a permis d'estimer les valeurs des précipitations, ainsi le Gradex moyen (16.5mm). Le passage aux pluies en 24 heures se fera en multipliant les valeurs par un coefficient égal à 1,15 et ceci pour tenir compte des erreurs systématiques dans la mesure. La valeur de Gradex doit aussi être changée avec la multiplication de Gradex des pluies journalières par le même coefficient de 1.15, Pour en déduire par la suite le gradex sur le temps de concentration (Gp(tc)) calculé à partir du Gradex en 24 heures (Gp (24)).

Tableau 10: Gradex des pluies (mm)

Période de retour T (ans)	***2***	***5***	***10***	***20***	***50***	***100***	***500***	***1000***
Gp (24)	38,9	60,5	74,7	88,4	106,1	119,3	150	163,3
Gp (Tc)	42,33	65,83	81,28	96,19	115,45	129,81	163,22	177,69

A partir du Gradex et du débit décennal de référence Q_{10} on a pu avoir le débit moyen, en le multipliant par le coefficient de pointe pour avoir le débit de pointe pour différentes périodes de retour (Tab.11)

Tableau 11: Débits de pointe par la méthode du Gradex

Période de retour (ans)	***100***	***500***	***1000***
Débits de pointes (m^3/s)	2538	2983	3945

Le tableau 12 récapitule les différents débits obtenus et retenus par les différentes méthodes appliquées. Les débits retenus sont le fruit d'une analyse et une comparaison des débits calculés par les différentes méthodes présentées précédemment. Les débits calculés par les formules empiriques de Fuller II et Hazan-Lazarevick sont comparables à ceux calculés par ajustement statistique. Tandis que les débits calculés par Mallet Gauthier sont sous-estimés que l'on ne va pas retenir. Aussi, retiendrons-nous la moyenne des débits calculés pour les périodes de retour (10, 20, 50 ans), par les formules empiriques de Fuller II et de Hazan Lazarevick et ceux calculés par l'ajustement statistique, tandis que les périodes de retour (100 ,500 et 1000 ans), on retient ceux calculés par la formule du Gradex.

Tableau 12: Résultats des débits de pointe calculés par les différentes méthodes de l'analyse fréquentielle

		Périodes de retour				
		10	***20***	***50***	***100***	***500***
Débits obtenus	**Mallet Gautier**	14.65	15.21	15.63	15.85	16.22
	Fuller II	586	746	807	1021	1132
	Hazan Lazarevick	457.2	548.9	670.2	762.05	875
	Ajustement Loi Normale	651	727	812	869	984
	Gradex	-	-	-	2538	2983
Débits retenus		***564.73***	***673.9***	***763.06***	***2538***	***2983***

Conclusion

Le Bassin versant du Beht est un bassin allongé suivant une direction SE-NW, vont du primaire au quaternaire, les formations primaires étant dominantes. Il a un aspect montagneux très varié. Ses altitudes sont orientées selon un gradient décroissant de l'amont vers l'aval. Son réseau hydrographique est caractérisé par une longueur de 451 km. Le principal cours d'eau s'écoule du Sud-Est au Nord-Ouest, prenant naissance aux confluences des Oueds Tigrigra et Ifrane.

Les sols peu évolués, les sols brunifiés, les vertisols et les sols assimilés sont les principaux types de sols affleurant dans le bassin. Les parcours, qui représentent 32 % de la couverture végétale, prédominent, tandis que les forêts constituent (20%) et les terrains agricoles (18%). Au total, 23% de la surface du bassin est ainsi constituée de terres nues.

Le climat est de type méditerranéen. Les précipitations moyennes annuelles révèlent une hétérogénéité spatiale, avec 513 mm en amont et 340.7mm en aval. Les valeurs moyennes mensuelles maximales sont enregistrées en décembre pour toutes les stations pluviométriques, tandis que les valeurs minimales sont enregistrées en juillet. Les températures varient entre 4.1°C et 30.4°C.

Le régime hydrologique est caractérisé par des périodes des étiages pendant la saison sèche et des périodes de crues qui sont surtout enregistrées pendant les saisons humides.

La variation interannuelle par la méthode des écarts des débits, a révélé une longue période de sécheresse avec des déficits de plus de 80%, et des années humides avec des excédents qui dépassent 200%.

Le régime hydrologique est considéré comme un régime simple (un seul maximum au cours de l'année, du Novembre à Avril) de type pluvial caractérisé par un coefficient mensuel des débits élevés pendant la période pluviale.

L'étude de l'historique des crues a montré que le bassin est caractérisé par de forts débits maximums, avec débits de pointe des crues dépassent souvent 450m3/s.

L'analyse fréquentielle des débits maximums instantanés nous a permis d'estimer les débits projetés et leur durée d'occurrence. Ces données montrent des crues importantes capables d'apporter de gros volumes d'eau et de sédiments et constituent des informations pertinentes et utiles à la modélisation hydraulique qui permet le calcul des profils d'écoulement et de la propagation des crues dans les cours d'eau, afin d'adopter les bonnes mesures stratégiques de protection et de disposer de valeurs fiables pour les dimensionnements d'ouvrages hydrauliques.

CHAPITRE IV : METHODOLOGIE

Introduction

La méthodologie adoptée consiste tout d'abord, en la modélisation hydrologique en appliquant deux types de modélisation, évènementielle par le modèle HEC-HMS et continue par le modèle SWAT, afin de tester et d'évaluer leur applicabilité pour la simulation du comportement hydrologique du bassin. Ainsi, les débits fournis vont être d'une grande importance dans l'étude de l'altération hydrologique et des composantes en débit environnemental en appliquant le modèle IHA.

Ce chapitre présente la procédure de préparation, de collecte et de création de tous les données nécessaires et requises pour la modélisation hydrologique et pour l'évaluation du degré d'altération hydrologique et l'impact des différents changements sur le régime d'écoulement de la rivière et son écosystème.

I. Application du modèle HEC-HMS sur le bassin versant de Beht

L'application du modèle HEC-HMS exige la connaissance de toutes les caractéristiques physiques et hydrologiques des bassins versants, d'où la nécessité de préparer les données nécessaires à la modélisation du bassin versant de Beht, en combinant les différentes technologies spatiales, notamment les systèmes d'information géographique (SIG), la télédétection et les modèles numériques de terrain (MNT).

I.1 Préparation des données nécessaires à la modélisation

I.1.1 Délimitation automatique du bassin versant

I.1.1.1 Modèle numérique de terrain (MNT)

Dans le cadre de la préparation d'un fichier de simulation HMS, avant de procéder à toute opération, il est indispensable de disposer du MNT de la zone d'étude, son rôle étant fondamental dans la caractérisation physique du bassin et le calcul des paramètres.

Le MNT utilisé est de type GDEM-ASTER (Global Digital Elevation Model-Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometr). La résolution altimétrique de ce modèle est de 30 m (Fig.34).

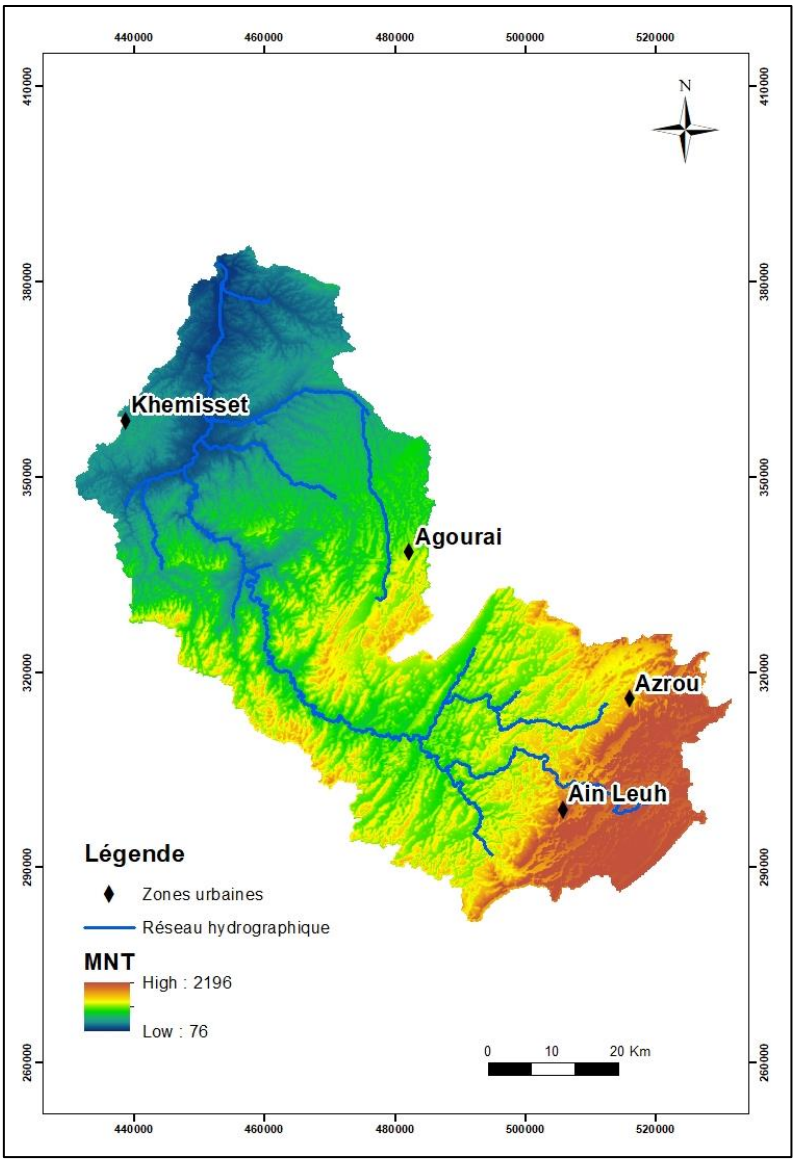


Figure 34: Extrait du modèle numérique de terrain présentant le relief du bassin versant de Beht

I.1.1.2 Délimitation des sous bassins et extraction du réseau de drainage

L'outil ARCHYDRO est une extension dans ArcGis qui permet la délimitation et la caractérisation des lignes de partage des eaux, l'analyse du réseau hydrogéométrique, la gestion et l'exportation des données vers des modèles numériques.

Cette étape consiste principalement à délimiter les sous bassins et extraire le réseau de drainage. Neuf opérations sont effectuées pour obtenir la schématisation du modèle du bassin (Fig.35) :

- **Les outils Fill Sinks et Flow Direction**

Le MNT est corrigé par le remplissage des dépressions en augmentant l'altitude des cellules au niveau du terrain environnant (Fill Sinks) afin de pouvoir déterminer le sens de l'écoulement (Flow Directions).

- **Les outils Flow Accumulation et Stream Définition**

L'accumulation de l'écoulement (Flow Accumulation) détermine le nombre de cellules ascendantes s'écoulant dans une cellule donnée. Elle permet la définition du réseau hydrographique (Stream Definition) qui résulte de la classification de toutes les cellules dont l'accumulation est supérieure à un certain seuil.

- **Les outils Stream Segmentation et Catchment Grid Delineation**

La Segmentation du cours d'eau (Stream Segmentation) divise les cours d'eau en des segments. Les limites des sous-bassins sont tracées pour chaque segment de cours d'eau (Catchment Grid Delineation).

- **Les outils Catchment Polygone Processing et Drainage Line Processing**

La fonction (Catchment Polygone Processing) convertit une grille de captage en une entité polygone. Elle permet de tracer les contours de chaque sous-bassin. Tandis que l'outil (Drainage Line Processing) permet de voir le détail des lignes de drains dans des sous-bassins versants.

- **L'Outil Adjoint Catchment Processing**

La dernière étape constitue l'agrégation des sous-bassins à chaque confluence de ruisseaux (Adjoint Catchment Processing).

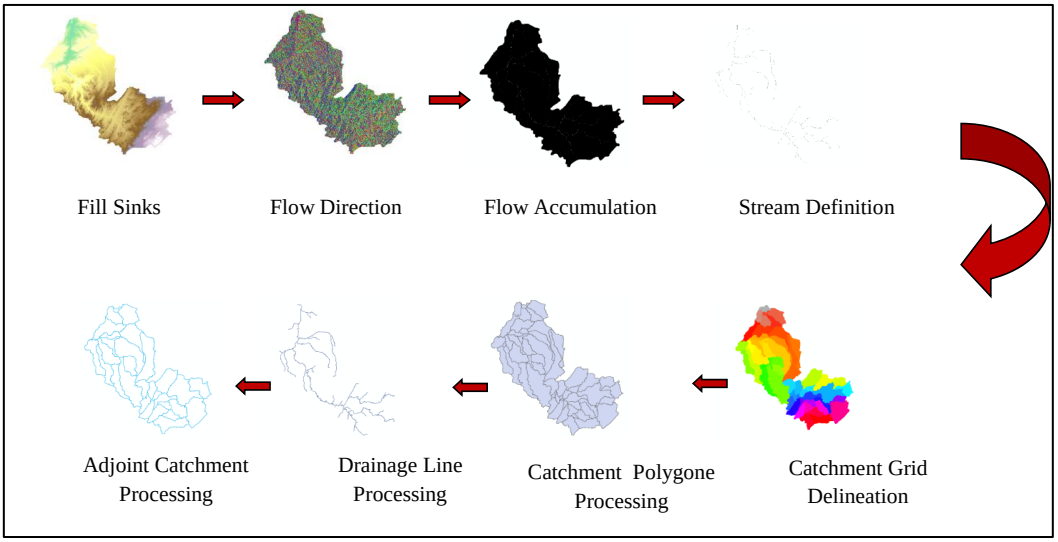


Figure 35: Etapes de la délimitation automatique des sous bassins

I.1.2 Occupation du sol

Le bassin versant de l'Oued Beht comporte six types principaux d'utilisation des sols :

- La majeure partie de la zone est constituée de terrains de parcours, qui représentent 1471 km2.
- Les terrains nus, avec une superficie de 1052 km2, soit 23 % de la surface totale.
- Les forêts viennent en troisième position avec 20.6% de la surface totale.
- Les zones agricoles couvrent 18%.
- Les matorrals représentent 5,6% de l'ensemble du bassin.
- Les zones urbaines avec 0.2 % de la surface du bassin (Fig.36).

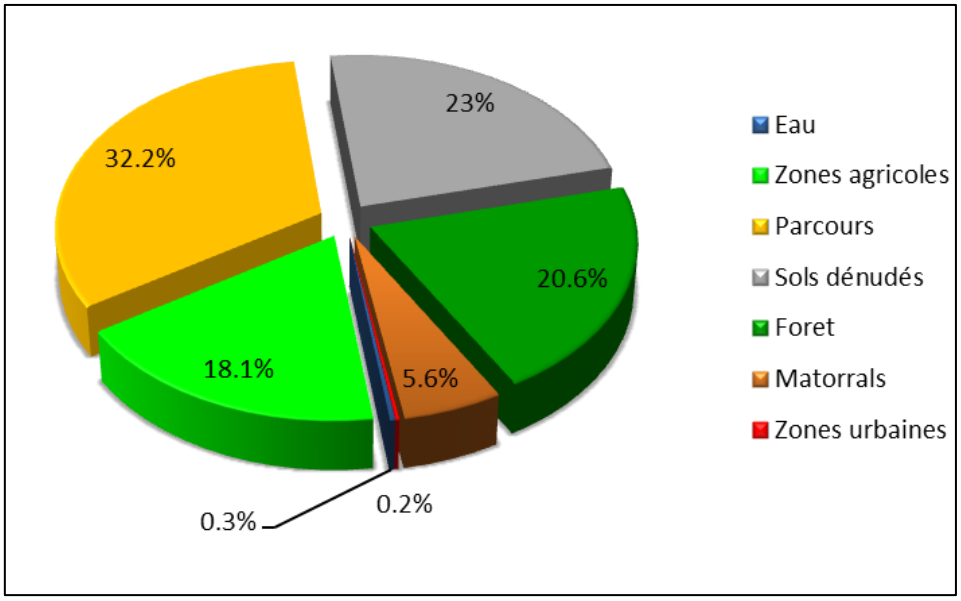


Figure 36: Distribution des types d'occupation du sol du bassin versant d'Oued Beht

En raison des particularités des différents modules choisis, notamment la méthode CN du NRCS (Natural Resources Conservation Service Curve Number) comme fonction de production, l'élaboration d'une carte d'occupation des sols était une étape nécessaire.

Les informations contenues dans cette carte doivent être authentiques par rapport à la classification du NRCS (Natural Resources Conservation Service) (USDA 1986), nous avons donc dû établir des correspondances entre les classes du NRCS et la carte préparée par la méthode de classification des images satellitaires. Ensuite, nous avons reclassé les classes thématiques définies comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tableau 13: Reclassification des classes d'occupation du sol

Première classification		Reclassification	
Numéro de classe	Nom de classe	Numéro de classe	Nom de classe
1	Eau	1	Eau
2	Forêt	2	Terrain boisé
3	Reboisement		
4	Sol nu	3	Terrain non boisé
5	Bâti		
6	Végétation basse	4	Végétation basse

I.1.3 Pédologie

Les principales classes de sols affleurant dans le bassin versant de Beht et leurs caractéristiques majeures sont détaillés précédemment dans le chapitre III et sont comme suivant :

- Sols calcimagnésiques
- Sols isohumiques
- Sols minéraux bruts
- Sols peu évolués
- Vertisols et assimilés
- Sols fersiallitiques
- Sols hydromorphes
- Sols brunifiés

La classification des sols retenue par la méthode SCS est la classification hydrologique. C'est une classification qui consiste à regrouper les sols sous quatre groupes hydrologiques (A, B, C, D) (USACE 2009), en se basant sur les estimations de leur potentiel d'infiltration. Les sols sont affectés à un groupe parmi les quatre en fonction de leur taux d'infiltration.

Groupe A : (faible potentiel de ruissellement) : Sols présentant des taux élevés d'infiltration même lorsque saturés et étant principalement constitués en profondeur de sable ou gravier bien drainés ou excessivement bien drainés. Ces sols possèdent un haut taux de transmission de l'eau infiltrée.

Groupe B : Sols avec des taux d'infiltration moyen lorsque saturés, composés essentiellement de sable ou gravier modérément drainés à bien drainés sur des profondeurs modérées à importantes, avec des textures modérément fines à modérément grossières. Ces sols possèdent un taux modéré de transmission de l'eau

Groupe C : Sols présentant des taux d'infiltration lents lorsque saturés, composés principalement de sols avec une couche qui retarde le mouvement vertical de l'eau ou de sols

avec une texture modérément fine à fine. Ces sols ont un taux de transmission de l'eau qu'on peut qualifier de faible

Groupe D (potentiel élevé de ruissellement) : Sols avec de très faibles taux d'infiltration lorsque saturés, constitués principalement d'argile en surface ou à une faible profondeur ou de sols avec une nappe phréatique haute en permanence. Ces sols présentent un très faible taux de transmission de l'eau.

Le passage de la classification pédologique à la classification hydrologique se fait en renseignant sur la texture des sols en fonction de sa composition en sable, limon, argile et matière organique. Les valeurs de ces composantes sont données dans le tableau suivant :

Tableau 14: Classes texturales des sols et leurs associations selon leur correspondance en classe hydrologique

Nom	Groupe hydrologique	Texture
Sols brunifiés	A	LSA
Sols calcimagnésiques	B	LSA
Sols fersiallitiques	B	LAS
Sols hydromorphes	C	LSA
Sols isohumiques	C	LSA
Sols minéraux bruts	A	LSA
Sols peu évolués	B	LSA
Vertisols et sols assimilés	D	ALO
Sols brunifiés et Sols calcimagnésiques	D	LSA
Sols brunifiés et Sols hydromorphes	D	A
Sols brunifiés et Sols isohumiques	C	LSA
Sols brunifiés et Sols minéraux bruts	B	LSA
Sols brunifiés et Sols peu évolués	C	LSA
Sols calcimagnésiques et Sols isohumiques	C	LSA
Sols calcimagnésiques et Sols peu évolués	A	LSA
Sols fersiallitiques et Sols peu évolués	A	LSA
Sols fersiallitiques et sols holomorphes	B	A
Sols minéraux bruts, Sols peu évolués et Sols hydromorphes	B	LSA
Sols peu évolués et Sols minéraux bruts	C	LSA
Vertisols, sols assimilés et Sols peu évolués	B	A

L :Limon/ S : Sable/ A : Argile

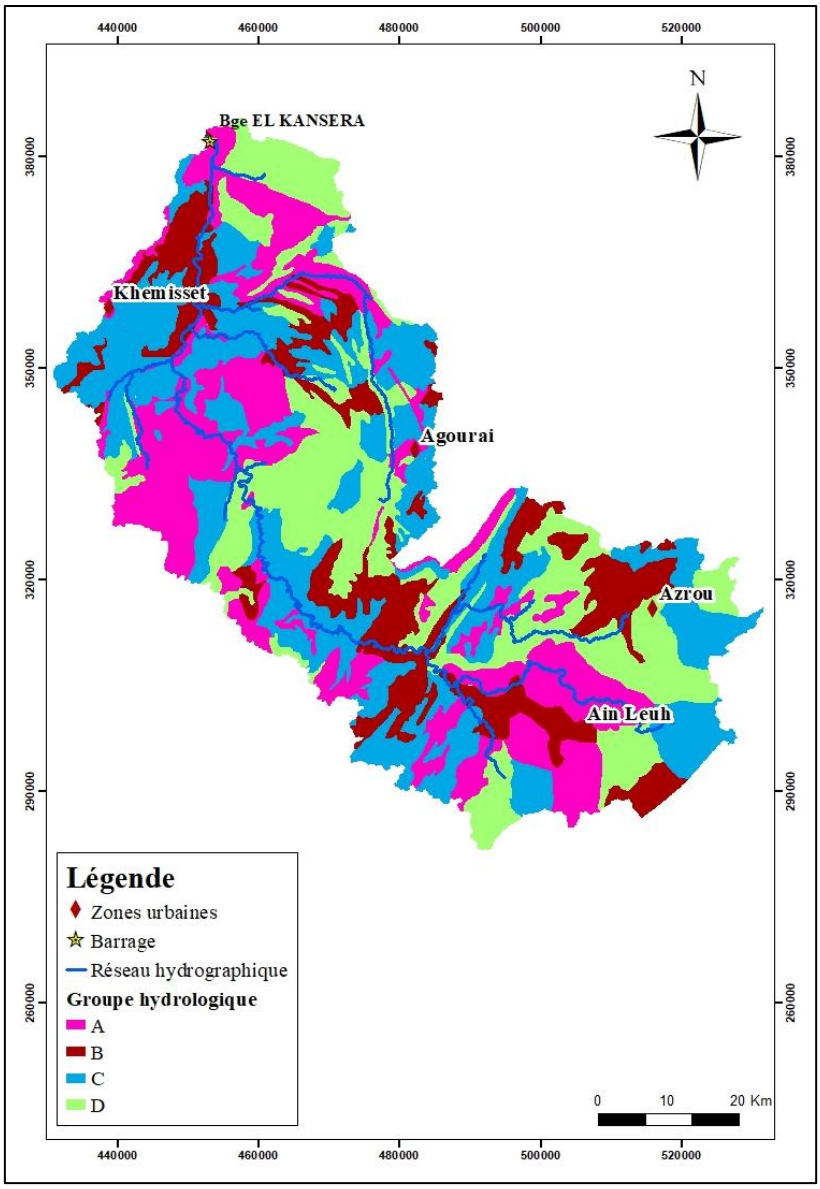


Figure 37: Pédologie du bassin versant de Beht selon la classification hydrologique

On peut conclure de cette carte (Fig.37) que la classe la plus dominante est la classe C, ce qui montre que les sols ont des taux d'infiltration lents, donc un ruissellement relativement élevé. (Daide, 2022).

I.1.4 Estimation des paramètres d'entrées

I.1.4.1 Génération de la grille de Curve Number

La méthode du SCS-CN (USDA-SCS, 1972), détermine le ruissellement de surface à partir d'un événement pluvieux et les caractéristiques du bassin versant dans lequel il se produit.

Le SCS a développé un système de caractérisation des sols basé sur le groupe hydrologique et d'utilisation des sols appelé " Curve Number " (CN). Les valeurs vont de 0 à 100 ; une valeur CN de 0 indique un potentiel de ruissellement nul, tandis qu'une valeur de 100 indique que toutes les précipitations ruissellent (USACE 2009). En d'autres termes, une valeur de 100 est attribuée directement à la surface de l'eau et 0 pour les sols hautement perméables avec un potentiel d'infiltration élevé.

a. Préparation de la table de correspondance type-occupation de sol (CN-Lookup)

La table de correspondance contiendra le Curve Number pour différentes combinaisons de combinaisons d'utilisation des sols et de groupes de sols. L'objectif de cette table est de définir les valeurs CN pour chaque combinaison d'utilisation des sols et de groupes hydrologiques. Dans ce cas, nous utiliserons les numéros de courbes SCS qui sont disponibles dans la littérature (rapports SCS ou tableaux SCS). Le tableau 15 résume la table de correspondance CN créée à partir des classes d'utilisation des sols et de leur correspondance en groupes hydrologiques tout en respectant la norme TR-55 et la table d'utilisation des sols du NRCS :

Tableau 15: Tableau de correspondance entre l'utilisation des sols et le type de sol (NRCS)

N° de classe	Nom de classe	A	B	C	D
1	Eau	100	100	100	100
2	Terrain boisé	45	66	77	83
3	Terrain non boisé	77	86	91	94
4	Végétation basse	60	71	78	81

b. Création de la grille CN

HEC-GeoHMS est utilisé pour créer la grille CN. Il combine le résultat de l'union entre le type et l'occupation des sols, la table CN-Lookup et le MNT du bassin. Mais avant de procéder, il est nécessaire d'ajouter un nouveau champ nommé "LandUse" dans la table d'union. Ce champ contiendra les informations sur la catégorie des occupations du sol, et reliera la table d'union à la table CN-Lookup.

I.1.4.2 Génération de la carte du Curve Number

La carte finale du Curve Number du bassin versant de Beht (Fig. 38) montre un CN moyen de 78 ce qui signifie que le bassin a un ruissellement modérément élevé, et cela est dû au sol de type argileux dominé par des sols peu développés, des sols bruns et des sols assimilés

vertisols et aussi, le couvert végétal qui est marqué par une présence importante de pâturages. Ces résultats sont presque similaires à l'étude réalisée par (Chadli et al. 2016) qui a trouvé que le curve number moyen dans le bassin de Sebou est 82.

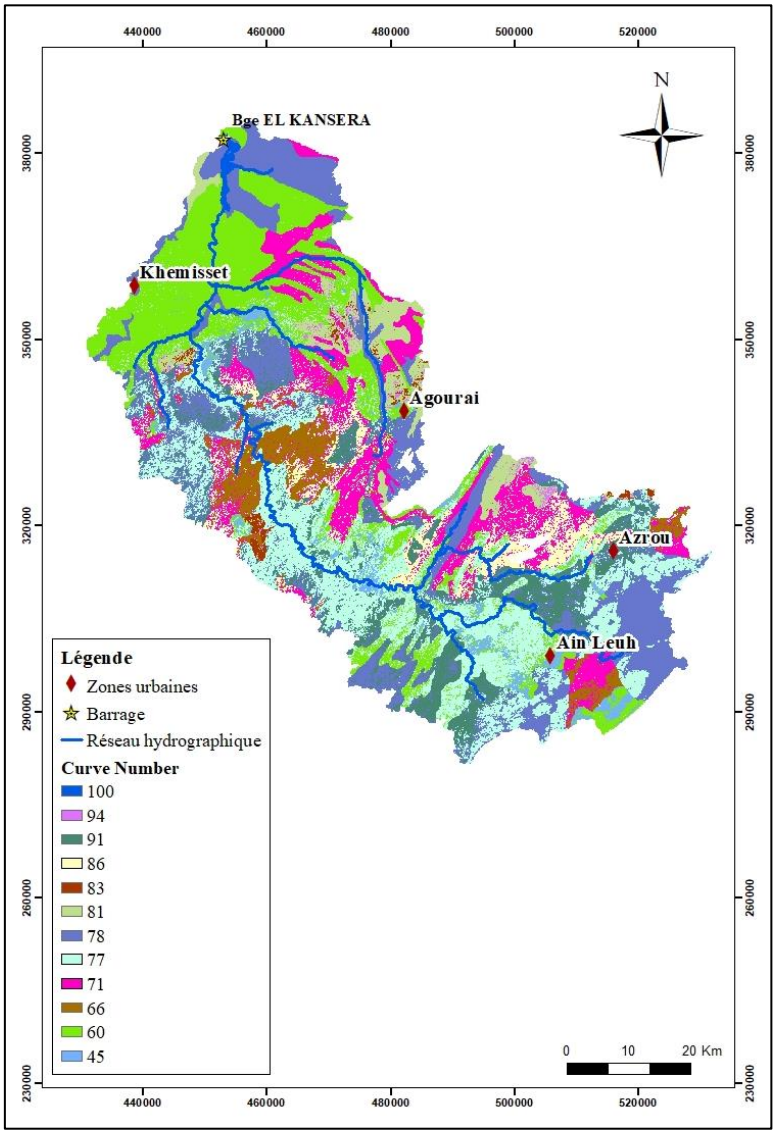


Figure 38: Carte du Curve Number du bassin versant de Beht

Le choix du Curve Number dépend, en plus du type de sol et de l'occupation de sol, des conditions antécédentes d'humidité du sol (AMC). Celles-ci peuvent être sèches (I), modérées (II) ou humides (III) (Mishra et Singh 2003). Les valeurs fournies dans le tableau des attributs (tab.3) sont représentatives des conditions moyennes d'humidité initiale (CNII) (Fig.5) et les nombres de courbes CNI et CNIII sont calculés directement en utilisant les équations (USDA 1985) ci-dessous :

$$\boldsymbol{CN(I) = \frac{4.2 \times CN(II)}{10 + 0.058 \times CN(II)}} \qquad \textbf{(31)}$$

$$CN(III) = \frac{4.2 \times CN(II)}{10 + 0.058 \times CN(II)} \qquad (32)$$

L'état d'humidité du sol est déterminé en fonction des précipitations dans le bassin versant au cours des cinq derniers jours avant l'événement en question, et par saison (saison basse et saison pluvieuse). Le nombre de courbes dans les conditions I et III est respectivement de 51 et 89 (Fig.39).

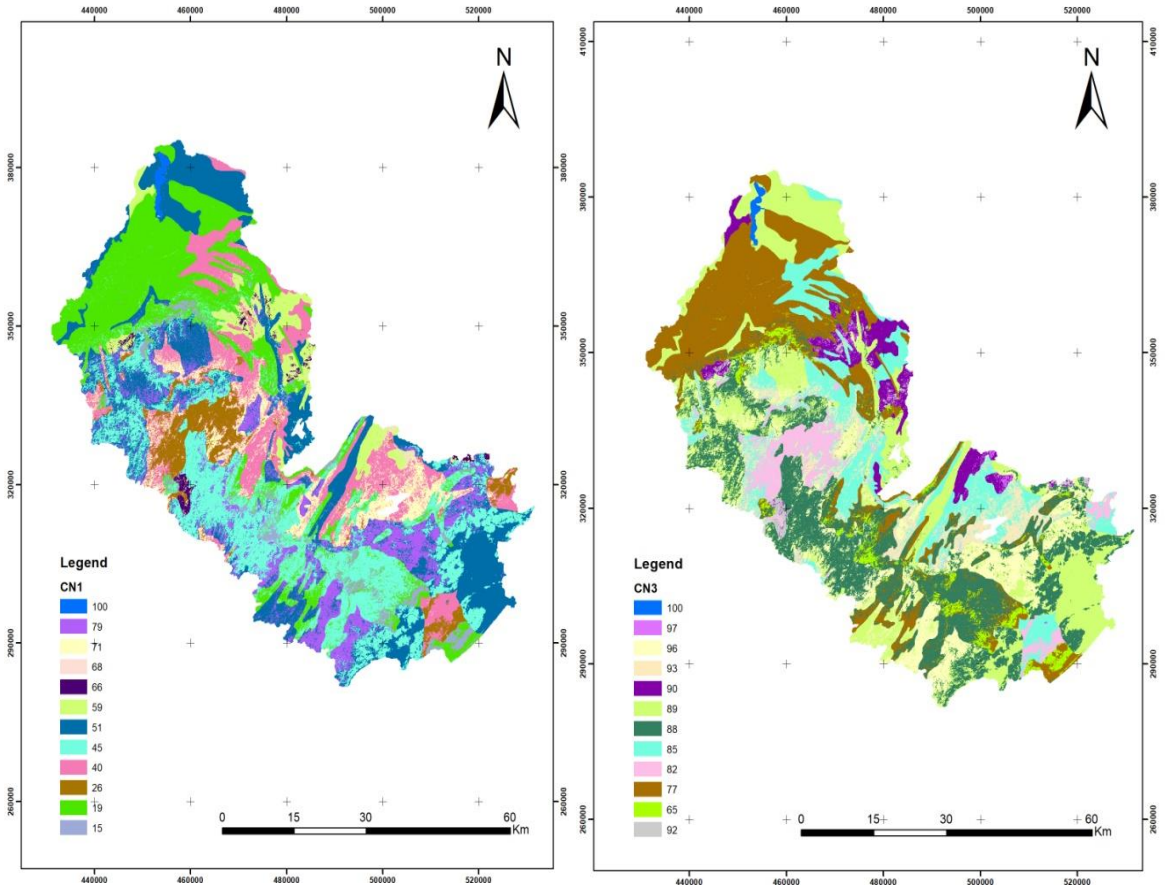


Figure 39: Carte du Curve Number du bassin versant de Beht à l'état sec (I) et à l'état humide (III)

I.1.4.3 Estimation du paramètre de l'abstraction initial

L'abstraction initiale mesurée en mm, elle correspond aux pertes initiales provenant durant la première phase de l'événement pluvieux, alors, l'écoulement ne débute qu'une fois la pluie brute dépasse la valeur de Ia. Elle est calculée à l'aide de l'équation suivante qui dépend directement au CN :

Ia = S*0.2 (33) **Avec:** $$S = \frac{25400 - 254 * CN}{CN} \qquad (34)$$

Sa valeur sera estimée lors de la phase de calibration.

I.1.4.4 Estimation du paramètre Lag Time

Le Lag time ou temps de Lag d'un bassin versant est définit comme la différence entre le pic de la pluie nette et le pic de l'hydrogramme, son calcul peut se faire par plusieurs formules mathématiques, comme il peut se faire sur la base du calcul du temps de concentration. Le temps de concentration (Tc) des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point situé le plus loin possible de l'exutoire pour atteindre ce dernier.

Théoriquement on estime que *Tc* est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques. Dans cette étude nous avons calculé le temps de concentration par la formule de Turrazza et Passini : (Tab.16)

$$T_c = 0{,}108 * (S \times L)^{1/3} / I^{1/2} \qquad (35)$$

Avec;

S : Superficie du sous-bassin.

L : longueur du talweg le plus long (Km).

I : Pente moyenne du cours d'eau principal (%).

Divers chercheurs (Mockus 1957 ; Simas 1996) ont constaté que pour des conditions naturelles moyennes du bassin versant et une distribution approximativement uniforme du ruissellement :

$$T_{lag} = 0.6 T_c \qquad (36)$$

Tableau 16: Temps de concentration et temps de lag du bassin versant de Beht

Sous-bassin versant	Oued principal	Tc (h)	T_{lag}
1	Tigrigra	5.2	3.12
2	Ifrane	4.3	2.58
3	Ouchket	2.9	1.74
4	El Kell	2.8	1.68
5	El Kour	2.7	1.62
6	Beregline	2.4	1.44
7	Kharrouba	2.3	1.38

I.1.4.5 Estimation du paramètre Impervious (Imp%)

Le pourcentage d'imperméabilité représente la partie de la surface du bassin considérée comme imperméable et liée directement au réseau de drainage. Son estimation est réalisée lors de la phase de calibration.

I.2 Importation du modèle sous HEC-HMS

Une fois toutes les étapes de l'élaboration de la base de données des paramètres hydrologiques géospatiales sont effectuées avec le Hec-GeoHms, nous procédons à l'importation du notre modèle de bassin sur la vue de logiciel HEC-HMS (Fig.40) pour la simulation du comportement pluie-débit.

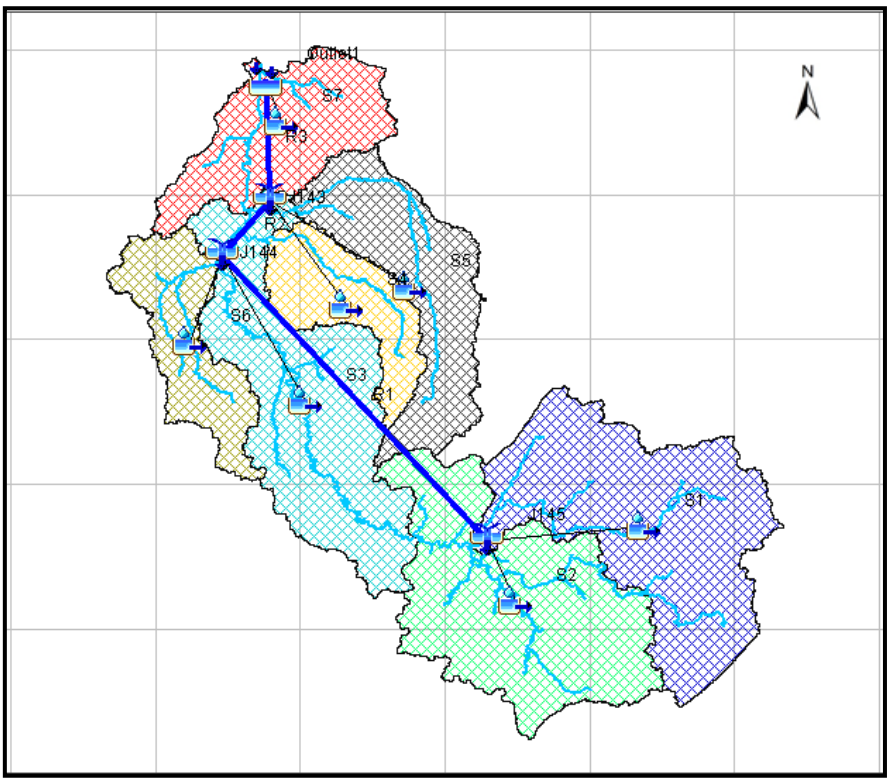


Figure 40: Schématisation du modèle final du bassin de Beht sous HEC-HMS

Le modèle hydrologique du bassin de Beht sera représenté dans HEC HMS par :

- Sept sous bassins nommés respectivement : S1 (Tigrigra), S2 (Ifrane), S3 (Kharrouba), S4 (Ouchket), S5 (El Kell), S6 (Beregline), S7 (Elkour).
- 1 exutoire
- 3 jonctions
- 3 tronçons de rivière

Le tableau 17 représente les paramètres d'entrées les plus importants dans le modèle conceptuel choisi cité dans le chapitre II.

HEC-HMS possède une fonction d'optimisation interne pour calibrer le modèle hydrologique, les valeurs initiales des paramètres à calibrer sont calculées via les données spatiales de la zone d'étude. Ces paramètres vont par la suite optimisé par le HEC-HMS.

Tableau 17: Paramètres d'entrée du modèle

		Fonction de production (SCS-CN)		**Fonction de transfert (SCS UH)**
Sous bassins	**Surface (km2)**	**CN**	**Initial abstraction (Mm)**	**T_{lag} (min)**
S1	909.37	77	15	189.34
S2	1019.60	75	17	155.2
S3	798.12	74	24	82.63
S4	326.53	73	18	106.7
S5	487.20	72	19	101.67
S6	353.26	72	20	89.50
S7	413.20	68	20	96.64

I.3 Simulation

La calibration d'un modèle consiste à déterminer, sur un échantillon d'événements de référence, un ou plusieurs jeux de paramètres avec lesquels les simulations du modèle approchent au mieux les hydrogrammes de la base de données de référence.

L'analyse de la sensibilité du modèle est faite d'une façon automatique par une procédure qui permet de calculer les valeurs optimales des paramètres à caler afin d'améliorer la cohérence entre l'hydrogramme observé et simulé.

Le modèle a été calibré en utilisant la fonction d'optimisation Univariate Gradient qui ajuste un seul paramètre à la fois en gardant les autres constants et la fonction objectif Peak-Weighted Root Mean Square Error (Hawkins et al., 2009), qui mesure la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé à l'hydrogramme observé, que ce soit en termes de débit, de volume ou de temps et qui donne plus d'importance aux débits supérieurs à la moyenne et moins à ceux inférieurs.

Les paramètres du modèle, à savoir CN, Lagtime, Impervious et Initial Abstraction, ont été optimisés en les modifiant à partir des valeurs calculées (Tab.18) et en les faisant varier

successivement dans un intervalle de (± 20%) jusqu'à atteindre un critère d'évaluation acceptable entre les débits simulés et observés.

Pour cette étude, les événements ont été choisis, en fonction des données disponibles, dans la période entre 2001 et 2014 (Tab.18). Les données pluviométriques utilisées sont celles des stations de Sidi El Mokhfi, Ouljet Soltane et barrage El Kansera, tandis que pour la station de jaugeage est représentée par la station d'annonce des crues de Ouljet Soltane. Il reste à noter que les différents paramètres du bassin peuvent être calibrés afin d'avoir une bonne correspondance entre les valeurs calculées et mesurées. (Daide, 2022).

Tableau 18: Caractéristiques des événements utilisés pour le modèle

Evénements	Fonction	Date début	Date fin
1	Calibration	01/12/2001	31/12/2001
2	Calibration	01/12/2003	31/12/2003
3	Calibration	01/12/2009	31/12/2009
4	Calibration	21/11/2010	21/12/2010
5	Validation	01/03/2013	31/03/2013
6	Validation	13/01/2014	09/02/2014

II. Application du modèle SWAT sur le bassin versant de Beht

Le principal problème rencontré en travaillant avec des modèles complexes, tels que SWAT, est principalement la disponibilité, l'accès et la qualité des données d'entrée. Les données à collecter doivent donc être acquises dans toutes les zones représentatives du bassin étudié. En effet, il est indispensable de disposer d'un grand volume de données à une résolution spatiale fine et avec un pas de temps journalier sur une période très longues, afin de simuler les processus réels se déroulant dans le bassin.

II.1 Préparation et intégration des données d’entrée

II.1.1 Relief

Le relief joue un rôle important dans le fonctionnement d’un bassin versant. C’est l’élément fondamental déterminant les caractéristiques physiographiques et géométriques du bassin et c'est le principal facteur qui régit ou affecte tous les processus du bassin.

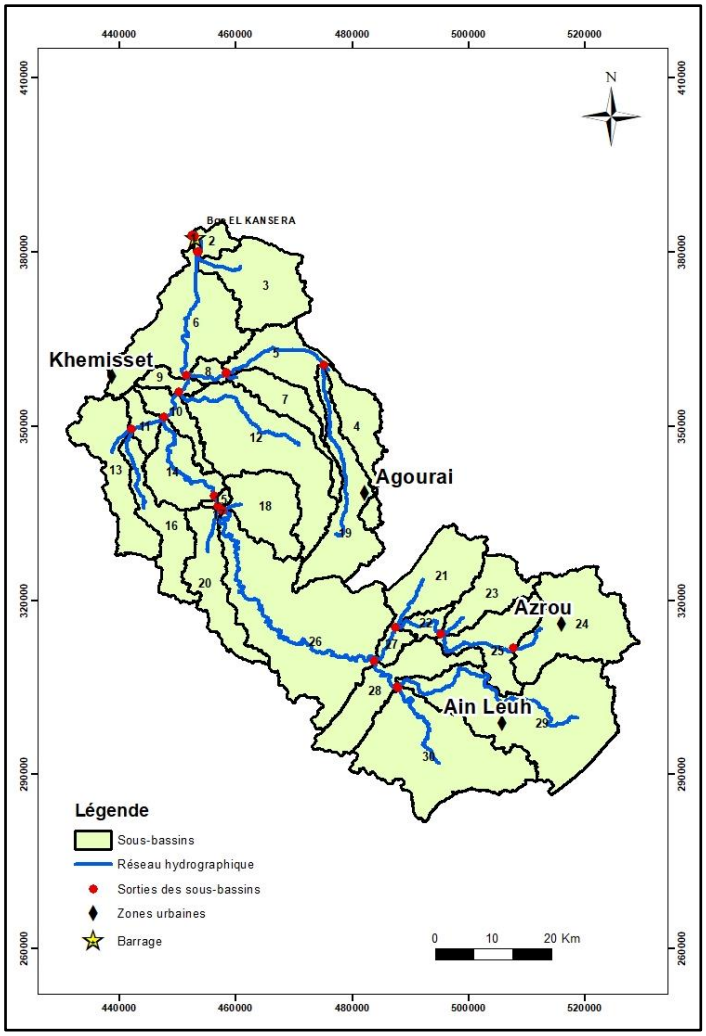


Figure 41: Carte des sous-bassins du bassin versant générée par SWAT

II.1.2 Unité de réponse hydrologique (HRU)

La surface à modéliser est ensuite subdivisée par le modèle SWAT en unités de réponse hydrologique (HRU), lesquelles sont une subdivision en unités plus petites de chaque sous-bassin. Ces HRUs résultent de la combinaison entre l'occupation du sol, les types de sol et de la pente.

Chaque unité appartient donc à seul sous-bassin et elle est constituée du même type de sol, d'occupation du sol et de classe de pente.

II.1.2.1 Occupation du sol

La carte d'occupation du sol du bassin élaborée doit être intégrée dans la base de données SWAT en remplissant tous les champs de la table des attributs nécessaires au modèle SWAT et en décrivant chaque type d'occupation du sol. Ces attributs peuvent être importés de la base de données SWAT (Tables Crop.dat et Urban.dat) en faisant une correspondance entre les

types d'occupation du sol locaux avec celles définies dans la base de données SWAT, (Tab.19).

Tableau 19: Correspondance de l'occupation du sol dans le modèle SWAT

Type d'occupation du sol	Correspondance dans SWAT
Eau	WATR
Zone agricole	AGRL
Parcours	PAST
Sols dénudés	SWRN
Forets	FRST
Matorral	RNGB
Zone urbaine	URBN

II.1.2.2 Pédologie

La connaissance de la nature du sol et de son état hydrique fournit des informations importantes pour comprendre et modéliser le fonctionnement hydrologique des bassins versants (Normand et al., 1996).

Les informations sur les sols sont intégrées dans le modèle SWAT, y compris la répartition des différents types de sols (cartes pédologique préparée) mais également une table d'attributs décrivant les propriétés physiques et chimiques de chaque type de sol, telles que la texture, la profondeur, la disponibilité en eau du sol (AWC) et la conductivité hydraulique (Ksat) etc (Annexe A). L'intégration de ces deux éléments est d'une grande importance, car il permet une simulation plus fiable des interactions entre le sol, l'eau et l'air (Chkir, 1994). Pour ce faire, on a utilisé la base de données du sol HWSD (Harmonized World Soil Database) produite par FAO (Food and Agriculture Organisation) et IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis), comportant les caractéristiques de chaque classe du sol ainsi que celles de ses différentes couches (Taia, 2015). Vingt et un nouveau type de sol avec leurs caractéristiques ont été créés et intégrés dans la base de données du modèle.

Le tableau 20 donne une description synthétique des différents paramètres composant la table attributaire.

Tableau 20: Composants de la table attributaire

Paramètres	Description	Observation
SNAM	Nom du type de sol	
NLAYERS	Nombre de couches dans le profil du sol	Propriété du sol entier
HYDRGRP	Groupe hydrologique du sol (A, B, C ou D selon la classification du NRCS)	
SOL_ZMX (mm)	Profondeur maximale du sol	
ANION_EXCL (%)	Fraction de porosité à partir de laquelle les anions sont exclus (Optionnel)	
SOL_CRK (m3/m3)	Potentiel de fissures exprimé en termes de volume (Optionnel)	
SOL_Z (mm)	Profondeur de la couche, calculée à partir de la surface	Propriété de chaque couche du sol
SOL_BD (g/cm3)	Densité apparente	
SOL_AWC (mm H2O/mm sol)	Teneur en eau	
SOL_CBN (%)	Pourcentage du carbone dans le sol	
SOL_K (mm/hr)	Conductivité hydraulique à saturation	
CLAY (%)	Teneur en argile dans le sol	
SILT (%)	Teneur en limon dans le sol	
SAND (%)	Teneur en sable dans le sol	
ROCK (%)	Teneur en fragments de roches dans le sol	
SOL_ALB	Albédo du sol	
USLE_K	Facteur d'érodibilité du sol (Equation USLE)	
SOL_EC (µS/cm)	Conductivité hydraulique (Optionnel)	

II.1.2.3 Pente

La répartition des pentes du bassin a été obtenue a partir du MNT, selon les classes suivantes :

- Pente < 5%/
- 5% < Pente < 10%
- 10% < Pente < 20%
- 20% < Pente < 40%
- Pente > 40%

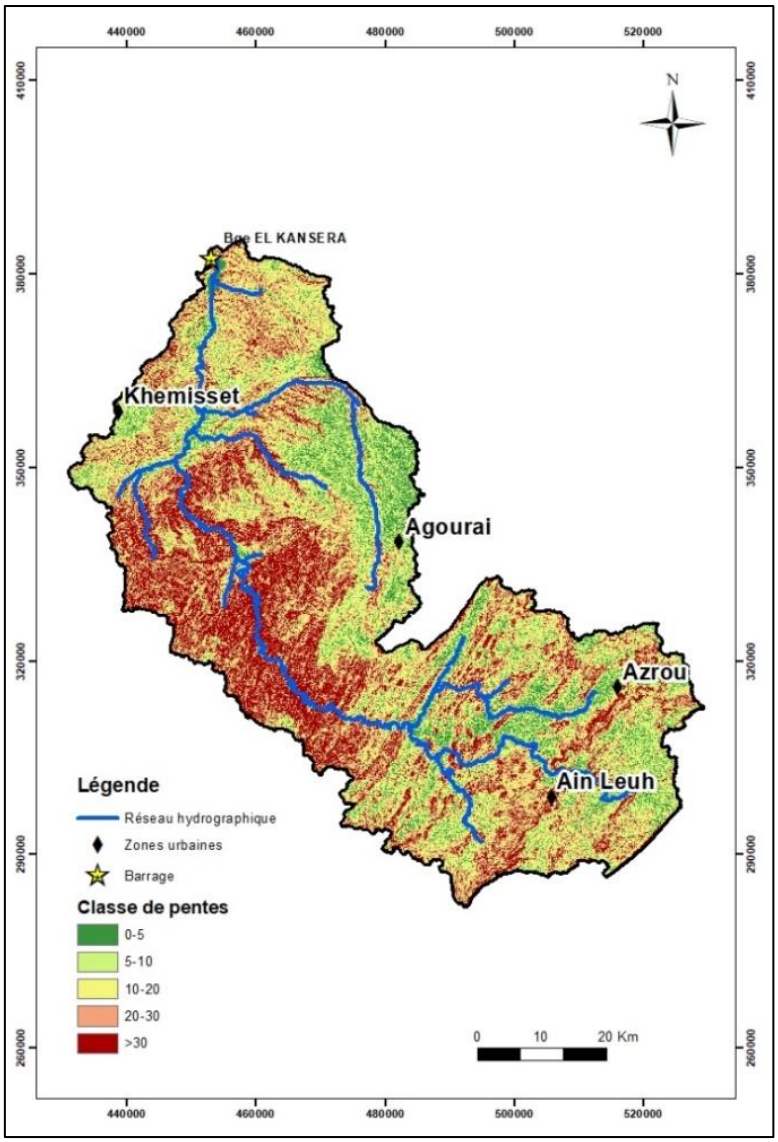


Figure 42: Carte des pentes du bassin versant d'Oued Beht

II.1.2.4 Découpage en unités de réponse hydrologique

Lorsque les données sur l'occupation du sol, les types du sol et les pentes sont définies et superposées pour le bassin versant, les calculs des unités de réponses hydrologiques (HRU) ont été lancés. Le bassin a été divisé en 942 HRUs.

Afin d'éliminer les classes mineures, d'occupation des sols, de types du sol et de pentes, un raffinement des HRU a été effectué en spécifiant des seuils de généralisation des différentes classes au niveau de chaque sous-bassin. Par conséquent, dans cette étape, un seuil de 10% a été choisi pour les trois composantes (occupation des sols, type du sol, pente). Ce qui signifie qu'un pourcentage de classe inférieur à 10% du sous-bassin versant est considéré comme négligeable et n'est pas inclus dans les calculs des HRUs. Ainsi, un total de 531 HRU a été déterminé pour le bassin versant de Beht.

II.1.3 Données climatiques

Le modèle SWAT nécessite les données climatiques suivantes : précipitations, températures minimales et maximales, vitesse moyenne du vent, humidité relative et rayonnement solaire (Neisch, 2005). Le pas de temps de ces données doit être journalier.

Dans cette étude, les données observées qui sont disponibles sont les précipitations, tandis que pour les autres variables, nous avons utilisé les données satellitaires CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) qui sont les plus proches des stations observées, comme indique le tableau ci-dessous (Tab.21).

Les données de CFSR sont réalisées par les centres nationaux de prévision environnementale NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Elles sont largement utilisées pour simuler le système hydrologique dans les bassins versant marocains (Brihet et al, 2016 ; Fadil et al., 2011), et ont montré des résultats satisfaisants.

Tableau 21: Coordonnées des stations utilisées

Stations	Nom	Longitude	Latitude	X	Y	Elévation	Période
CFSR	336-59	-5.869	33.639	456250	338050	469	1989-2014
	340-59	-5.915	34.04	452100	382620	133.5	
	334-53	-5.318	33.402	507550	311400	1121	
P	339-59	-5.938	33.87	450089	363617	142	
	336-59	-5.938	33.565	449914	329800	594	
	333-53	-5.313	33.252	507956	294972	1934	

II.2 Analyse de sensibilité

Pour une opération de calibration efficace, une analyse de sensibilité a été effectuée sur la base de l'équation de sensibilité relative décrite par Haan (2002) pour déterminer les paramètres SWAT les plus sensibles sur lesquels on doit se concentrer pendant le processus de calibration.

Pour effectuer l'analyse de sensibilité sur notre zone d'étude, on a tout d'abord défini la fonction objective optimisée, afin de comparer les débits observés et ceux simulés. Elle est basée sur plusieurs indices statistiques tels que le coefficient de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970), le coefficient de détermination (R^2), l'erreur moyenne quadratique (RSR). Ensuite, on a déterminé les paramètres d'entrée les plus signifiants qui influent les débits dans le bassin versant de Beht. Selon (Arnold et al., 2012), ces paramètres et leurs fourchettes de variation sont représentés dans le tableau ci-dessous. Une analyse de sensibilité globale a été réalisée pour déterminer le nombre de paramètres à calibrer, sans tenir compte de ceux qui n'ont pas d'influence par rapport au phénomène étudié.

Tableau 22: Paramètres de calage qui influent le débit

Paramètres	Description	Plage de variation
CN2.mgt	Curve Number	35-98
SOL_AWC.sol	L'eau disponible dans le sol	0-1
SOL_K.sol	Conductivité hydraulique saturée	0-500
SOL_BD.sol	La densité apparente du sol	0.9-2.5
ALPHA_BF.gw	Coefficient de tarissement de la nappe souterraine	0-1
GW_DELAY.gw	Délai de recharge de l'aquifère (j)	0-365
GWQMN.gw	Seuil de contribution de la nappe souterraine à l'écoulement en chenal, écoulement de base	0-5000
GW_REVAP.gw	Coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine	0.02-0.2
REVAPMN.gw	Seuil d'évaporation à partir de la nappe souterraine	0-500
RCHRG_DP.gw	Coefficient de percolation vers la nappe profonde	0-1
SHALLST.gw	Profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère peu profond	0-1000
DEEPST.gw	Profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère profond	0-1000
ESCO.hru	Facteur sol d'évaporation du sol en fonction de la profondeur	0.6-1
EPCO.hru	Facteur végétal d'évaporation du sol en fonction de la profondeur	0.6-1
DEP_IMP.hru	Profondeur de la couche imperméable	1000-7000
SLSUBBSN.hru	La longueur moyenne de la pente du bassin	10-150
LAT_TIME.hru	Temps de parcours du flux latéral.	0-180
SURLAG.bsn	Le temps de réponse au ruissellement de surface	0-24
CH_N2.rte	Coefficient de Manning des chenaux principaux	-0.01-0.3
CH_K2.rte	Perméabilité des berges des chenaux principaux	-0.01-500
SMFMX.bsn	Taux maximal de fonte de la neige pendant l'année	0-20
SMTMP.bsn	Température de base de la fonte des neiges	-5-5
SMFMN.bsn	Taux minimal de fonte de la neige pendant l'année	0-20
SFTMP.bsn	Température de chute de neige	-5-5

II.3 Calibration

La procédure de calibration peut se faire manuellement ou d'une façon automatique en utilisant une fonction d'optimisation. La liste des paramètres SWAT à calibrer est définie selon les processus traités et suite à l'analyse de sensibilité. Cette dernière phase est précédée généralement par une phase d'initialisation du modèle « Warm-Up » qui consiste à utiliser les données de certaines années (2 à 5 ans) pour tenir en compte des conditions initiales du milieu et initialiser ainsi les valeurs des paramètres du modèle.

Le modèle SWAT a été exécuté sur une période de 17 ans, avec deux années de réchauffement (1998-1999). La période de calibration (Jan. 2000 à Déc. 2007). Période de validation (Jan. 2008 à Juil. 2014).

Afin d'estimer et d'apprécier l'effet de chaque paramètre sur la réponse du modèle, il faut donc procéder à une succession de série de simulations ou d'itérations qui peut varier entre 500 et 1000, jusqu'à l'obtention des domaines de variance optimaux qui permettent d'avoir la meilleure corrélation entre les données observées et celles simulées par le modèle et avec le degré d'incertitude exigé. Cette analyse de sensibilité nécessite un temps de calcul très considérable selon le nombre de paramètres utilisés.

Vu l'hétérogéneité spatiale et la grande superficie du bassin de Beht, on a adopté une calibration multi-site ou calibration séquentielle, qui a été proposée par certains chercheurs (Cao et al., 2003 ; Van Liew et Veith, 2010). Elle consiste à caler le modèle en plusieurs points qui représentent généralement les stations de mesure.

Ainsi, les stations utilisées pour le calage du modèle SWAT sur le bassin de Beht sont : La station de Sidi El Mokhefi située en amont du bassin, la station Ouljet Soltane au milieu et la station de barrage El Kansera en aval.

II.4 Validation

L'étape de validation consiste à récupérer les paramètres retenus lors du calage et les introduire au modèle pour refaire une nouvelle simulation sur une nouvelle série de données.

Moriasi et al., (2007) ont proposé trois indicateurs statistiques pour l'évaluation de la performance du SWAT, tels que le coefficient de Nash-Sutcliffe, le coefficient de corrélation R2, Le ratio Erreur Moyenne quadratique – Ecart type. Les équations de ces critères ont été détaillées dans le chapitre II.

Abbaspour (2004), en introduisant sa méthode de calage stochastique SUFI, propose d'utiliser deux indicateurs supplémentaires pour l'estimation de l'incertitude du modèle. Ces deux indices sont :

- P-factor : il exprime le pourcentage des observations incluses dans l'intervalle de confiance de 95% (95PPU : 95 Percent Prediction Uncertainty). Sa valeur varie de 0 à 1. La valeur 1 indique une parfaite corrélation entre les sorties simulées et les observations ;
- R-factor : il exprime l'épaisseur moyenne de la bande de l'intervalle de confiance (95PPU) divisée par l'écart type des observations. Sa valeur varie de 0 à l'infini. Une valeur proche de 0 indique une très bonne performance du modèle.

III. Application du modèle IHA sur bassin versant de Beht

La croissance démographique, l'augmentation de l'activité humaine, le changement climatique, la surexploitation des eaux superficiels (Wang, X. et al., 2012), la pollution des rivières, la surpêche, et le changement dans les utilisations des sols (y compris la déforestation) (Dudgeon, 2000), la présence des ouvrages hydrauliques qui répondent à la demande croissante en eau (pour l'agriculture, l'industrie et la consommation humaine), sont tous des facteurs qui modifient et altèrent le régime d'écoulement naturel des rivières et de leurs écosystèmes (McAllister, D.E. et al., 2001, Kuriqi, A. et al., 2016). A titre d'exemple, la construction d'un barrage peut avoir des effets positifs, mais aussi négatifs, en diminuant le niveau de l'eau dans la rivière en aval, susceptible de provoquer de sérieuses perturbations de l'écosystème riverain en aval (Kuriqi, A. et al., 2017).

Dans le contexte d'une gestion durable des eaux douces, il est nécessaire d'évaluer le degré d'altération et l'impact des différents changements sur le régime d'écoulement de la rivière et son écosystème, afin de disposer de débits environnementaux (débits réservés) adéquats dans les rivières (Hayes, D.S. et al., 2018).

III.1 Aperçu sur le modèle IHA

Les régimes hydrologiques jouent un rôle majeur dans la structuration de la diversité biotique au sein des écosystèmes fluviaux et la variation hydrologique est reconnue comme une force motrice primaire dans ces écosystèmes. Le « US Nature Conservancy » a développé une méthode connue sous le nom d'Indicateurs d'altération hydrologique, IHA (Richter et al. 1996, 1997, 1998), pour évaluer le degré d'altération hydrologique, de permettre la caractérisation

des conditions naturelles de l'eau et de faciliter les évaluations des modifications des régimes d'écoulement dues aux activités humaines et des infrastructures hydrauliques. L'IHA a été utilisé par près de 2000 gestionnaires de ressources en eau, hydrologues, chercheurs et décideurs politiques dans le monde entier (The Nature Conservancy, 2009).

Le modèle IHA calcule deux types de statistiques de débit ; le premier type comprend 33 statistiques IHA et le second type comprend 34 statistiques de débit calculées pour cinq composantes de débit environnemental (EFC) différentes. (Annexe B).

Les 33 paramètres IHA sont divisés en cinq groupes (magnitude, durée, amplitude, fréquence et timing) du régime d'écoulement annuel. Les cinq principaux attributs sont programmés dans l'IHA en raison de leur influence sur les espèces aquatiques à différents stades de leur cycle de vie. L'IHA permet de comparer simplement les attributs hydrologiques d'un site avant et après une certaine activité de projet, ou de deux sites avec différents types ou niveaux d'impacts. Il fournit une mesure statistique du changement de la tendance centrale ou du degré de variation d'un attribut d'intérêt.

Les 34 statistiques de composantes en débit environnemental sont une série plus récente de paramètres de débit hydrologique et ont été développés pour identifier et calculer des statistiques sur les événements hydrologiques tels que les inondations et les sécheresses. Les cinq composantes essentielles du débit, à savoir : les faibles débits, les débits extrêmement faibles, les impulsions de débit élevé, les petites crues et les grandes crues, ont été identifiées comme écologiquement essentielles et ont été incorporées dans le logiciel IHA en tant que "composantes du débit environnemental" (Mathews, R. et Richter, B.D., 2007). Chacune de ces composantes de débit a un rôle respectif dans la vie d'un organisme. Cette classification est aussi basée sur le fait que chacun de ces groupes est constitué d'un événement de débit caractéristique de l'hydrogramme naturel de la rivière et qui est écologiquement significatif.

III.2 Application du modèle

L’évaluation des débits environnementaux nécessite une longue étude à savoir une analyse hydrologique pour avoir des informations sur le régime de flux passé et actuel de la rivière, à savoir la quantité d'eau qui s'écoule dans ses canaux pendant les différents mois de l'année, le timing des petites et grandes inondations, une collecte des données et une analyse sur les communautés des poissons, des macros invertébrés et de la végétation riveraine est aussi nécessaire, ainsi une évaluation de la qualité de l’eau.

Le présent travail a pour but de définir le régime hydrologique, son degré d'altération, ainsi que les composantes du débit environnemental du bassin de Beht au niveau de la station de barrage El Kansera, comme une étape préliminaire, qui doit être affinée par une longue étude écologique, pour avoir une idée générale sur les conditions des flux à la base de laquelle des recommandations des débits écologiques devraient être mises en œuvre.

Généralement le modèle est utilisé pour l'évaluation de l'impact de l'installation des stations et/ou barrages sur le régime hydrologique d'une rivière (Zhang et al., 2016 ; Ali et al., 2019 ; Šarauskienė et al., 2021) ou l'impact du changement climatique (Brouziyne et al., 2022). Dans notre cas d'étude, le barrage a été créé en 1934 mais les données hydrométéorologiques antérieures ne sont pas disponibles. Néanmoins, une étude de l'état actuel et précédent, nommé post et pré impact, du régime hydrologique s'avère nécessaire comme étape initiale pour l'évaluation des conditions riveraines de l'oued Beht et l'impact des changements pendant les quatre dernières décennies.

III.2.1 Données requises

Les analyses ont été effectuées sur la base des données de débit journalier obtenues en appliquant le modèle SWAT à l'échelle du bassin, en utilisant les mesures des données pluviométriques journalières obtenues et calibrées par le débit observé enregistré à la station du barrage El Kansera de la période 1970 à 2013. Cette dernière a été divisée en deux parties allant de 1970 à 1992 (pré-impact) et de 1993 à 2013 (post-impact), afin d'investiguer la potentielle altération due à l'action anthropique, couplée aux effets du changement climatique. Tous les paramètres ont été calculés à l'aide de statistiques non paramétriques (Médiane et coefficient de dispersion).

Conclusion

La phase initiale de ce chapitre consiste à fournir les données nécessaires à la simulation hydrologique en utilisant le modèle HEC-HMS. La délimitation des sous-bassins, l'extraction du réseau hydrographique et la création des bases de données sur les sols et l'utilisation des sols ont constitué une étape très importante de cette étude. Celles-ci ont été utilisées avec ArcGIS et HEC-GeoHMS pour estimer le Curve Number dans trois états (CNI (sec), CNII (moyen) et CNIII (humide)), et pour déterminer une carte de Curve Number qui a été utilisée dans la simulation pour le bassin versant de Beht. Le CN du bassin est moyen à élever, avec une valeur moyenne de 78, ce qui signifie que le bassin a un potentiel de ruissellement

modéré, les zones les plus productrices de ruissellement ont un coefficient de ruissellement élevé.

La deuxième partie avait pour objectif de préparer les données nécessaires à la modélisation spatialisée du bassin versant par le modèle SWAT. Puis, l'analyse de sensibilité et les incertitudes du modèle SWAT, le calage et la validation.

La dernière partie a été consacré à la collecte des données du modèle IHA pour l'évaluation du degré d'altération et des composantes en débit environnemental, comme première étape dans une étude détaillée future visant à proposer et à fixer des débits environnementaux appropriés pour le bassin de Beht.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

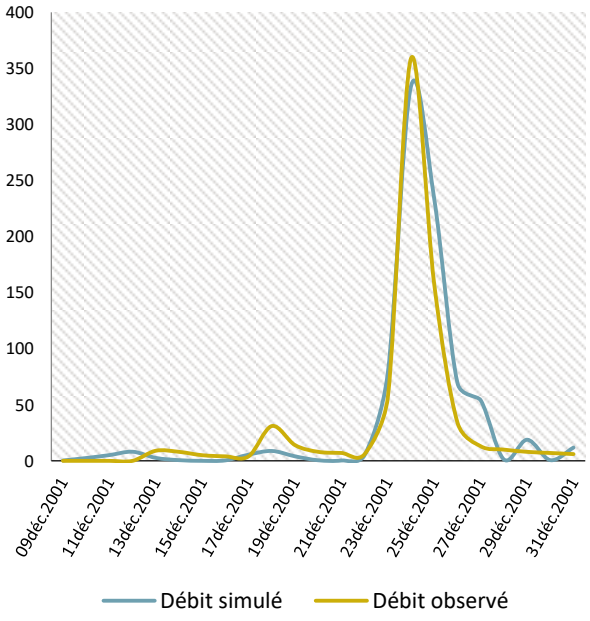
Introduction

Ce chapitre présente, en premier lieu, les différents résultats obtenus et discussions, de l'application des modèles hydrologiques HEC-HMS et SWAT sur le bassin versant de Beht, à savoir, l'analyse de sensibilité, la calibration et la validation des deux modèles, ainsi que les résultats du bilan hydrologique du bassin. Puis l'analyse des résultats de l'application du modèle IHA pour l'évaluation du degré d'altération et des composantes en débit environnemental.

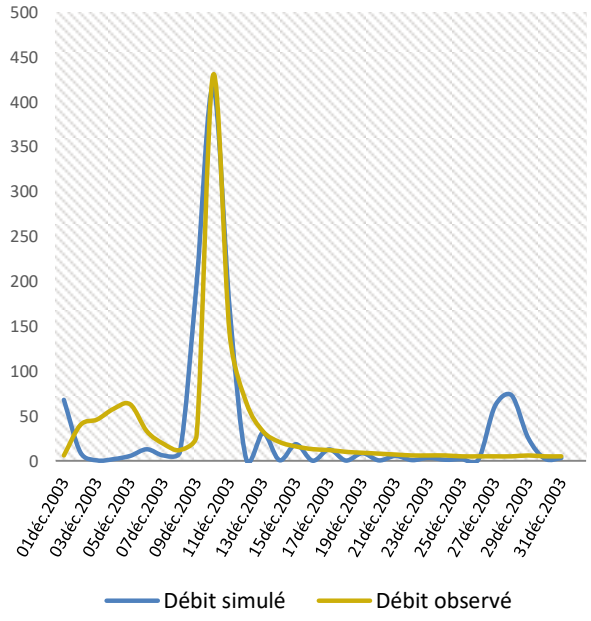
I. Modélisation hydrologique par HEC-HMS

I.1 Calibration

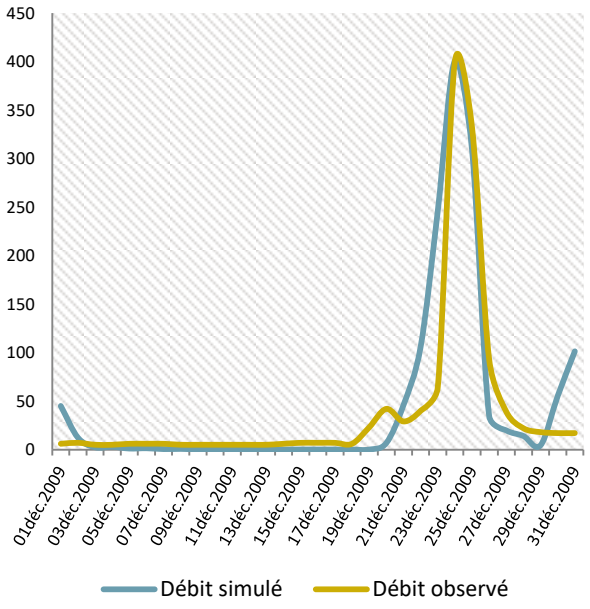
Les résultats du modèle hydrologique ont montré un ajustement raisonnable entre les hydrogrammes simulés et observés après optimisation ; la forme de l'hydrogramme et le moment du pic avaient une bonne correspondance (Fig.43). Pour tous les événements, la forme de l'hydrogramme a été reproduite avec précision dans la sortie du modèle. Cependant, le volume du ruissellement a été surestimé pour les événements 1, 2 et 3 et sous-estimé pour l'événement 4. (Daide, 2022).



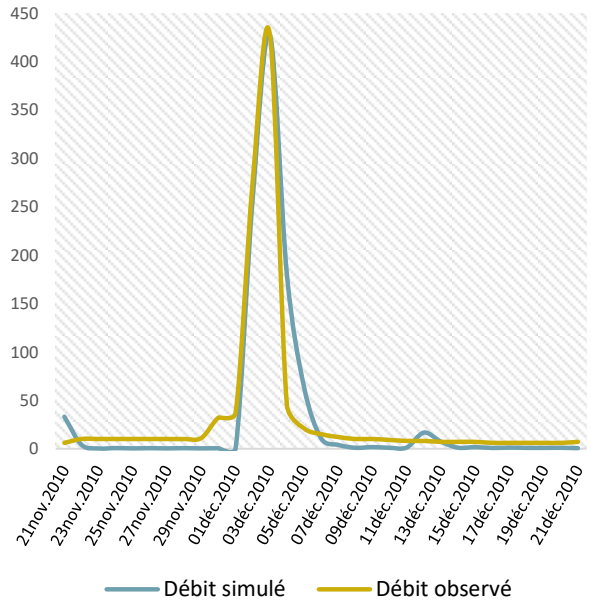
Evénement 1



Evénement 2



Evénement 3



Evénement 4

Figure 43: Hydrogrammes simulés et observés en période de calibration

- **Critères d'évaluation**

Le tableau 23 montre les résultats des erreurs relatives pour le volume et le débit de pointe. Les valeurs calculées de l'erreur en pourcentage du volume total et du débit de pointe entre les valeurs simulées et observées dans toutes les simulations avant optimisation étaient approximativement élevées, avec des valeurs moyennes de 6,14% pour le débit de pointe et de 14,15% pour le volume total. En fonction de ce résultat, une analyse de sensibilité a été menée

pour déterminer le paramètre le plus sensible. Il s'est avéré que l'abstraction initiale et le Curve number étaient les plus sensibles, le temps de parcours K moins sensible et le temps de lag peu sensible.

Après optimisation, les valeurs de cette étude ont été réduites entre 0,1 et 6,1% pour le débit de pointe entre 0,86 et 17% pour le volume total, avec des valeurs moyennes de 2,5% et 4,8%, respectivement (Tab.23). Une valeur négative indique une sous-estimation par le modèle et une valeur positive une surestimation

Le résultat est très bon comme l'indiquent Najim et al., 2002 et Cheng et al., 2006, qui ont suggéré que les plages acceptables d'erreurs relatives en pourcentage entre les valeurs observées et simulées devraient être inférieures à ±25%.

Tableau 23: Débits de pointe et volumes simulés et observés

Evénements	**Débit de pointe (m3/s)**				**Volume (mm)**			
	Sim		**Obs**	**ERQ**	**Sim**		**Obs**	**ERV**
	Av.Op	Apr.Op			Av.Op	Apr.Op		
Ev1	379.9	334.3	359	-6.9	19.86	17.58	14.98	17.5
Ev2	382.6	416.4	430	-3.2	22.51	22.24	22.4	-0.86
Ev3	400.5	400.7	400	0.2	26.74	26.49	26.64	7.51
Ev4	395.1	427.6	428	-0.1	17.88	20.07	21.05	-4.69
Moyenne	***389.525***	***394.75***	***404.25***	***-2.5***	***21.74***	***21.59***	***20.76***	***4.82***

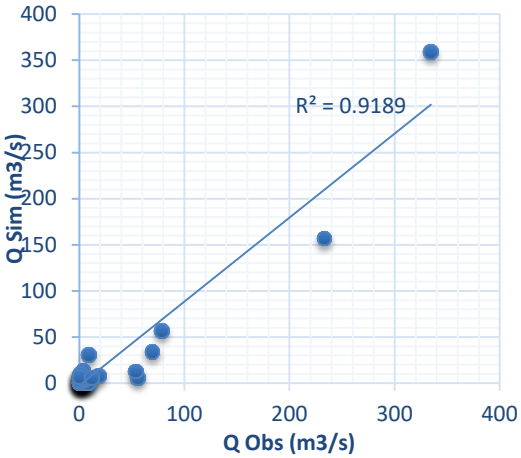
Av.Op : Avant optimisation
Apr.Op : Après optimisation
ERQ : Erreur relative du débit (%)
ERV : Erreur relative du volume (%)

Les résultats montrent également un accord relativement étroit entre les valeurs de débit de pointe observées et simulées (R2 = 0.842) (Fig.44). Sur la base de la classification mentionnée par Zou et al., la moyenne du coefficient de corrélation obtenue peut être considéré comme fort (>0.8). En ce qui concerne le critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE), de meilleurs résultats ont été obtenus entre les valeurs simulées et observées, avec une valeur moyenne de NSE de 81,5% (Tab.24), ce qui signifie que le modèle est très performant. La simulation du modèle peut être jugée satisfaisante si l'efficacité de Nash-Sutcliffe est supérieure à 50%, bonne si elle est supérieure à 65%, et très bonne si elle est supérieure à 75% (Moriasi et al., 2007). La valeur moyenne du rapport entre l'écart-type des observations

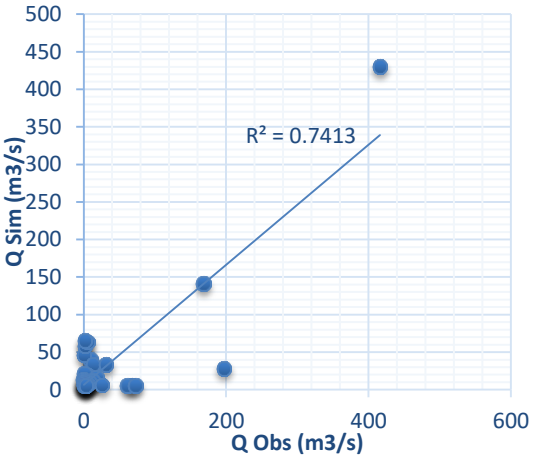
et l'erreur quadratique moyenne (RSR) obtenue était de 0,1, donc selon Moriasi et al., 2007 le modèle peut être considéré comme satisfaisant si RSR<=0,7. Les quatre critères d'évaluation statistique avec les valeurs moyennes de REP = 2,5%, REV = 4,8%, NSE = 0,815, R2 =0,842, RSR=0,1 ont montré une bonne simulation entre les valeurs estimées et observées.

Tableau 24: Critères d'évaluation pendant la calibration

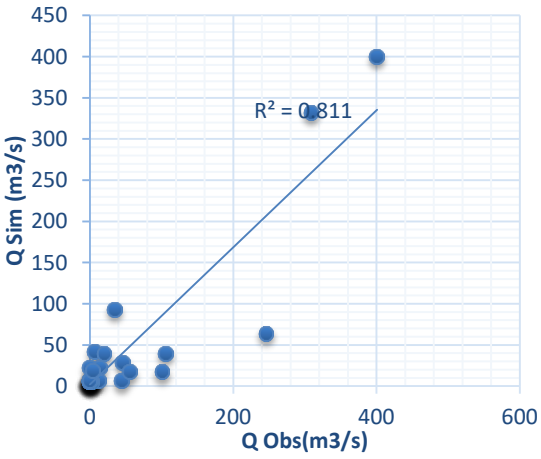
	NSE	RSR	R2
Ev1	0.903	0.097	0.918
Ev2	0.691	0.309	0.739
Ev3	0.773	0.227	0.81
Ev4	0.893	0.107	0.903
Moyenne	***0.815***	***0.185***	***0.842***



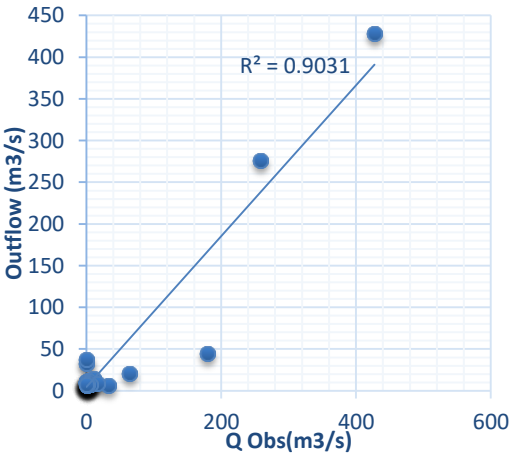
Evénement 1



Evénement 2



Evénement 3



Evénement 4

Figure 44: Régression linéaire pendant la calibration

I.2 Validation

Un modèle est validé, si les paramètres obtenus par calibration permettent de reproduire les événements de validation.

Le tableau ci-dessous montre la validation des résultats simulés (Tab.25) du débit de pointe, du volume total, et leurs erreurs relatives, l'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE), le coefficient de corrélation (R2) et les valeurs (RSR). Les figures 45 et 46 montrent respectivement les hydrogrammes simulés et observés et leur corrélation.

Les résultats semblent être satisfaisants en termes d'erreurs relatives et des différents critères d'évaluation (Tab.25 et 26).

Tableau 25: Débits de pointe et volumes calculés et mesurés pendant la validation

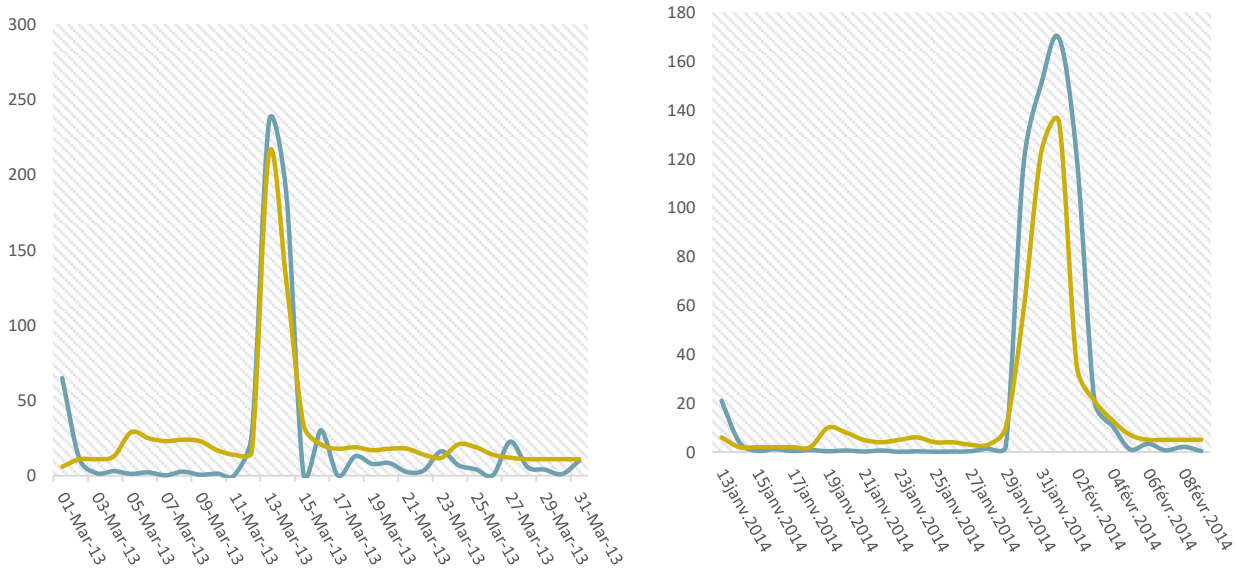
Evénements	Débit de pointe (m3/s)			Volume (mm)		
	Simulé	**Observé**	**ERQ**	**Simulé**	**Observé**	**ERV**
Ev5	235.1	214	9.8	13.59	16.62	-18.2
Ev6	169.5	155	9.3	12.31	10.72	-14.8
Moyenne	***202.3***	***184.5***	***9.6***	***12.95***	***13.67***	***-1.69***

Tableau 26: Critères d'évaluation pendant la validation

	NSE	**R2**	**RSR**
Ev5	0.711	0.867	0.28
Ev6	0.557	0.874	0.44
Moyenne	***0.634***	***0.807***	***0.36***

Compte tenu de tous ces résultats, on peut conclure que le modèle HEC-HMS a pu reproduire de façon très satisfaisante les hydrogrammes de crue pour les événements pluvieux quotidiens du bassin versant. De plus, malgré une surestimation des débits de pointe (Fig.45), les résultats indiquent une bonne performance du modèle. Par conséquent, le modèle HEC-HMS

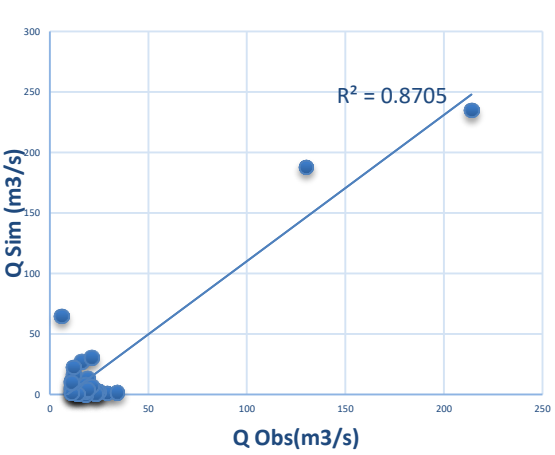
peut être utilisé pour simuler les hydrogrammes de crue pour les événements pluvieux quotidiens. L'erreur relative moyenne en pourcentage est de 9,6 % et de 1,69 % pour le volume et le débit de pointe respectivement. (Daide, 2022).



Evénement 5 Evénement 6

Figure 45: Hydrogrammes des événements de validation

En ce qui concerne le coefficient de détermination, il existe une corrélation relativement proche entre les valeurs de débit de pointe observées et simulées (R2 = 0,807) (Fig.46). Pour le critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE), les résultats obtenus entre les valeurs simulées et observées sont de 63,4% et le critère RSR est de 36%. Ces valeurs sont fortement indicatives de la bonne performance des simulations (Moriasi et al. 2007). En général, les critères d'évaluation statistique avec les valeurs moyennes de ERQ = 9,6%, ERV = 1,69%, NSE = 0,63, et R2 =0,870, RSR=0,36 montrent une bonne simulation entre les valeurs estimées et observées.



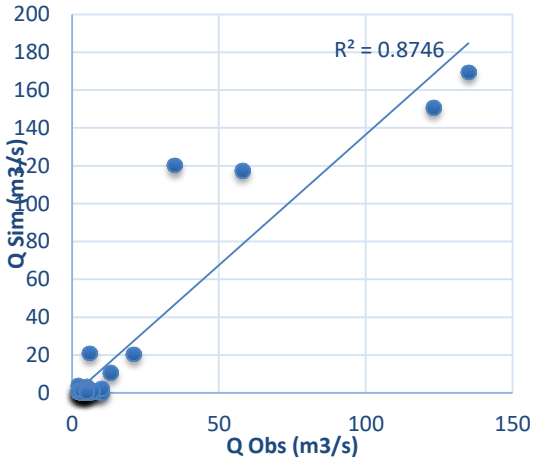


Figure 46: Régression linéaire pendant la validation

Les techniques utilisées dans cette étude pour la simulation ont produit de bons résultats des événements de validation, et les critères d'évaluation statistique ont révélé que le modèle HEC-HMS a bien fonctionné dans la prévision du débit de pointe et du volume total dans le bassin versant de Beht.

A partir de tous ces résultats on peut conclure que la fonction de production est chargée de calculer le volume total de ruissellement généré par un événement pluvieux donné, ainsi, la fonction objective utilisée donne des résultats efficaces sur les débits de pointe et privilégie la restitution de la pointe de l'hydrogramme par rapport au volume. En effet, du fait que chaque crue possède ses propres particularités, cette restitution comportera toujours des erreurs qui varient en fonction de l'événement et du jeu d'optimisation des paramètres du modèle utilisé. Ce jeu de paramètres est basé sur le changement des valeurs des paramètres simultanément tous à la fois ou un par un avec un taux de tolérance, ceci est dans le but de trouver la meilleure combinaison possible qui peut reproduire fidèlement l'hydrogramme de crue, alors, cette opération peut des fois aboutir à des valeurs de paramètres aberrantes qui n'ont aucun lien avec la réalité du terrain quoique que l'hydrogramme de crue généré soit visuellement très acceptable et les valeurs simulées s'approchent tellement des valeurs observés.

Pour synthétiser, la modélisation hydrologique par HEC-HMS appliquée sur le bassin versant d'Oued Beht a donné des résultats qui ont révélé que le modèle est valide, performant et qu'il est effectivement capable de reproduire la réalité des flux observés à l'exutoire du bassin versant. Les sorties du modèle ont jugé les résultats comme acceptables ; Les paramètres optimisés sont jugés optimaux pour tout le bassin à savoir le Curve Number, l'abstraction

initiale et le taux de perméabilité, les débits de pointe qui sont bien reproduits pendant la simulation avec une légère sous-estimation pour les événements de la calibration et surestimation pour les événements de validation, quant aux volumes de crue leur restitution était proche de ceux observés et ceci en diminuant le pourcentage d'imperméablité qui a permis de diminuer la surestimation des volumes lors de la phase de validation.

Le modèle utilisé était le plus simple et le moins exigeant en termes de données d'entrées, à savoir, la méthode de la SCS CN qui est connue par sa dépendance du paramètre du Curve Number et de la répartition spatio-temporelle des précipitations, ainsi la méthode de l'hydrogramme unitaire de la NRCS (SCS) dépendante du temps de Lag, qui a bien reproduit les événements parfaitement. En revanche, le manque de données pluviométriques et hydrométriques et leurs qualités médiocres, s'est montré défavorable à la bonne efficacité du modèle ; les stations de débit utilisées ne sont pas suffisantes pour présenter la totalité du bassin. Pour augmenter la performance du modèle dans les simulations, il est recommandé d'installer davantage de stations pluviométriques et hydrométriques dans le bassin, afin de générer plus de détails, de réduire l'effet de l'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations et des débits, ainsi que de déterminer des valeurs de Curve Number et des hydrogrammes appropriés, selon les recommandations de Haawkins (1993).

II. Modélisation hydrologique par SWAT

II.1 Analyse de sensibilité

Afin d'optimiser la mise en œuvre de cette procédure sur le bassin de Beht, on a procédé tout d'abord par une analyse de sensibilité de type OAT.

Cette analyse de sensibilité a permis de classer, en ordre, les paramètres sensibles suivant leurs degrés d'influence (le paramètre significatif est celui qui a la valeur p-value la plus basse et la valeur t-stat la plus élevée). Parmi 21 paramètres, onze sont avérés influents.

Tableau 27: Les paramètres les plus sensibles au modèle

Rang de sensibilité	Paramètres	Valeur optimale
1	CN2.mgt	0.14
2	GW_DELAY.gw	31.02
3	ESCO.hru	0.75

4	GW_REVAP.gw	0.2
5	GWQMN.gw	2190
6	ALPHA_BF.gw	0.8
7	EPCO.hru	0.86
8	SOL_AWC.sol	0.24
9	REVAPMN.gw	400.22
10	CH_K2.rte	83.31
11	CH_N2.rte	0.22

Parmi les paramètres les plus influents (Tab.26), on distingue la présence des paramètres liées à l'écoulement de surface (Curve Number « CN2 »), à l'écoulement souterrain (le délai de recharge de l'aquifère « GW_DELAY, ALPHA_BF GWREVAP, GWQMN, REVAPMN), à l'évaporation (le facteur sol d'évaporation du sol en fonction de la profondeur « ESCO »), au sol (la teneur en eau du sol « SOL_AWC »), et au routage du bassin (CH_K2).

Le Curve Number a été le paramètre le plus influent principalement en raison des variations des types d'occupation des sols dans le bassin. En effet, cette sensibilité est due à la présence des principales classes de couverture des sols (terrains parcours, sols dénudés, zones agricoles) qui représentent plus de la moitié des utilisations des sols du bassin versant, étant donné que le ruissellement est plus important dans ces zones pour un événement pluvieux, par rapport à d'autres types d'occupation du sol ayant des faibles valeurs de CN (Feyereisen et al., 2007).

La plupart des autres paramètres sensibles sont liés à l'écoulement souterrain. GW_DELAY et ALPHA_BF, contrôlent la rétention de l'eau dans le sol via les eaux souterraines jusqu'à la rivière. Ces deux paramètres sont liés au moment du début du processus. Le paramètre GW_DELAY mesuré en jours définie le temps nécessaire pour que l'eau se déplace de la zone racinaire de l'aquifère superficielle pour se transformer en écoulement de base. Une augmentation de ce facteur conduit à un processus de recharge plus lent et inversement (B. Guse et al., 2014).

La sensibilité aux paramètres SOL_AWC et GWQMN peut s'expliquer par le fait que les catégories de sol dominantes appartiennent aux groupes hydrologiques B définis par des taux d'infiltration et des taux de transmission d'eau modérés et une capacité de drainage élevée.

Notons que les zones en amont du bassin versant de Beht sont caractérisées par la présence de formes géologiques karstiques qui favorisent l'infiltration des précipitations ; après la

saturation du sol l'eau traverse l'aquifère profond et peut se produire comme écoulement de base après un événement de pluie, la quantité totale d'eau drainée sera plus élevée, et le modèle SWAT ne simule pas précisément cette partie.

La présence des paramètres liés à l'évapotranspiration (ESCO, EPCO, REVAPMN) dans la liste des paramètres sensibles identifiés, peut être expliquée par le prélèvement important des besoins d'évaporation des couches inférieures du sol.

II.2 Calibration

La calibration du modèle est effectuée sur une période de dix ans (Jan.2000 à Déc.2010), les données de sortie du modèle pourront être générées à l'échelle journalière, mensuelle ou annuelle. Dans cette étude, les sorties sont produites à un pas de temps journalier et mensuel.

Les résultats de la calibration des débits journaliers et mensuels observés et ceux simulés, aux trois stations hydrométriques, sont illustrés dans les figures 47 et 48.

Ces figures montrent que le modèle simule avec succès la variation du débit et représente bien les différents pics journaliers ainsi que mensuels, avec une sous-estimation de ces pics de pointe extrêmes.

Des études antérieures élaborées pour les bassins arides et semi-arides (Meaurio et al. 2015 ; Molina-Navarro et al. 2016), ont utilisé des critères de performance statistique tels que R2, NSE et RSR.

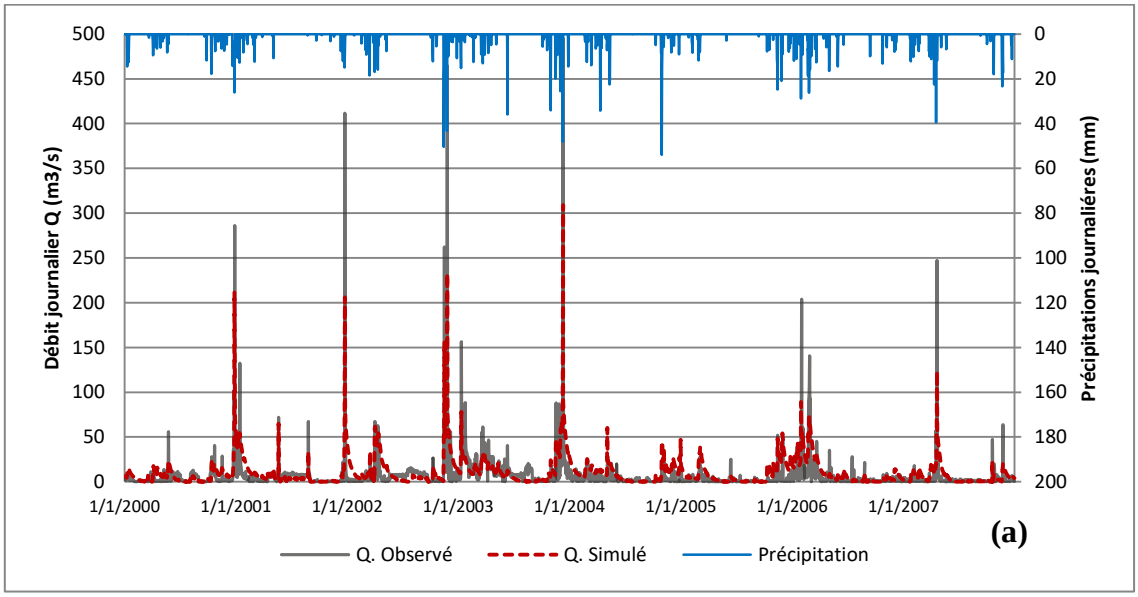
Moriasi et al. 2007, ont suggéré que la valeur NSE doit pas dépasser 0.5 et la valeur de RSR qui n'excède pas 0.7, pour pouvoir juger la calibration et la validation hydrologique comme satisfaisante ; Arnold et al. (2012) ont proposé qu'une valeur R2 supérieure (ou égale) à 0,6 est un indicateur satisfaisant d'une bonne calibration/validation du modèle SWAT.

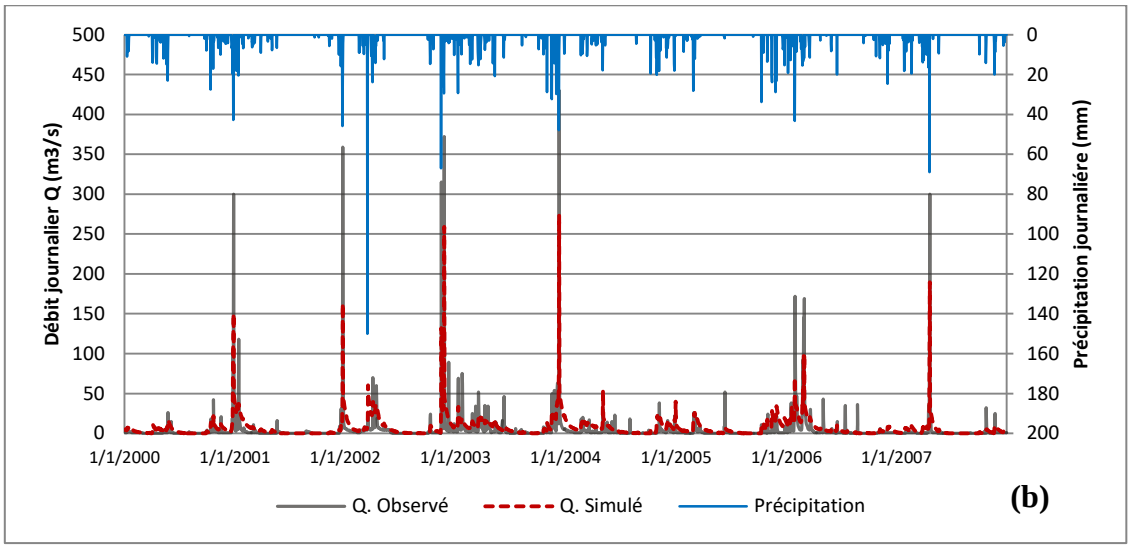
Les paramètres de qualité de l'ajustement (Tab.27) de la calibration journalière obtenus pour la zone d'étude, dans les différentes stations de jaugeage sont ; le critère de nash est l'ordre de 0.68-0.76-0.5, le coefficient de détermination est de 0.7-0.8-0.6 et le RSR est de 0.4-0.3-0.5, et ceci pour les 3 stations (station El kansera, Ouljet Soltane et Sidi El Mokhefi) respectivement.

Tandis que les paramètres obtenus lors de la calibration mensuelle sont de l'ordre de 0.7-0.77 (NSE), 0.76-0.73 (R2) et 0.34-0.3 (RSR) pour les 2 stations El kansera et Ouljet Soltane.

Les résultats obtenus montrent que le modèle fonctionne bien lors de la phase de calibration, conformément aux critères d'évaluation de la performance du modèle proposés par Moriasi et al. 2007 et la simulation du modèle SWAT dans le bassin versant étudier a été jugée satisfaisante.

D'autres auteurs ont réussi à obtenir des résultats presque similaires dans des conditions climatiques semi-arides (Fadil et al. 2011, Abouabdillah et al. 2014, Brouziyne et al. 2017, Abdelmounim et al. 2019, Bouslihim et al. 2020, Nabih 2022).





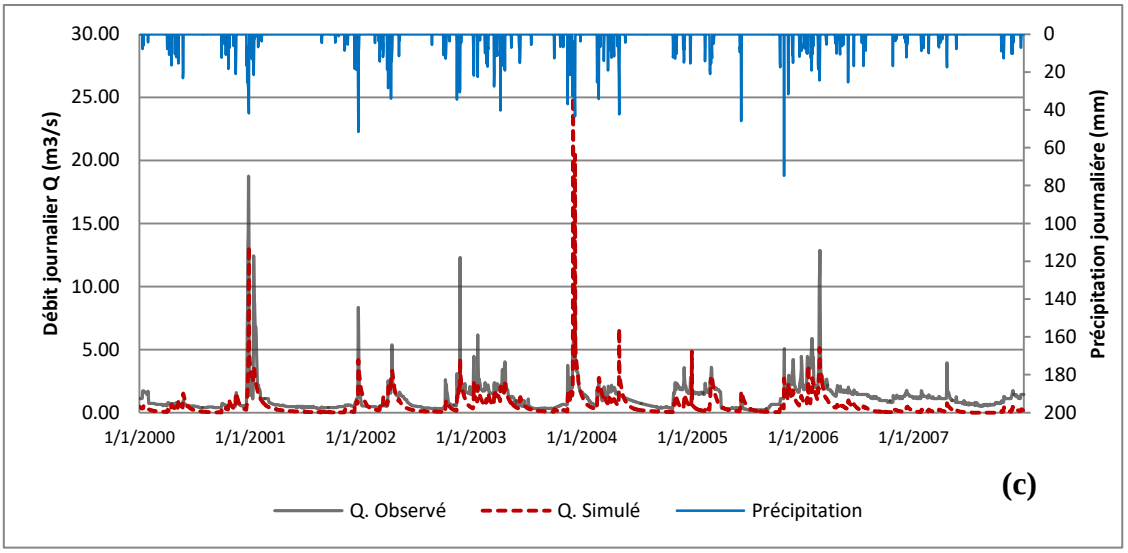


Figure 47: Débits journaliers observé Vs simulé des stations ElKansera (a) Ouljet Soltane (b) Sidi El Mokhefi (c) après calibration

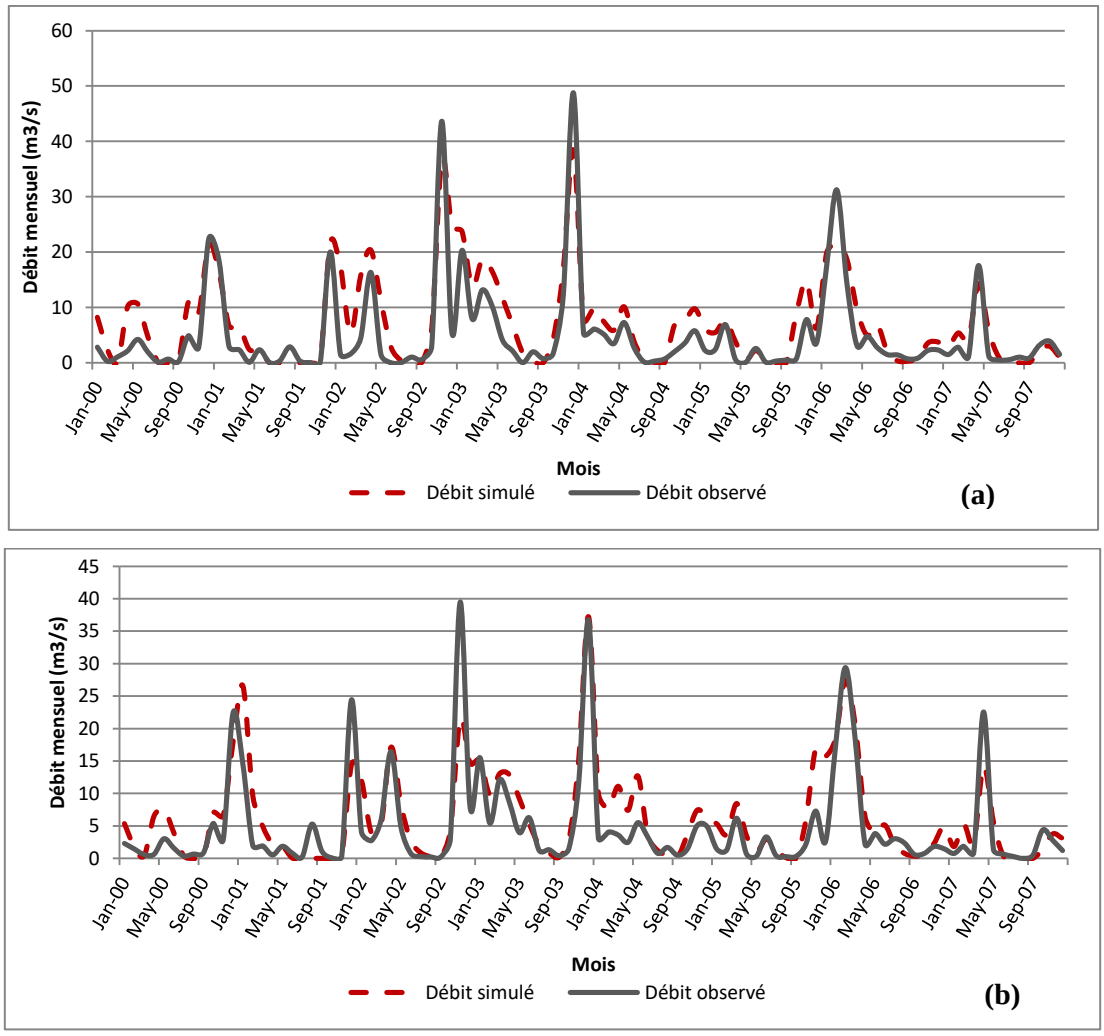


Figure 48: Débits mensuels observé Vs simulé après calibration des stations El Kansera (a) et Ouljet Soltane (b)

Tableau 28: Indices de performance de la phase de calibration

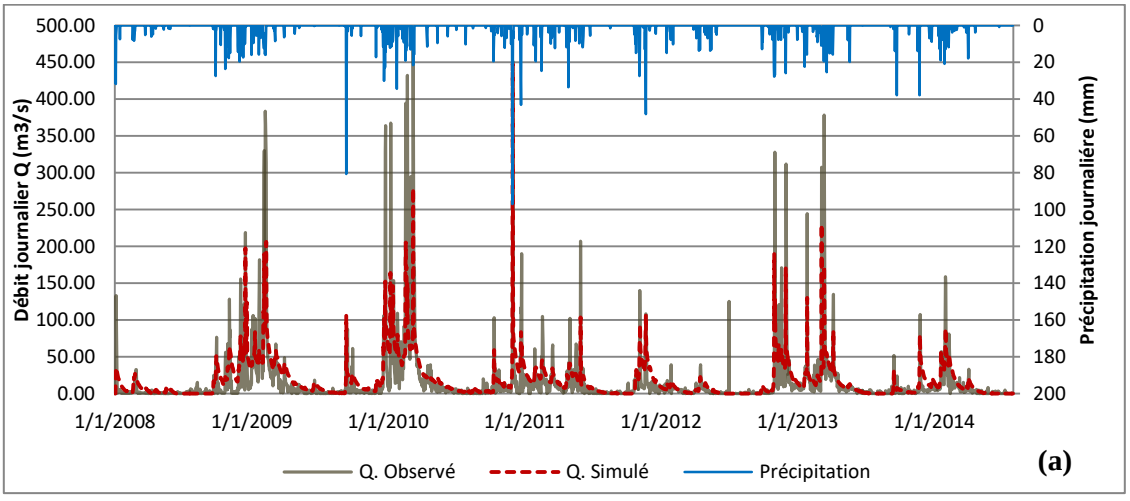
Indicateurs	Station El Kansera		Station Ouljet Soltane		Station Sidi Mokhefi
	J.	Mens.	J.	Mens.	J.
NSE	0.68	0.7	0.76	0.77	0.5
R2	0.7	0.76	0.8	0.73	0.6
RSR	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5

II.3 Validation

Les figures 49 et 50 montrent que le modèle reproduit l'aspect général de la variation du débit ainsi que les irrégularités saisonnières et que la relation entre les débits mesurés et simulés est globalement similaire aux résultats de la calibration. Le débit simulé a suivi la même allure du débit observé pendant la période de validation, à la fois dans les pas de temps journaliers et mensuels, avec une sous-estimation de la plupart des pics des débits et une sur-estimation des débits de base. Par conséquent, les incertitudes sur les pics peuvent être liées à la complexité des caractéristiques du bassin versant, qui sont susceptibles de contribuer de manière importante à une imperfection relative du modèle.

D'après le tableau 28, les critères d'évaluation obtenus montrent une bonne performance pour le pas de temps mensuel pour les trois stations (station El kansera, Ouljet Soltane et Sidi El Mokhefi) respectivement, avec un coefficient NSE de 0.61-0.63-0.73, un coefficient R2 de 0.73-0.76-0.88 et un coefficient RSR de 0.3-0.3-0.26.

Dans le cas du pas de temps journalier, SWAT a démontré une performance satisfaisante avec des valeurs NSE de 0.8-0.77, R2 de 0.81-0.83 et RSR de l'ordre de 0.19-0.22 pour les 2 stations El kansera et Ouljet Soltane. (Tab.28)



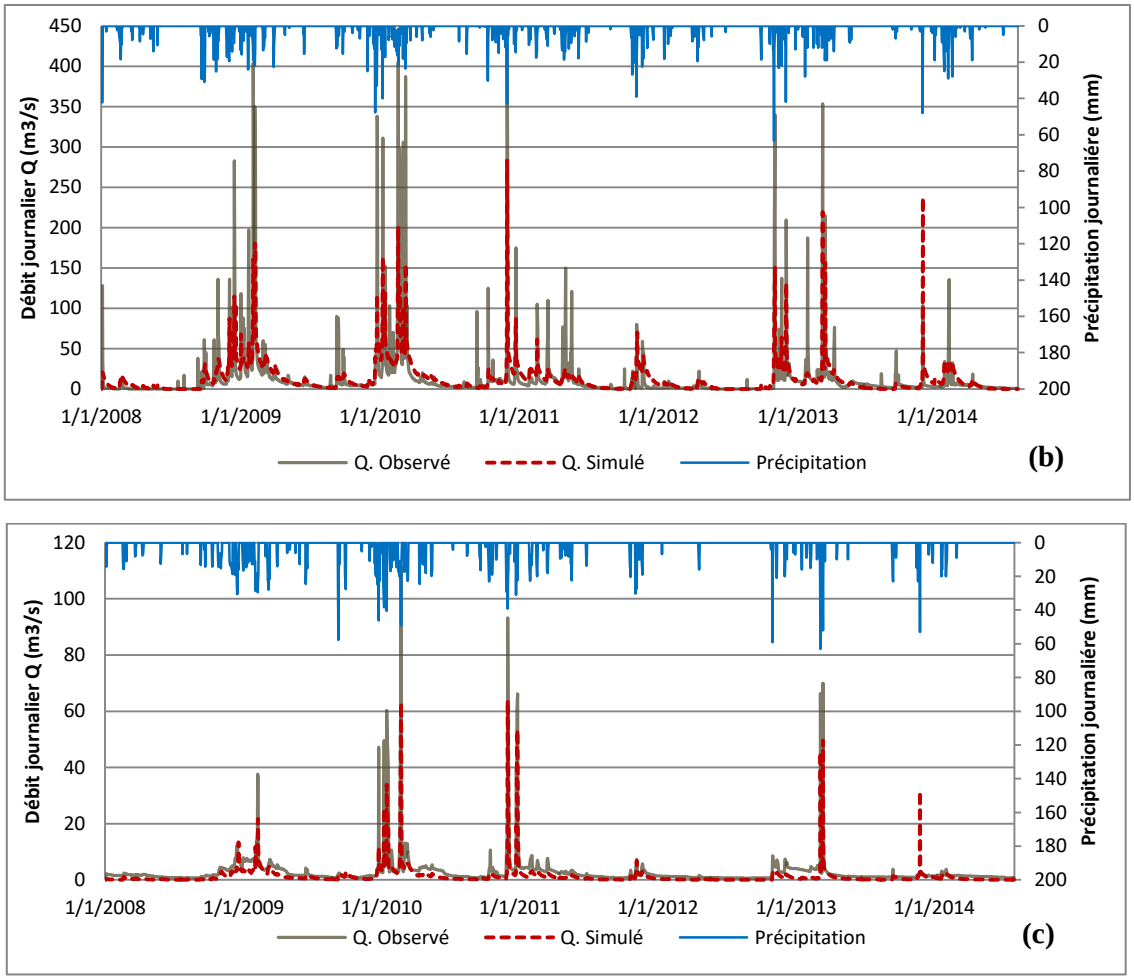
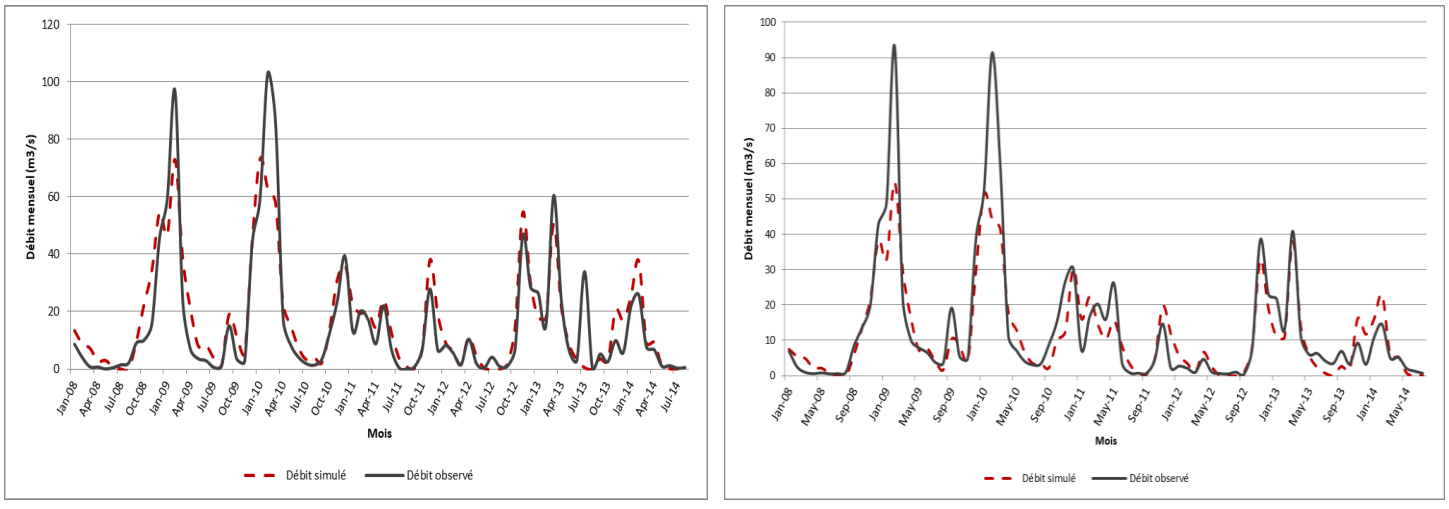


Figure 49: Débits journaliers observé Vs simulé des stations ElKansera (a) Ouljet Soltane (b) Sidi El Mokhefi (c) après validation



(a) **(b)**

Figure 50: Débits mensuels observé Vs simulé après validation des stations El Kansera (a) et Ouljet Soltane (b)

Tableau 29: Indices de performance de la phase de validation

Indicateurs	Station El Kansera		Station Ouljet Soltane		Station Sidi Mokhefi
	J.	Mens.	J.	Mens.	J.
NSE	0.61	0.8	0.63	0.77	0.73
R2	0.73	0.81	0.76	0.83	0.88
RSR	0.3	0.19	0.3	0.22	0.26

L'analyse de sensibilité, la calibration et la validation du modèle ont été utilisées pour évaluer la performance du modèle hydrologique du bassin versant de Beht.

Les paramètres les plus sensibles dans la zone d'étude sont CN2, GW_DELAY, ESCO, EPCO, GWREVAP, GWQMN, ALPHA BF, SOL_AWC, REVAPMN. La sensibilité du modèle à ces paramètres calibrés confirme les résultats de certaines études déjà réalisées, dans des zones présentant des caractéristiques similaires en termes du contexte climatique semi-aride (Fadil et al., 2011, Bouslihim et al., 2016, Brouzyine et al., 2017, Mimich et al., 2018, Moumen et al., 2020), ainsi la plupart des paramètres sensibles sont généralement liés aux eaux souterraines.

Le débit simulé a suivi, presque, l'allure générale du débit observé et le modèle a simulé tous les pics, ce qui permet de considérer avec confiance la reproductibilité des données d'entrées utilisées.

Sur un pas de temps mensuel, le modèle SWAT a réussi à simuler les processus hydrologiques avec précision, tout comme la simulation au pas de temps journalier, il a été calibré et validé de façon satisfaisante dans le bassin aux trois stations de jaugeages.

Notons que le modèle surestime les débits de base, ce qui peut s'expliquer par la mauvaise répartition de la pluie, notamment l'eau d'infiltration dans les zones karstiques et par l'existence potentielle de petits réservoirs utilisés pour l'approvisionnement en eau des cultures dans le bassin versant et qui peuvent influencer le régime d'écoulement lorsqu'il est faible.

La sous-estimation des pics de débit extrêmes en période humide indique que le modèle ne représente pas toute la réalité de la composante des eaux souterraines du système hydrologique.

La performance du modèle SWAT en termes de critères statistiques (NSE, R2, et RSR) peut être considérée comme satisfaisante, malgré les nombreuses limitations et contraintes rencontrées dans cette étude, à savoir les conditions de données limitées et imprécises, la distribution spatiale des précipitations dans le bassin qui peuvent ne pas être représentative et les caractéristiques hétérogènes du bassin versant étudié, en termes d'occupation des sols, de types de sol et de topographie, ainsi le régime d'écoulement caractérisés par des précipitations extrêmement variables et des phénomènes de crues brutales.

II.4 Bilan hydrologique du bassin versant de Beht

Le modèle SWAT a permis de générer le bilan hydrologique et d'identifier la part de chaque processus sur le bassin versant de Beht. Ce bilan a été effectué au niveau mensuel et à l'échelle annuelle pour l'ensemble de la période de simulation (2000-2014).

Les principales composantes hydrologiques que le modèle SWAT a simulées tout au long de la simulation sont présentées dans le tableau 29.

La précipitation moyenne annuelle est de 467.73mm, dont 40% est perdue par évapotranspiration (183mm), qui est un élément assez commun dans le contexte semi-aride. La contribution majeure de l'évapotranspiration dans le bilan hydrique du bassin d'étude est principalement liée au type d'occupation du sol dominé par les sols nus les zones agricoles avec de longues saisons de croissance, ce qui augmente les taux d'évaporation et de transpiration.

Le ruissellement de surface est de 27.69 mm (6% de la précipitation). Quant à l'écoulement total est de 111.9 mm, soit environ 24%. Cela est dû principalement à un apport des flux latéraux qui constituent 10% de la moyenne annuelle des précipitations.

Tableau 30: Composantes hydrologiques générées par le modèle

Précipitation (mm)	467.73
Ruissellement (mm)	27.69
Evapotranspiration (mm)	183.35
Evapotranspiration potentielle (mm)	1533.27
Ecoulement latéral (mm)	62.76
Ecoulement total (mm)	111.93
Débit de base	21.48

II.4.1 Variation mensuelle du bilan hydrique

Tableau 31: Les moyennes mensuelles des composantes du bilan hydrique du bassin de Beht (2000-2014)

Mois	Précipitations (Mm)	Evapotranspiration (Mm)	Ruissellement (Mm)	Ecoulement total (Mm)
Sep.	20.44	9.13	0.76	2.33
Oct.	46.94	19.05	1.83	5.82
Nov.	76.75	19.85	6.94	16.31
Déc.	77.89	21.54	7.73	21.53
Janv.	57.9	17.53	3.41	15.68
Févr.	54.68	18.14	2.7	13.34
Mars	53.59	22.09	3.25	15.34
Avr.	39.79	25.35	0.58	9.7
Mai	25.6	18.28	0.47	6.35
Juin	10.45	8.49	0.02	3
Juil.	1.7	1.88	0	1.49
Aout	2	2.02	0	1.04

Le tableau 30 illustre les moyennes mensuelles des composantes du bilan hydrique du bassin de Beht pour la période de simulation (2000 à 2014).

La répartition mensuelle des différentes composantes du cycle est marquée par la présence de deux périodes. La première période où les débits les plus élevés sont observés d'Octobre à Mars et les précipitations sont importantes, entrainant ainsi des ruissellements importants. La deuxième période est la saison estivale (Avril-Aout) où l'évapotranspiration qui domine et les ruissellements de surface disparaissent. Pendant cette saison, la rivière s'est généralement asséchée en raison d'une longue période de sécheresse (Fig.51).

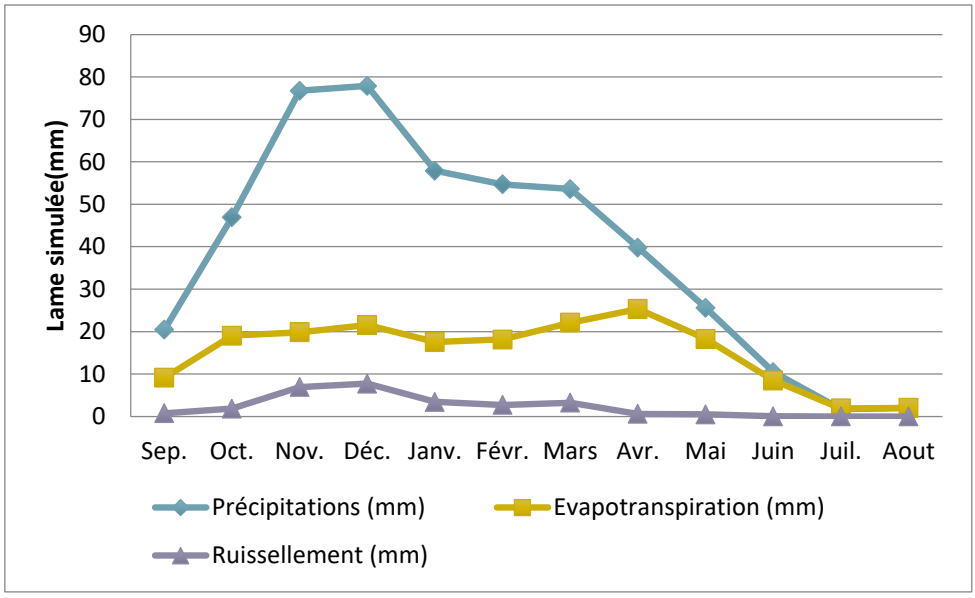


Figure 51: Répartition du bilan hydrologique mensuel du bassin de Beht

II.4.2 Variation interannuelle du bilan hydrologique

La variation annuelle du bilan hydrologique (Fig.52) présente la variation des précipitations, de l'évapotranspiration et de l'écoulement total. Les variations de précipitations observées entre les années définissent cette variation. Elle varie en moyenne annuelle à environ 453 mm, avec les années 2003, 2009 et 2010 qui ont dépassé la moyenne annuelle par des valeurs de 605mm, 740mm, 867mm respectivement. Ces années ont également enregistré des valeurs élevées de l'écoulement total (272mm) et de l'évapotranspiration (212mm).

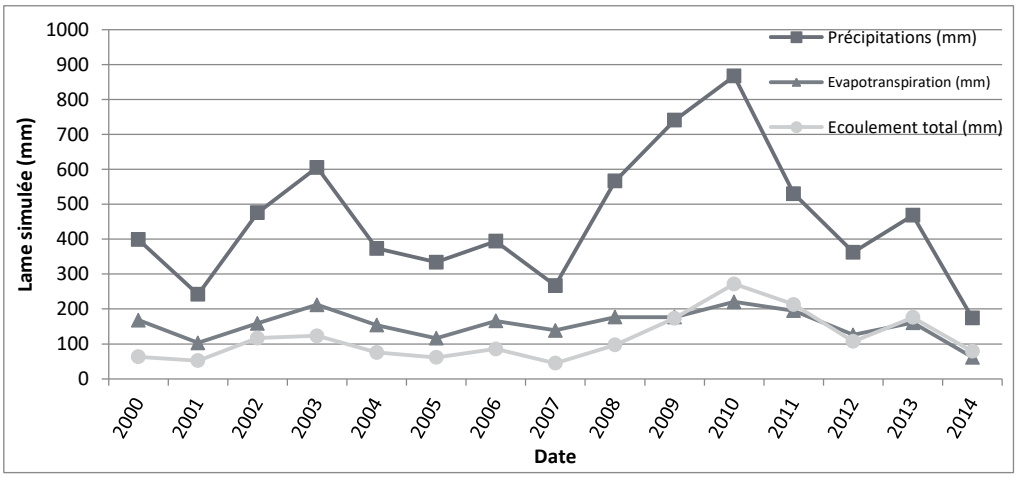


Figure 52: Bilan hydrologique annuel du bassin de Beht généré par SWAT

II.4.3 Variation des unités spatiales du bilan hydrologique du bassin de Beht

La modélisation spatialisée permet l'estimation des différents processus hydrologiques au niveau des zones qui constituent la division du bassin soit en sous-bassins, HRU, type de sol ou en occupation du sol. Cette spatialisation représente un élément essentiel dans la gestion des ressources en eau des bassins versants.

Dans le cas de notre étude, la répartition du bilan à l'échelle annuelle a été faite pour les différents sous-bassins de la zone d'étude, comme le montre le tableau ci-dessous.

Les précipitations moyennes obtenues sur le bassin versant de l'étude pendant la période de simulation ont montré un gradient décroissant du sud au nord, suivant les altitudes. La valeur de pluie la plus élevée a été simulée dans le bassin versant en amont, alors que la plus faible est celle de la partie aval.

En ce qui concerne la percolation moyenne annuelle a révélé aussi que la quantité la plus importante se trouve en amont du bassin, du fait de la nature karstique du substratum et a montré le même gradient que les précipitations, suivant la direction de l'écoulement et l'altitude. Tandis que dans la partie Sud- Ouest du bassin, la percolation n'est pas trop importante en raison des affleurements des schistes du primaire qui sont généralement imperméable, ainsi des précipitations et des capacités de drainage des sols qui diminuent.

Quant au ruissellement simulé ( ), il a suivi le même gradient d'altitude et d'écoulement d'eau en ordre décroissant de l'amont vers l'aval, caractérisé par un taux de percolation et d'évapotranspiration faibles (Fig.53).

Tableau 32: Répartition du bilan hydrologique à l'échelle annuelle par sous-bassins

Sous-bassins	Superficie (km2)	Précipitations (mm)	Evapotranspiration (mm)	Ruissellement (mm)	Percolation (mm)	Ecoulement total (mm)
1	0.59	351	138	17	127	92
2	32.07	351	407	10	127	51
3	187.12	352	186	9	129	43
4	112.41	352	164	14	169	27
5	127.52	352	174	22	135	49
6	284.49	352	176	34	121	60
7	93.25	352	165	33	143	50
8	21.68	352	178	37	124	55
9	31.51	352	171	33	129	58
10	59.85	352	159	30	130	69

11	40.64	352	173	33	122	63
12	332.01	436	186	32	168	90
13	173.90	436	182	37	151	110
14	122.87	436	141	8	140	162
15	8.76	436	141	15	187	117
16	132.03	436	143	13	142	158
17	1.08	436	150	7	270	29
18	140.95	436	170	33	118	155
19	192.52	436	205	30	184	56
20	145.04	436	163	29	124	155
21	162.25	532	184	33	270	97
22	29.93	532	158	38	238	153
23	105.08	532	182	54	246	117
24	246.41	532	165	25	288	113
25	131.24	532	157	43	300	122
26	537.29	436	170	16	131	142
27	27.10	532	162	64	275	116
28	169.09	532	165	27	278	123
29	434.52	532	165	32	292	109
30	367.13	532	165	16	291	113

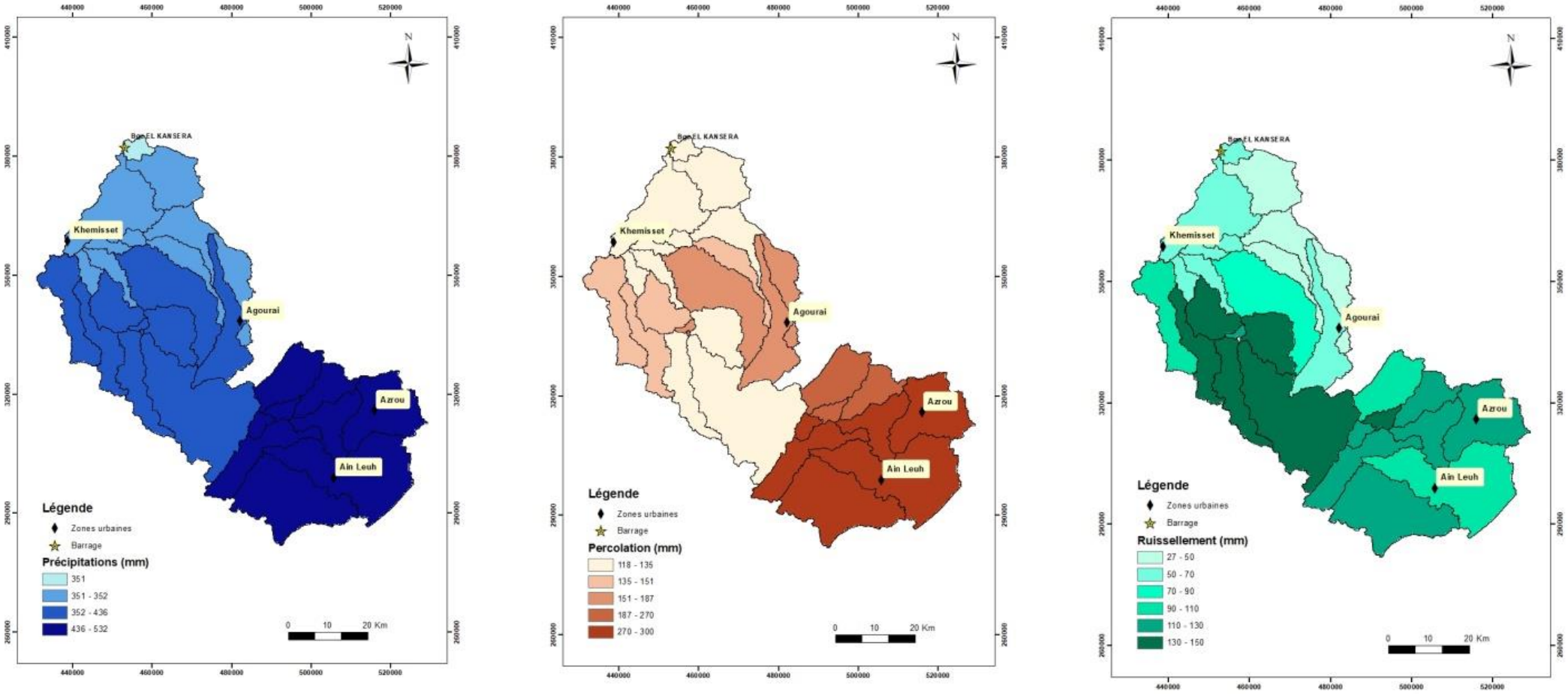


Figure 53: Distribution de la moyenne annuelle des précipitations (a) de percolation (b) et de ruissellement (c)

II.4.4 Estimation des apports en eau au barrage El Kansera

Le barrage El Kansera se trouve à 20 Km au sud de la ville de Sidi Slimane il a été réalisé entre 1927 et 1935, c'est le plus ancien barrage d'accumulation au Maroc (ABHS, 2016). Sa capacité est de 227 Mm3 à 266 Mm3. Son rôle est très important, du fait qu'il assure l'irrigation de 25000 ha près de la ville de Sidi Slimane l'AEP de la ville de Khemisset et Tiflet et les douars avoisinants, il permet également la production de 15000 Kwh/an grâce à l'usine installé au pied du barrage et la protection de l'aval contre les crues de l'oued Beht.

La retenue du barrage El Kansera présente une hydrologie très contrastée avec une capacité de 192000 m^3, sur une superficie de 18 Km^2 au niveau normal 122.5m NGM (Nivellement Général du Maroc). Sa profondeur moyenne est de 16.5m et le point le plus profond est de 28m. (ABHS, 2010).

Les apports en eau du barrage El Kansera, l'exutoire du bassin versant de Beht, peuvent être estimé par le modèle à partir d'écoulements produits par les différentes unités de réponse hydrologique du bassin versant (Neitsch et al., 2005).

La figure 54 montre les apports simulés et ceux mesurés au barrage El Kansera pendant la période de simulation. Les apports mesurés sont de l'ordre de 4629Mm3 avec une sous-estimation de ceux simulés par une valeur de 3340Mm3.

Les apports moyens annuels mesurés et ceux simulés au barrage pendant la période de simulation sont respectivement de 330.71 Mm3 et 238 Mm3.

L'estimation des apports au barrage El Kansera, révèle une bonne performance du modèle et une bonne correspondance entre les apports simulés et observés. Les valeurs du coefficient de détermination liant ces deux apports est de 0.86 (Fig.55)

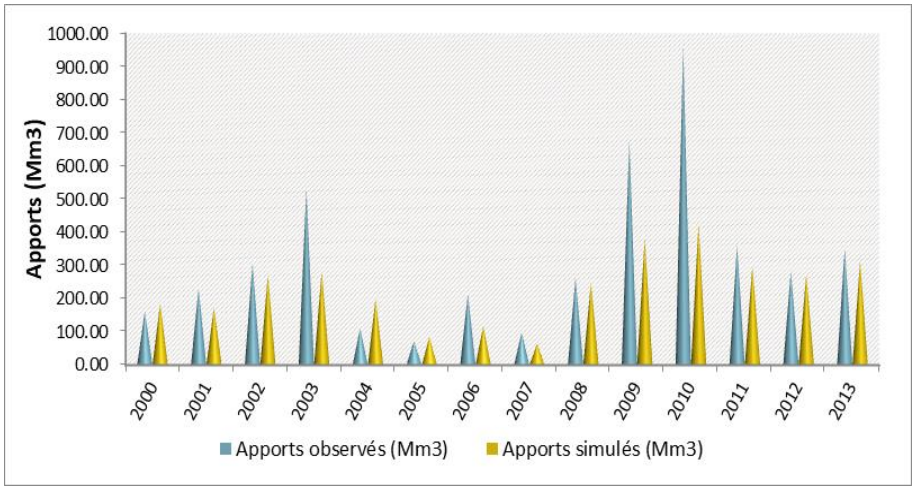


Figure 54:Apports en eau mesurés et simulés au barrage El Kansera

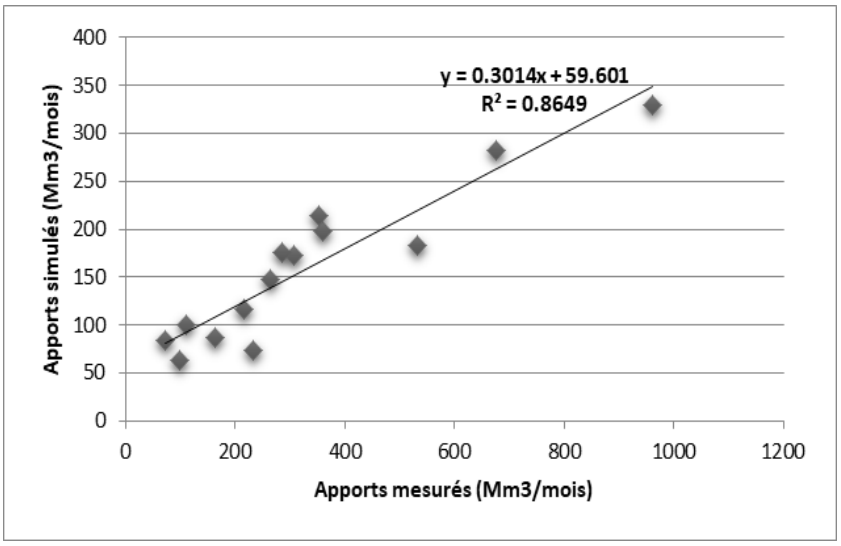


Figure 55: Corrélation entre les apports simulés et observés

III. Evaluation du degré d'altération et des composantes en débit environnemental

Les changements du régime d'écoulement et les altérations hydrologiques sont étudiés à l'aide des outils IHA. Les résultats de l'analyse utilisant l'IHA expliquent les changements dans les 33 paramètres écologiques, qui reflètent les changements écologiques et hydrologiques qui se produisent le long de la rivière en raison des activités anthropiques en cinq groupes, ainsi les composantes en débit environnmental.

III.1 Les composantes IHA

III.1.1 Magnitude des débits mensuels

Les résultats du premier groupe obtenus à l'aide du logiciel IHA sont les variations par rapport aux valeurs médianes de chaque débit mensuel. La courbe débit-durée est une courbe de fréquence cumulée qui montre le pourcentage de temps où des débits spécifiques ont été atteints ou dépassés pendant une période donnée. Elle combine en une seule courbe les caractéristiques d'écoulement d'un cours d'eau dans toute la gamme des débits, sans tenir compte de la séquence des occurrences. Généralement, les hauts et les bas débits sont respectivement au-dessus et dessous de 50% de la probabilité de dépassement.

L'analyse IHA de base sur la station El Kansera présentée dans la figure 56 présente les courbes de durée de débit pour chaque mois ainsi que des séries annuelles. Ceci est déterminé à partir de l'enregistrement du débit quotidien dans deux périodes 1970-1992 et 1993-2013.

L'importance de ce graphique est d'évaluer la probabilité de dépassement d'une certaine magnitude de débit un jour donné d'un mois. Notez que l'axe des y est représenté en échelle logarithmique. La forme de la courbe dans les régimes de débit haut et bas est particulièrement importante pour évaluer les caractéristiques du cours d'eau et du bassin. Dans les hauts débits, la courbe est moins abrupte, ce qui indique que les débits élevés durent plusieurs jours dans les deux périodes. La limite inférieure, quant à elle, présente une courbe nette qui indique la capacité du bassin à supporter des débits faibles pendant les saisons sèches. Ces débits sont maintenus tout au long de l'année en raison des conditions naturelles d'écoulement des cours d'eau et/ou en raison de la grande capacité des eaux souterraines qui soutiennent le débit de base du cours d'eau. La comparaison entre les deux périodes analysées a montré qu'il y a une augmentation des débits faibles et moyens durant la période 1993-2013.

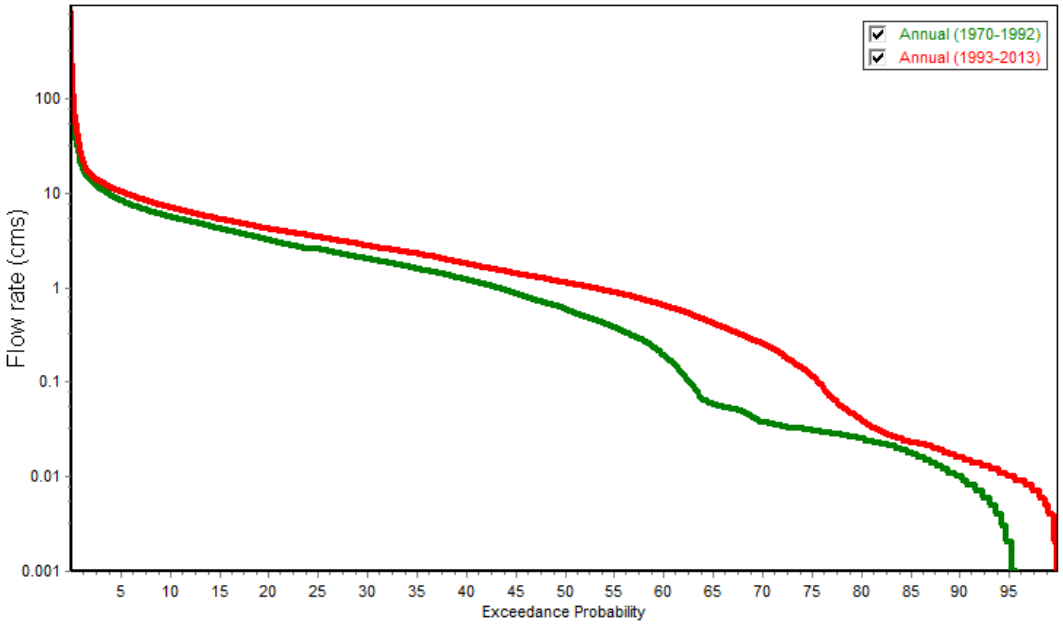


Figure 56: Courbe durée-débit annuelle

Flow rate cms (Débit m3/s)

Exceedance probability (probabilité de dépassement)

Selon des études précédentes (Chbouki et al., 1995) effectuées sur l'ensemble du Maroc, les années 1970-1991 ont été considérées comme une période de sécheresse, tandis que les deux décennies suivantes ont été humides, ce qui explique l'augmentation générale des débits faibles et moyens, tandis que les débits élevés n'ont pas varié, probablement en raison du barrage existant, car les barrages sont connus pour réduire la fréquence des inondations spécifiées (Fox et al., 2001). Dans les années suivantes qui ne sont pas incluses dans l'étude ; une étude

d'analyse de la sécheresse de 1980 à 2017 a montré que la sécheresse a augmenté drastiquement à partir de 2012 (Hakam et al., 2022).

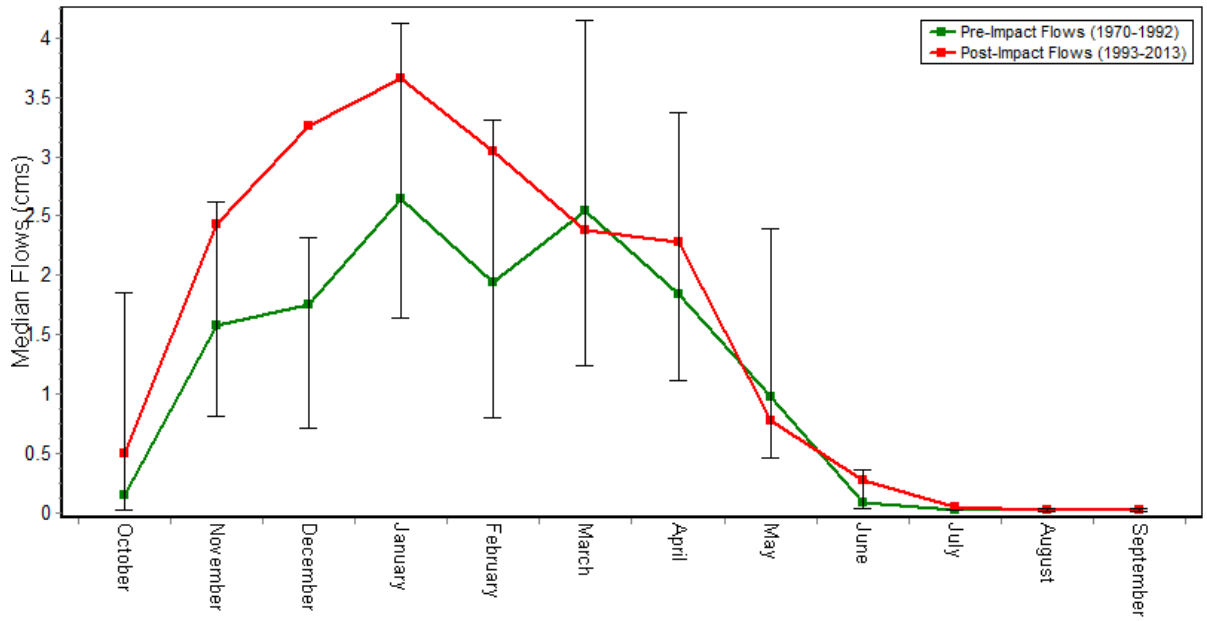


Figure 57: Pré et post-impact sur les débits mensuels

Median flows cms (Débits Médian m3/s)

La figure 57 montre la variation des débits mensuels entre la première période allant de 1970-1992 et la deuxième période 1993-2013, indique cependant une augmentation des débits médians pendant la période humide allant d'octobre à février, une augmentation est enregistrée en mois d'avril. Ces résultats sont traduits dans le tableau 33 où on observe une augmentation exceptionnelle au mois d'octobre, décembre et juin indiquée par des valeurs de variations relatives 227%, 85% et 193% respectivement. De plus, les 25e, médiane et 75e centiles de débit ont été aussi altérer (Fig.58), cela peut être expliquer par la différence entre les deux périodes observées en termes de sécheresse, car la première période était sèche suivie d'une période très humide avec des précipitations et inondations extrêmes (Chbouki et al., 1995), notamment durant la deuxième période dans l'année 2008 et 2010 ont connues des évènements exceptionnelles (ABHS, 2008).

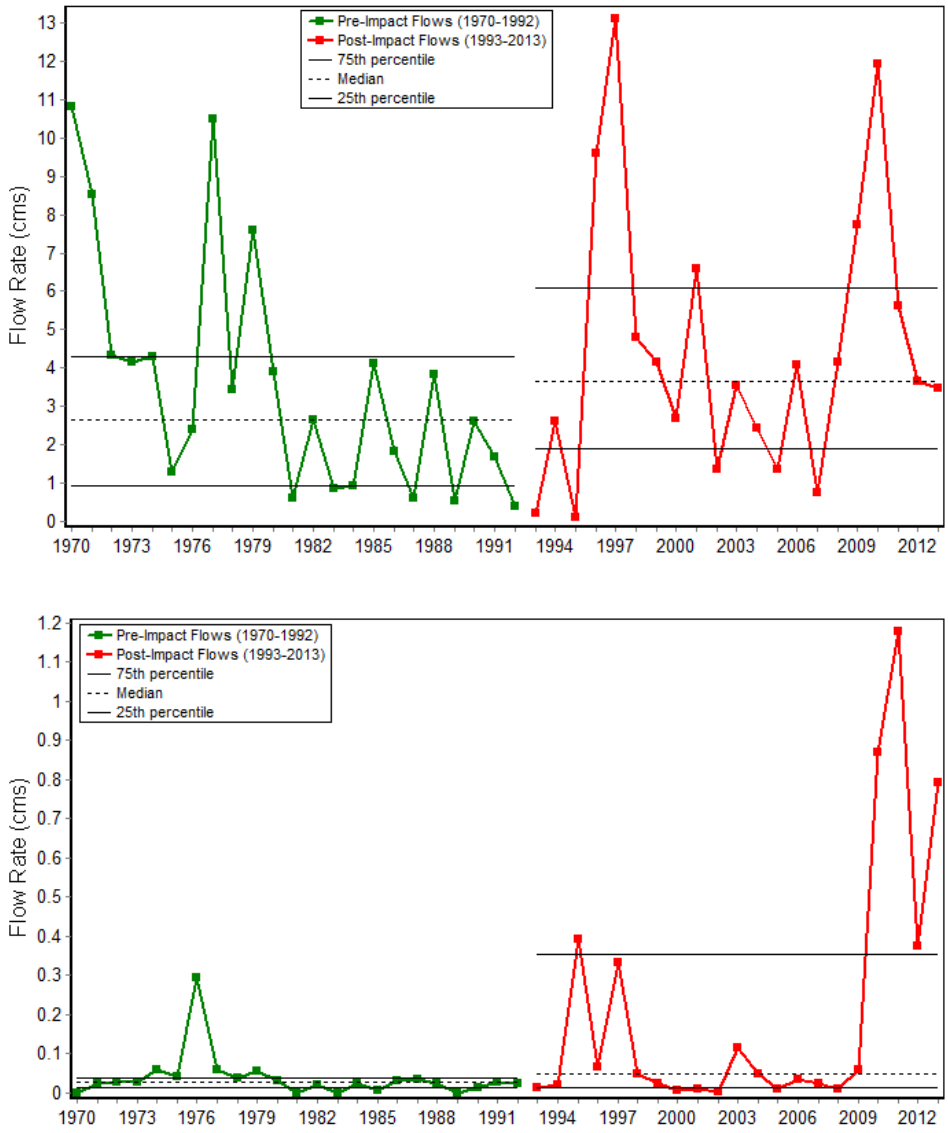


Figure 58: Débit mensuel des mois de Janvier (a) et Juillet (b)

III.1.2 Magnitude et durée des conditions extrêmes

L'approche de la gamme de la variabilité (RVA) compare la variation des paramètres IHA de la période avant l'impact à la variation de la période après l'impact pour déterminer l'étendue des changements. Chaque paramètre de l'IHA est analysé pour déterminer la fréquence à laquelle il tombe dans l'une des trois catégories de RVA (faible, moyen, élevé), comme défini par les limites des catégories de RVA. La RVA exige au moins deux ans de données avant l'impact. Le changement de fréquence entre avant et après l'impact de chaque paramètre IHA dans chacune des trois catégories RVA est rapporté comme l'altération hydrologique (HA) pour ce paramètre. Les facteurs sont calculés par l'équation suivante :

HA = (Fréquence observée - fréquence prévue) / Fréquence prévue

Où la " fréquence prévue " est la fréquence attendue dans la période post-impact si elle suit le même schéma que la période pré-impact, et la " fréquence observée " est la fréquence réellement observée dans la période post-impact.
Des valeurs positives d'altération hydrologique indiquent que la fréquence des valeurs dans la plage de variabilité donnée est plus élevée (de la période pré-impact à la période post-impact), tandis que des valeurs négatives indiquent une fréquence décroissante.
La variation du débit est divisée en trois catégories :

- la catégorie la plus basse est considérée comme le débit ayant un écart-type par rapport à la moyenne, qui contient toutes les valeurs inférieures ou égales au 25e centile ;
- la catégorie moyenne à toutes les valeurs du 25ème au 75ème percentile ;
- la catégorie haute comporte les valeurs supérieures au 75e percentile. Sur la base de cette fourchette, trois catégories sont créées (0-25%, 25-75% et 75-100%).

Les plus grandes altérations hydrologiques pour le bassin de Beht au niveau de la station El Kansera sont résumées dans la figure 59, qui montrent les classes de RVA (élevée, moyenne ou faible) liées à chacune des trente-trois variables hydrologiques. L'altération hydrologique a été estimée pour chacune des trois classes (élevée, moyenne ou faible) (Annexe C/Fig.C-1). L'analyse de la RVA a mis en évidence une augmentation de la fréquence d'occurrence des débits maximums sur 1, 3, 7 et 90 jours, des débits faibles minimums sur 30 et 90 jours et des débits médians mensuels (Octobre et Juillet), principalement dans la catégorie des RVA élevées, comme l'une des plus grandes altérations hydrologiques. La forte altération positive observée dans les débits mensuels pendant le mois de juillet (saison sèche) peut s'expliquer par une élévation des débits de base dans le cours d'eau. Ceci est soutenu par l'indice de débit de base montrant une valeur d’altération négative. Ce qui indique que le volume de décharge possible a diminué dans la rivière. Les résultats signalent qu'un stress et une perturbation environnementale importants se sont produits le long de la rivière.

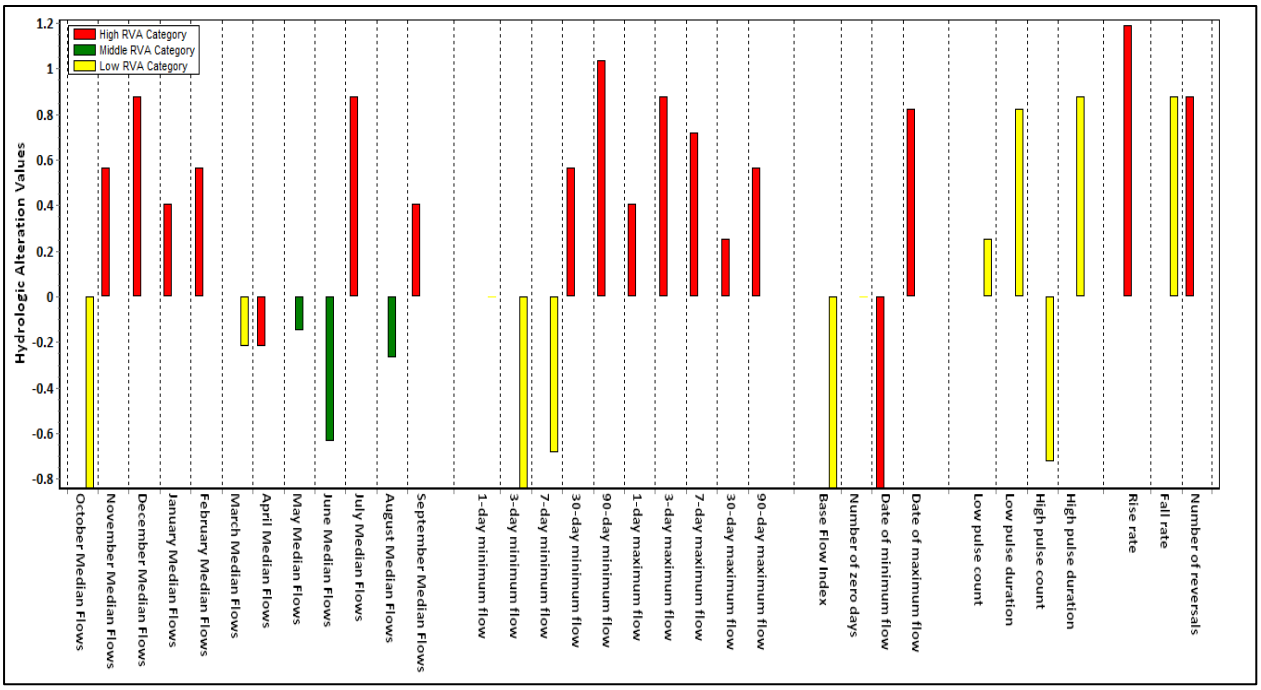


Figure 59: Catégorisation RVA des plus grands facteurs d'altération hydrologique

III.1.3 Timing des eaux extrêmes annuelles

Le troisième groupe d'IHA fournit des informations sur le timing des conditions hydriques extrêmes annuelles, il comprend deux paramètres, à savoir, la condition hydrique minimale annuelle sur un jour (1-day annual minimum water condition), tandis que le second fournit des informations sur la condition hydrique maximale annuelle sur un jour (1-day annual maximum water condition). Ces deux paramètres sont considérés comme très importants, et ils fournissent des informations cruciales sur les perturbations environnementales ou le stress hydrique dans l'écosystème aquatique.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 32. La date julienne de chaque minimum annuel d'un jour a révélé qu'elle avait augmenté de 2.16% dans la période post-impact, avec un degré d'altération négative de -0.8. De même, la date julienne de chaque maximum annuel d'un jour a été augmenté de 5% durant les deux dernières décennies comparativement aux deux antécédentes et que les jours juliens ont été décalés de 317 avant l'impact à 334 après l'impact, avec une valeur d'altération positive de 0.8. Ce décalage de presque un mois aura un effet sur l'écosystème aquatique.

III.1.4 Impulsions hautes et basses du débit

L'IHA a permis de classer la fréquence et la durée des impulsions des basses et hautes eaux dans le groupe 4. Ce dernier fournit une information sur les paramètres liés à l'occurrence de la

durée des conditions de hautes et basses eaux dans une année donnée. Ces conditions de hautes et basses eaux sont définies sur la base du 75e centile au-dessus (haute impulsion) et le 25e centile en dessous (impulsion basse) du débit pour la période pré-impact. Les paramètres de fréquence décrivent la régularité avec laquelle une grandeur de régime d'écoulement se produit sur un intervalle de temps spécifié. Les paramètres de durée décrivent la période pendant laquelle une condition d'écoulement spécifique existe.

On observe d'après le tableau 32, que la fréquence des impulsions basses n'est pas fortement modifiée avec une valeur d'altération hydrologique de 0.2. La durée des impulsions basses et hautes a diminué. Cette diminution est de -50% pour la faible durée d'impulsion et de -34.6% pour la durée d'impulsion élevée. De façon générale, on peut noter que la durée d'impulsions basses et hautes, et la fréquence des impulsions hautes sont fortement altérées de 0.82, 0.87 et -0.7 respectivement.

III.1.5 Taux et fréquence des modifications du débit

Les paramètres du groupe 5 de l'IHA montrent le taux de montée, le taux de descente et les inversions (calculés en divisant l'enregistrement hydrologique en périodes " de montée " et " de descente ", qui correspondent aux périodes pendant lesquelles les variations journalières des débits sont respectivement positives ou négatives). Globalement, ces paramètres fournissent des informations sur les changements brusques du flux interannuel. Le résultat obtenu, présenté dans le tableau 32, a révélé que le taux de montée a augmenté de manière significative de 145% et que le taux de descente a légèrement changé de 23.8%. Le taux de montée est fortement altéré avec une valeur de 1.19. Le taux de descente de la valeur de l'altération hydrologique est élevé (0.87). Ainsi, le nombre d'inversions est fortement altéré (0.87).

Tableau 33: Résultats des paramètres IHA

Facteurs IHA		Pré-impact	Post-impact	Variation relative (%)
Groupe 1	Octobre	0.15	0.5	227.45
	Novembre	1.58	2.43	54.38
	Décembre	1.75	3.26	85.92
	Janvier	2.65	3.66	38.04
	Février	1.95	3.04	56.26
	Mars	2.54	2.38	-6.3
	Avril	1.85	2.28	23.24

	Mai	0.98	0.78	-20.3
	Juin	0.1	0.28	193.48
	Juillet	0.03	0.05	78.79
	Aout	0.02	0.02	-2.35
	Octobre	0.03	0.03	7.63
Groupe 2	1-jour minimum	0.012	0.013	2.25
	3-jour minimum	0.017	0.015	-9.18
	7-jour minimum	0.0185	0.0183	-1.02
	30-jour minimum	0.02166	0.02163	-0.13
	90-jour minimum	0.027	0.071	155.71
	1-jour maximum	61.95	84.58	36.52
	3-jour maximum	33.58	51.87	54.46
	7-jour maximum	18.83	32.84	74.4
	30-jour maximum	8.08	13.86	71.36
	90-jour maximum	5.45	6.853	25.53
	Nombre de jours zéro	0	0	0
	Indice de débit de base	0.0058	0.0082	40.73
Groupe 3	Date du minimum	231	236	2.16
	Date du maximum	317	334	5.36
Groupe 4	Nombre d'impulsions faible	9	8	-11.11
	Durée d'impulsion faible	2	1	-50
	Nombre d'impulsions élevé	4	5	25
	Durée d'impulsion élevée	13	8.5	-34.61
Groupe 5	Taux de montée	0.0256	0.06288	145.62
	Taux de descente	-0.1318	-0.1632	23.82
	Nombre d'inversions	171	183	7.01

III.2 Composantes du débit environnemental, durée et timing

III.2.1 Composantes du débit environnemental

L'analyse des composants du débit environnemental de la période du 1970 à 1992 a révélé une seule grande crue en 1990 (Fig.60). Cette période a connu aussi des petites crues, ce qui favorise une croissance rapide des organismes aquatiques, du fait que les zones inondées peu profondes sont souvent plus chaudes que le cours d'eau principal et riches en nutriments et en insectes (NC Conservancy, 2009). Les variations des débits faibles sont un élément fondamental pour les communautés aquatiques, car elles déterminent la quantité d'habitats disponibles, ce qui va avoir une forte influence sur la diversité et le nombre d'organismes qui peuvent vivre dans la rivière (Castello et al., 2019).Cette phase a connu une longue période de sécheresse, ce qui se manifeste par la présence des débits extrêmement faibles, qui peuvent être stressants pour de nombreux organismes, mais qui peuvent aussi fournir les conditions nécessaires à certaines espèces de plantes par exemple, de se régénérer. Concernant les impulsions de débit élevé, ils présentent une haute fréquence durant toute la période et sont importantes et nécessaires aux zones à faibles débits, car ils apportent des matières organiques riches pour soutenir le réseau alimentaire aquatique.

Pour la deuxième période (1993-2013), l'analyse des composants du débit environnemental a révélé trois grandes crues à savoir 2002, 2004 et 2010 (Fig.60). Les petites crues étant dominantes. Il en résulte un mouvement des organismes en amont, aval en zones humides de plaine d'inondation de la rivière, ce qui va avoir un impact positif sur la migration des organismes aquatiques, le frai/la reproduction et la période de croissance des juvéniles (Spurgeon and Pegg, 2017). Ces zones souvent inaccessibles peuvent fournir des ressources alimentaires importantes. D'autre part, les débits faibles ont connu une variation importante et pourraient avoir un impact sur les relations entre prédateurs et proies, ainsi que la diversité et le nombre d'organismes. Les impulsions de débit élevé présentent une magnitude presque uniforme, ce qui favorise le déplacement des organismes mobiles vers les zones situées en amont et en aval.

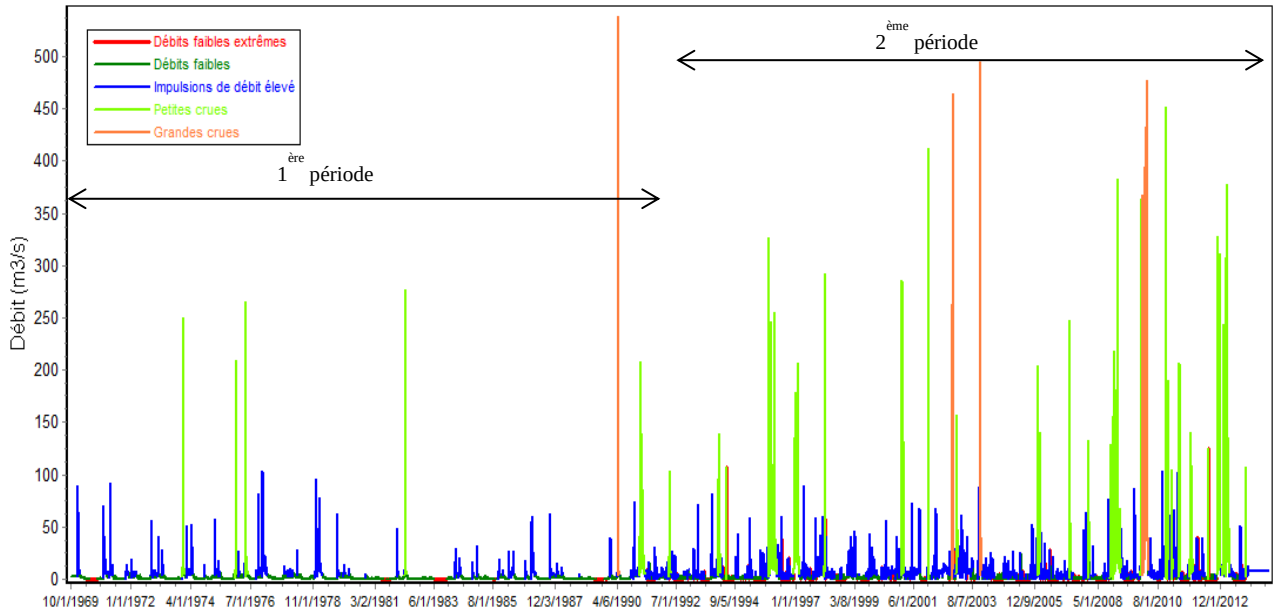


Figure 60: Les composantes en débit environnemental du bassin de Beht (1970-2013)

III.2.2 Durée du flux et timing des composantes du débit environnemental

La durée est le nombre de jours où une composante de flux donnée s'est produite et le timing par contre est la date julienne à laquelle une composante de flux donnée s'est produite.

Toutes les composantes du débit environnemental ont montré une durée croissante, à l'exception des débits extrêmement faibles (Fig.61). Les faibles débits ont montré une tendance à l'augmentation alors que les faibles débits extrêmes ont diminué autrement. Selon l'analyse des composantes du débit, les grandes et petites crues existent le plus après 1989 et 1995 respectivement. L'impulsion de haut débit, qui se produit au début de la saison des pluies, n'est presque pas perturbée, ce qui peut permettre aux poissons et autres organismes aquatiques d'accéder plus facilement aux zones en amont. Cette composante du débit n’est pas suffisante pour la reproduction complète des différents organismes aquatiques dans la rivière et les zones humides de la plaine d'inondation fournis par les petites et grandes crues.

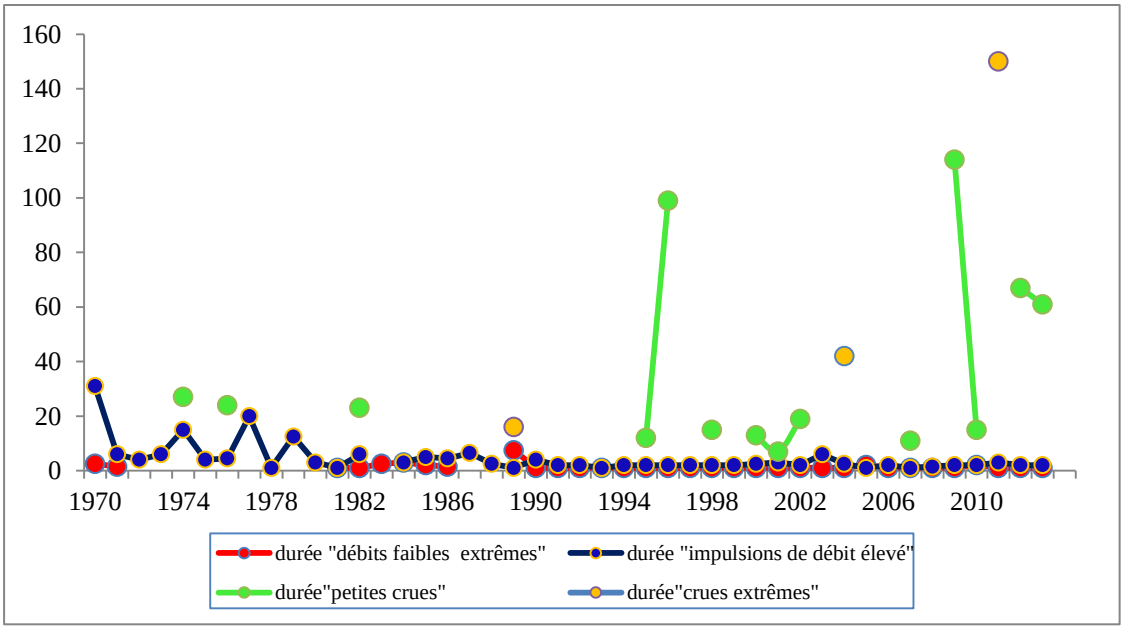


Figure 61: durée des composantes du débit environnemental

Le timing (le jour julien) de l'occurrence des débits faibles extrêmes, varie entre 140 et 300, cette composante est stable et représente une médiane de 216 et un coefficient de dispersion de 0,16 ; durant la première période, ces débits se sont produits au milieu du printemps (141 jour julien) à l'automne (315 jour julien) et pour la deuxième période, ils se sont déroulés généralement durant la saison d'été et ont connu une variation plus importante. D'autres composantes du débit environnemental sont très variables ; les impulsions de haut débit ont connu une variation interannuelle plus importante entre 1970 et 1992 et se sont produits durant l'hiver et l'automne, et entre 1993 et 2013 ils sont apparus pendant toutes les saisons mais surtout en été (Fig.62). Cela peut entraîner une perturbation du cycle de reproduction des poissons et autres organismes aquatiques qui vivent dans la rivière. Les impulsions de débit élevé sont un signal pour que ces espèces commencent à migrer dans les rivières pour atteindre les zones de frai des plaines inondables. Pour les petites crues, elles ont eu lieu pendant la saison d'hiver et certaines années au printemps et ont été plus fréquentes pendant la deuxième période. Les crues extrêmes, sont aussi survenues pendant l'hiver, notamment entre 1993 et 2013, à l'exception de la crue du printemps en 1990.

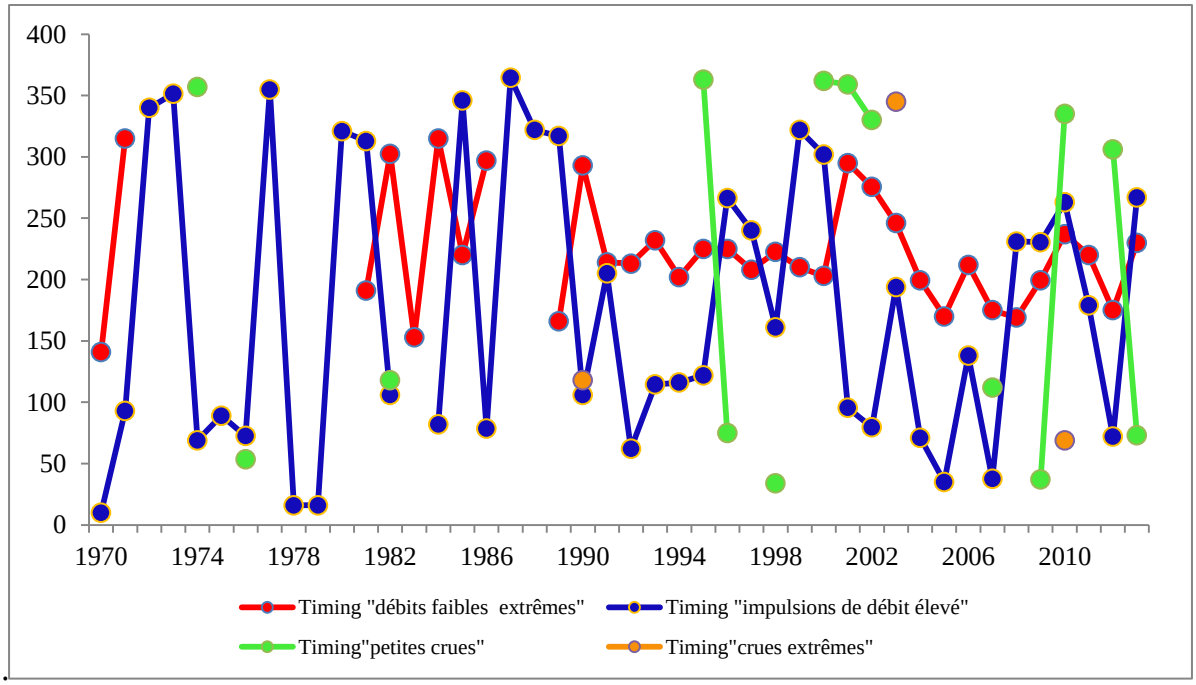


Figure 62: Timing des composantes du débit environnemental

Conclusion

La simulation par HEC-HMS de la relation pluie-débit du bassin versant, nous a permis de conclure que le résultat attendu est encourageant. Le débit de pointe et le volume total de tous les événements après optimisation sont très comparables aux données observées, avec les paramètres les plus sensibles sont l'abstraction initiale suivi par le Curve Number. La performance du modèle HEC-HMS était très bonne avec des valeurs significatives pour les différents critères d'évaluation, tels que les fonctions d'erreur relative, d'efficacité de Nash-Sutcliffe NSE, de coefficient de détermination R^2 et de rapport entre l'écart type des observations et l'erreur quadratique moyenne RSR, sur la base des méthodes de production, de transfert et de routage sélectionnées.

Les résultats obtenus ont montré que le modèle adopté à partir du logiciel HEC-HMS est acceptable et capable de reproduire la réalité des débits observés à l'exutoire du bassin versant, cependant, pour améliorer les performances du modèle dans les simulations, il est recommandé de mettre en place de stations météorologiques et hydrométriques afin de fournir plus de précisions et d'informations.

Pour la modélisation par SWAT, l'étude effectuée dans le bassin versant de Beht a montré que le modèle peut reproduire d'une façon satisfaisante les débits à l'échelle journalière et men-

suelle, dans un contexte de climat semi-aride, malgré les incertitudes qui sont dues à la nature et la précision des données pluviométriques et de débit mesurées.

L'analyse de sensibilité effectuée par l'algorithme SUFI-2 pour réduire le nombre de paramètres à considérer, a révélé la sensibilité du modèle aux paramètres des eaux souterraines. L'évaluation de la qualité de simulation a été réalisée par comparaison avec les mesures observées suivant trois indicateurs statistiques R2, NSE et RSR, qui ont donné de très bons résultats.

Le modèle SWAT a également simulé un bilan hydrologique irrégulier dans le bassin versant de Beht avec une prédominance de l'évapotranspiration, qui est caractéristique des conditions semi-arides. Cette variabilité élevée des ressources en eau dans le bassin versant s'explique par la variabilité spatiale des précipitations, les caractéristiques de l'utilisation des terres, le relief et les formations géologiques affleurant dans la zone d'étude.

L'approche SWAT-IHA, a confirmé sa capacité à évaluer le degré d'altération, les impacts des différents changements sur le régime hydrologique et les composantes en débit environnemental du cours d'eau, durant les deux périodes d'étude, nécessaire pour maintenir la totalité de la biodiversité naturelle. Cette méthode a pour avantage de permettre, en l'absence de données biologiques complètes ou d'expertise écologique, de fixer des objectifs préliminaires destinés à protéger la biodiversité et les écosystèmes aquatiques, à partir de données hydrologiques simulées.

Sur la base de l'analyse de la courbe de durée des débits, la comparaison entre les deux périodes a montré qu'il y a une augmentation des débits faibles et moyens durant la période 1993-2013 (post-impact), du fait que cette période a été considérée comme une période humide. La variation des débits mensuels a connu aussi une augmentation exceptionnelle des débits médians pendant la période humide allant d'octobre à février.

Concernant les plus grandes altérations hydrologiques, l'analyse de la RVA a mis en évidence une forte altération positive principalement dans la catégorie des RVA élevées. Ces résultats indiquent qu'il y a eu un stress et une perturbation environnementale importants le long de la rivière. Le timing des conditions hydriques annuelles extrêmes, la durée d'impulsions basses et hautes, la fréquence des impulsions hautes et le taux de montée et de descente sont également fortement altérées, modifiant ainsi le régime d'écoulement et l'écosystème aquatique.

Les composantes des flux environnementaux du bassin de Beht sont aussi affectées par le changement climatique durant les quatre dernières décennies, ce qui rend nécessaire de mettre en place des mesures pertinentes visant à préserver les débits environnementaux.

Ces résultats qui servent de base hydrologique, pourraient s'avérer déterminants pour maintenir la vie aquatique et devraient être complétés et affinés par une étude écologique bien détaillée, visant à établir une corrélation entre les réponses biologiques et les altérations hydrologiques (ainsi que les altérations des habitats physiques), pour objectif final de proposer et fixer des débits environnementaux adéquats pour le bassin de Beht, vu qu'il y a une très grande diversité de la macrofaune benthique, qui connait une dégradation du fait de la présence du barrage en aval, des pompages d'eaux destinés à l'irrigation des zones cultivées et des décharges non contrôlées (Lamhasni et al., 2017).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Il est évident que la description des processus intervenant dans la réponse hydrologique d'un bassin versant n'est pas si simple, cette description nécessite une bonne connaissance de plusieurs paramètres, qui font l'objectif de la modélisation et la compréhension des processus hydrologiques.

L'objectif de ce travail de thèse consistait à appliquer et à tester deux types de modélisation ; événementielle par le modèle semi-distribué HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center) et continue par le modèle spatial SWAT (Soil Water Assessment Tool) semi-distribué à base physique, dans le but de comprendre le fonctionnement des ressources en eau au niveau du bassin versant de Beht. Les séries de débit fournies par le modèle avaient une grande importance dans l'évaluation des composantes en débit environnemental qui est considéré comme l'un des indicateurs essentiels de la qualité des écosystèmes aquatiques.
De nombreux critères ont déterminé le choix du modèle HEC-HMS, dont la simplicité des données requises par le modèle, le recours à la méthode CN du NRCS sur plusieurs bassins au Maroc, et donc sa validation dans notre zone d'étude, de même que la prise en compte de plusieurs facteurs ayant un impact sur la transformation pluie-débit, rendant ainsi les résultats plus réalistes.

La délimitation des sous-bassins, l'extraction du réseau hydrographique et la création des bases de données sur les sols et l'utilisation des sols ont constitué une étape très importante de cette étude par le modèle HEC-HMS. Celui-ci a été utilisé pour estimer le Curve Number dans trois états (sec, moyen et humide), et pour déterminer une carte de Curve Number qui a été utilisée dans la simulation pour le bassin versant de Beht. Le CN du bassin est moyen à élevé, avec une valeur moyenne de 78, ce qui signifie que le bassin a un potentiel de ruissellement important. Les paramètres de simulation ont été optimisés grâce à la calibration du modèle, dont le plus sensible était l'abstraction initiale, suivie du Curve Number. La simulation de la relation pluie-débit du bassin versant a abouti ainsi à un résultat satisfaisant. Le débit de pointe et le volume total de tous les événements après optimisation sont très comparables aux données observées.

La performance du modèle HEC-HMS était très bonne avec des valeurs significatives pour les différents critères d'évaluation sur la base des méthodes de production, de transfert et de routages sélectionnés, avec des valeurs de : NSE = 0,815 et 0.63, R2 = 0,842 et 0.87, EQM = 0,1 et 0.36 pour les périodes de calibration et de validation respectivement. Les résultats

obtenus ont montré que le modèle adopté est acceptable et capable de reproduire la réalité des débits observés, cependant, pour améliorer les performances du modèle dans les simulations, il est recommandé de mettre en place de stations météorologiques et hydrométriques afin de fournir plus de précisions et d'informations.

Pour la modélisation du bassin avec le modèle SWAT, la préparation des données nécessaires, a exigé une longue phase de collecte et de traitement de ces données, en raison du fait que les caractéristiques physiques du bassin étudié doivent être renseignées pour pouvoir effectuer ce type de modélisation spatiale à base physique.

Une analyse de sensibilité a été effectuée par l'algorithme SUFI-2 afin réduire le nombre de paramètres à considérer, cette analyse a révélé la sensibilité du modèle aux paramètres des eaux souterraines.

En appliquant une calibration dite séquentielle, basée sur la calibration du modèle sur différents sites pour mieux représenter le caractère hétérogène du bassin, le modèle SWAT a montré sa capacité à reproduire de manière satisfaisante les débits à l'échelle journalière et mensuelle, dans un contexte de climat semi-aride, tout en tenant compte des incertitudes liées à la qualité et à la précision des données pluviométriques et de débit mesurées. Les résultats obtenus, après une longue période de calage, par rapport aux critères d'évaluations sélectionnés (R2, NSE et EQM), ont montré que le modèle est performant et peut être appliqué aux bassins similaires à la zone d'étude.

Le modèle SWAT a également simulé un bilan hydrologique irrégulier dans le bassin versant de Beht avec une prédominance de l'évapotranspiration, qui est caractéristique des conditions semi-arides. Cette variabilité élevée des ressources en eau dans le bassin versant s'explique par la variabilité spatiale des précipitations, les caractéristiques de l'utilisation des terres, le relief et les formations géologiques affleurant dans la zone d'étude.

Les débits simulés par le modèle SWAT ont permis d'évaluer le degré d'altération, les impacts des différents changements sur le régime hydrologique et les composantes en débit environnemental entre deux périodes (1970 à 1992 et 1993 à 2013), en utilisant le programme IHA. Sur la base des différents résultats, on conclut que la rivière a subi de fortes altérations, indiquant qu'il y a eu un stress et une perturbation environnementale du fait du changement climatique (succession d'années sèches et humides) et d'actions anthropiques par la présence du barrage en aval, modifiant ainsi le régime d'écoulement et l'écosystème aquatique. Ces

résultats aident à expliquer les changements dans les conditions écologiques ou les populations d'espèces et sont donc utiles pour aider les gestionnaires de l'eau à fixer des objectifs de protection et de restauration du débit de la rivière, afin de préserver et de conserver la biodiversité des écosystèmes aquatiques, ainsi de déterminer les besoins en débits environnementaux.

PERSPECTIVES FUTURS

Les résultats de ce travail de recherche ont permis de bien comprendre la situation et le comportement hydrologique du bassin versant de Beht, où peu de travaux similaires ont été effectués. Toutefois, pour améliorer la qualité de ce travail, d'autres points doivent être étudiés :

- ✓ Utilisation des données satellitaires de la TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), par exemple pour évaluer les données sur les précipitations.
- ✓ Evaluer la sensibilité du modèle par rapport aux formalismes des différentes fonctions de transfert fournies par le logiciel HECHMS.
- ✓ Afin de mettre à jour les données actuelles et améliorer la qualité du modèle, des cartes à haute résolution des sols et de l'utilisation des sols doivent être établies.
- ✓ Faire des simulations par le modèle SWAT pour prévoir l'impact des changements climatiques, d'occupation du sol et des pratiques agricoles sur le fonctionnement du bassin versant.
- ✓ Appliquer une méthode holistique pour évaluer les débits environnementaux adéquats pour le bassin de Beht, en collectant et décrivant les différentes données sur la communauté des poissons, des macroinvertébrés, du macrofaune benthique et de la végétation riveraine du bassin de Beht, ainsi une évaluation de la qualité de l'eau pour fournir des informations sur l'état de la rivière pour savoir les composés qui détruisent la vie aquatique.
- ✓ Evaluer l'effet du changement climatique sur les composantes des flux environnementaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbaspour K.C., Yang J., Maximov I., Siber R., Bogner K., Mieleitner J., Zobrist J., Srinivasan T., 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology, 333, PP. 413-430.

Abdallaoui, A., 1998. Contribution à l'étude du phosphore et des métaux lourds contenus dans les sédiments et de leur influence sur les phénomènes d'eutrophisation et de la pollution. Cas du bassin versant de l'oued Beht et de la retenue de barrage El Kansera.

Abdelmounim, B., Benaabidate, L., Bouizrou, I., & Aqnouy, M. 2019. Implementation of distributed hydrological modeling in a semi-arid Mediterranean Catchment Azzaba, Morocco. Journal of Ecological Engineering, 20(6), 236-254.

Abouabdillah, A., White, M., Arnold, J. G., De Girolamo, A. M., Oueslati, O., Maataoui, A., & Lo Porto, A. 2014. Evaluation of soil and water conservation measures in a semi-arid river basin in Tunisia using SWAT. Soil use and management, 30(4), 539-549.

Acreman, M., Dunbar, M., Hannaford, J., Mountford, O., Wood, P., Holmes, N., Cowx, I., Noble, R., Extence, C., and Aldrick, J., 2008. Developing environmental standards for abstractions from UK rivers to implement the EU Water Framework Directive/Développement de standards environnementaux sur les prélèvements d'eau en rivière au Royaume Uni pour la mise en oeuvre de la directive cadre sur l'eau de l'Union Européenne, Hydrological Sciences Journal, 53, 1105-1120.

Agence du Basin Hydraulique du Sebou (ABHS)., 2010. Etude de mise en place d'un système d'alerte aux crues et de télémesure dans le bassin du Beht.

Ahbari, A. 2013. Bassin versant de Rhéraya : modélisation pluie-débit et prédiction du comportement hydrologique. Mémoire de fin d'études. Faculté des sciences et techniques, Cady Ayyad University, Marrakech.

Ali, R., Kuriqi, A., Abubaker, S., Kisi, O., 2019. Hydrologic alteration at the upper and middle part of the yangtze river, China: Towards sustainable water resource management under increasing water exploitation. Sustain. 11, 1–16. https://doi.org/10.3390/su11195176.

Allen, R.G. 1986. A Penman for all seasons. J. Irrig. And Drain Engng., ASCE 112 (4): 348-368.

Allen, R.G., M.E. Jensen, J.L. Wright, and R.D. Burman. 1989. Operational estimates of evapotranspiration. Agron. J. 81 : 650-662.

Ambroise, B., 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, processus et modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du département « Science du Sol » de l'Institut National de Recherches Agronomiques de Dijon. pp 34.

Ambroise, B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, Facteurs, Modèles. Editions H.G.A., Bucarest,200p.

Anctil, F., Rousselle, J. et Lauzon, N. (2005). Hydrologie, cheminements de l'eau, Presses Internationales Polytechniques. 317p.

Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R, Haney E.B., Neitsch S.L., 2012. "Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation, version 2012."Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service. Blackland Research Center-Texas Agricultural Experiment Station.

Arnold, J. G. Allen, P. M. & Betrnhardt, G., 1993. A Comprehensive surface groundwater flow model. Hydrol. 142(69).

Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., Jha, M.K., 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. Trans. ASABE 55, 1491–1508.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. J. Am. Water Resour. Assoc. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x

Arthington, A.H., Brizga, S.O. & Kennard, M.J., 1998a. Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: best practice framework. Land and Water Resources Research and Development Corporation Occasional Paper No. 25/98. Canberra, Australia. 26pp.

Arthington, A.H., King, J.M., O'keeffe, J.H., Bunn, S.E., Jour, J.A., Pusey, B.J., Blüdhorn, D.R. & Tharme, R.E. 1992. Development of an holistic approach for assessing environmental water requirements of riverine ecosystems. Pp 69-76. In: Pigram, J.J. & Hooper, B.P. (eds). Water Allocation for the Environment. Proceedings of an International Seminar and Workshop. Armidale, Australia. 282pp.

ASCE, 1993. Criteria for evaluation of watershed models, American Society of Civil Engineers, Reston.

Beaudet G., 1969. Le Plateau central marocain. Thèse D. lettres, Rabat. 478p.

Bejarano, D. M., Nilsson, C., Del tanago, G. M., and Marchamalo, M., 2011. Responses of riparian trees and shrubs to flow regulation along a boreal stream in northern Sweden, Freshw Biol, 56, 853-866.

Bennett, N. D., B. F. W. Croke, A. J. Jakeman, L. T. H. Newham and J. P. Norton, 2010. Performance evaluation of environmental models. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs). Proceedings. International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada.

Bentayeb A. et Leclerc C., 1977. "Le Causse moyen atlasique," in Ressources en Eaux du Maroc, Tome 3, Domaines Atlasiques et Sud-Atlasiques, Notes et Mémoire du Service Géologique du Maroc, pp. 37–66.

Billaux P., Bryssine G., 1970. Les sols du Maroc : Chapitre III. Cahier de l'ORSTOM, 13703, pp. 59-101.

Blüdhorn, D.R. & Tharme, R.E., 1992. Development of an holistic approach for assessing environmental water requirements of riverine ecosystems. Pp 69-76. In: Pigram, J.J. & Hooper, B.P. (eds). Water Allocation for the Environment. Proceedings of an International Seminar and Workshop. Armidale, Australia. 282pp.

Bouabdelli A., 1989. Tectonique et sédimentation dans les bassins orogéniques : les sillons Viséen d'Azrou-Khenfra (Est du Massif hercynien central). Thèse-es-sciences, Strasbourg, 275p.

Boumir Kh., 1990. Paléoenvironnements de dépôts et transformations post-sédimentaires des sables fauves de Sais (Maroc). Thèse de l'université, de Nancy l, 176 p.

Bouslihim Y., Kacimi, I., Brirhet, H., Khatati, M., Rochdi, A., Pazza, N. E. A., ... & Yaslo, Z. 2016. Hydrologic modeling using SWAT and GIS, application to subwatershed Bab-Merzouka (Sebou, Morocco). Journal of Geographic Information System, 8(1), 20-27.

Bouslihim Y., 2020. Hydrological and soil erosion modeling using SWAT model and Pedotransfert Functions: a case study of Settat-Ben Ahmed watersheds, Morocco. Thèse de doctorat. Université Hassan Ier Settat (Maroc).

Brocca L., Melone F., Moramarco T., Singh V.P., 2009. Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall–runoff modelling. Journal of Hydrologic Engineering 14, 153–165.

Brocca L., Melone F., Moramarco T., Wagner W., Naeimi V., Bartalis Z., Hasenauer S., 2010. Improving runoff prediction through the assimilation of the ASCAT soil moisture product. Hydrology and Earth System Science 14, 1881–1893.

Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Bouabid, R., Benaabidate, L., & Oueslati, O. 2017. SWAT manual calibration and parameters sensitivity analysis in a semi-arid watershed in North-western Morocco. Arabian Journal of Geosciences, 10, 1-13.

Brouziyne, Y., Belaqziz, S., Benaabidate, L., Aboubdillah, A., Bilali, A. El, Elbeltagi, A., Tzoraki, O., Chehbouni, A., 2022. Modeling long term response of environmental flow attributes to future climate change in a North African watershed (Bouregreg watershed, Morocco). Ecohydrol. Hydrobiol. 22, 155–167. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.08.005

Brown, C.A. & King, J.M., 1999. Task 2 Report Series. Introduction and description of the workshop process. Consulting services for the establishment and monitoring of the instream flow requirements for river courses downstream of the Lesotho Highland Water Project dams. Lesotho Highlands Development Authority, Lesotho.

Brown, C.A. & King, J.M., 2000. Volume II: IFR methodology. In: LHDA 648-F-03. Consulting services for the establishment and monitoring of the instream flow requirements for river courses downstream of the LHWP dams. Unpublished Metsi Consultants Report to Lesotho Highlands Development Authority. Metsi Consultants, Lesotho. 180 pp.

Bunn, S. E., and Arthington, A. H., 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity, Environmental Management, 30, 492-507. DOI: 0.1007/s00267-002-2737-0.

Burger J., Dardel R., Dutrieux E., Jacquemont J. & Naif R., 1951. Carte géologique régulière du Maroc au 1:100.000eme: Meknès nord, Feuille levée et édifiée par la Société Chérifiènne des Pétroles, Notes et mémoires du Service géologique du Maroc, 111.

C. Santhi, R. D. Harmel, A. van Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan, M. K. Jha., 2012. "SWAT: Model use, calibration and validation" ASABE 55(4): 1491-1508.

Castello, L., Bayley, P.B., Fabré, N.N., Batista, V.S., 2019. Flooding effects on abundance of an exploited, long-lived fish population in river-floodplains of the Amazon. Rev. Fish Biol. Fish. 29, 487–500. https://doi.org/10.1007/s11160-019-09559-x

Cavendish, M.G. & Duncan, M.I., 1986. Use of the Instream Flow Incremental Methodology: a tool for negotiation. Environ. Impact Assess. Rev. 6: 347 363.

Chadli K, Kirat M, Laadoua A. et al., 2016. Runoff modeling of Sebou watershed (Morocco) using SCS curve number method and geographic information system. Model. Earth Syst. Environ. 2, 158.

Chamayou J., Combe M., Genetier B. et Leclerc C., 1975, "Le bassin de Meknès-Fès," in Ressources en eaux du Maroc, Tome 2, Plaines et bassins du Maroc atlantique, Service géologique du Maroc. , pp. 41–71.

Chbouki, N., Stockton, C.W., Myers, D.E., 1995. Spatio-temporal patterns of drought in Morocco. Int. J. Climatol. 15, 187–205. https://doi.org/10.1002/JOC.3370150205.

Cheng C., Ou C., Chau K (2002) Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall–runoff model calibration. J. Hydrol. 268, 72–86.

Chiew, F. H. S. and T. A. McMahon (1993), Assessing the Adequacy of Catchment Streamflow Yield Estimates, Aust. J. Soil Res., 31, 665-680.

Chu, T. W., and A. Shirmohammadi. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. Trans. ASAE 47(4): 1057-1073.

Chu, X.; Steinman, A., 2009. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. J. Irrig. Drain. E-Asce.135, 119–124.

Combe M., Ferré M., Thauvin J.P., 1975. Meseta centrale et Meseta côtière. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, p : 147-171.

Council, E. P., 2000. Directive of the European Parliament and of the Council 2000/60/EC establishing a framework for community action in the field of water policy, European Commission PE-CONS, 3639, 100.

Criss, Robert, et William Winston. 2008. « Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals ». Hydrological Processes, vol. 22, no 14, p. 2723.

Cunderlik J. M. et Simonovic S. P. 2004. Calibration, verification, and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model. Project Report IV. CFCAS project. 113p.

Daide, F., Afgane, R., Lahrach, A., & Chaouni, A. A. (2022). Beht watershed (Morocco) rainfall-runoff simulation with the HEC-HMS hydrological model. Ecological Engineering & Environmental Technology, 23.

Dawdy, D.R. et O'Donnell, T., 1965. Mathematical models of catchment behavior. American Society of Civil Engineers Proceedings, 91(HY4), 123-137.

De Marsily, G., 1994. Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie. Revue scientifique de l'eau, Vol. 7, p : 219-234.

Declaration, T. B., 2007. The Brisbane Declaration: Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being, Declaration of the 10th International River Symposium, 3–6 September 2007, Brisbane, Australia.

DREF N-O, 2007. Direction Régionale des Eaux et Forêt Du Nord-Ouest à Kenitra. Etude d'aménagement du bassin versant de l'Oued Beht en amont du barrage El Kansera.

Dudgeon D., 2000. Large-scale hydrological changes in tropical Asia: prospects for riverine biodiversity, Bioscience, 1 50, 793-806.

Dunbar, M.J., Gustard, A., Acreman, M.C. & Elliott, C.R.N., 1998. Review of overseas approaches to setting river flow objectives. Environment Agency R&D Technical Report W6B(96)4. Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom. 61 pp.

El Gaatib R., 2017. Cartographie décisionnelle de l'aménagement intégré du Bassin Versant de l'Oued Beht : Analyse spatiale de l'aléa érosif des sols pour la gestion des risques naturels d'envasement de la retenue du barrage El Kansera (Maroc). Thèse doct. Université Mohammed V – Rabat, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, 192p.

Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y., & Bachir, O. A. 2011bri. Hydrologic modeling of the Bouregreg watershed (Morocco) using GIS and SWAT model. Journal of Geographic Information System, 3(04), 279.

Faugères J.C., 1978. Les Rides sud rifaines : évolution sédimentaires d'un bassin atlantico – mésogéen de la marge africaine. Thèse doct. Es-sc., univ. Bordeaux I, n° 590.

Fox, H.R., Wilby, R.L., Moore, H.M., 2001. The impact of river regulation and climate change on the barred estuary of the Oued Massa, southern Morocco. River Res. Appl. 17, 235–250. https://doi.org/10.1002/rrr.613.

Gassman, P. Reyes, M. Green, C. & Arnold, J., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. American society of Agriculture and Biological Engineers 50(4), 1211-1250. https://doi.org/10.13031/2013.23637

Gaume, E. (2002). Un parcours dans l'étude des phénomènes extrêmes en hydrologies. Mém. H.D.R., Ecole National des Ponts et Chaussées. 269 p.

Gordon, N.D., Mcmahon, T.A. & Finlayson, B.L., 1992. Stream hydrology. An introduction for ecologists. John Wiley & Sons, Chichester. 526 pp.

Gray D. M., 1972. Manuel des principes d'hydrologie. Comité National Canadien de la Décennie Hydrologique Internationale. Ottawa.

Grayson, R.B., Moore, I.D. and McMahon, T.A., 1992a. Physically based hydrologic modeling .1. A terrain-Based model for investigative purposes. Water Resources Research, 28(10): 2639-2658.

Guillot, P. and Duband, D., 1967. La méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies, in Floods and Their Computation. Proceedings of the Leningrad Symposium, IASH Publ. 84: 560–569.

Gupta, H. V., H. Kling, K. K. Yilmaz and G. F. Martinez, 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, Journal of Hydrology, 377, 80-91.

Hakam, O., Baali, A., Ahouach, Y., & Azennoud, K. 2022. Comparative evaluation of precipitation-temperature based drought indices (DIs): A case study of Moroccan Lower Sebou basin. Kuwait Journal of Science, 49(3).

Halwatura, D.; Najim. M., 2013. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. Environ. Modell. Softw. 46, 155–162.

Hargreaves G. H. et Riley J. P., 1985. "Agricultural benefits for Senegal River Basin." J. Irrig. and Drain. Engr., 111(2), 113-124.

Hawkins RH, Ward TJ, Woodward DE, Van Mullem, J.A., 2009. Curve Number Hydrology: State of Practice; American Society of Civil Engineers: Reston, VI, USA.

Hawkins RH., 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. J. Irrig. Drain. Eng. 119, 334–345.

Hayes D.S., Brändle J.M., Seliger C., Zeiringer B., Ferreira T., & Schmutz S., 2018. Advancing towards functional environmental flows for temperate floodplain rivers. Science of the Total Environment, 633, 1089-1104.

Hingray B., Picouet C., Musy A., 2009. Hydrologie: Une science pour l'ingénieur, tome2, 384p.

Huang M., Gallichand J., Dong C., Wang Z., Shao M., 2007. Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China. Hydrological Processes 21, 1471–1481.

IPCC, 2014. Climate Change 2014 : Synthesis Report, Kristin Seyboth (USA). Gian-Kasper Plattner.

Jain, Sharad, et KP Sudheer., 2008. Fitting of hydrologic models: a close look at the Nash–Sutcliffe index. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 13, no 10, p. 981-986.

Kharchaf Y., 2013. Apport des SIG et télédétection à la modélisation des bassins versants-Cas du bassin Oum Er-Rbia (Maroc). Thèse de doctorat - Faculté des sciences Ain-Chock. Casablanca. 144p.

King, J.M. & Louw, D., 1998. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology. Aquatic Ecosystem Health & Management 1: 109-124.

Kingsford, R. T., and Auld, K. M., 2005. Waterbird breeding and environmental flow management in the Macquarie Marshes, Arid Australia, River Research and Applications, 21, 187-200, doi:10.1002/Rra.840.

Kingumbi A., 2006. Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Thèse de Doctorat , Institut National d'Ingénieur, 199 p.

Klemes, V., 1986. Operational Testing of Hydrological Simulation-Models, Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol., 31, 13-24.

Krause, P., D. P. Boyle and F. Bäse, 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, Advances in Geosciences, 5, 89-97.

Kuriqi A., Ardiçlioglu M., Muceku Y., 2016. Investigation of seepage effect on river dike's stability under steady state and transient conditions. Pollack Period. 11, 87–104.

Kuriqi A., Pinheiro A., Sordo-Ward A., Garrote L., 2017. Trade-off between environmental flow policy and run-of-river hydropower generation in Mediterranean climate. Eur. Water. 60, 123–130.

Laborde J.P., 2009. Eléments d'hydrologie de surface. Cours : Cycle d'ingénieur, Hydroprotech. Ecole polytechnique de l'université de Nice. 202p.

Lakhili, F., Mohammed, B., Nouzha, B., Hamid, L., Abrerrahim, L., 2015. Etude de la qualité physicochimique et de la contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Beht (Maroc). Eur. Sci. J. 11.

Lamhasni, N., Lahcen, C., & Timallouka, M., 2017. Bio-évaluation de la qualité des eaux de surface d'oued Beht (Maroc) Indice Biologique Global des réseaux de contrôle et de surveillance (IBG-RCS). Eur. Sci. J, 13.

Legates, D. R., & McCabe, G. J., 1999. Evaluating the use of"goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Res., 35(1), 233-241. http://dx.doi.org/10.1029/1998WR900018.

Linsley, R., K. and N. Crawford, H., 1960. Computation of a synthetic streamflow record on a digital computer, IAHS Publ., 51, 526-538.

Littlewood, I. G., Down, K., Parker, J. R. & Post, D. A., 1997. The PC Version of IHACRES for Catchment-Scale Rainfall – Streamflow Modelling: User Guide. Institute of Hydrology Software report, p. 89.

Llamas, J., 1993. Hydrologie générale. Principes et applications. Gaetan Morin éditeur. 2e éd., Québec, p 527.

Loar, J.M., Sale, M.J. & Cada, G.F., 1986. Instream flow needs to protect fishery resources. Water Forum '86: World water issues in evolution. Proceedings of A.S.C.E. conference/HY. IR, EE, WR, WW Divs. Long Beach, California, August 4-6.

Luzio, M. Di, Srinivasan, R., Arnold, J.G., Neitsch, S.L., 2002. ARC VIEW INTERFACE FOR SWAT2000 USER'S GUIDE. GSWRL Report 02-03, BRC Report 02-07. Texas Water Resources Institute TR-193, College Station, TX.

Madsen H., 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. Journal of Hydrology.

Maison P., 2000. Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant : Approche mécaniste simplifiée de la zone non saturée, Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse. 303 p.

Marchandise A., Viel, C., 2009 Utilisation des indices d'humidité de la chaîne Safran-Isba-Modcou de Météo-France pour la vigilance et la prévision opérationnelle des crues. La Houille Blanche 6, 35–41.

Marchandise, A., 2007. Modélisation hydrologique distribuée sur le gardon d'Anduze : étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques. Thèse de Doctorat, Univ.Montpellier2.

Marghich A., 1989. Contribution à l'étude sédimentologique, minéralogique et géochimique des alluvions actuelles de l'Oued Beht (Maroc central). Thèse de 3ème cycle, Ecole Normale Supérieure, Fès.256 p.

Mathews, R., Richter, B.D., 2007. Application of the Indicators of Hydrologic Alteration Software in Environmental Flow Setting1. JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc. 43, 1400–1413.

Mayer, D. G. and D. G. Butler, 1993. Statistical validation, Ecological Modelling, 68, 21-32.

McAllister D.E., Craig J.F., Davidson N., Delany S., Seddon M., 2001. Biodiversity impacts of large dams. Backgr. Pap. 1, 59–68.

McCuen, R., Zachary K., Gillian C., 2006. Evaluation of the Nash– Sutcliffe efficiency index. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 11, no 6, p. 597- 602.

Meylan, P. and Musy, A., 1999. Hydrologie fréquentielle. Office fédéral de l'éducation et de la science/suisse (n 96.01). pp 181, 251, 275, 305, 371.

Michard, A., 1976. Eléments de Géologie Marocaine. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, Rabat, 252pp.

Michel, C., 1989. Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.

Milhous, R.T., Updike, M.A. & Schneider, D.M., 1989. Physical habitat simulation system reference manual - version 2. Instream Flow Information Paper 26. U.S.D.I. Fish Wildl. Serv. Biol. Rep. 89(16).

Mimich, K., Essahlaoui. A., El Ouali, A., El Hmaidi, A., 2018. Using SWAT To Simulate a Moroccan Watershed, including an assessment of the most sensitive modelling parameters with SUFI2. The International Journal of Engineering and Science (IJES), 7.10, 50-63.

Miossec, M. P., 2004. Apport des multi-modèles pour la modélisation sur des bassins versants non jaugés. DEA Hydrologie, hydrogéologie, géostatistique et géochimie. Université Pierre et Marie Curie, Université de Paris-sud, Ecole Nationale du Génie Rural des eaux et des Forêts. CEMAGREF, Antony, France, 43 p

Mishra SK, Singh VP., 2003. Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. Water Sci. And Tech. Library. Volume 42, 534p.

Monteith, J. L., 1965. "Evaporation and the environment." In: The state and movement of water in living organisms, XIXth symposium Soc. for Exp. Biol.,Swansea, Cambridge University Press, 205-234.

Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL, 2007.Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. T. ASABE. 50, 885–900.

Moriasi, D., Wilson, B., Douglas-Mankin, K., Arnold, J., & Gowda, P., 2012. Hydrologic and water quality models: Use, calibration, and validation. Trans. ASABE, 55(4), 1241-1247. http://dx.doi.org/10.13031/2013.42265.

Morin, G. et Paquet, P., 1995. Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU, Guide de l'utilisateur. Version 2.0 pour Windows. INRS-Eau, rapport de recherche no. 435, 54 pp.

Morin, G., 1991. Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride, Le modèle hydrologique CEQUEAU : exemples d'application. INRS-eau, Université du Québec, Canada, p : 23-39.

Moumen, Z., Nabih, S., Elhassnaoui, I., & Lahrach, A. 2020. Hydrologic Modeling Using SWAT: Test the Capacity of SWAT Model to Simulate the Hydrological Behavior of Watershed in Semi-Arid Climate. In Decision Support Methods for Assessing Flood Risk and Vulnerability (pp. 162-198). IGI Global.

Musy A., 2005. Note de cours "Hydrologie générale" de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). URL: http://echo2.epfl.ch/e-drologie/.

Nabih, S. 2022. Meteorological and ecohydrological patterns of Mediterranean watersheds due to climate change: cases of Upper Sebou (Morocco) and Tsiknias (Greece). Thèse de doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès.

Naghettini, M. Potter, K.W. and Illangasekare, T., 1996. Estimating the upper tail of flood peak frequency distributions using hydrometeorological information. Water Resources Research, Vol. 32: 1729-1740. http://www.agu.org/pubs/crossref/1996/96WR00200.shtml

Najim MMM, Babelb MS, Loofb R., 2006. AGNPS model assessment for a mixed forested watershed in Thailand. http://dx.doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2006.32.053

Nash, J.E. et Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. J. Hydrol. **10**, p 282-290.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. et Williams, J.R., 2005. Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation, version 2005, Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service. Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service. Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station.

Neitsch, S.., Arnold, J.., Kiniry, J.., Williams, J.., 2011. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, Texas Water Resources Institute. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063

Neitsch, S.., Arnold, J.G., Kiniry, J.., Williams, J.., 2009. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009.

Ogden, B.F.L., Garbrecht, J., Debarry, P. a, Johnson, L.E., 2001. Gis and Distributed Watershed Models . J. Hydrol. Eng. 6, 515–523.

O'Keeffe, J., 2009. Sustaining river ecosystems: balancing use and protection, Progress in Physical Geography, 33, 4 339-357, doi: 10.1177/0309133309342645.

O'Keeffe, J., and Quesne, T., 2009. Keeping rivers alive: a primer on environmental flows, WWF Water security series 2, 39 pp.

Pastor, A. V., Ludwig, F., Biemans, H., Hoff, H., & Kabat, P., 2013. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 10(12).

Payraudeau S., 2002. Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerrainéens. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Montpellier, 436p.

Perrin, C., V. Andreassian and C. Michel., 2006. Simple benchmark models as a basis for model efficiency criteria, 24 pp., Schweizerbart, Stuttgart, ALLEMAGNE.

Pettit, N. E., Froend, R. H., and Davies, P. M., 2001. Identifying the natural flow regime and the relationship with riparian vegetation for two contrasting western Australian rivers, Regulated Rivers-Research & Management, 17, 201-215, doi:10.1002/Rrr.624.

Petts, G.E., 1996. Water allocation to protect river ecosystems. Regul. Rivers: Res. Mgmt. 12: 353-365.

Petts, G.E., Bickerton, M.A., Crawford, C., Lerner, D.N. & Evans, D., 1999. Flow management to sustain groundwater-dominated stream ecosystems. Hydrol. Process. 13: 497-513.

Poff, N. L., and Zimmerman, J. K., 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows, Freshwater Biology, 55, 194-205.

Priestley, C. H. B. et Taylor, R. J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather. Rev, 100, 81-92.

Refsgaard, J. C. and H. J. Henriksen, 2004. Modelling guidelines - terminology and guiding principles, Advances in Water Resources, 27, 71-82.

Refsgaard, J. C., L. Troldborg, H. J. Henriksen, A. L. Højberg, R. R. Møller and A. M. Nielsen, 2010. God praksis i hydrologisk modellering. In Geo-guide 7. Geological Survey of Denmark and Greenland.

Refsgaard, J. C., Storm, B., 1995. Construction, Calibration and Validation of hydrological models, in Global Environmental Change and Land Surface Processes in Hydrology: the trial and Tribulations of modeling and measuring, NATO ASI ser. I, Vol. 46, p : 17-39, Springer-Verlag, New York.

Refsgaard, J.C. et Abbott, M.B., 1996. The role of distributed hydrological modelling in water resources management - Chapter 1. In: Distributed Hydrological modelling, M. B. Abbott et J. C. Refsgaard (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1-16.

Refsgaard, J.C., 1997. Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of Hydrology 198, p. 69-97.

Reiser, D.W., Wesche, T.A. & Estes, C. 1989a. Status of instream flow legislation and practice in North America. Fisheries 14(2): 22-29.

Richter, B. D., Warner, A. T., Meyer, J. L., and Lutz, K., 2006. A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations, River Research and Applications, 22, 297-318.

Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. & Braun, D.P., 1996. A method for assessing hydrological alteration within ecosystems. Conservation Biology 10(4): 1163-1174.

Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Wigington, R. & Braun, D.P., 1997. How much water does a river need? Freshwater Biology 37: 231-249.

Roche M., 1963. Hydrologie de surface, Gauthier - Villars Editeur, Paris, 429 p.

Roche P. A., 1988. Les modèles. Gestion des eaux : Automatisation, Informatisation et Télégestion, Tome III, F. Valiron (Ed). pp 138-166

Rykiel, E. J. J., 1996. Testing ecological models: the meaning of validation, Ecological Modelling, 90, 229-244.

Šarauskienė, D., Adžgauskas, G., Kriaučiūnienė, J., Jakimavičius, D., 2021. Analysis of hydrologic regime changes caused by small hydropower plants in lowland rivers. Water (Switzerland) 13. https://doi.org/10.3390/w13141961

Schaefli Bettina, Hoshin Gupta., 2007. « Do Nash values have value? ». Hydrological Processes, vol. 21, no 15, p. 2075-2080.

SCS (Soil Conservation Service), 1972. Section 4: Hydrology in National Engineering Handbook. Soil Conservation Service (SCS).

Seibert, J., 2001. On the need for benchmarks in hydrological modelling, Hydrol. Process., 15, 1063-1064.

Singh V. P., 1995. Watershed Modeling Computer Models of Watershed Hydrology, Water Ressources Publications, Littleton, Colorado.

Singh, J., H. V. Knapp, and M. Demissie., 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey.

Sood, A., Smakhtin, V., Eriyagama, N., Villholth, K.G., Liyanage, N., Wada, Y., Ebrahim, G., Dickens, C., 2017. Global Environmental Flow Information for the Sustainable Development Goals (IWMI Research Report 168).

Spurgeon, J.J., Pegg, M.A., 2017. Juvenile growth of a macrohabitat generalist tied to hydrological character of large-river system. Freshw. Biol. 62, 291–302. https://doi.org/10.1111/fwb.12867

Suwal, N., Kuriqi, A., Huang, X., Delgado, J., Młyński, D., & Walega, A., 2020. Environmental flows assessment in Nepal: the case of Kaligandaki River. Sustainability, 12(21), 8766.

Swales, S. & Harris, J.H., 1995. The Expert Panel Assessment Method (EPAM): a new tool for determining environmental flows in regulated rivers. Pp 125-134. In: Harper, D.M. & Ferguson, A.J.D. (eds). The ecological basis for river management. John Wiley & Sons, New York.

Swales, S., Bishop, K.A. & Harris, J.H., 1994. Assessment of environmental flows for native fish in the Murray-Darling Basin – a comparison of methods. Pp. 184-191. In: Proceedings of environmental flows seminar, Australian Water and Wastewater Association Inc. Artarmon, N.S.W., Australia.

Taia S., 2015. Modélisation de l'hydrologie et de l'érosion du bassin versant de l'Oued Beht (Nord-Ouest du Maroc). Mémoire Master spécialisé. Faculté des sciences Ibn Tofail.116p.

Tennant, D.L., 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries 1(4): 6-10.

Tharme, R. E., 2003. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers, River Research and Applications, 19, 397-441. doi:10.1002/Rra.736.

Tharme, R.E. & King, J.M., 1998. Development of the Building Block Methodology for instream flow assessments, and supporting research on the effects of different magnitude flows on riverine ecosystems. Water Research Commission Report No. 576/1/98. 452 pp.

Tharme, R.E., 1996. Review of international methodologies for the quantification of the instream flow requirements of rivers. Water law review. Final report for policy development. Commissioned by the Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria. Freshwater Research Unit, University of Cape Town, Cape Town. 116 pp.

Tharme, R.E., 1997a. Chapter 2: review of IFR methodologies. In: Metsi Consultants. Lesotho Highlands Water Project. Task 1 Report: IFR methodology and parameters. Consulting services for the establishment and monitoring of the instream flow requirements for river course downstream of LHWP dams. Report No. 648-02. Lesotho Highlands Development Authority, Lesotho.

Tharme, R.E., 2000. In draft. International trends in the development and application of environmental flow methodologies: a review. Water Research Commission Technology Transfer Report. Water Research Commission, Pretoria**.**

The Nature Conservancy., 2009. "Indicators of Hydrologic Alteration, Version 7.1 User's Manual."

Thoms, M.C., Sheldon, F., Roberts, J., Harris, J. & Hillman, T.J., 1996. Scientific panel assessment of environmental flows for the Barwon-Darling River. Report to the Technical Services Division of the New South Wales Department of Land and Water Conservation. NSW, Australia.

Tramblay Y., 2012. Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine. Rapport interne de l'ABH de Loukous. Maroc. 34p.

Tramblay Y., Bouvier C., Martin C., Didon-Lescot J.-F., Todorovik D., Domergue J.-M., 2010. Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modeling, Journal of Hydrology 387, 176–187.

USACE (United States Army Corps of Engineers), 2009. HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension, Technical Reference Manual, Davis, CA 95616 USA, CPD-77.

USACE, 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual version 3.5. Hydrologic Engineering Center. 138 p.

USACE, 1994. Flood-Runoff Analysis Engineering Manuel. N° 110-2-1417, Washington. 214p.

USACE, 2010. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical reference manual version 3.5. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering center, Davis, CA.

USACE, U.A.C.O. Hydrologic Modeling System, HEC-HMS, 2015. Quick Start Guide; US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA.

USDA (United States Department of Agriculture), 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release 55, Natural Resources Conservation Services, Conservation Engineering Division, Washington, DC, USA. Second Edition, June. 164p.

USDA-SCS Soil Conservation Service, 1985. National Engineering Handbook. Section 4, Hydrology, Washington, DC.

Vauclin M., Vachaud G., 1991. Modélisation des écoulements d'eau dans le milieu naturel : approche déterministe ou stochastique. Institut de mécanique de Grenoble.

Vazquez-Amábile, G. G., and B. A. Engel., 2005. Use of SWAT to compute groundwater table depth and streamflow in the Muscatatuck River watershed. Trans. ASAE 48(3): 991-1003

Wallingford, H. R., 2003. Handbook for the assessment of catchment water demand and use.

Wang X.-J., Jian-Yun Z., Shahid S., ElMahdi, A., Rui-min H., Zhen-Xin B., Ali M., 2012. Water resources management strategy for adaptation to droughts in China. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang. 17, 923–937.

Willmott, C. J., 1984. On the evaluation of model performance in physical geography, Spatial Statistics and Models, 443-460.

World Bank Group, 2022. Supporting Morocco's Journey to Disaster and Climate Resilience. Morocco Integr. Disaster Risk Manag. Resil. https://www.worldbank.org/en/results/2022/08/11/supporting-morocco-s-journey-to-disaster-and-climate-resilience (accessed 9.21.22).

World Bank Group, 2021. Climate Risk Profile : Morocco.

Zhang, Z., Huang, Y., Huang, J., 2016. Hydrologic alteration associated with dam construction in a medium-sized coastal watershed of southeast China. Water (Switzerland) 8. https://doi.org/10.3390/w8080317

Zelelew, D.; Melesse, A., 2018. Applicability of a Spatially Semi-Distributed Hydrological Model for Watershed Scale Runoff Estimation. Water.10, 923.

Zemzami, M. Benaabidate, L. Layan, B. and Dridri, A., 2012. Design flood estimation in ungauged catchments and statistical characterization using principal components analysis: application of Gradex method in Upper Moulouya. Hydrological Processes, DOI: 10.1002/hyp.9212.

Annexe A: Table des caractéristiques des sols du SWAT pour le bassin versant de Beht

SNAM	CMPPCT	NLAYERS	HYD GRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1	SOL_EC1
SBR	29	2	A	150.000	0.5	0.5	LSA-LSA	50	1.83	0.15	9.094	2.100	24.000	33.000	43.000	28.650	0.010	0.170	0.000
SCAL	30	2	D	94.000	0.5	0.5	LSA-LSA	32	1.84	0.15	9.107	2.300	19.000	40.000	41.000	90.000	0.010	0.100	0.000
SFER	31	2	B	125.000	0.5	0.5	LAS-LAS	45	1.82	0.15	8.859	1.800	24.000	46.000	30.000	1.150	0.010	0.280	0.000
SHYD	33	2	C	76.000	0.5	0.5	LSA-LSA	26	1.83	0.15	9.103	2.600	26.000	29.000	45.000	0.000	0.010	0.320	0.000
SISO	34	2	C	88.000	0.5	0.5	LSA-LSA	28	1.83	0.15	9.078	2.200	23.000	36.000	41.000	5.640	0.010	0.320	0.000
SMB	35	2	A	92.000	0.5	0.5	LSA-LSA	26	1.84	0.15	9.159	1.200	23.000	28.000	49.000	27.260	0.010	0.200	0.000
SPE	36	2	B	92.000	0.5	0.5	LSA-LSA	26	1.83	0.15	8.988	1.400	28.000	31.000	41.000	5.640	0.010	0.320	0.000
VSA	37	2	D	60.000	0.5	0.5	ALO-ALO	20	1.77	0.15	8.958	1.100	50.000	30.000	20.000	24.430	0.010	0.200	0.000
SBRSCAL	38	2	D	122.000	0.5	0.5	LSA-LSA	41.00	1.83	0.15	9.101	2.200	22.000	36.000	42.000	59.325	0.010	0.135	0.000
SBRSHYD	39	2	D	110.000	0.5	0.5	A-A	35.00	1.80	0.15	9.036	1.750	39.000	30.000	31.000	16.095	0.010	0.225	0.000
SBRSISO	40	2	C	119.000	0.5	0.5	LSA-LSA	39.00	1.83	0.15	9.065	2.150	23.000	35.000	42.000	17.145	0.010	0.245	0.000
SBRSMB	41	2	B	116.000	0.5	0.5	LSA-LSA	38.00	1.84	0.15	9.106	1.650	23.000	31.000	46.000	27.955	0.010	0.185	0.000
SBRSPE	42	2	C	116.000	0.5	0.5	LSA-LSA	38.00	1.83	0.15	9.046	1.750	26.000	32.000	42.000	17.145	0.010	0.245	0.000
SCALSISO	43	2	C	90.000	0.5	0.5	LSA-LSA	30.00	1.83	0.15	9.098	2.250	21.000	38.000	41.000	47.820	0.010	0.210	0.000
SCALSEP	44	2	A	88.000	0.5	0.5	LSA-LSA	29.00	1.84	0.15	9.139	1.750	21.000	34.000	45.000	58.630	0.010	0.150	0.000
SFERSPE	45	2	A	101.000	0.5	0.5	LSA-LSA	35.50	1.82	0.15	9.005	1.600	26.000	38.000	36.000	3.395	0.010	0.300	0.000
SFERSHAL	46	2	B	95.000	0.5	0.5	A-A	32.50	1.79	0.15	8.995	1.600	39.000	36.000	25.000	2.345	0.010	0.280	0.000
SMBSPESHYD	47	2	B	66.000	0.5	0.5	LSA-LSA	26.00	1.83	0.15	9.082	1.733	26.000	30.000	44.000	10.967	0.010	0.280	0.000
SPESMB	48	2	C	66.000	0.5	0.5	LSA-LSA	26.00	1.83	0.15	9.084	1.300	26.000	29.000	45.000	16.450	0.010	0.260	0.000
VSASPE	49	2	B	66.000	0.5	0.5	A-A	23.00	1.79	0.15	8.983	1.250	39.000	30.000	31.000	15.035	0.010	0.260	0.000
VSASHYD	50	2	B	66.000	0.5	0.5	A-A	23.00	1.80	0.15	9.009	1.850	38.000	30.000	32.000	12.215	0.010	0.260	0.000

Annexe B : Indicateurs d'altération hydrologique (IHA) (adapté du manuel de l'IHA)

- Les paramètres IHA

Les composantes de l'IHA caractérisent la variation intra-annuelle du débit en se basant sur une série d'attributs hydrologiques (statistiques IHA) classés en cinq groupes, selon « the Nature Conservancy (2009) »

Groupe 1 : Les statistiques du groupe 1 de l'IHA (débit mensuel moyen) caractérisent les tendances saisonnières de l'ampleur et du timing du débit. Elles décrivent les conditions normales et fournissent une mesure de la disponibilité ou de la durabilité de l'habitat ou des débits pour différents usages de la rivière.

Groupe 2 : les statistiques du groupe 2 de l'IHA se focalisent sur l'ampleur et la durée des conditions de débit extrêmes annuelles. En plus des débits maximum et minimum sur des périodes de temps spécifiques, elles comprennent l'indice de débit de base, défini comme le débit minimum sur 7 jours/débit moyen pour l'année et le nombre de jours à débit presque nul. Les statistiques du groupe 2 fournissent une mesure de la quantité de stress et de perturbations environnementales au cours de l'année.

Groupe 3 : les statistiques du groupe 3 de l'IHA caractérisent le timing (dates dans l'année) des débits annuels minimum et maximum sur un jour. Le timing est important pour évaluer le degré de stress ou de mortalité dû à des événements extrêmes pendant les périodes cruciales du cycle de vie d'une espèce. Il est également important de le comparer aux délais nécessaires pour les loisirs ou d'autres services socio-économiques.

Groupe 4 : Les statistiques du groupe 4 de l'IHA comprennent les fréquences des pulsations de haut et de bas débit. Une impulsion est définie comme un débit moyen journalier supérieur ou inférieur à des seuils sélectionnés. La durée pendant laquelle une condition d'eau spécifique existe peut déterminer si une phase particulière du cycle de vie peut être achevée ou le degré auquel l'inondation ou la dessiccation peut se produire.

Groupe 5 (taux de montée, taux de descente et nombre d'inversions), ces statistiques caractérisent le nombre et le taux moyen de changements de débit positifs (montée) et négatifs (descente) sur deux jours consécutifs. Le taux de changement de l'état de l'eau influe sur la capacité de certains organismes à rester au bord de l'eau ou sur la capacité des racines des plantes à rester en contact avec les réserves d'eau phréatique

Tableau B-1: Caractéristiques des 33 paramètres de l'IHA (NC, 2009)

IHA Parameter Group	Features	Hydrological Parameter
1. Magnitude of monthly water conditions	Magnitude, timing	Mean or median value for each calendar month
2. Magnitude and duration of annual extreme water conditions	Magnitude, duration	Annual minima, 1-day mean Annual minima, 3-day means Annual minima, 7-day means Annual minima, 30-day means Annual minima, 90-day means Annual maxima, 1-day mean Annual maxima, 3-day means Annual maxima, 7-day means Annual maxima, 30-day means Annual maxima, 90-day means Number of zero-flow days Base flow index: 7-day minimum flow/mean flow for year
3. Timing of annual extreme water conditions	Date of the maximum and minimum flow	Julian date of each annual 1-day maximum Julian date of each annual 1-day minimum
4. Frequency and duration of high and low pulses	Number and duration of high pulses and low pulses	Number of low pulses within each water year Mean or median duration of low pulses (days) Number of high pulses within each water year Mean or median duration of high pulses (days)
5. Rate and frequency of water condition changes	Rise rate, Fall rate and Reversals	Rise rates: Mean or median of all positive differences between consecutive daily values Fall rates: Mean or median of all negative differences between consecutive daily values Number of hydrologic reversals
		Total 33 parameters

- Les composantes du flux environnemental

Résumé des cinq composantes des flux environnementaux (EFC) utilisées dans le logiciel IHA, et de leurs influences sur les écosystèmes.

Les composantes du flux environnemental selon « the Nature Conservancy (2009) », sont les suivants :

Débits faibles : Il s'agit des conditions de débit dominantes dans la plupart des rivières. Dans les rivières naturelles, après qu'un événement pluvieux ou une période de fonte des neiges soit passé et que le ruissellement de surface associé du bassin versant ait diminué, la rivière revient à son niveau de base ou d'étiage. Ces niveaux d'étiage sont soutenus par l'écoulement des eaux souterraines dans la rivière. Les variations saisonnières du débit d'étiage d'une rivière sont une contrainte fondamentale pour les communautés aquatiques, car elles déterminent la quantité d'habitats aquatiques disponibles pendant la majeure partie de l'année. Cela a une forte influence sur la diversité et le nombre d'organismes qui peuvent vivre dans la rivière.

Débits extrêmement faibles : Pendant les périodes de sécheresse, les rivières atteignent des niveaux très bas qui peuvent être stressants pour de nombreux organismes, mais qui peuvent fournir les conditions nécessaires à d'autres espèces. La chimie de l'eau, la température et la

disponibilité de l'oxygène dissous peuvent devenir très stressantes pour de nombreux organismes lors de débits extrêmement faibles, au point que ces conditions peuvent entraîner une mortalité considérable. D'un autre côté, les débits extrêmement faibles peuvent favoriser la concentration des proies aquatiques pour certaines espèces, ou peuvent être nécessaires pour assécher les plaines d'inondation basses et permettre à certaines espèces de plantes, de se régénérer.

Impulsions de débit élevé : Pendant les orages ou les brèves périodes de fonte des neiges, une rivière peut dépasser son niveau d'étiage. Telles qu'elles sont définies ici, les impulsions de débit élevé comprennent toute montée des eaux qui ne déborde pas des berges du canal. Ces impulsions apportent des perturbations importantes et nécessaires aux faibles débits.

Même une faible ou brève arrivée d'eau douce peut apporter un soulagement bien nécessaire aux températures élevées de l'eau ou aux conditions de faible teneur en oxygène qui caractérisent les périodes d'étiage, et fournir un apport nourrissant de matière organique ou d'autres aliments pour soutenir le réseau alimentaire aquatique. Les impulsions de débit élevé permettent également aux poissons et aux autres organismes mobiles de se déplacer plus facilement vers les zones situées en amont et en aval.

Petites inondations : Pendant les inondations, les poissons et autres organismes mobiles sont capables de se déplacer en amont, en aval et à l'extérieur dans les plaines d'inondation ou les zones humides submergées pour accéder à des habitats supplémentaires. Ces zones souvent inaccessibles peuvent fournir des ressources alimentaires importantes. Les zones inondées peu profondes sont souvent plus chaudes que le cours d'eau principal et riches en nutriments et en insectes qui favorisent la croissance rapide des organismes aquatiques. Telle qu'elle est utilisée ici, une "petite crue" comprend toutes les crues de la rivière qui débordent du canal principal, mais n'inclut pas les crues plus extrêmes et moins fréquentes.

Crues importantes : Les crues extrêmes modifient généralement la structure biologique et physique d'une rivière et de sa plaine d'inondation. Ces grandes crues peuvent éliminer littéralement de nombreux organismes, épuisant ainsi certaines populations mais créant aussi, dans de nombreux cas, de nouveaux avantages pour certaines espèces. Les crues extrêmes peuvent également jouer un rôle important dans la formation des principaux habitats, comme les zones humides des plaines d'inondation, ainsi que la recharge des nappes phréatiques, l’apport des nutriments à la végétation riveraine et relier le canal aux habitats de la plaine d'inondation qui fournissent une nourriture supplémentaire aux organismes aquatiques.

Annexe C : Résultats du programme IHA

- Catégorisation RVA

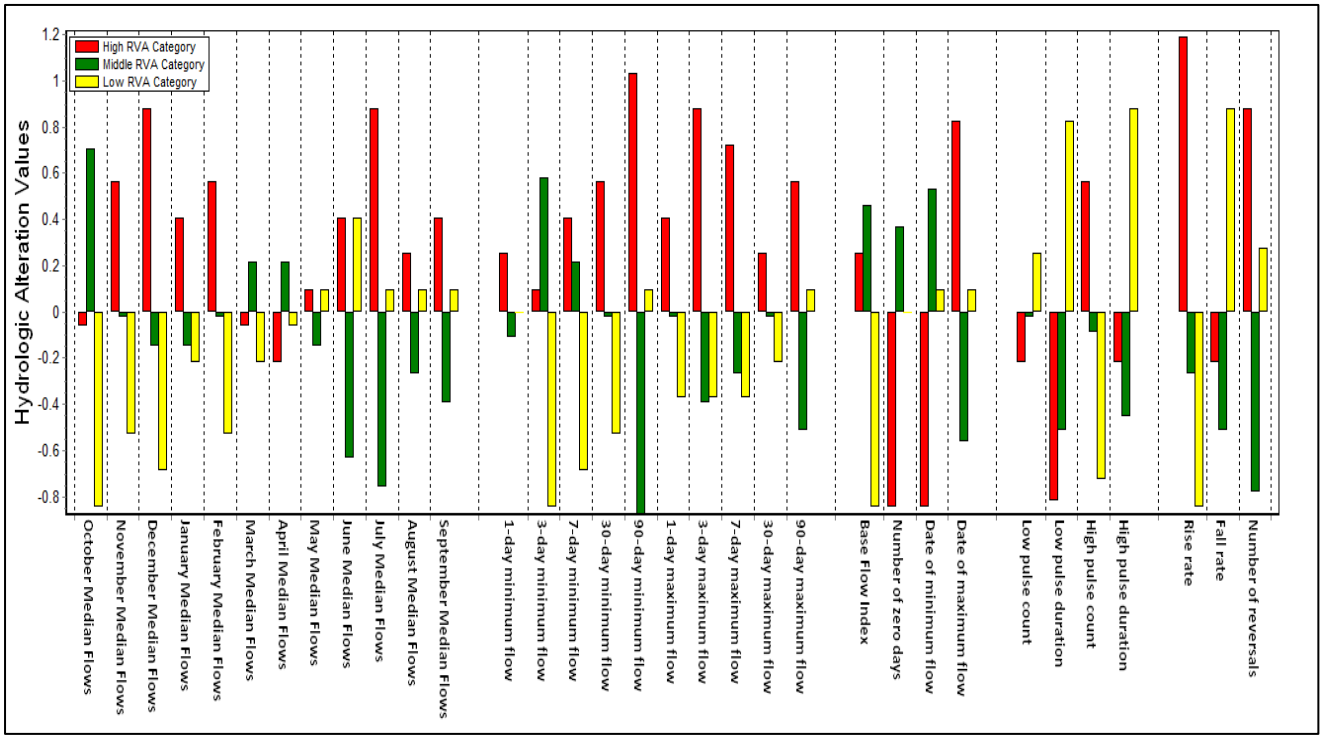


Figure C-1 : Catégorisation RVA des indicateurs hydrologiques d'Oued Beht à la station El Kansera (1970-2013)

Tableau C-1 : Résultats de l'altération hydrologique d'Oued Beht à la station El Kansera (1970-2013)

	Catégorie RVA moyenne			Catégorie RVA élevée			Catégorie RVA faible		
	Prévue	Observée	Alter.	Prévue	Observée	Alter.	Prévue	Observée	Alter.
Paramètres groupe #1									
Octobre	8.217	14	0.7037	6.391	6	-0.06122	6.391	1	-0.8435
Novembre	8.217	8	-0.02646	6.391	10	0.5646	6.391	3	-0.5306
Décembre	8.217	7	-0.1481	6.391	12	0.8776	6.391	2	-0.6871
Janvier	8.217	7	-0.1481	6.391	9	0.4082	6.391	5	-0.2177
Février	8.217	8	-0.02646	6.391	10	0.5646	6.391	3	-0.5306
Mars	8.217	10	0.2169	6.391	6	-0.06122	6.391	5	-0.2177
Avril	8.217	10	0.2169	6.391	5	-0.2177	6.391	6	-0.06122
Mai	8.217	7	-0.1481	6.391	7	0.09524	6.391	7	0.09524
Juin	8.217	3	-0.6349	6.391	9	0.4082	6.391	9	0.4082
Juilet	8.217	2	-0.7566	6.391	12	0.8776	6.391	7	0.09524
Aout	8.217	6	-0.2698	6.391	8	0.2517	6.391	7	0.09524
Septembre	8.217	5	-0.3915	6.391	9	0.4082	6.391	7	0.09524
Paramètres groupe #2									
1-jour minimum	14.61	13	-0.1101	6.391	8	0.2517	0	0	
3-jour minimum	8.217	13	0.582	6.391	7	0.09524	6.391	1	-0.8435
7-jour minimum	8.217	10	0.2169	6.391	9	0.4082	6.391	2	-0.6871
30-jour minimum	8.217	8	-0.02646	6.391	10	0.5646	6.391	3	-0.5306
90-jour minimum	8.217	1	-0.8783	6.391	13	1.034	6.391	7	0.09524
1-jour maximum	8.217	8	-0.02646	6.391	9	0.4082	6.391	4	-0.3741
3-jour maximum	8.217	5	-0.3915	6.391	12	0.8776	6.391	4	-0.3741
7-jour maximum	8.217	6	-0.2698	6.391	11	0.7211	6.391	4	-0.3741
30-jour maximum	8.217	8	-0.02646	6.391	8	0.2517	6.391	5	-0.2177
90-jour maximum	8.217	4	-0.5132	6.391	10	0.5646	6.391	7	0.09524
Nombre de jours zéro	14.61	20	0.369	6.391	1	-0.8435	0	0	
Indice de débit de base	8.217	12	0.4603	6.391	8	0.2517	6.391	1	-0.8435
Paramèteres groupe #3									
Date du minimum	9.13	14	0.5333	6.391	1	-0.8435	5.478	6	0.09524
Date du maximum	9.13	4	-0.5619	5.478	10	0.8254	6.391	7	0.09524
Paramètres groupe #4									
Nombre d'impulsions faible	8.217	8	-0.02646	6.391	5	-0.2177	6.391	8	0.2517
Durée d'impulsion faible	8.217	4	-0.5132	5.478	1	-0.8175	5.478	10	0.8254
Nombre d'impulsions élevé	10.96	10	-0.0873	6.391	10	0.5646	3.652	1	-0.7262
Durée d'impulsion élevée	7.304	4	-0.4524	6.391	5	-0.2177	6.391	12	0.8776
Paramètres groupe #5									
Taux de montée	8.217	6	-0.2698	6.391	14	1.19	6.391	1	-0.8435
Taux de descente	8.217	4	-0.5132	6.391	5	-0.2177	6.391	12	0.8776
Nombre d'inversions	9.13	2	-0.781	6.391	12	0.8776	5.478	7	0.2778