

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila

Institut des Sciences et de la Technologie

Département des sciences et Technique



N° Ref :.....

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Sciences Hydrauliques

***Modélisation pluie- débit par les modèles conceptuels GR
(application au Bassin versant de Bouhamdane)
Wilaya de Guelma***

Réalisé par :

 **M^{elle} : Messaoud Allam Karima**

 **M^{elle} : Khellaf Khadidja**

Soutenu devant le jury :

Mr.	KEBLOUTI Mehdi	M.A.A	CUAB MILA	Président
Mr.	BERHAIL Sabri	M.A.A	CUAB MILA	Examineur
Mme.	BENCHAIBA Leila	M.A.A	CUAB MILA	Promoteur

Année universitaire : 2015/2016



دعاء

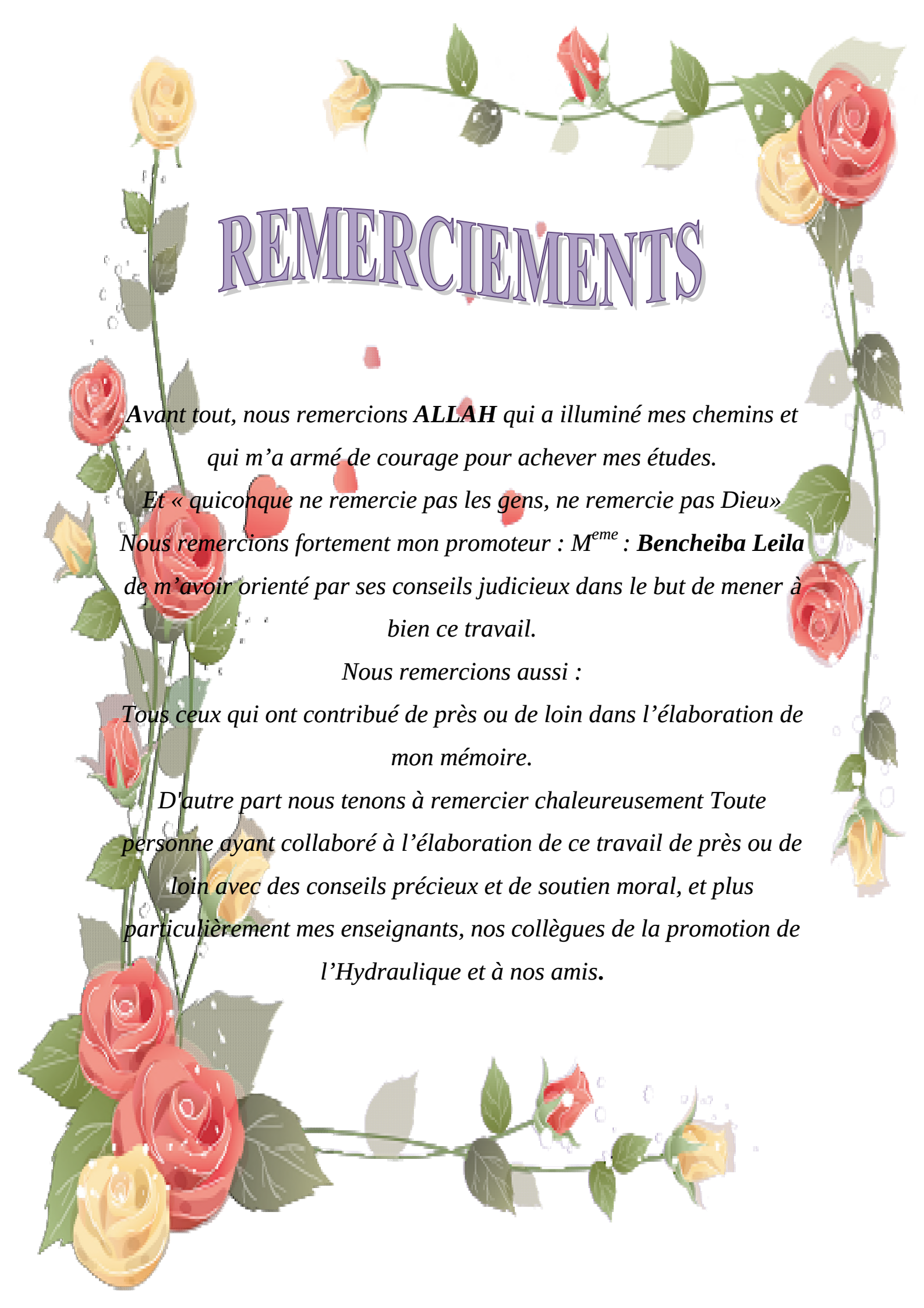
اللهم

إذا أعطيتني مالا فلا تأخذ سعادتي
وإذا أعطيتني قوة فلا تأخذ عقلي
وإذا أعطيتني جاها فلا تأخذ تواضعي
وإذا أعطيتني تواضعا فلا تأخذ عزتي
وإذا أعطيتني قدرة فلا تأخذ عفوي

اللهم اختم بالصالحات أعمالنا و بالسعادة
أحلامنا و حقق بالزيادة أماننا و ذكرنا
أن الفشل هو التجربة الأولى التي تسبق
النجاح

اللهم آمين



A decorative border of roses and leaves surrounds the text. The roses are in shades of red and yellow, with green leaves interspersed. The border is more dense on the left and right sides, with some roses and leaves extending into the central text area.

REMERCIEMENTS

*Avant tout, nous remercions **ALLAH** qui a illuminé mes chemins et qui m'a armé de courage pour achever mes études.*

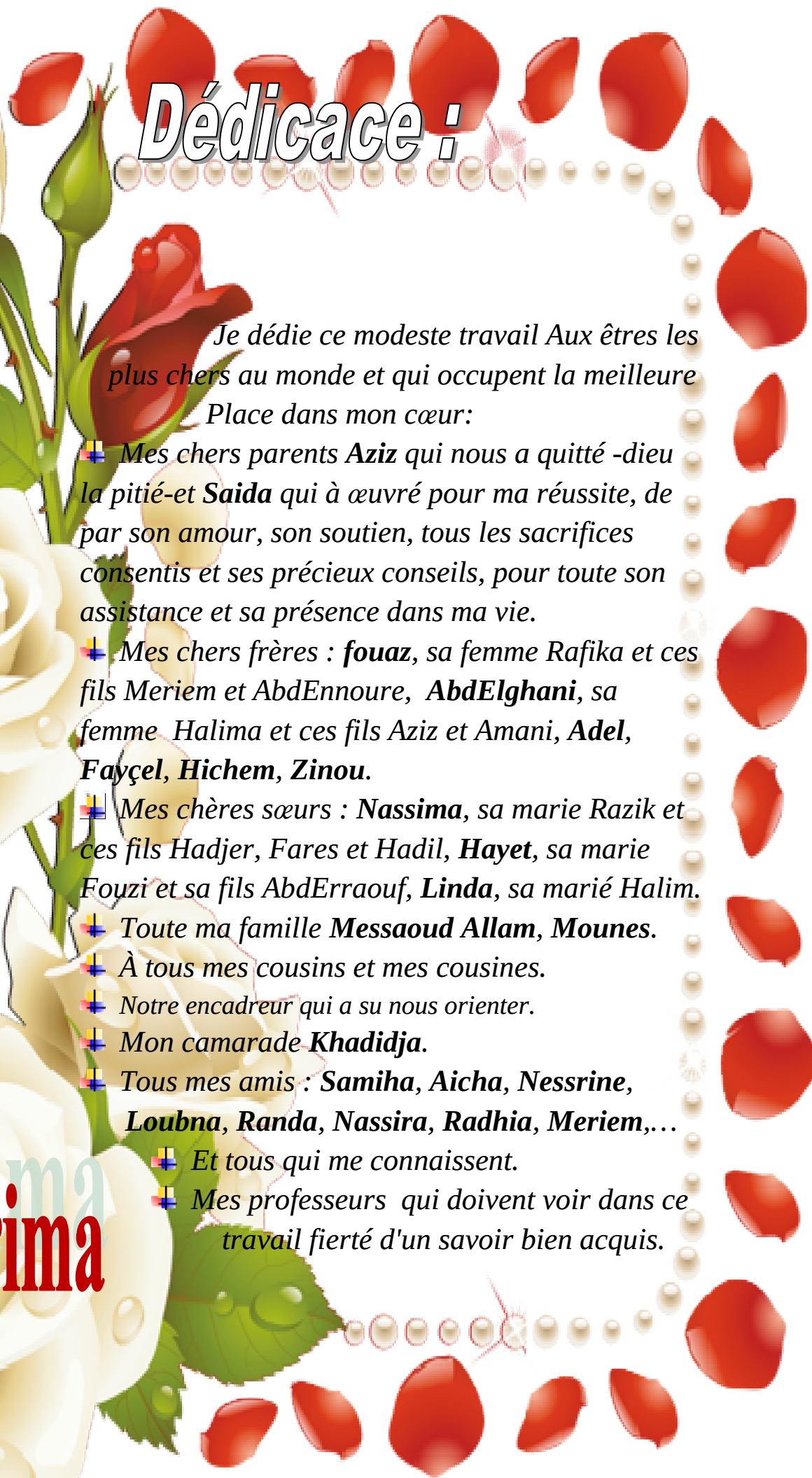
Et « quiconque ne remercie pas les gens, ne remercie pas Dieu »

*Nous remercions fortement mon promoteur : M^{eme} : **Bencheiba Leila** de m'avoir orienté par ses conseils judicieux dans le but de mener à bien ce travail.*

Nous remercions aussi :

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans l'élaboration de mon mémoire.

D'autre part nous tenons à remercier chaleureusement Toute personne ayant collaboré à l'élaboration de ce travail de près ou de loin avec des conseils précieux et de soutien moral, et plus particulièrement mes enseignants, nos collègues de la promotion de l'Hydraulique et à nos amis.



Dédicace :

Je dédie ce modeste travail Aux êtres les plus chers au monde et qui occupent la meilleure Place dans mon cœur:

✚ Mes chers parents **Aziz** qui nous a quitté -dieu la pitié-et **Saida** qui à œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

✚ Mes chers frères : **fouaz**, sa femme **Rafika** et ces fils **Meriem** et **AbdEnnoure**, **AbdElghani**, sa femme **Halima** et ces fils **Aziz** et **Amani**, **Adel**, **Fayçel**, **Hichem**, **Zinou**.

✚ Mes chères sœurs : **Nassima**, sa marie **Razik** et ces fils **Hadjer**, **Fares** et **Hadil**, **Hayet**, sa marie **Fouzi** et sa fils **AbdErraouf**, **Linda**, sa marié **Halim**.

✚ Toute ma famille **Messaoud Allam**, **Mounes**.

✚ À tous mes cousins et mes cousines.

✚ Notre encadreur qui a su nous orienter.

✚ Mon camarade **Khadidja**.

✚ Tous mes amis : **Samiha**, **Aicha**, **Nessrine**, **Loubna**, **Randa**, **Nassira**, **Radhia**, **Meriem**,...

✚ Et tous qui me connaissent.

✚ Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail fierté d'un savoir bien acquis.

Karima
Karima



Dédicace :

Je dédie ce modeste travaille à mes très cher parents

qui m'ont aidés à le réaliser,

qui ont veillés sur moi

tous le long chemin, ils étaient la chandelle

qui m'a éclairée le parcours,

et qui on souffert pour moi.

Je les remercie.

A mes chers frères qui étaient a cotés de moi au

moment quand j'avais besoin d'eux.

A tout ma famille.

A tous mes amis et ma camarade.

A la section MASTER 2 HYDRAULYQUE.

A notre encadreur qui a su nous orienter.

Khadidja
Khadidja

Table des matières

Table des matières

Listes des figures

Listes des tableaux

Introduction Générale

CHAPITRE 1 – PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Présentation générale de la wilaya de Guelma	4
Situation géographique	4
I.2. Présentation générale de la zone d'étude	4
I.2.1. Situation géographique	4
I.3. Identification administrative dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane	6
I.4. Le bassin versant d'Oued Bouhamdane	6
I.5. Le Barrage de Bouhamdane (le barrage de Hammam-Debagh)	7
I.5.1. Historique	7
I.5.2. Caractéristiques hydrologiques	8
I.5.3. Caractéristiques du Barrage.....	8
I.5.4. Destination	8
I.5.5. Le périmètre d'irrigation de Guelma	8
I.6. Le couvert végétal du bassin versant de l'oued Bouhamdane	9
I.6.1. Le couvert végétal du bassin versant de l'oued Bouhamdane	9
I.7. Formation géologique	10
I.8. Conclusion	11

CHAPITRE 2 – ETUDE CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. L'étude climatique	13
II.2 Les caractéristiques climatiques du bassin versant de l'oued Bouhamdane	13
II.3. Les éléments climatiques	14
II.3.1. Température	14
II.3.2. Précipitations et évaporations	14
II.3.3. Précipitations saisonnières	16
II.3.4. Insolation.....	16
II.3.5. Nombre de jours Gelée	17
II.3.6. Humidité	18
II.3.7. La vitesse des vents	18
II.3.8. Nébulosité	19
II.4. Synthèse climatique	20
II.4.1. Diagramme Ombrothermique de Gaussen	20
II.4.2. Climagramme de l'Emberger	21
II.5. Conclusion	22

CHAPITRE III – PRESENTATION DES MODELES GR

III.1. Introduction	24
III.2. Définition d'un modèle	24
III.3. Définition et principe des modèles hydrologiques	24

III.4. Les applications de la modélisation pluie-débit	26
III.5. Les différents types des modèles hydrologiques.....	26
III.6. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)	27
III.7. Mode de développement	27
III.8. Paramètres des modèles conceptuels	28
III.9. Principales caractéristiques	28
III.9.1. au niveau des processus.....	28
III.9.2. au niveau de l'espace.....	28
III.9.3. au niveau du temps	28
III.10. Les différents modèles de GR	29
III.10.1. Modèle pluie-débit annuel GR1A	29
III.10.1.1. Paramètre	29
III.10.1.2. Description mathématique	29
III.10.2. Modèle pluie-débit mensuel GR2M	29
III.10.2.1. Les Paramètres de GR2M	30
III.10.2.2. La structure de GR2M	30
III.10.2.3. Description mathématique	31
III.10.3. Modèle pluie-débit journalier GR4J	32
III.10.3.1. Les Paramètres de GR4J	33
III.10.3.2. La structure de GR4J	33
III.10.3.3. Description mathématique	33
III.11. Applications des modèles GR	36
III.12. Conclusion	37
CHAPITRE IV – ÉVAPOTRANSPIRATION	
IV.1. Introduction	39
IV.2. Evapotranspiration	39
IV.2.1. L'évaporation	40
IV.2.2. La transpiration	40
IV.3. Différents types de l'évapotranspiration	40
IV.3.1. Evapotranspiration potentielle ou évapotranspiration de référence	40
IV.3.2. Evapotranspiration réelle	41
IV.3.3. Evapotranspiration maximale (ETM)	41
IV.4. Les facteurs fondamentaux de l'évapotranspiration.....	41
IV.5. Les formules de l'ETP	42
IV.5.1. Formule dite ANRH(2002)	42
IV.6. Conclusion	44
CHAPITRE V – DONNEES NECESSAIRES AU MODELE GR ET PARAMETRES DE VALIDATION	
V.1. Introduction.....	46
V.2. Description de l'échantillon de données utilisé pour tester les modèles pluie-débit (les entrées)	46
V.2.1. Les précipitations(P)	46
V.2.2. L'évapotranspiration(ETP)	46
V.2.3. Les débits(Q)	46

V.3. Le calage des modèles hydrologiques.....	47
V.4. La Validation du modèle	47
V.4.1. Les procédures de validation	47
V.4.2. Les critères de validation des modèles conceptuels.....	48
V.4.2.1. Les critères graphiques.....	48
V.4.2.2. Les critères numériques.....	48
V.4.2.2.1. Critère de Nash.....	48
V.4.2.2.2. La moyenne (Moy)	48
V.4.2.2.3. L'écart type	49
V.4.2.2.4. Le coefficient de variation	49
V.4.2.2.5. Le coefficient de détermination R^2	49
V.4.2.2.6. L'erreur absolue moyenne (MAE : Mean Absolute Error).....	50
V.4.2.2.7. La racine de la moyenne des erreurs quadratique notée RMSE	50
V.4.2.2.8. L'indice de Willmott	51
V.4.2.2.9. L'indice de Willmott raffiné	51
V.5. Conclusion.....	51

CHAPITRE VI– MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR GR2M

VI.1. Introduction	53
VI.2. Opérations de calages.....	53
VI.3. Variation mensuelle des pluies	53
VI.4. Variation mensuelle des débits	54
VI.5. Variation mensuelle des évapotranspirations selon la formule dite ANRH	55
VI.6. Modélisation au pas de temps mensuel (application modèle GR2M .	56
VI.7. Variantes liées aux périodes de calage et de validation	56
VI.8. Stabilité des paramètres et critère de NASH du modèle GR2M en fonction de la taille de l'échantillon de calage	63
VI.9. Conclusion	65

Conclusion Générale

Références Bibliographiques

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1	Situation géographique de la région de Guelma.....	4
Figure I.2	Carte de situation géographique du bassin versant de l'oued Bouhamdane.	5
Figure I.3	Carte du bassin versant de l'oued Bouhamdane et limite administrative du bassin versant	6
Figure I.4	Evacuateur de crue du barrage Bouhamdane	8
Figure I.5	La couverture végétale de l'oued Bouhamdane.....	10
Figure I.6	La formation géologique du bassin versant de Bouhamdane	10
Figure II.1	Localisation des stations pluviométriques et hydrométriques du bassin versant de l'oued Bouhamdane	13
Figure II.2	Courbe répartitions de températures minimales, moyennes et maximales mensuelles (2005-2014).	14
Figure II.3	Histogrammes représenter les précipitations et évaporations moyennes mensuelles (2005-2014)	15
Figure II.4	Variations saisonnières des précipitations moyennes.	16
Figure II.5	Histogramme représenter l'insolation moyenne mensuelle (2005-2014).....	17
Figure II.6	Histogramme représenter le nombre des jours gelés moyenne mensuelle (2005-2014).	17
Figure II.7	Courbe représente l'humidité moyenne mensuelle (2005-2014).	18
Figure II.8	Rosace des directions de fracturations de la zone d'étude.....	19
Figure II.9	Histogramme représente les vitesses des vents moyens mensuels (2005-2014).	19
Figure II.10	représente la nébulosité moyenne mensuelle (2005-2014).	20
Figure II.11	Diagramme Ombrothermique (2005-2014).	21
Figure II.12	Positionnement de Guelma dans le Climagramme d'Emberger	22
Figure III.1	Schématique d'un modèle hydrologique	25
Figure III.2	Transformation de la pluie en hydrogramme de débit.....	26
Figure III.3	Les différents types de classifications utilisées pour les modèles pluie-débit (adapté de Andréassian, 2002).	27
Figure III.4	Schéma de la structure du modèle GR2M	30
Figure III.5	Schéma de la structure du modèle GR4J	33
Figure III.6	Les différentes applications de la modélisation GR	37
Figure IV.1	Phénomène de l'évapotranspiration.	39
Figure IV.2	Evolution du coefficient correctif mensuel.	43
Figure VI.1	Variation mensuelle des pluies de la station Medjaz Ammar.....	54
Figure VI.2	Variation mensuelle des débits de la station de Medjaz Ammar	55
Figure VI.3	Variation mensuelle des évapotranspirations de station de Medjez Ammar.....	56
Figure VI.4	Modélisation par le modèle GR2M	57
Figure VI.5	Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	57

Figure VI.6 Courbe du niveau S du réservoir de production	57
Figure VI.7 Courbe du niveau R du réservoir de routage	57
Figure VI.8 Visualisation de la qualité de calage (période de calage de 120 mois).58	
Figure VI.9 Visualisation de la qualité de validation (période de validation de 120 mois).....	58
Figure VI.10 Modélisation par le modèle GR2M	59
Figure VI.11 Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	59
Figure VI.12 Courbe du niveau S du réservoir de production	59
Figure VI.13 Courbe du niveau R du réservoir de routage.....	59
Figure VI.14 Visualisation de la qualité de calage (période de calage de 160 mois)60	
Figure VI.15 Visualisation de la qualité de validation (période de calage de 80 mois).	60
Figure VI.16 Modélisation par le modèle GR2M	61
Figure VI.17 Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.....	61
Figure VI.18 Courbe du niveau S du réservoir de production	61
Figure VI.19 Courbe du niveau R du réservoir de routage.....	61
Figure VI.20 Visualisation de la qualité de calage (période de calage de 192 mois).	62
Figure VI.21 Visualisation de la qualité de validation (période de calage de 48 mois).	62
Figure VI.22 Evolution des paramètres X1, X2 de GR2M.....	64
Figure VI.23 Evolution des critères de Nash.....	64

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1	Répartition des communes du bassin versant de l'oued Bouhamdane	6
Tableau II.1	Températures moyennes mensuelles (2005-2014).....	14
Tableau II.2	Les précipitations et les évaporations moyennes (2005-2014).	15
Tableau II.3	Distribution saisonnières des précipitations moyennes.....	16
Tableau II.4	Les insolation moyennes mensuelles (2005-2014).	16
Tableau II.5	Nombre des jours gelés moyenne (2005-2014).	17
Tableau II.6	Humidité moyenne mensuelles (2005-2014).	18
Tableau II.7	Représente les vitesses moyennes mensuelles des vents (2005-2014).	18
Tableau II.8	Nébulosité moyenne mensuelles (2005-2014).	20
Tableau II.9	Type de climat en fonction de valeur Is.....	21
Tableau IV.1	Coefficients correctifs régionaux (Kr).....	43
Tableau IV.2	Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ANRH.....	43
Tableau V.1	Qualité des modèles en fonction des valeurs du critère de NASH	48
Tableau VI.1	Caractéristiques statistiques de base des pluies mensuelles	53
Tableau VI.2	Caractéristiques statistiques de base des débits mensuels de la station de Medjaz Ammar	54
Tableau VI.3	Caractéristiques statistiques de base des évapotranspirations mensuelles de la station de Medjaz Ammar	55
Tableau VI.4	Résultats de la modélisation (période de calage de 120 mois).....	58
Tableau VI.5	Résultats de la modélisation (période de calage de 160 mois).....	60
Tableau VI.6	Résultats de la modélisation (période de calage de 192 mois).....	62
Tableau VI.7	Paramètres et NASH du modèle GR2M pour des tailles différentes de calage.....	63

Résumé

ملخص:

إن دراسة العلاقات التي تربط التساقط بالجريان في الأودية عملية ذات أهمية خاصة و ذلك في العديد من التطبيقات العملية في مجال تسيير الموارد المائية. و بغرض معرفة و فهم أوضح لهيدرولوجيا الحوض المائي لوادي بوحمدان (شمال غرب قالمة -الجزائر) قمنا بتطبيق نموذج التساقط -جريان مياه التدفق وهو النموذج الشامل للخران أو نموذج الهندسة الريفية على حوض واد بوحمدان. في هذه الدراسة, ارتأينا أن نركز على تطبيق نموذج الهندسة الريفية قمنا بالحسابات و ذلك على المدى الشهري حيث أدخلنا عامل التبخر كأحد المعطيات بالإضافة إلى عاملي التساقط و التدفق. بعد ضبط النموذج المحصل عليه قمنا بإثبات صحة النتائج.و النتائج المحصل عليها كانت مرضية تثبت أن هذا النموذج 'الهندسة الريفية' يعتمد على مبادلات الغلاف الجوي – باطن الأرض وكذا سعة الخزان الجوفي. مما أكسبه نجاعة أكثر و فعالية إضافية في الأداء, لذا ينصح باستعماله.

الكلمات المفتاحية : الهيدرولوجيا, الحوض المائي, واد بوحمدان, النموذج, التساقط – التدفق, نموذج الهندسة الريفية, السنوي, الشهري, اليومي.

RESUME :

Pour une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Bouhamdane, nous avons tenté dans ce travail l'application de la modélisation pluie débit en utilisant un modèle global à réservoir : le modèle du Génie rural « GR ». Les modèles hydrologiques globaux permettent de simuler la transformation de la pluie en débit sur des bassins naturels, pour de nombreuses applications pratiques dans le domaine de la gestion de la ressource en eau. Ce travail basé sur la modélisation pluie-débit à l'échelle mensuelle est appliqué au bassin versant d'Oued Bouhamdane (Nord-Ouest Guelma- algérien). L'application du modèle GR2M dont les paramètres d'entrée sont les précipitations et l'ETP (calculée par formule de l'ANRH) et le paramètre de sortie est constituée par les lames d'eau écoulées.

La phase du calage du modèle GR donne des résultats appréciables. Il est nécessaire de juger les performances du modèle sur une période différente de celle ayant servi à ajuster les paramètres du modèle. Les résultats obtenus sont acceptables indiquent que le modèle prend en compte les différents échanges (atmosphère et souterrains) ainsi que la capacité de réservoir. Il est apparu que le changement d'échelle de temps a ajouté des gains très importants, non seulement en cohérence de l'ensemble des modèles, mais surtout en performance.

Mots clés : Hydrologie, bassin versant, Oued Bouhamdane, Modélisation, pluie-Débit, Modèle, GR1A, GR2M, GR4J.

ABSTRACT:

For a better understanding of the hydrological behavior of the watershed of basin valley Bouhamdane we tried in this work the application of the rain flow modeling using a global model tank: the model of Agricultural Engineering "GR". The global hydrological models simulate flow in the transformation of the rain on natural basins, for many practical applications in the field of management of water resources. This work based on rainfall-runoff modeling on a monthly scale is applied to the watershed of basin valley Bouhamdane (Northwest Algerian -Guelma). The application of GR2M model whose input parameters, the rainfall and ETP (calculated by formula ANRH) and the output parameter is made up of past water slides. The phase of the timing of the GR model to achieve results. It is necessary to judge the performance of the model over a period different from that used to adjust model parameters. The results are acceptable indicate that the model takes into account the different exchanges (atmosphere and underground) and the tank capacity. It appeared that the time scale of change has added very significant gains, not only the consistency of all the models, but especially in performance.

Key words: hydrology, watershed, basin valley Bouhamdane, Modelling, rain-flow, Model, GR1A, GR2M, GR4J.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Les ressources en eau, est un élément fondamental et nécessaire au maintien et au développement de toute activité humaine économique et sociale. Cependant, le succès de telles ressources passe nécessairement par une bonne connaissance du régime hydrologique de la zone d'étude.

Les bassins versants sont des systèmes complexes, à cause des processus qui se déroulent au sein de ces derniers. La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, tels que le dimensionnement et la gestion des ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc., donc il est nécessaire de comprendre, par une approche dynamique, le fonctionnement du bassin, la nature et le rôle des processus mis en jeu. Un moyen pour arriver à comprendre la génération des débits et pour établir des simulations est de remonter jusqu'à leur cause première, les pluies. Ainsi, de construire des modèles permettant d'obtenir une représentation simplifiée et facilement utilisable de ce lien entre pluie et débit. Cependant la modélisation pluie-débit est confrontée à la difficulté d'appréhension des systèmes étudiés du fait de leur complexité intrinsèque. Ce mémoire de Master s'inscrit dans le domaine de la modélisation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Pour ce faire, il y a les modèles du Génie rural (GR1A, GR2M, GR4J) l'objectif est de trouver les paramètres optimaux qui permettent une meilleure simulation afin d'apprécier les débits simulés pour la prévision et ou la prédétermination. Mais nous avons appliqués le modèle génie rural 2 mensuels sur le bassin versant d'Oued Bouhamdane, pour l'objectif principal est de tester le modèle conceptuel parcimonieux dit « GR2M » au pas de temps mensuel et vérifier la sensibilité de ce dernier à l'effet du choix de la durée de calage sur ces performances. Le but final sera la simulation de séries mensuelles moyennant le modèle GR2M une fois calé. Cette simulation sera basée sur la simulation des entrées dudit modèle à savoir les débits, les pluies et les évapotranspirations. Les pluies mensuelles interannuelles seront simulées dans leurs lois de distribution par contre les moyennes mensuelles interannuelles des évapotranspirations seront considérées quasi constantes dans l'hypothèse d'une stabilité climatique à court et à moyen terme.

Pour cela nous avons subdivisé notre travail en six chapitres :

- Premier chapitre présentation de la région d'étude le bassin versant de l'oued Bouhamdane
- Deuxième chapitre : étude climatique.
- Troisième chapitre : présentation des modèles GR.
- Quatrième chapitre : l'évapotranspiration.
- Cinquième chapitre : Données nécessaires au Modèle GR et paramètres de validation.
- Sixième chapitre porte sur l'application de modèle GR2M.

INTRODUCTION GENERALE

Une conclusion générale devra couronner notre contribution en faisant ressortir des recommandations et constatations quant à l'application des modèles conceptuels type GR2M.

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude



Présentation de la zone d'étude

I. 1. Présentation générale de la wilaya de Guelma :

❖ Situation géographique :

La wilaya de Guelma se situe au Nord-est de l'Algérie. Elle est limitée par la wilaya de Annaba au Nord, Skikda au Nord-Ouest, Constantine à l'Ouest, Oum-El-Bouaghi au sud et Souk Ahras au Sud-est [1] ; est une ville située à l'est de l'Algérie à 537 Km de la capitale.

Les coordonnées géographiques de Guelma sont 36°15'0" Nord et 7°30'0" Est (degrés, minutes, secondes) ou 36.25 et 7.5 (en degrés décimaux), 290 m d'Altitude. La région de Guelma dont fait partie du secteur étudié est située à 600 km à l'Est d'Alger et à 70 Km à l'ENE de Constantine ; et occupe une position médiane entre le nord, les hauts plateaux et le sud du pays. Elle se caractérise par des reliefs montagneux, qui occupent environ 60 % de la région. Sa population est estimée à 482.261 habitants, dans une superficie de 3.686,84 Km², et une densité de 131 habitants/Km². [2]



Figure I.1 : Situation géographique de la région de Guelma. [14]

I.2. Présentation générale de la zone d'étude :

I.2.1. Situation géographique :

Le bassin versant de l'oued Bouhamdane est situé au Nord- est de l'Algérie occupant la partie Ouest de la wilaya de Guelma, fait partie du grand bassin versant de la Seybouse N°14. Il est drainé par l'oued Bouhamdane et ses affluents.

Ce bassin s'étend du 6° 55' au 7° 15' de longitude Est et du 35°15' au 36°70' de latitude Nord.

A la station Medjez Ammar II le bassin couvre une superficie de l'ordre de 1105 Km² Il est limité par les bassins versants:

- Au Nord, par le domaine coti constantinois.
- Au Sud et Sud- Ouest par le bassin de l'oued cherf.
- A l'Est par Guelma.
- A l'Ouest par Constantine.

Et notamment par les lignes de partages des eaux suivantes :

- ❖ A l'Est par, djebel Essaâda (1108m), djebel Ancel (1124m) et djebel M'deregNarou.
- ❖ Au Sud, par Koudiat Dib (1124m).
- ❖ A l'Ouest, par djebel El Guettar (1246m), djebel Oum Settas (1324m).
- ❖ Au Nord par des djebels Taya et Mermera et djebel Arara à Medjez Ammar.

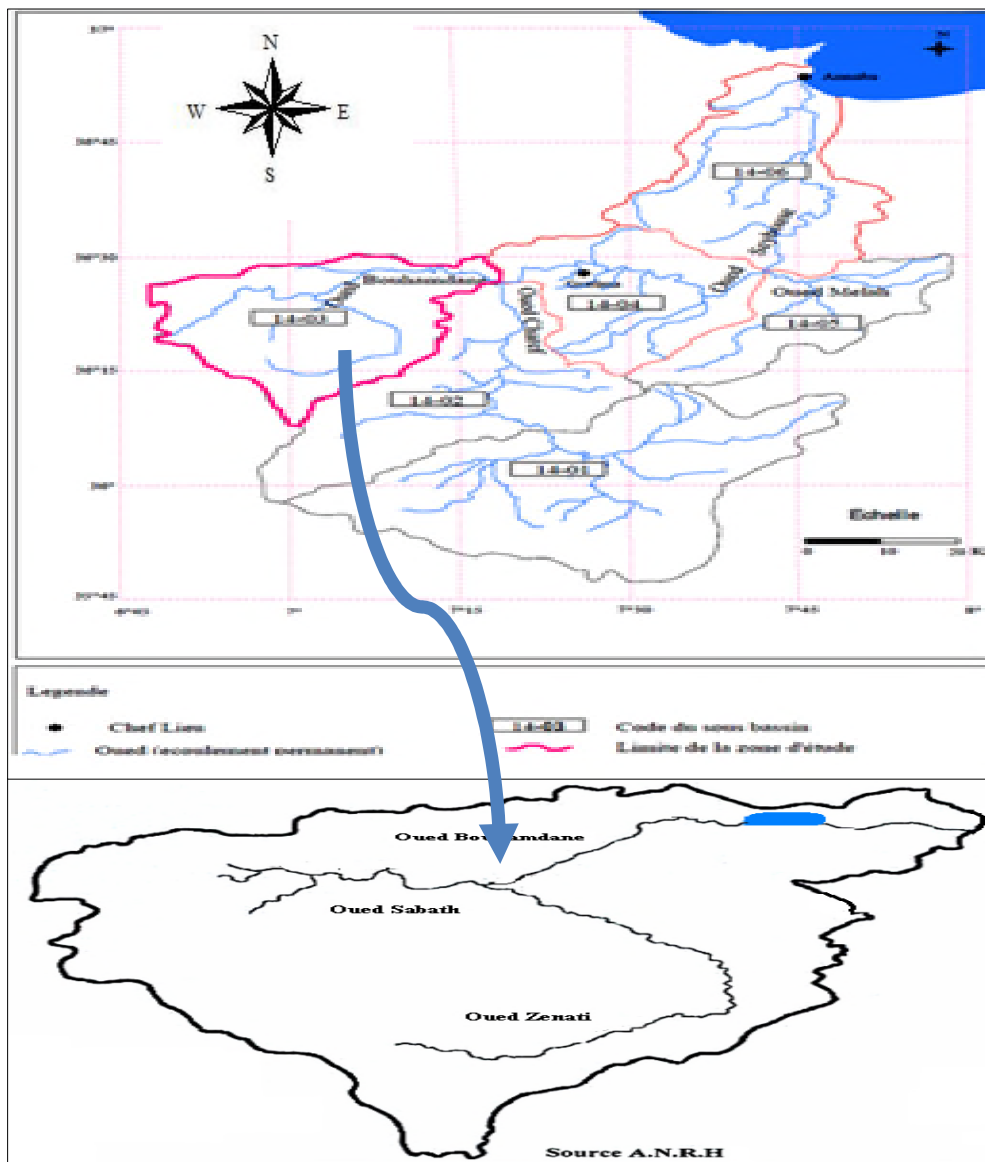


Figure I.2 : Carte de situation géographique du bassin versant de l'oued Bouhamdane. [16]

I.3. Identification administrative dans le bassin versant de l'oued

Bouhamdane :

Le bassin versant de l'oued Bouhamdane occupe la partie Ouest de wilaya de Guelma englobe onze (11) communes appartiennent à ce bassin sont : Oued Zenati, BourdjSabath, Ain Ragada, Ain Hassainia, Medjez Ammar, Ras el Agba, Hammam Debaghe, Bouhamdane et plus une commune de l'OuladeHababa de la wilaya de Skikda ou Nord du bassin, et Ain Abid et Ben Badis de la wilaya de Constantine a l'Ouest du bassin.

Tableau I.1 : Répartition des communes du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

Commune	Wilaya
Oued Zenati Bourdjsabath Ain Ragada	Guelma 24
Ain Hassainia Medjez Ammar Ras el Agba	
Hammam Debaghe Bouhamdane	
Ain Abid Ben Badis	Constantine 25
OuladeHababa	Skikda 21

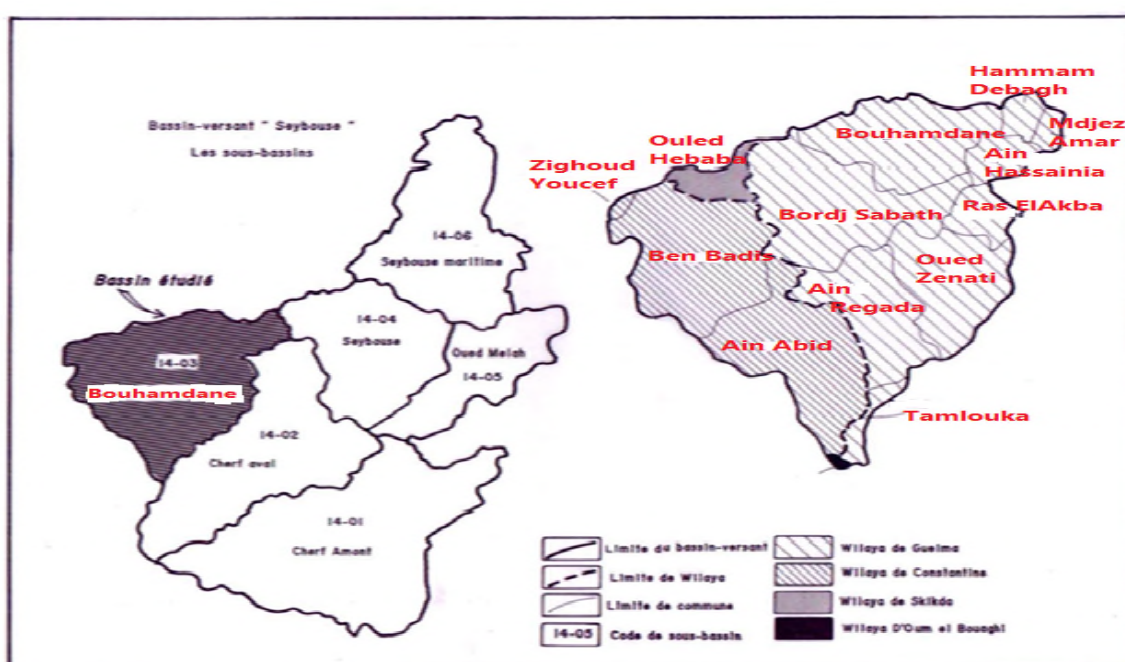


Figure I.3 : Carte du bassin versant de l'oued Bouhamdane et limite administrative du bassin versant. [6]

I.4. Le bassin versant d'Oued Bouhamdane :

C'est un sous bassin versant de Seybouse, qui a les caractéristiques suivantes:

- ❖ Le code : 14-03-01.
- ❖ X : 912.30.

- ❖ Y : 358.75.
- ❖ L'altitude minima : 270 m.
- ❖ L'altitude maxima : 1281 m.
- ❖ L'altitude moyenne : 775.5 m
- ❖ Surface : 1105 km².
- ❖ Périmètre : 170 km.
- ❖ La longueur du rectangle équivalent : 68.84 km.
- ❖ La longueur du Thalweg principal : 90 km.
- ❖ Densité de drainage : 2.45 km/km².
- ❖ L'indice de compacité : 1.43
- ❖ L'indice de pente de roche : 0.13
- ❖ Coefficient de torrentialité : 1.22

(ANRH.)

I.5. Le Barrage de Bouhamdane (le barrage de Hammam-Debagh) :

Barrage de Bouhamdane, dans la région de hammam Debagh (Guelma), cet ouvrage réalisé en 1980, considéré comme le plus important de la wilaya de Guelma est situé sur l'oued Bouhamdane à 20 km à l'Ouest de la ville de Guelma. Il est implanté à 3 km à l'amont de localité de Hammam Debagh (Hammam Maskoutaine).

I.5.1. Historique :

Commencées dès avant les années soixante-dix, les études du barrage de Hammam Debagh, quelque fois référencé sous le nom de El MaihEssaliah, se sont matérialisées par la constitution d'un dossier de projet et d'un dossier d'appel d'offre, établi par le groupement Srucky-Tractionnel-Acres, fin 1977.

Les études d'exécution et d'assistance technique pendant les travaux ont été confiés par un contrat de juillet 1979 Coyne et Bellier, qui en fait est intervenu dès Septembre 1978.

A la suite de reconnaissances de terrain complémentaires, et aussi à cause du tremblement de terre d'El Asnam, le projet a été confié remodelé de manière significative, ce qui fut exprimé par un dossier daté de février 1981.

La réalisation des travaux de génie civil a été confiée au consortium italien CIR date d'avril 1980, et l'essentiel de ces travaux était achevés à la fin de 1987.

La fourniture et le montage des équipements électriques et hydromécanique ont été confiés à la société commerciale yougoslave INGRA, par un marché datant de 1985. Fin 1988, la plupart des installations étaient opérationnelles.

La mise en eau de l'aménagement a été commencé fin décembre 1988, mai la faiblesse des apports pendant toute l'année suivante a entraîné une montée extrêmement lente du plan d'eau ; fin 1988, le niveau était aux environs de la cote 311 (environ 10 millions de mètre cube en brut). **(ANB)**

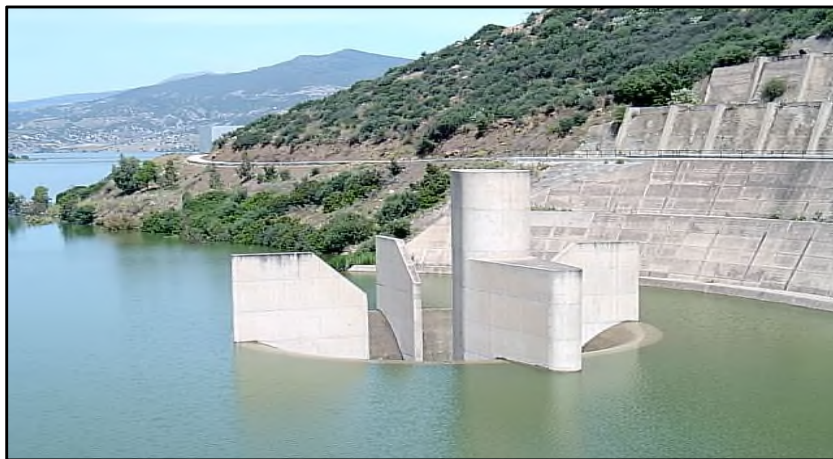


Figure I.4: Evacuateur de crue du barrage Bouhamdane.

I.5.2. Caractéristiques hydrologiques :

- Oued : Bouhamdane
- Capacité initiale : 200,00 hm³.
- Capacité dernier levé (2004) : 184.35 hm³.
- Apport moyen annuel : 0.35 hm³/an.
- Envasement annuel : 0.53 hm³/an.
- Surface du bassin versant : 1105 km².

I.5.3. Caractéristiques du Barrage :

- Type du barrage : en terre.
- Hauteur : 95m.
- Longueur : 430 m.
- Cote de retenue Normale(R.N) :360.00m.
- Cote Plus Haute Eaux (P.H.E) :370,24 m.
- Déversions : corolle et Seuil libre
- Débit d'évacuation : 2240 m³/s.
- Vidange de fond : 218 m³/s.

I.5.4. Destination :

Le plan d'eau du barrage de Bouhamdane ; son rôle à jouer dans le souci de sauvegarder l'environnement, en plus des finalités pour lesquelles il a été construit à l'origine, à savoir :

- l'irrigation (34 hm³) des 2 périmètres Guelma-Bouchehouf (dont la superficie s'étend sur 13.000 ha) d'une part et Dréan-Besbès dans la wilaya d'El Tarf, d'autre part,
- l'alimentation en eau potable de la ville de Guelma et des centres avoisinants (19 hm³).

I.5.5. Le périmètre d'irrigation de Guelma :

Les travaux de périmètre d'irrigation avaient été lancés fin de 1986, c'est-à-dire juste après la réalisation du barrage de Bouhamdane par la société italienne CIR.

Le périmètre de Guelma court sur 80 km le long de l'oued Seybouse jusqu'à Drean (W d'El Tarf). D'une superficie de 12.900 ha, il est divisé en 6 secteurs autonomes au plan aménagement et de déserte en eau. L'eau mobilisée provient du barrage de Bouhamdane qui est d'une capacité de plus de 200 millions de mètre cubes. [4]

I.6. Le couvert végétal du bassin versant de l'oued Bouhamdane :

Le couvert végétal et le type de sol influencent sur l'écoulement de la surface le taux de l'évaporation et la capacité de rétention du bassin.

I.6.1. Les Différents types d'occupation du sol du bassin versant l'oued

Bouhamdane :

La répartition spatiale des sols dépend étroitement d'un certain nombre de facteurs, notamment le climat, la roche mère, la topographie et la végétation. Parmi ces facteurs, le climat revêt une importance capitale quant aux processus pédogénétiques. Son influence est mécanique et chimique. En effet conditionnant les précipitations, les écarts thermiques et la couverture végétale, il détermine le degré d'altération de la roche mère dont est issue la partie minérale du sol et ses propriétés mécaniques et chimiques.

Il y a plusieurs classifications, nous reprendrons les trois grandes catégories de type de couverture végétale:

✓ Les surfaces bien protégées :

Ce sont les surfaces qui bénéficient de couverture végétale plus ou moins dense et permanente, et plus spécialement les forêts, ces dernières protègent contre l'érosion et la concentration rapide des eaux.

✓ Les surfaces incomplètement protégées :

Ce sont les surfaces partiellement nues en permanence, et les surfaces saisonnièrement protégées, dont les averses peuvent engendrer un ruissellement important qui peut déclencher des actions érosives et des crues inondant ; il s'agit généralement des terres de culture destinées, soit pour la céréaliculture qui occupe densément le sol pendant une période de l'année, et de l'arboriculture qui laisse le sol nu en permanence entre les arbres.

✓ Les surfaces mal protégées ou nues :

Elles englobent les terrains dénudés, les terrains de parcours, taillis et broussailles à faible densité de recouvrement où le ruissellement et l'érosion hydrique sont largement favorisés, surtout dans les terrains dénudés imperméables et sur les terrains de parcours fortement pâturé. [3]



Figure I.5 : La couverture végétale de l'oued Bouhamdane.

I.7. Formation géologique :

La lithologie est variée, constituée de formations superficielles (32.4%), les calcaires occupent une faible surface (4 %). Les grès, conglomérats, marnocalcaires et marnes schisteuses occupent (40.5 %) de la surface du bassin, les argiles et les marnes (23.1 %) se localisent principalement dans la zone orientale du bassin versant de l'oued Bouhamdane. [5]

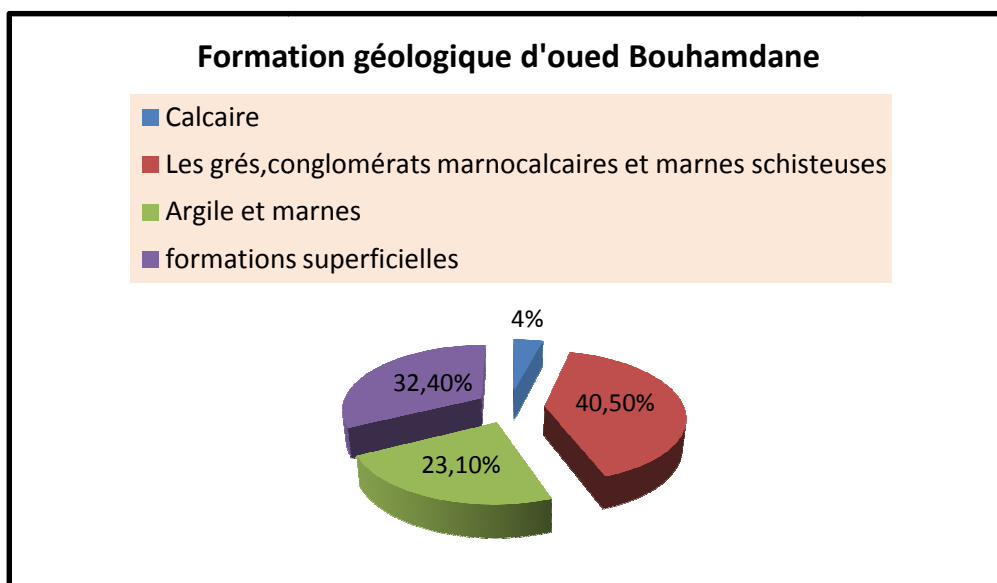


Figure I.6 : La formation géologique du bassin versant de Bouhamdane.

I.8. Conclusion :

Le bassin versant de l'oued Bouhamdane est situé au Nord- est de l'Algérie occupant la partie Ouest de la wilaya de Guelma, fait partie du grand bassin versant de la Seybouse N°14. Il est drainé par l'oued Bouhamdane et ses affluents.

L'analyse morpho-métrique est la base de toute étude hydrologique, elle permet de quantifier les caractéristiques du milieu physique d'un bassin versant.

Le calcul des caractéristiques topographiques et hydrologiques n'a pas de sens pratique, il sert comme moyen de comparaison entre les bassins. Alors que l'approche cartographique reflète avec fidélité la réalité du terrain, mais la qualité de l'information reste toujours relative. Généralement, le bassin versant de l'oued Bouhamdane présente un relief fort.

Dans le suivant résumé les caractéristiques du bassin versant :

➤ Morphologie du bassin versant :

- Superficie : $S = 1105 \text{ Km}^2$.
- Périmètre : $P = 170 \text{ Km}$.
- Indice de compacité : $K_c = 1.43$
- Longueur du rectangle équivalent : $L = 68.84 \text{ Km}$.
- Largeur du rectangle équivalent : $I = 16.04 \text{ Km}$.

➤ Relief :

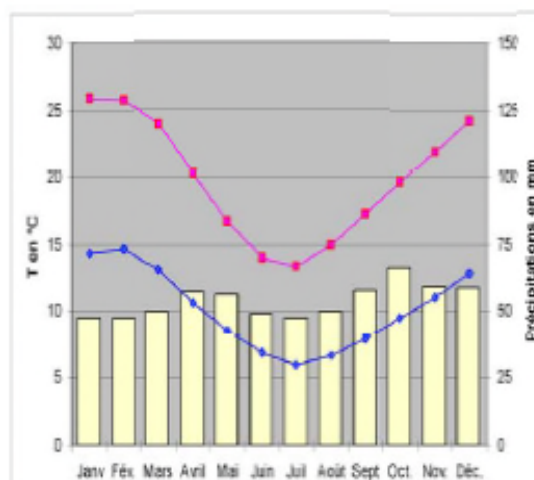
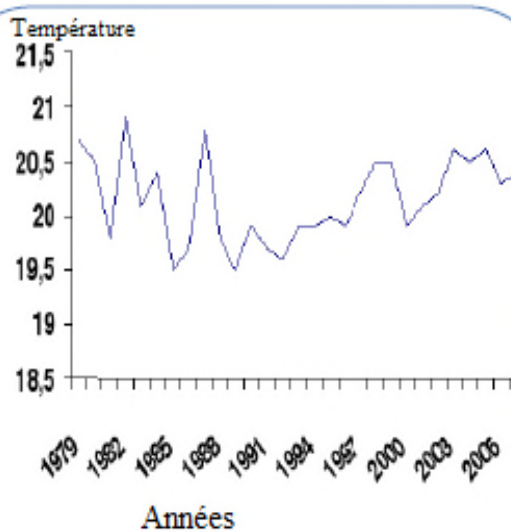
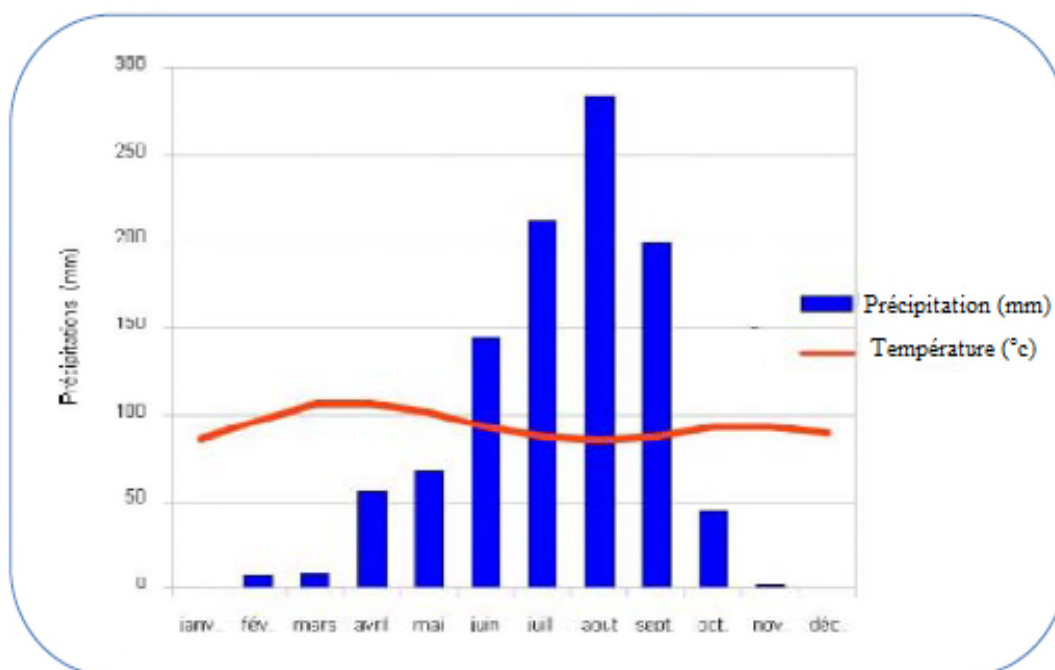
- Altitude maximale : $H_{\max} = 1281 \text{ m}$.
- Altitude minimale : $H_{\min} = 270 \text{ m}$.
- Altitude moyenne : $H_{\text{moy}} = 775.5 \text{ m}$.
- Indice de pente de roche : $I_p = 0.13\%$.

➤ Réseau Hydrologique :

- Longueur du thalweg principale : $L_p = 90 \text{ km}$.
- Densité de drainage : $D_d = 2.45 \text{ km/km}^2$.
- Temps de concentration : $T_c = 15 \text{ heures}$.

Chapitre II :

Etude climatique de la zone d'étude



Etude climatique de la zone d'étude

II.1. L'étude climatique :

Le climat, l'une des composantes les plus importantes des milieux physiques des bassins versants, constitue le facteur le plus influent sur les écoulements, à la fois annuels et extrêmes (crues et étiages). Deux facteurs climatiques sont de première importance :

➤ La pluviométrie, constitue le facteur essentiel car générateur de l'écoulement superficiel à l'échelle de temps mensuelle.

➤ La thermométrie, étudiée pour une station climatologique, permettre à l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle calculée par les formules de l'A.N.R.H. Le régime climatique du bassin versant de Bouhamdane est tranché en deux saisons : une saison humide où les précipitations sont supérieures à la moyenne mensuelle interannuelle, et une saison sèche où les précipitations sont inférieures à la moyenne mensuelle interannuelle.

II.2. Les caractéristiques climatiques du bassin versant de l'oued

Bouhamdane :

L'étude des caractéristiques climatiques basée sur les données de précipitation et de température nous permet de donner un bref aperçu sur leur répartition dans le temps et dans l'espace. Ces deux paramètres nous permettent également de déterminer l'évapotranspiration, paramètre essentiel du déficit d'écoulement et de l'alimentation, c'est à dire la lame d'eau précipitée pour pouvoir quantifier le volume d'eau infiltré.

✚ Le réseau pluviométrique et les séries d'observation :

Le bassin versant de l'oued Bouhamdane est équipé de cinq (05) stations pluviométriques, et nous avons utilisé une autre station pluviométrique située aux alentours du bassin. [3]

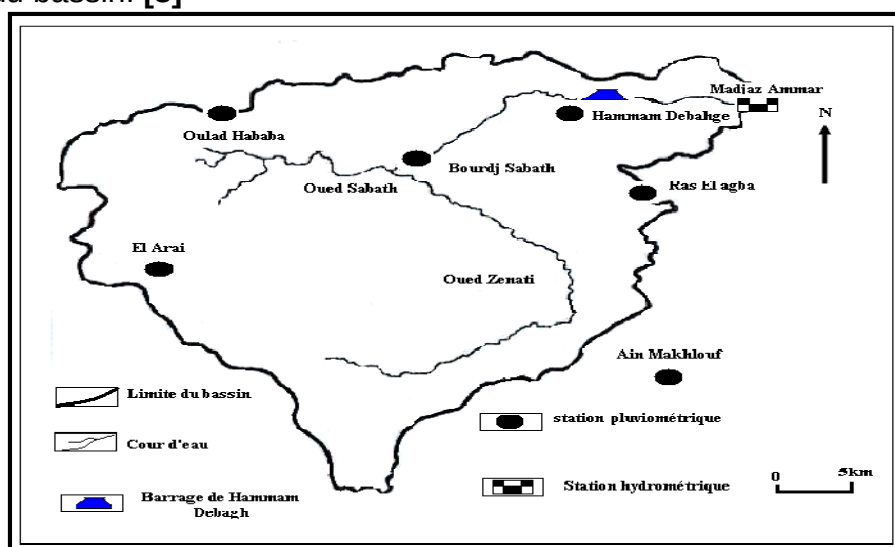


Figure II.1 : Localisation des stations pluviométrique et hydrométrique du bassin versant de l'oued Bouhamdane.

II.3. Les éléments climatiques :

L'état de l'atmosphère peut se caractériser par la mesure des différentes grandeurs physique comme la température, précipitation, humidité, insolation, le vent...etc.

II.3.1. Température :

Les températures régissent directement, en interaction avec les autres facteurs météorologiques (insolation, humidité, précipitation, ...etc.) ; et biogéographiques, le développement de la végétation, le phénomène de l'évapotranspiration et ainsi que le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. [6]

Tableau II.1 : Températures moyennes mensuelles (2005-2014).

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT
T min (°C)	16,97	13,72	9,37	5,89	4,91	4,66	6,21	8,87	11,49	15,02	18,38	18,70
T moy (°C)	24,29	20,74	15,18	11,44	10,61	10,86	13,32	16,90	20,79	25,47	29,10	28,87
T max (°C)	31,43	27,59	21,22	17,06	16,29	16,43	19,48	23,18	27,43	32,67	36,70	36,66

Source (ONM Constantine)

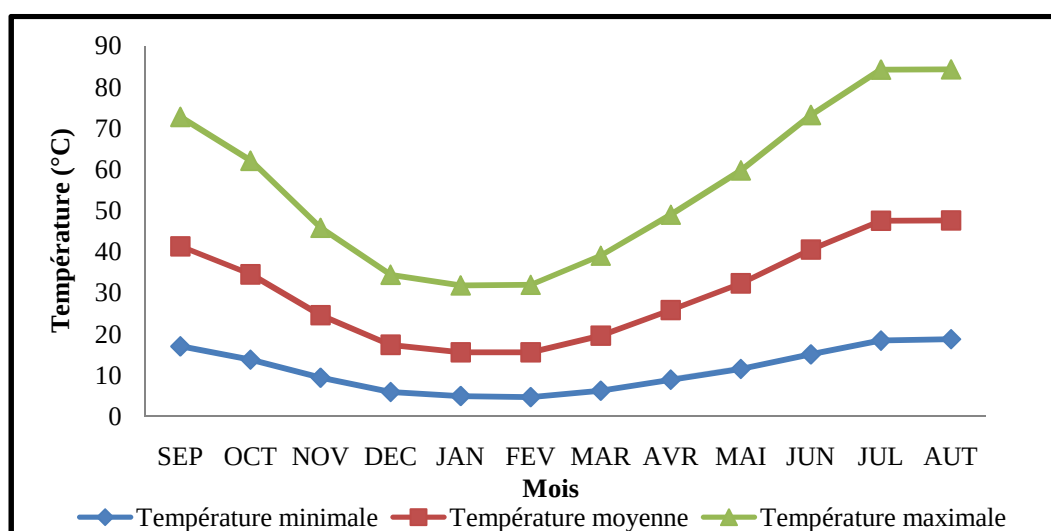


Figure II.2 : Courbe répartitions de températures minimales, moyennes et maximales mensuelles (2005-2014).

Ce sont les mois Juillet et Aout qui enregistres les plus fortes température de la période de l'année. Les valeurs moyennes restent élevées jusqu'à même le mois de Septembre, après ce mois, on y remarque une chute progressive des températures, cette diminution atteint sont minimum durant le mois de Janvier et Février.

II.3.2. Précipitations et évaporations :

La pluviométrie mesure l'ensemble des précipitations sous forme de pluie, de grêle ou de neige qui se produisent sur une aire géographique et pendant une période données.

Les précipitations et principalement les pluies, qui constituent le poste entrée du cycle de l'eau, sont une composante fondamentale en hydrologie. Leur mesure et

leur étude détaillées sont primordiales pour la connaissance du régime des oueds, de l'état des réserves en eau du sol et de la recharge des nappes.

Les précipitations sont, avec les écoulements, l'un des processus hydrologiques les plus variables, à la fois dans l'espace et dans le temps (aux échelles annuelle, mensuelle et journalière).

L'évaporation est le processus par lequel l'eau sous forme liquide se transforme en gaz (vaporisation) et peut s'échapper de la surface évaporatoire. L'eau peut s'évaporer à partir de nombreuses surfaces comme les lacs, les rivières, les sols, les routes et la végétation mouillée.[15]

Tableau II.2 : Les précipitations et les évaporations moyennes (2005-2014).

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT
Précipitations moy (mm)	46,5	57,7	61,0	67,3	77,0	74,7	97,9	50,2	41,6	12,6	3,5	11,7
Evaporations moy (mm)	94,2	74,5	53,6	42,1	39,7	42,3	52,9	61,9	83,4	124,6	156,7	129,4

Source (ONM Constantine)

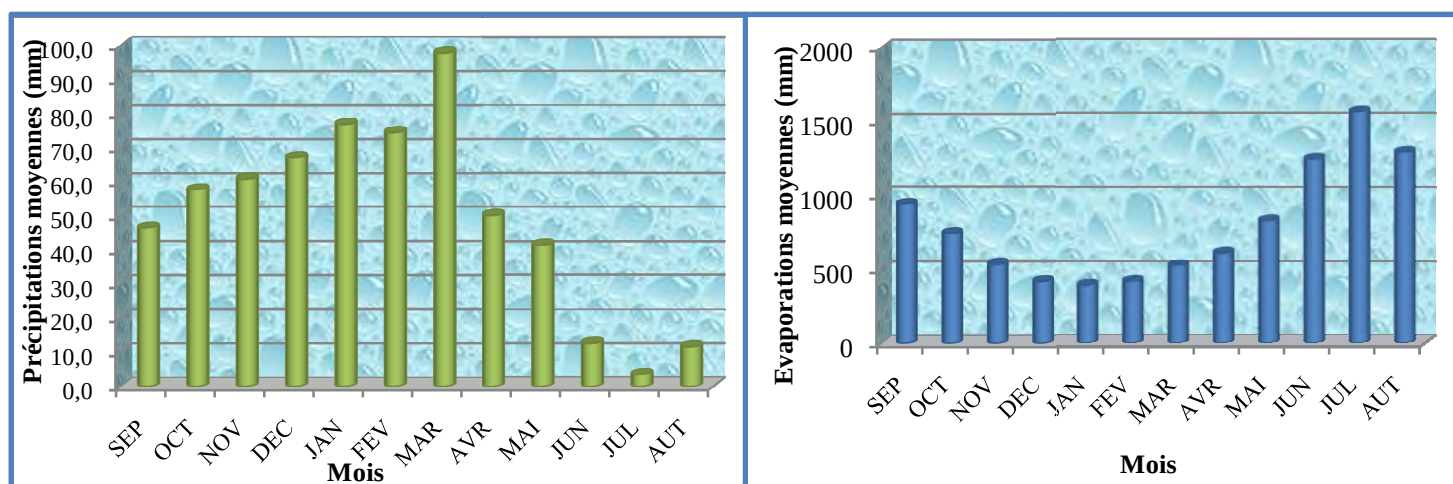


Figure II.3 : Histogrammes représentant les précipitations et évaporations moyennes mensuelles (2005-2014).

On remarque que le gradient des pluies mensuelles s'accroît progressivement à partir du mois de septembre jusqu'au mois le plus humide de l'année (Mars) où les précipitations moyennes atteignent le maximum (97.9 mm). Les valeurs maximales sont observées pendant les mois de Mars, Février, Janvier et Décembre respectivement 97.9mm, 74.7mm, 77.0mm, 67.3mm.

Après les mois à forte pluviosité. Les moyennes mensuelles des précipitations commencent à chuter et affleurent des valeurs très faibles qui coïncident avec les mois d'Aout et Juillet.

Le mois de Juillet est considéré comme le mois le plus sec avec seulement 3.5mm.

On peut dire qu'il existe deux périodes distinctes :

- 1- Une période très sèche représentée par les mois de juillet et Aout.
- 2- Une période humide correspondant aux restes des mois de l'année.

II.3.3. Précipitations saisonnières :

La distribution saisonnière des précipitations, montre que l'Hiver est la saison la plus humide; avec une sécheresse en période d'Eté.

Tableau II.3 : Distribution saisonnières des précipitations moyennes.

Station	Automne	Hiver	Printemps	été	Annuel (mm)
Oued Bouhamdane	63.23	73	55.07	9,27	200.57

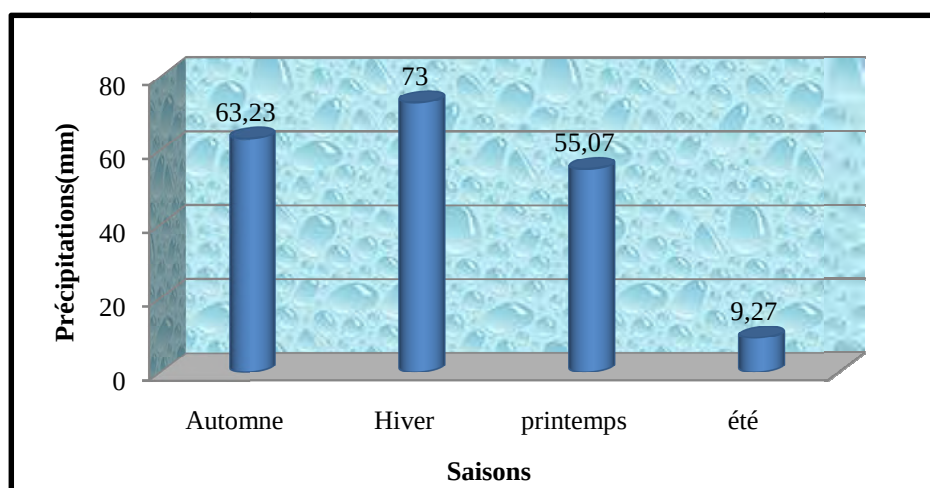


Figure II.4 : Variations saisonnières des précipitations moyennes.

Toutefois nous remarquons, une période relativement pluvieuse regroupant les saisons d'Automne, d'Hiver et de Printemps et une saison sèche représentée par l'Eté.

II.3.4. Insolation :

L'ensoleillement est la mesure du rayonnement solaire que reçoit une surface au cours d'une période donnée. [4]

L'évaporation absorbe de la chaleur qui est fournie principalement par le rayonnement solaire transformé plus ou moins sélectivement en énergie calorifique par la surface évaporant. Le bilan calorifique de la surface évaporant doit d'ailleurs tenir compte d'autres échanges de chaleur avec le milieu ambiant. [7]

Tableau II.4 : Les insulations moyennes mensuelles (2005-2014).

Années	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT
Insolation moyenne	234,0	221,1	170,1	148,9	152,9	157,9	204,0	223,7	276,5	316,8	360,9	290,8

Source (ONM Constantine)

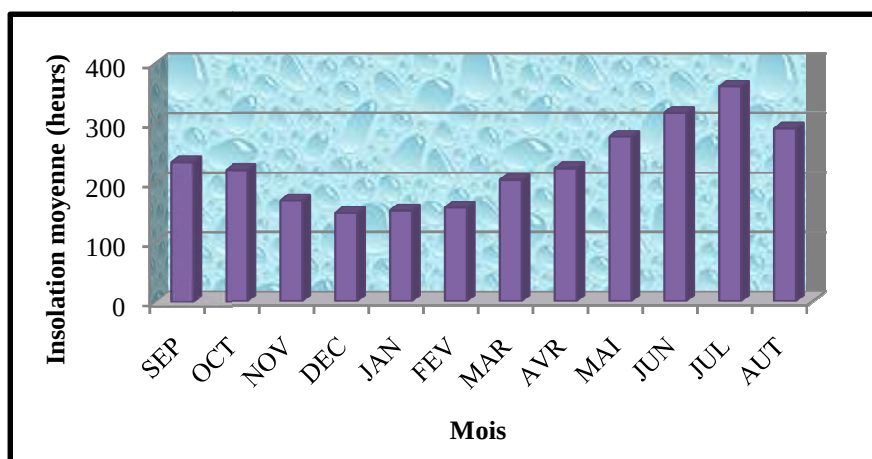


Figure II.5 : Histogramme représenter l'insolation moyenne mensuelle (2005-2014).

L'examen du tableau, montre que durant les années d'observation, le mois de juillet est le plus ensoleillé.

II.3.5. Nombre de jours Gelée :

Les gelées sont fortement influencées par l'altitude et engendrées par les basses températures ; et en exprimé en heurs.

Elles sont fréquentes en hiver et surtout au printemps, elle provoque de graves dégâts sur les jeunes plantes. [14]

Tableau II.5 : Nombre des jours gelés moyenne (2005-2014).

Années	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT
Nombre des jours gelés	0	0	0,556	8,667	11,222	10,111	7,111	1,333	0,111	0	0	0

Source (ONM Constantine)

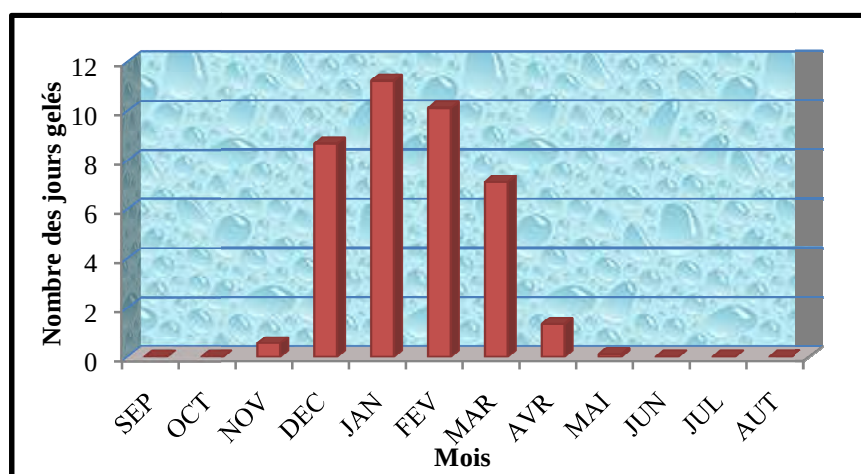


Figure II.6 : Histogramme représenter le nombre des jours gelés moyenne mensuelle (2005-2014).

En remarque les nombre des jours gelés nous découvrons le nombre de jour de gelée blanche varier entre 11.22 en Janvier et 0.11 en Février. Au mois Mai, ce nombre diminue à 0.11 (tableau au-dessus). En moyenne, on observe de 39 jours de gelée par ans.

II.3.6. Humidité :

L'humidité relative est l'un des paramètres principaux du cycle hydrologique. Elle conditionne l'évaporation. [6]

C'est le pourcentage de vapeur d'eau dans l'air par rapport à celle qu'il pourrait contenir à la même température. Elle nous ressorte une approche sur l'état hygrométrique de l'air. [15]

Tableau II.6 : Humidité moyenne mensuelles (2005-2014).

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT
Humidité moyenne (%)	64,8	68,0	71,1	74,7	75,2	72,4	71,6	68,4	63,6	54,6	50,2	52,4

Source (ONM Constantine)

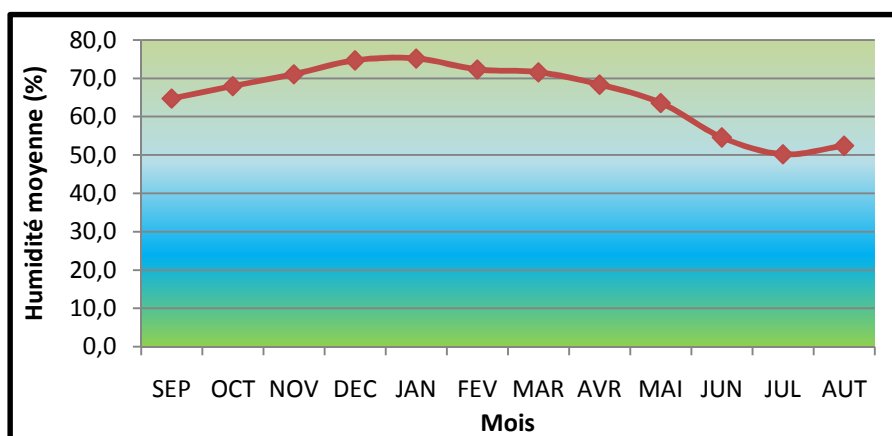


Figure II.7 : Courbe représente l'humidité moyenne mensuelle (2005-2014).

A partir de cette figure, on remarque que : l'humidité relative maximale est enregistrée en hiver et minimale en été. La valeur maximale est de 75.2 % en Janvier, et la valeur minimale est de 50.2% en Juillet. La valeur moyenne annuelle est de 65.58 %.

II.3.7. La vitesse des vents :

Le vent assure le renouvellement de l'air plus ou moins saturé au contact de la surface évaporant par de nouvelles couches ayant une température et une humidité généralement plus faibles. [8]

L'analyse de rosace, permet de dégager la direction des vents du **Nord- Ouest à Nord** ; Les données relatives au vent de l'oued Bouhamdane sont reportées sur le tableau suivant :

Tableau II.7 : Représente les vitesses moyennes mensuelles des vents (2005-2014).

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT
Vitesses moyennes des vents	1,6	1,2	1,6	1,7	1,5	1,6	1,9	1,9	1,8	1,9	1,8	1,4

Source (ONM Constantine)

Rose des Vents

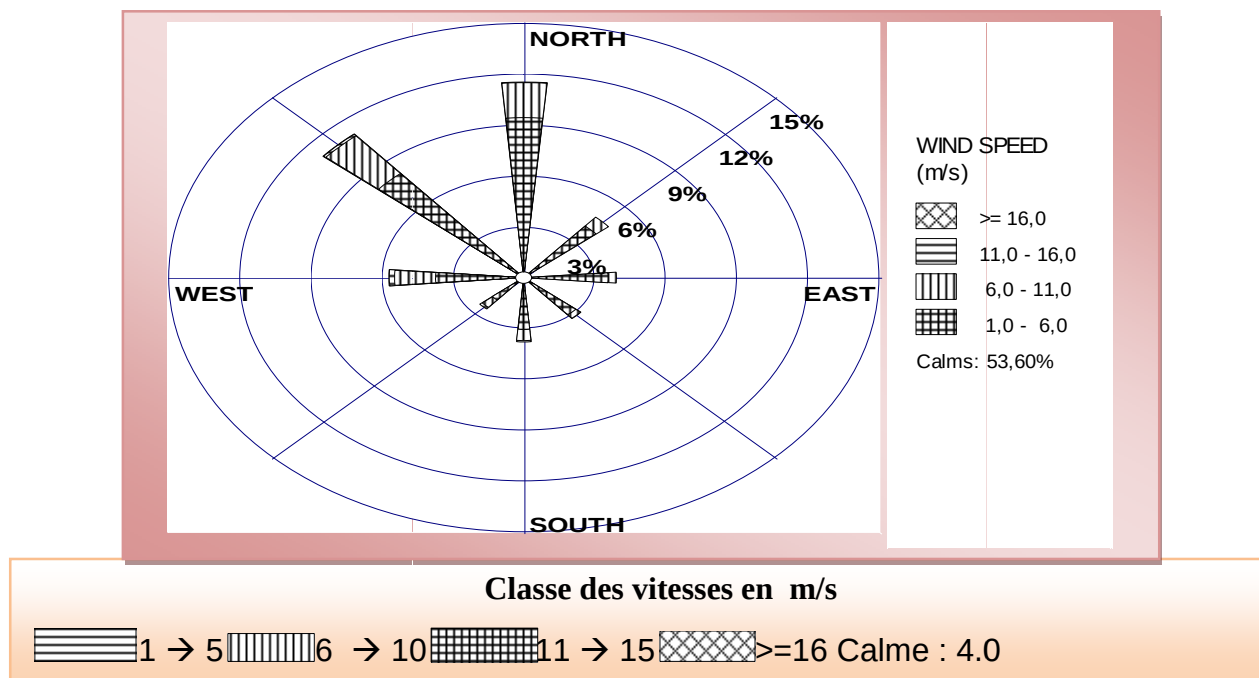


Figure II.8 : Rosace des directions de fracturations de la zone d'étude. (ONM Constantine)

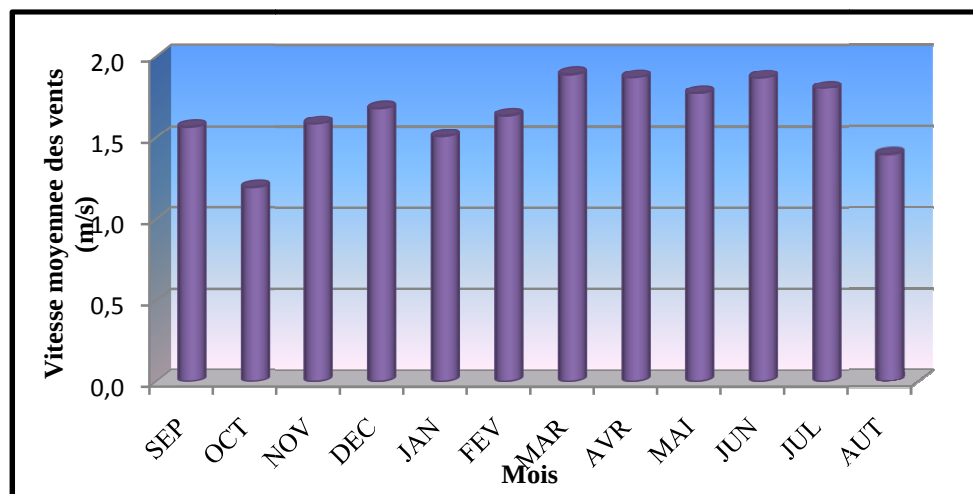


Figure II.9 : Histogramme représente les vitesses des vents moyens mensuels (2005-2014).

Les vents sont les plus fréquents à printemps (1.87m/s) ; et moins fréquents en automne (1.47m/s).

II.3.8. Nébulosité :

La nébulosité est un terme souvent employé en météorologie. La nébulosité, ou couverture nuageuse, est l'obscurcissement du ciel par les nuages ou bien la fraction du ciel couverte par les nuages (fonction du genre, de l'espèce, de la variété) au-dessus d'une région. La nébulosité devient donc une notion essentielle dans la prévision du temps ; en exprimé en octas. [9]

Tableau II.8 : Nébulosité moyenne mensuelles (2005-2014).

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT
Nébulosité moyenne	4,1	4,3	4,5	4,9	4,9	5,1	5,0	4,8	4,3	3,1	2,4	2,2

Source (ONM Constantine)

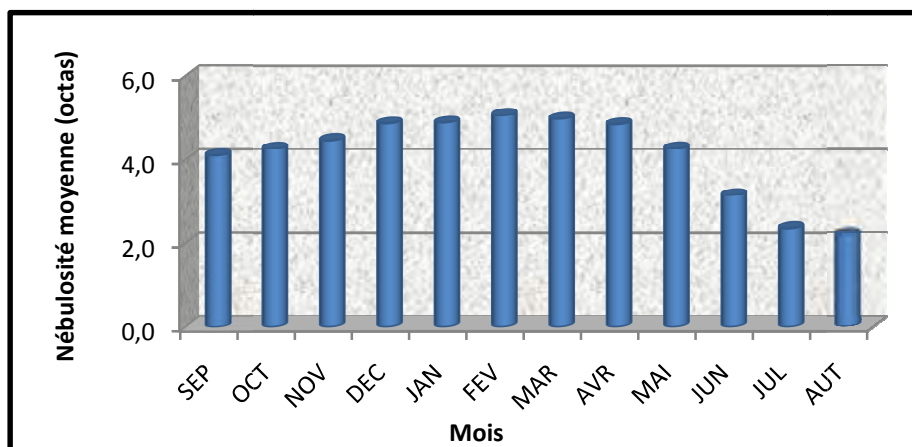


Figure II.10 : Histogramme représente la nébulosité moyenne mensuelle (2005-2014).

II. 4. Synthèse climatique :

L'établissement d'une synthèse des facteurs climatiques à savoir la pluviométrie et la température fait appel à l'étude des deux paramètres suivants [4] :

- Le diagramme Ombrothermique de Gaussen ;
- Le Climagramme de L'Emberger.

II.4.1. Diagramme Ombrothermique de Gaussen :

Le diagramme Ombrothermique de **GAUSSEN** est une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèche et humide d'une région donnée.

D'après la formule de Gaussen, $P=2T$, un mois sec est celui où le total des précipitations est égal ou inférieur au double de la température, et inversement, le mois humide est celui où le total des précipitations est supérieur le double de la température.

La saison de sécheresse à Guelma débute au début du mois mai et se termine au mois de Septembre.

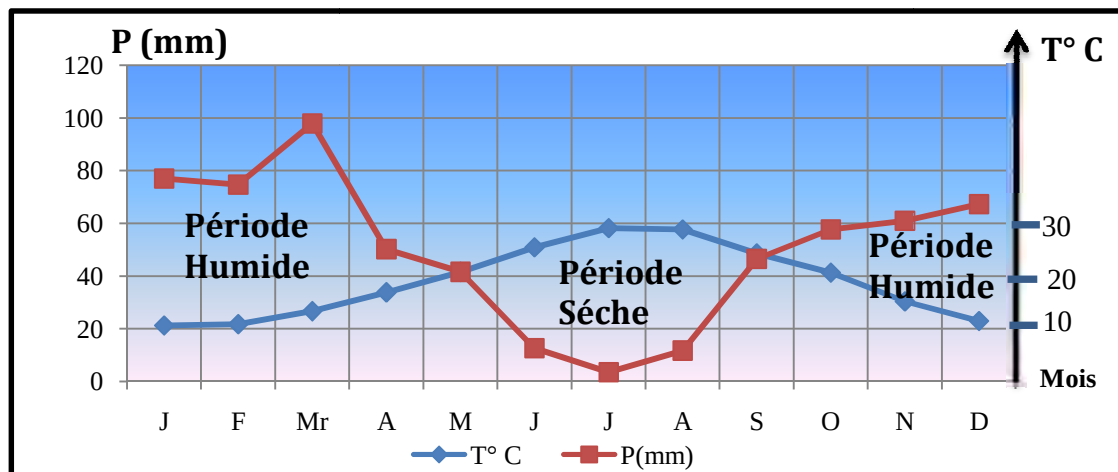


Figure II.11 : Diagramme Ombrothermique (2005-2014).

Le diagramme représente pour les douze mois les courbes des températures et des précipitations. L'ordonnée doit être graduée de telle sorte que $P=2T$. Cela permet de représenter le développement annuel des précipitations, des températures et laisser apprécier le rapport entre précipitations et températures, puisque la sécheresse apparaît quand la courbe de température passe au-dessus de la courbe des précipitations.

II.4.2. Climagramme de l'Emberger :

Ce Climagramme de l'Emberger (I_s) est utilisé pour déterminer le climat de la région étudiée. Pour déterminer l'étage bioclimatique de la zone d'étude, en applique la formule d'Emberger (1932) modifié par Stewart en 1969.

$$I_s = 3.43 \times \frac{P}{M - m} \quad \dots\dots\dots \text{II.1}$$

Où :

I_s : le quotient pluviométrique d'Emberger.

P : Pluviométrie annuelle moyenne en mm égale à 601.8mm.

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud en degré Kelvin (°K).

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid en degré Kelvin (°K).

Tableau II.9 : Type de climat en fonction de valeur I_s .

Valeurs de I_s	Type de climat
$10 > I_s$	Désertique
$10 < I_s < 25$	Aride
$25 < I_s < 50$	Semi aride
$50 < I_s < 100$	Tempéré
$100 < I_s$	Humide

D'après les données de la station de Medjez Ammar II.

$P=601.8\text{mm}$

$M=36.70+273=309.7^\circ\text{K}$

$m=4.66+273=277.66^\circ\text{K}$

Nous avons obtenus une valeur d' $I_s=64.42$

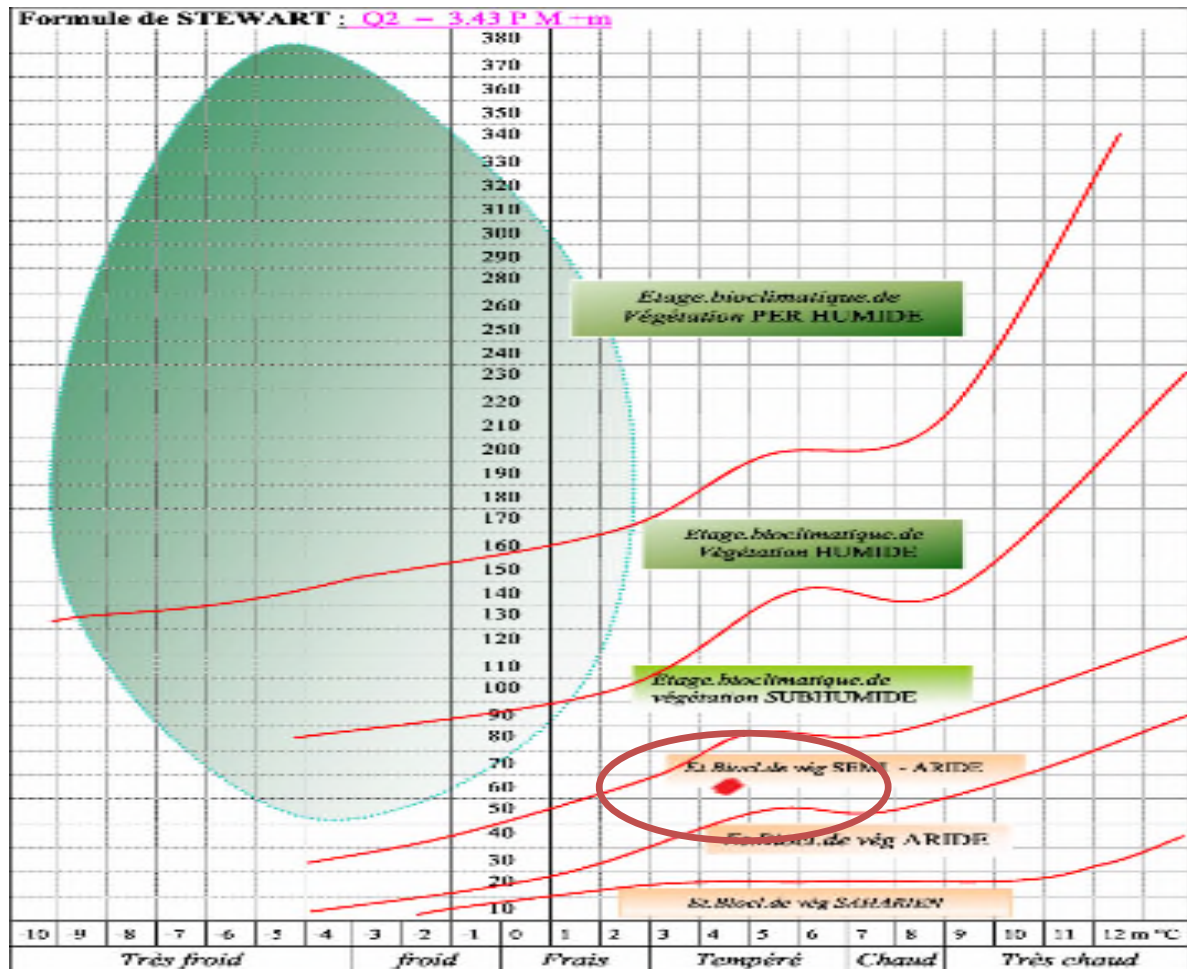


Figure II.12 : Positionnement de Guelma dans le Climagramme d'Emberger.

Nous avons obtenus une valeur d' I_s égale à 64.42 indiquant que notre région d'étude située dans l'étage bioclimatique semi-aride, à hiver tempéré.

II.5. Conclusion :

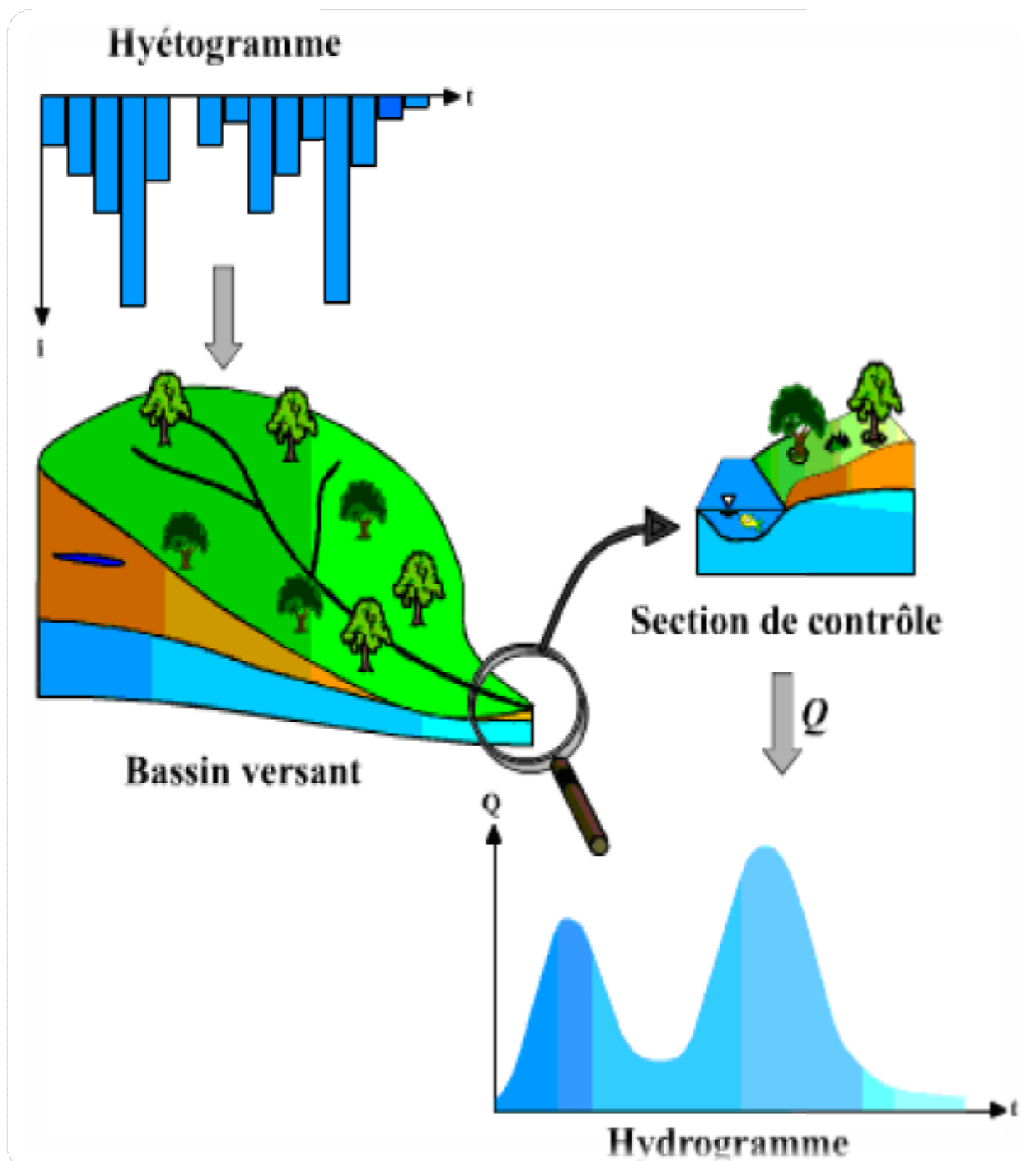
L'analyse du climat du bassin de l'oued Bouhamdane à partir des données climatiques montre que les caractéristiques climatiques de ce bassin, sont étroitement liées à leurs positions géographiques, et à leur relief. On relève des fortes variabilités spatiales et surtout temporelles de ces différents paramètres climatiques qui vont certainement entraîner une variabilité de ruissellement sur le même bassin versant.

L'évolution mensuelle interannuelle de ces deux paramètres (précipitation, température), permet de distinguer une période chaude et sèche s'étale du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre, et une période froide et humide.

Le bassin de l'oued Bouhamdane situe dans l'étage bioclimatique semi-aride.

Chapitre III :

Présentation des modèles GR



Présentation des modèles GR

III.1. Introduction :

La simulation de la relation pluie - débit ou la transformation de la pluie en débit est un phénomène très complexe. Beaucoup de chercheurs ont travaillé pour cette problématique par application des modèles globaux, conceptuels, physiques, distribués et semi distribués.

La modélisation pluie-débit par les modèles conceptuels (à réservoirs), est réalisée par deux processus différents, à savoir la fonction de production, et la fonction de transfert chargée de distribuer les débits vers l'exutoire. Dans ce qui suit, on détaillera les définitions des vocabulaires utilisés.

III.2. Définition d'un modèle :

Un modèle est la représentation mentale d'un être du monde réel et de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler mentalement le comportement de cet être. [16]

Le modèle est une image de la réalité, une simplification des phénomènes naturels avec un nombre de paramètres volontairement limité. [17]

La modélisation à une place centrale dans l'hydrologie moderne. Les modèles pluie-débit ont, à de nombreuses reprises, prouvé leur efficacité. En effet, la simulation des débits est indispensable à de nombreux secteurs économiques et pour la sécurité civile. Les attentes sont fortes, car les modèles nous servent à prédire les débits futurs (à partir de données observées), les événements extrêmes (crues et étiages), la probabilité d'apparition de ces événements (souvent les valeurs extrêmes de crue ou d'étiage), et à déterminer les impacts probables de changements climatique ou anthropique.

Pour répondre à ces problématiques, des approches différentes se sont développées, allant des modèles hydrologiques conceptuels aux modèles hydrologiques à bases physiques. Tous ces modèles comportent un nombre plus ou moins important de paramètres, dont il faut déterminer les valeurs. Si les paramètres ne sont pas mesurables ou quantifiables à partir des propriétés physiques du bassin, il convient de déterminer leurs valeurs par optimisation, c'est-à-dire celles permettant les meilleures simulations de débits possibles. [4]

III.3. Définition et principe des modèles hydrologiques :

La modélisation hydrologique est la représentation simplifiée partielle ou totale du cycle hydrologique [18]. Cette représentation se fait grâce à un ensemble d'équations mathématiques qui sont appelées à reproduire le système. Le modélisateur introduit généralement les facteurs qui lui semblent pertinents pour minimiser les erreurs liées aux hypothèses simplificatrices de la modélisation.

La modélisation pluie-débit représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin, qui permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant étudié en des séries des débits.

On distingue quatre types de variables qui existent en totalité ou en partie dans chaque modèle [19] :

🌧 **Variables d'entrées** : Le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques et hydrodynamiques du milieu, ...).

🌧 **Variables de sorties** : Le modèle répond par un ensemble de variables (débits, flux ou concentration en polluants, ...).

🌧 **Variables d'état** : Elles permettent de caractériser l'état du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, profondeurs des sols, pentes, ...).

🌧 **Paramètres de calage** : En plus des variables, la modélisation fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par calage (conductivité hydraulique à saturation, ...)[19].

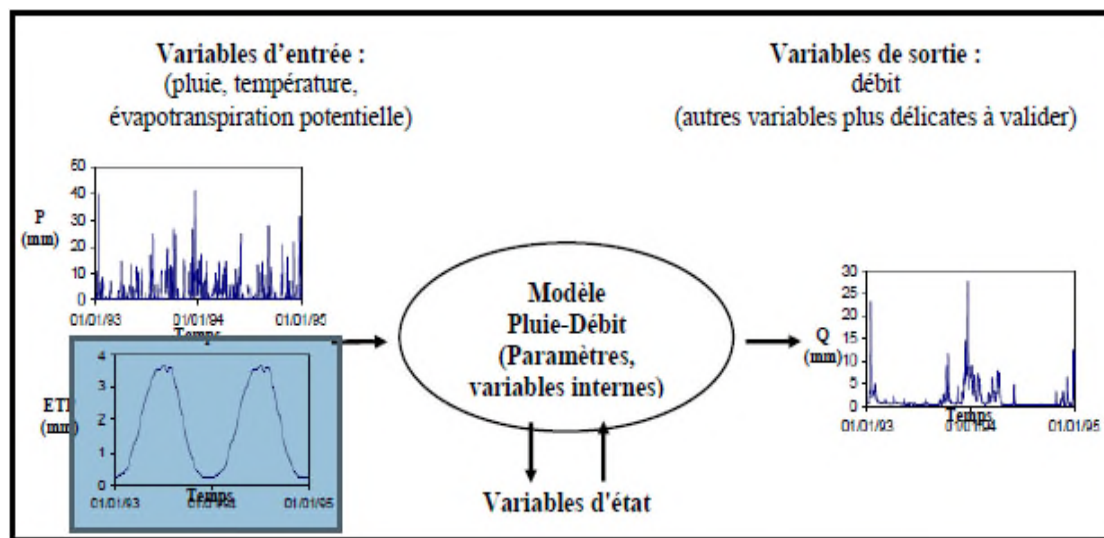


Figure III.1 : Schématisation d'un modèle hydrologique [19].

Les variables citées ci-dessus interviennent dans la modélisation hydrologique par l'intermédiaire de deux fonctions : une fonction de production et une fonction de transfert (Fig. III.2) [19] :

➤ **La fonction de production** : c'est une représentation simple mais réaliste, des différentes voies que suivra l'eau de pluie, entre le moment où elle rejoint le cours d'eau [19], elle exprime la transformation de la pluie brute en pluie nette, définit la fraction de la pluie brute qui contribue effectivement au ruissellement. En d'autres termes, elle permet de calculer la quantité d'eau qui va s'écouler à l'exutoire d'un bassin ou sous bassin versant.

➤ **La fonction de transfert** : c'est la fonction qui permet de transférer, comme son nom l'indique, la quantité d'eau déterminée par la fonction de production, vers le cours d'eau. Elle permet la transformation de la pluie nette en un hydrogramme à l'exutoire du bassin versant, donc, de donner une forme à la crue dont le volume a été déterminé par la fonction de production, en simulant l'hydrogramme de crue à l'exutoire. [10]

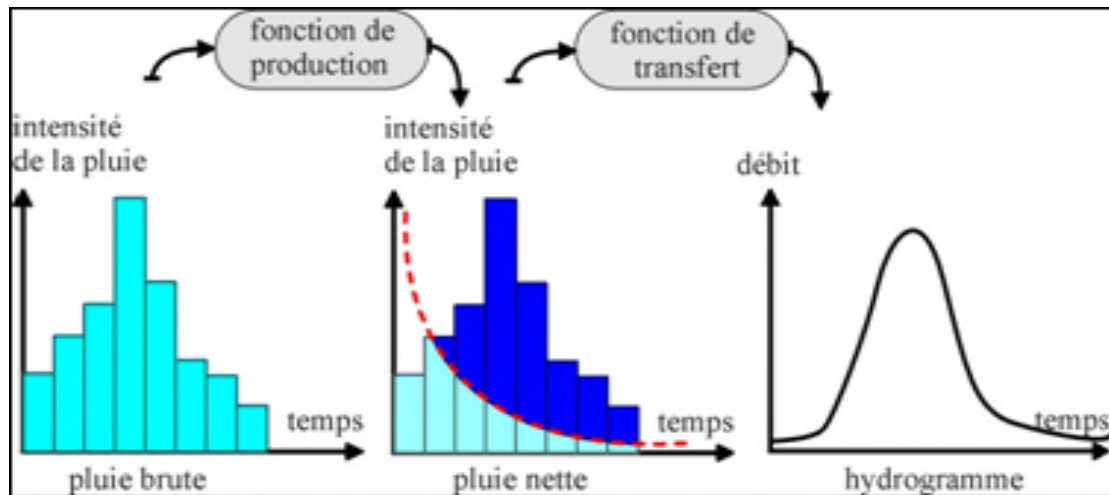


Figure III.2 : Transformation de la pluie en hydrogramme de débit. [10]

III.4. Les applications de la modélisation pluie-débit :

La modélisation de la transformation pluie-débit intègre dans son contexte les différents éléments du cycle hydrologique. Certains types de modèles nécessitent le passage par la modélisation de chaque élément avant de construire le modèle finale pluie-débit. L'unité de l'étude est généralement le bassin versant limité topographiquement, sauf dans le cas où des formations géologiques drainent des surfaces situées hors limites topographiques du bassin.

La modélisation pluie-débit peut donner la réponse aux nombreuses questions, relatives à l'eau, axée sur la gestion des ressources et de risque. Parmi ces questions on note [20] :

- Développer la gestion des systèmes de protection contre les crues.
- Gérer les barrages réservoirs, cela s'effectue sur deux plans :
 - Le contrôle et le diagnostique du fonctionnement d'une structure hydraulique ;
 - L'optimisation des règles de gestion d'un aménagement. [30]
- Générer de longue série de données hydrologiques, qui seront utilisées soit pour permettre un traitement statistique de données (compléter les données manquantes), soit pour permettre l'évolution des ressources en eau. [4]

III.5. Les différents types des modèles hydrologiques:

De nombreuses classifications de modèles hydrologiques existent dans la littérature. En effet, un grand nombre de caractéristiques des modèles peut être utilisé pour construire une classification. De plus, la plupart des modèles hydrologiques sont des assemblages de modules ayant des propriétés différentes. [1]

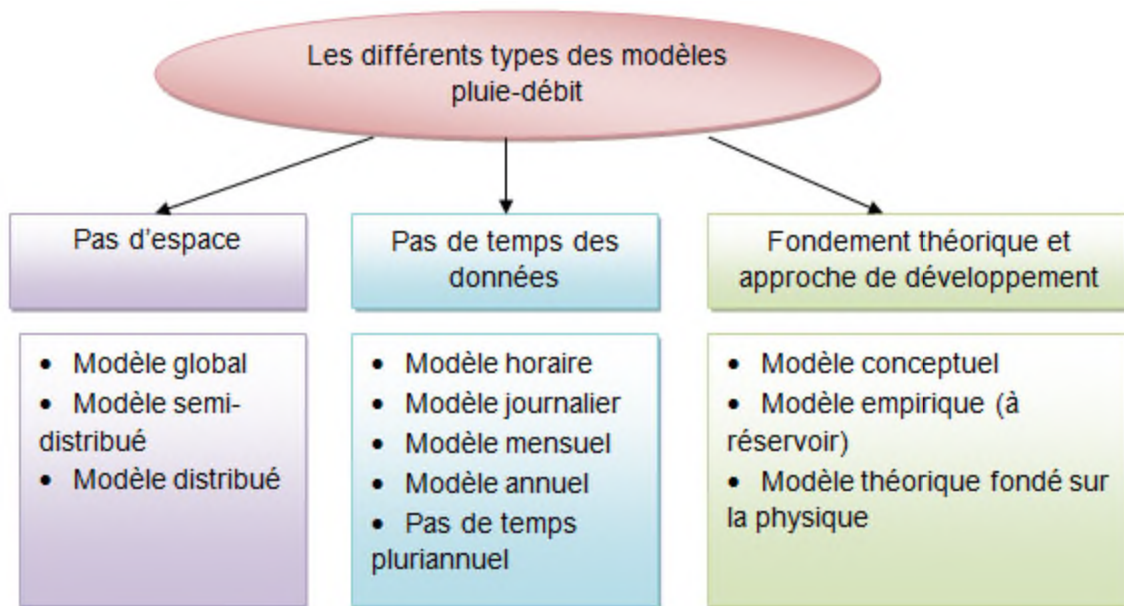


Figure III.3 : Les différents types de classifications utilisées pour les modèles pluie-débit. [38]

III.6. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) :

Les modèles de simulation du Génie Rural fonctionnent aux pas de temps annuel, mensuel et journalier.

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire. [21]

Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

III.7. Mode de développement :

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes [39] :

➤ Représentation globale du bassin versant.

- Approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements.
- Augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples.
- Justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances.
- Recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés), utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles. [22]
- Evaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures du modèle.

III.8. Paramètres des modèles conceptuels:

Le fonctionnement interne des modèles conceptuels est régi par des relations entre les variables (observées) alimentant le modèle considéré comme des entrées, et les variables calculées en ajustant un certain nombre d'entités dits paramètres. En effet l'estimation de ces paramètres est une étape très essentielle.

III.9. Principales caractéristiques :

Comme tout modèle hydrologique, les modèles GR opèrent une triple globalisation (triple considération de moyenne) du système bassin versant:

III.9.1. au niveau des processus :

Les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus.

III.9.2. au niveau de l'espace :

Les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout.

Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité.

III.9.3. au niveau du temps :

Les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles. Notons que le développement d'un modèle au pas de temps horaire est en cours [39] et actuellement, le modèle journalier est appliqué au pas de temps horaire. Le modèle GR3H (horaire) utilisé dans certaines applications développées au Cemagref d'Aix-en-Provence [40] correspond au modèle proposé par [41] au pas de temps journalier. [10]

III.10. Les différents modèles de GR :

Les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). [11]

III.10.1. Modèle pluie-débit annuel GR1A :

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau. La principale version, que nous présentons ici. [23]

III.10.1.1. Paramètre :

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13 ; 3.5].

III.10.1.2. Description mathématique :

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . Le modèle s'écrit :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \dots\dots\dots \text{III.1}$$

Où :

Q_k : le débit simulé de l'année k .

P_k : la pluie observée de l'année k .

P_{k-1} : est la pluie observée de l'année $k-1$.

E_k : est l'évapotranspiration potentielle de l'année k .

X : est le paramètre du modèle à optimiser.

Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

III.10.2. Modèle pluie-débit mensuel GR2M :

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres optimisable. Le modèle est à pas de temps mensuel.

Il fonctionne autour de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et un de routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur les entrées. Le modèle utilise en entrées la pluie moyenne et l'ETP, et fournit en sortie le débit. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement : [24], [25] [26], [27], [42] et [28], qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi *et al.* (2006b) qui paraît la plus performante. [43]

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle.

Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

III.10.2.1. Les Paramètres de GR2M :

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X_1 : capacité du réservoir de production (mm).

X_2 : Coefficient d'échanges souterrains (-).

III.10.2.2. La structure de GR2M :

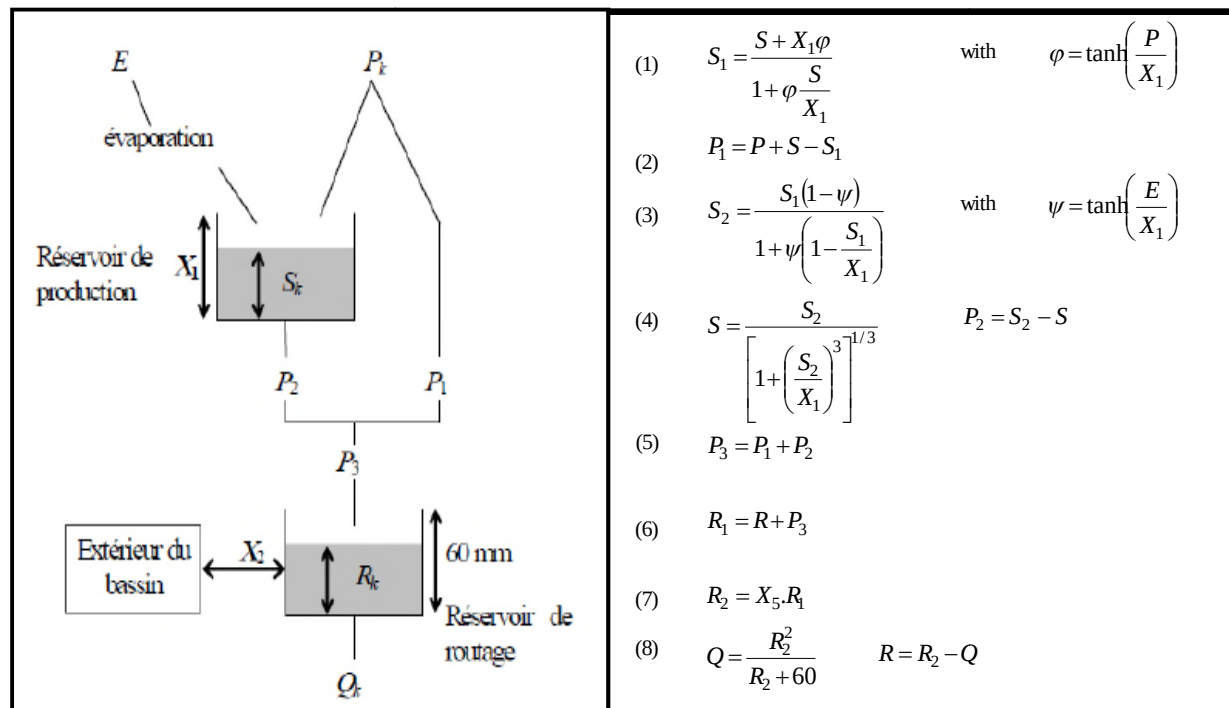


Figure III.4 : Schéma de la structure du modèle GR2M.

III.10.2.3. Description mathématique :

Un schéma de la structure est donné à la (Fig III.4). P_k est la pluie mensuelle du mois k et E : l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes :

- **Production :**

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol.

Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)} \dots\dots\dots \text{III.2}$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie en excès, P_1 , est donnée par :

$$P_1 = P + P_s \dots\dots\dots \text{III.3}$$

Et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \dots\dots\dots \text{III.4}$$

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité E_s est prélevée du réservoir :

$$E_s = \frac{S' \cdot \left(2 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)} \dots\dots\dots \text{III.5}$$

E est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré. Le niveau S' devient S'' :

$$S'' = S' - E_s \dots\dots\dots \text{III.6}$$

- **Percolation**

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 :

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{1/3} \right\} \dots\dots\dots \text{III.7}$$

Et son niveau S_{k+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \dots\dots\dots\text{III.8}$$

• **Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique :**

La quantité d'eau totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \dots\dots\dots\text{III.9}$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \dots\dots\dots\text{III.10}$$

Un terme d'échange en eau souterrain F a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés. Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle. F est alors calculé par :

$$F = (X_2 - 1).R' \dots\dots\dots\text{III.11}$$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_2 - R' \dots\dots\dots\text{III.12}$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon l'équation suivante:

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \dots\dots\dots\text{III.13}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k \dots\dots\dots\text{III.14}$$

III.10.3. Modèle pluie-débit journalier GR4J :

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres optimisables. Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture

sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin.

III.10.3.1. Les Paramètres de GR4J :

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

X1 : capacité du réservoir de production (mm).

X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm).

X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm).

X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire *HU1* (j).

III.10.3.2. La structure de GR4J :

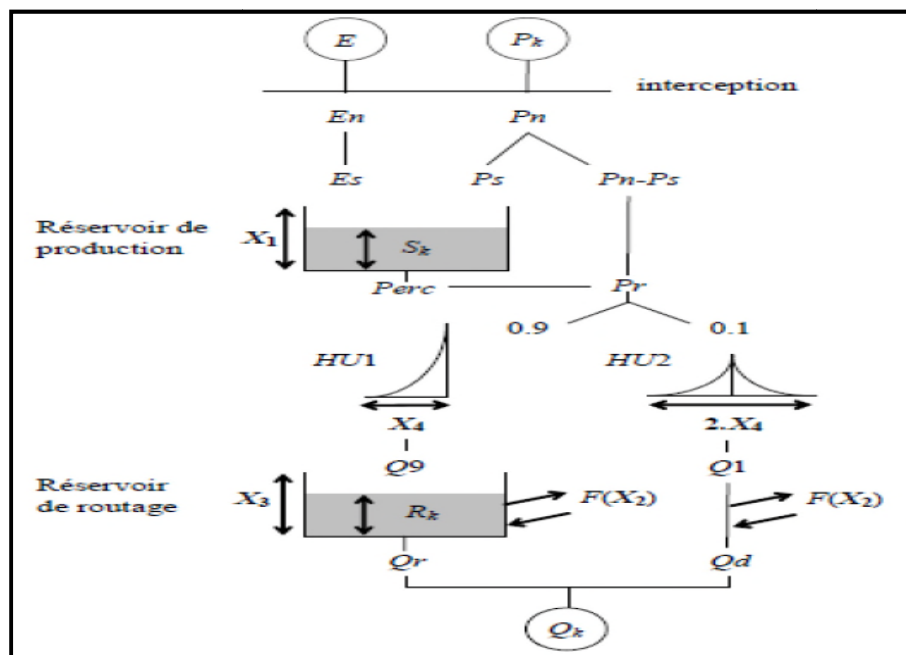


Figure III.5: Schéma de la structure du modèle GR4J.

III.10.3.3. Description mathématique :

Un schéma de la structure est donné à la (Fig. III.5). **P_k** est la pluie journalière du jour **k** et **E** l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

➤ Neutralisation :

La première opération est la neutralisation de **P_k** par **E** pour déterminer une pluie nette **P_n** et une évapotranspiration nette **E_n** calculée par :

Si $P > E$, alors $P_n = P_k - E$ et $E_n = 0$
 Si $P < E$, alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P_k$

➤ Fonction de rendement :

Dans le cas où **P_n** est différente de zéro, une partie **P_s** de **P_n** alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \cdot \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)} \dots\dots\dots \text{III.15}$$

Avec :

X_1 : est la capacité maximum du réservoir de production en (mm).

S_k : le contenu du réservoir de production au début du jour k.

Dans le cas contraire, lorsque E_n est différent de zéro, une quantité d'évaporation E_s est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S_k \cdot \left(2 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)} \dots\dots\dots \text{III.16}$$

Le contenu du réservoir qui résulte de ces opérations est donnée par :

$$S' = S_k + P_s - E_s \dots\dots\dots \text{III.17}$$

➤ **Percolation :**

Une percolation P_{erc} issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$P_{\text{erc}} = S' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S'}{9 X_1} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \dots\dots\dots \text{III.18}$$

Par suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - P_{\text{erc}} \dots\dots\dots \text{III.19}$$

Et la quantité d'eau P_r qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$P_r = P_{\text{erc}} + (P_n - P_s) \dots\dots\dots \text{III.20}$$

➤ **Hydrogramme unitaires :**

P_r est divisé en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire **HU1** et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique **HU2**. **HU1** et **HU2** dépendent du même paramètre X_4 , temps de base de **HU1** exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement **SH1** et **SH2**, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. **SH1** est définie en fonction du temps par :

$$\begin{aligned} \text{Pour } t \leq 0, & \quad SH1(t) = 0 \\ \text{Pour } 0 < t < X_4, & \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{5/2} \\ \text{Pour } t \geq X_4, & \quad SH1(t) = 1 \end{aligned}$$

SH2 est définie de façon similaire par :

Pour $t \leq 0$, $SH2(t) = 0$

Pour $0 < t \leq X_4$, $SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4} \right)^{5/2}$

Pour $X_4 < t < 2.X_4$, $SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4} \right)^{5/2}$

Pour $t \geq 2.X_4$, $SH2(t) = 1$

Les ordonnées de **HU1** et **HU2** sont alors calculées par :

$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1)$III.21

$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1)$III.22

Où « j » est un entier.

A chaque pas de temps k, les sorties **Q9** et **Q1** des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$Q9(k) = 0.9. \sum_{j=1}^l UH1(j). P_r(k - j + 1)$III.23

$Q1(k) = 0.1. \sum_{j=1}^l UH2(j). P_r(k - j + 1)$III.24

Où :

$l = \text{int}(X_4) + 1$ Et $m = \text{int}(2.X_4) + 1$, avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

➤ **Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique :**

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$F = X_2. \left(\frac{R_k}{X_3} \right)^{7/2}$ III.25

où R_k est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

➤ **Réservoir de routage :**

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie **Q9** de l'hydrogramme **HU1** et **F**:

$R' = \max(0; R_k + Q9(k) + F)$

Il se vidange ensuite en une sortie **Qr** donnée par :

$Q_r = R' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\}$ III.26

Le niveau dans le réservoir devient :

$R_{k+1} = R' - Q_r$

➤ **Ecoulement total :**

La sortie **Q1** de l'hydrogramme **HU2** est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement **Qd**:

$Q_d = \max(0; Q1(k) + F)$

Le débit total Q est alors donnée par :

$$Q_k = Q_r + Q_d$$

III.11. Applications des modèles GR :

Les modèles présentés précédemment peuvent être utilisés pour un certain nombre d'application d'ingénierie ou de gestion de l'eau. Á titre d'exemples, on peut citer :

❖ **La reconstitution ou l'extension des séries de débit** : après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées.

❖ **La prédétermination** : les séries de débit observé étant souvent courtes, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit. On peut pour cela soit utiliser des séries de pluie observées si elles sont suffisamment longues, soit utiliser un générateur aléatoire de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observées).

❖ **La prévision à court terme (quelques heures à quelques jours)** : elle est particulièrement utile pour les événements des crues. Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions. Les travaux de Tangara (2005) ont par exemple permis de mettre au point un modèle continu (GR3M) Dérivant du modèle GR4J et spécifiquement adapté à l'exercice de prévision à court terme ; voir également les travaux réalisés en mode événementiel avec le modèle GR3H.

❖ **La prévision à moyen ou long terme (de quelques semaines à quelques mois)** : elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie.

❖ **La détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant** : l'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant. [1]

❖ **La gestion ou le dimensionnement d'ouvrages** : grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien le modèle a été testé sur plusieurs pays et a montré de bons résultats en comparaison avec d'autres modèles pluie-débit. [29]

❖ **L'application du modèle sur des bassins non jaugés**, c'est-à-dire des bassins où les données nécessaires pour le calage numérique des paramètres ne sont pas disponibles.

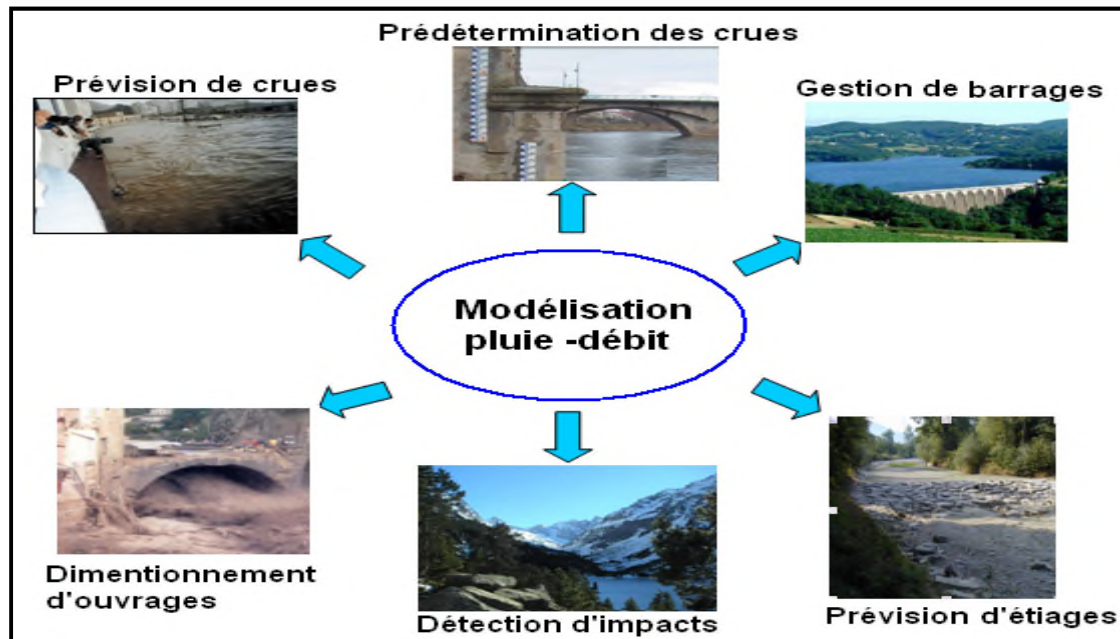


Figure III.6 : Les différentes applications de la modélisation GR (Perrin, 2000).

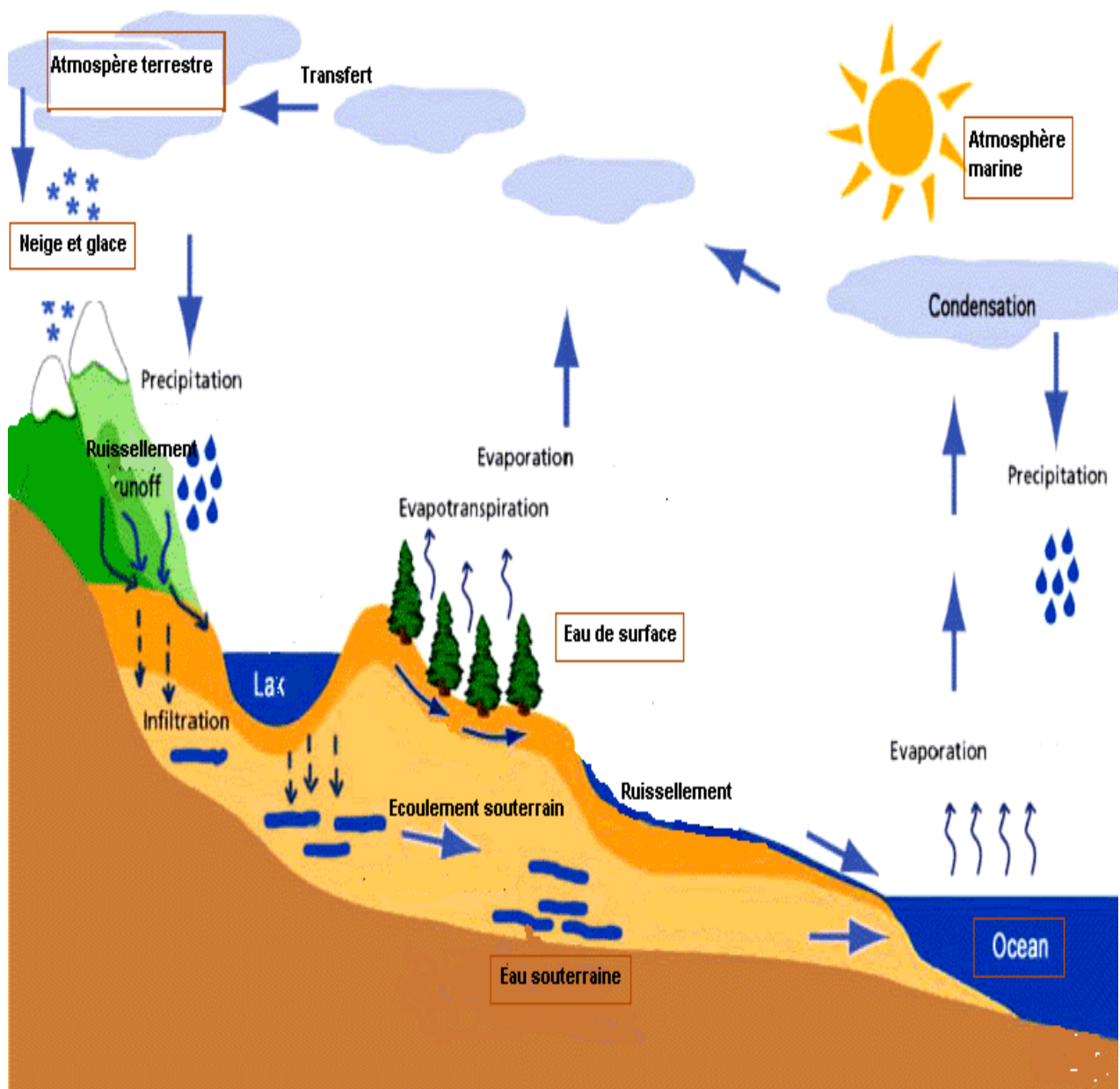
III.12. Conclusion :

Grâce aux progrès importants réalisés dans le domaine de l'informatique et des Systèmes d'Informations Géographiques les modèles hydrologiques et en particulier distribués utilisent une description de plus en plus complète du bassin versant et des termes du cycle hydrologique.

Cependant, du fait du grand nombre de paramètres qui interviennent dans les processus hydrologiques et la complexité de ces bassins, cette approche pointue n'apporte pas forcément des résultats meilleurs. C'est pourquoi nous avons choisi un modèle hydrologique global, comportant peu de paramètres et pouvant rendre compte du comportement hydrologique du bassin. Les modèles du CEMAGREF, GR2M est été retenus.

L'objectif est de déterminer les paramètres caractéristiques de ce modèle pour un bassin versant étudié.

Chapitre IV : Evapotranspiration



Evapotranspiration

IV.1. Introduction :

Les phénomènes de transfert d'eau à la surface de la terre sont dus à des processus énergétiques conditionnés par les paramètres climatiques.

La réserve en eau du sol évolue en fonction de nombreux processus interdépendants (infiltration, drainage, évaporation, transpiration,...) dont l'étude est en général assez complexe. Les processus d'écoulement de l'eau du sol peuvent être résumés en une équation globale appelée "bilan hydrique" au champ. Ce bilan est établi en faisant la somme de tous les flux d'eau entrant et sortant du sol, directement ou par l'intermédiaire des cultures.

IV.2. Evapotranspiration :

L'évapotranspiration est un phénomène extrêmement complexe, faisant intervenir des paramètres aérodynamiques, énergétiques et biologiques. On désigne sous le nom d'évaporation une perte en eau subie par les surfaces d'eau libres. [10]

Ainsi, parmi les termes du cycle de l'eau, c'est sans doute le plus difficile à quantifier.

A l'échelle qui nous intéresse, celle du bassin versant, ce phénomène n'est pas directement mesurable et il est donc souvent représenté de manière simplifiée dans les modèles hydrologiques, notamment dans les modèles pluie-débit. Une variable intermédiaire y est utilisée, l'évapotranspiration potentielle. [12]

Elle résulte de deux phénomènes l'un est physique (évaporation) l'autre biologique (transpiration).

L'air ambiant n'est jamais sec mais contient une part plus ou moins importante d'eau sous forme gazeuse de par :

- **L'évaporation physique** au-dessus des surfaces d'eau libre, des sols dépourvus de végétation et des surfaces couvertes par de la neige ou de la glace.
- **La transpiration des végétaux** (évaporation physiologique) qui permet à la vapeur d'eau des échapper des plantes vers l'atmosphère.

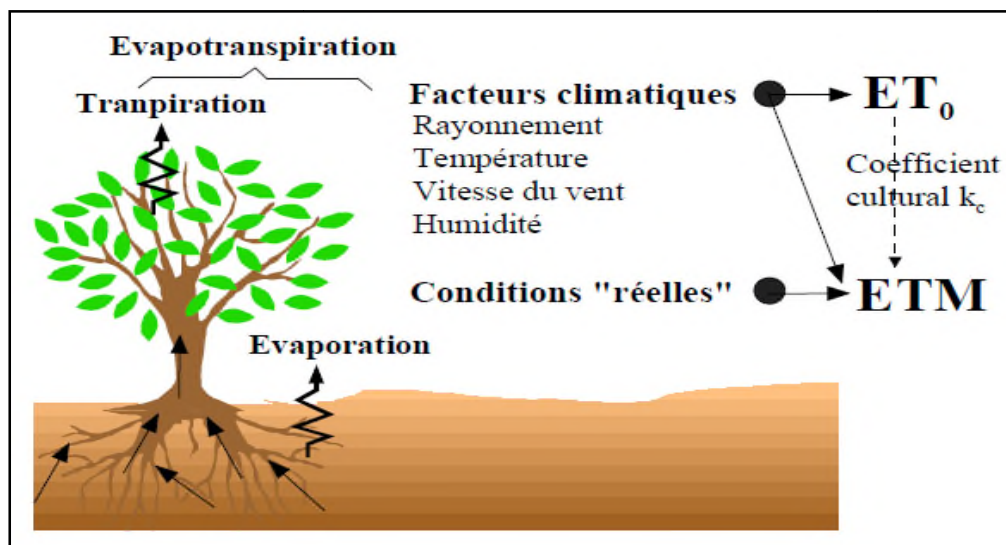


Figure IV.1 : Phénomène de l'évapotranspiration.

IV.2.1. L'évaporation :

Est l'ensemble des phénomènes de transformation de l'eau en vapeur par un processus spécifiquement physique. Elle peut être réelle si la surface évaporant est existante (lacs, mers, sols, etc.). Comme elle peut être potentielle si la surface est imaginaire.

L'évaporation dépend essentiellement de deux facteurs associés à :

+ Des facteurs météorologiques :

- La quantité de chaleur à disposition.
- Température de l'air et de l'eau.
- Humidité relative et spécifique de l'air.
- Pression atmosphérique, Vent.

+ Des facteurs physiques liés aux surfaces évaporantes :

- Evaporation à partir des surfaces d'eau libre (salinité, température, profondeur, étendue).
- Evaporation à partir d'un sol nu (teneur en eau du sol, capillarité, couleur du sol, etc).
- Evaporation de la neige (densité, type, etc.).

IV.2.2. La transpiration :

Est le phénomène physiologique de la transformation de l'eau en vapeur par les être vivants et notamment les végétaux.

La transpiration végétale est un phénomène passif, car l'émission interne de vapeur d'eau n'est pas produite par un processus physiologique interne mais elle est due à l'énergie solaire. La transpiration végétale assure un refroidissement au niveau des feuilles des plantes.[44].

La transpiration est influencée par :

- ✓ Facteurs climatiques.
- ✓ Nature, âge et développement du feuillage de la plante.
- ✓ Humidité du sol.

Les phénomènes d'évaporation et de transpiration ont besoin d'énergie pour réaliser le changement de phase de l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur. Cette source d'énergie est le soleil. [15]

IV.3. Différents types de l'évapotranspiration :**IV.3.1. Evapotranspiration potentielle ou évapotranspiration de référence:**

L'évapotranspiration potentielle (notée ETP ou ETo) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant. [10]

(ET₀) terme aujourd'hui recommandé pour désigner l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface généralement recouverte de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau. [15]

IV.3.2. Evapotranspiration réelle :

On appelle évapotranspiration réelle (notée ETR), la quantité d'eau évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant.

L'ETR se mesure généralement en (mm) de hauteur d'eau à une unité de temps choisie (par jour, par décade, par mois). L'ETR est calculée par la formule suivante de TURC qui fait intervenir que les précipitations et la température :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \dots\dots\dots IV.1$$

Où :

ETR : évapotranspiration réelle annuelle en (mm) ;

P : précipitations moyennes annuelles en (mm) ;

T : température moyenne annuelle en (°C).

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

IV.3.3. Evapotranspiration maximale (ETM) :

Elle représente l'évapotranspiration réelle maximum d'une parcelle cultivée dans les meilleures conditions possibles et bien alimentée en eau (Ducroque, 1990).

Le niveau d'évapotranspiration correspond, au rendement maximal .Il existe une relation entre l'ETM et l'ETP de forme :

$$ETM = K_c \cdot ETP \dots\dots\dots IV.2$$

Sachant que :

K_c : coefficient cultural, est une donnée par période végétative. [13]

IV.4. Les facteurs fondamentaux de l'évapotranspiration :

Les facteurs qui conditionnent le taux d'évaporation généralement exprimé en mm par jour, par mois, par an,...) peuvent être groupés en deux catégories bien distinctes suivant q' ils sont propres à l'atmosphère ambiante ou à la surface évaporante elle-même :

- Les paramètres caractérisant l'état de l'atmosphère au voisinage de la surface évaporante et son aptitude à provoquer l'évaporation ; ces paramètres régissent le pouvoir évaporant de l'atmosphère (évapotranspiration potentielle).
- Les paramètres caractérisant la nature et l'état de la surface évaporante (surface d'eau libre, neige, glace, sol nu, végétation) ainsi que son aptitude à alimenter l'évaporation et à répondre plus ou moins rapidement aux variations du pouvoir évaporant de l'atmosphère.

Les principaux facteurs du pouvoir évaporant sont :

- ✓ Le déficit hygrométrique ou déficit de saturation de l'atmosphère.
- ✓ La température de l'air.
- ✓ L'insolation.

- ✓ La vitesse et la turbulence du vent. [7]

IV.5. Les formules de l'ETP :

Ces formules sont obtenues sur la base des expériences faites dans les régions à caractère climatique différent :

- Formule de Blany Criddele.
- Formule de Thornthwaite.
- Formule de Turc.
- Formule de Penman.
- Formule de Penman- Monteith.
- Formule de l'ANRH, etc...

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle nous avons utilisées la formule dite ANRH (2002).

IV.5.1. Formule dite ANRH(2002) :

C'est une formule calée sur le modèle de Penman et écrite sous forme simplifiée pour l'adapter à la formule de Blaney et Criddele, elle est développée sous la direction du Professeur

J.P. Laborde, (ANRH-GTZ, 2003) et elle permet d'évaluer l'évapotranspiration selon la référence Penman à partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante, L'équation générale s'écrit sous de la forme suivante [1]:

$$ETP_{ANRH} = K_r K_m (H - 187)(0.032t + 0.077) \dots\dots\dots IV.3$$

Avec :

ETP_{ANRH} : Evapotranspiration potentielle (mm/mois).

K_m : Coefficient mensuel, ses valeurs sont données à la figure IV.2.

K_r : Coefficient régional qu'on peut lire sur le tableau IV.1.

t : température moyenne mensuelle pour le mois considéré (°C).

H : Durée théorique mensuelle d'insolation du mois i (heures/mois) et elle est exprimée en fonction de l'ordonnée (Y) de Lambert selon la formule suivante :

$$H_i = a_i Y + b_i \dots\dots\dots IV.4$$

Avec:

Y: l'ordonnée de Lambert de la zone (Km), l'altitude. Y=359.10 km

a_i, b_i: des coefficients donnés dans le tableau IV.2.

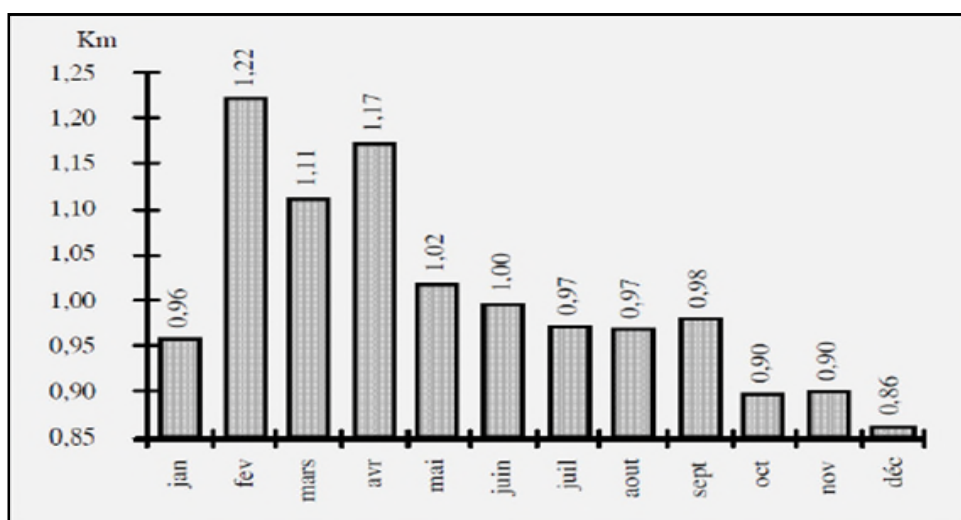


Figure IV.2 : Evolution du coefficient correctif mensuel.

Tableau IV.1 : Coefficients correctifs régionaux (Kr).

Station	Kr	Nom	Kr	Nom	Kr
Ain safra	1.21	Dellysafir	0.87	Mostaganame	0.87
Annaba	0.91	Djelfa	1.10	Msila	1.12
Arzew	0.97	El Kheiter	1.15	Naàma	1.11
Barika	1.24	El-Bayad	1.23	Oran	0.99
Batna	1.12	El Milia	0.79	Oum ElBouaghi	0.92
B. Barreridj	1.07	Ghazaouet	0.81	Saida	1.01
Béchar	1.32	Guelma	0.83	Sétif	1.04
Bejaia	0.92	Jijel Aer	0.79	SidiBel Abbès	0.94
BeniSaf	0.88	Jijel Port	0.79	Skikda	0.86
Biskra	1.26	Ksar Chellala	1.09	Souk ahras	0.99
Bou Saada	1.10	Maghnia	0.93	Tebassa	1.00
Bouira	1.04	Mascara	0.95	Tenes	0.95
Chlef	0.93	Mecheria	1.14	Tiaret	1.08
Constantine	0.91	Medea	1.05	TiziOuzou	0.83
DarElbeida	0.89	Miliana	0.97	Tlemcen Zen	0.93

Tableau IV.2: Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ANRH.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ai	-0.022	-0.01	-0.001	0.01	0.02	0.025	0.02	0.014	0.003	-0.008	-0.019	-0.025
Bi	315	307	371	389	429	429	436	414	370	351	311	308

IV.6. Conclusion :

A l'origine, l'ETP était mesurée dans la plupart des cas à l'aide de bacs et évaporomètres. Ces derniers instruments colossaux et coûteux n'estiment que l'ETP sur une surface restreinte et artificielle et il faut passer de ces données locales à une ETP régionale. C'est pourquoi de nombreuses formules ont été établies pour calculer l'ETP à partir des quatre éléments fondamentaux: température, déficit de saturation, vent et radiation globale qui régissent ce phénomène. Mais ces quatre éléments diffèrent dans leur pouvoir évaporant; de plus, ils ne sont pas tous mesurés dans toutes les stations quelque que soit leur classe.

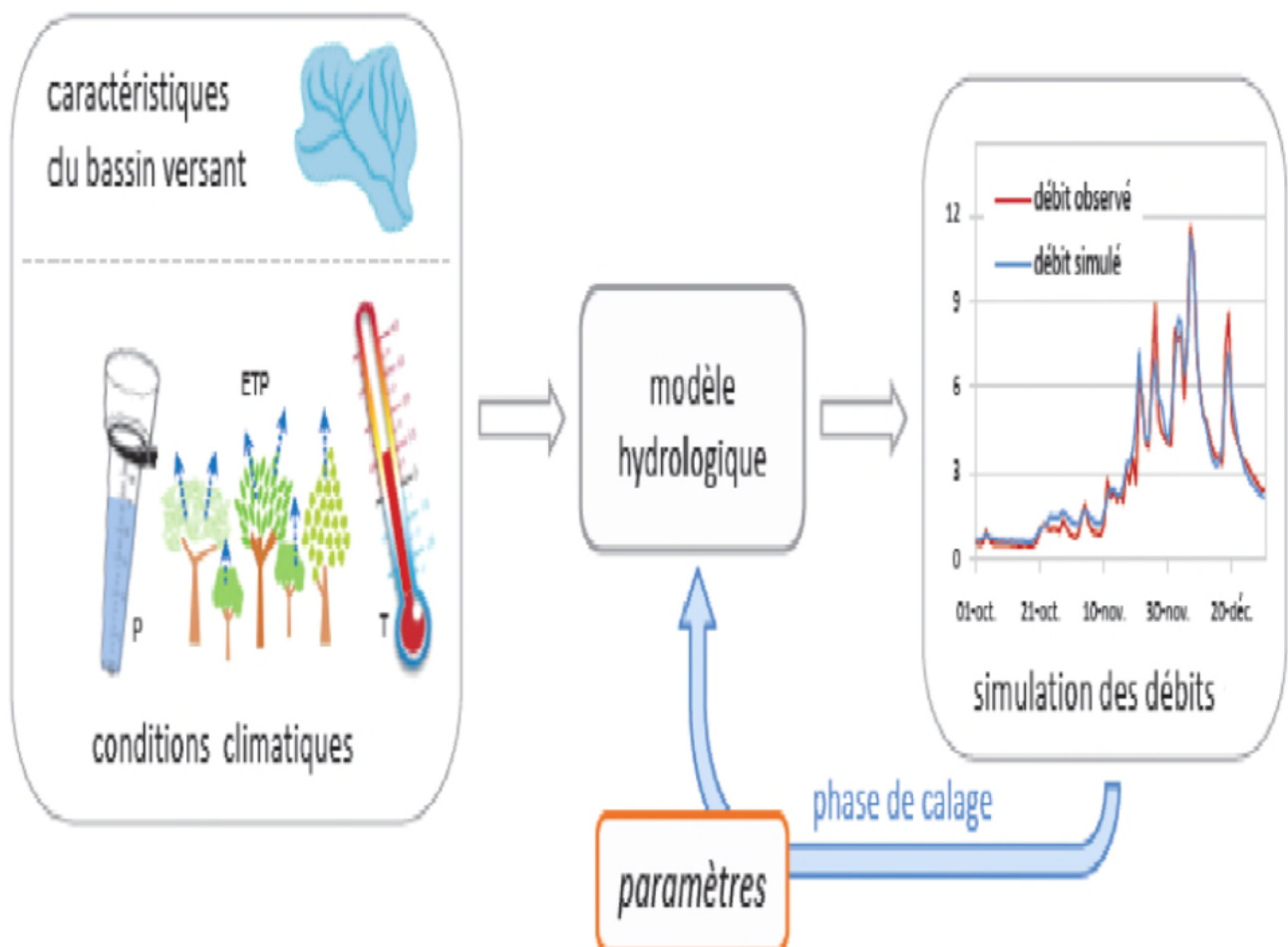
Ces problèmes de disponibilité de données ont orienté de nombreux auteurs vers la recherche d'une formule convenable, plus ou moins complexe, qui peut servir à estimer avec les moindres erreurs, l'évapotranspiration potentielle, à partir d'un ou de plusieurs paramètres climatiques qui régissent en priorité ce phénomène. Cependant la justesse de ces formules dépend en grande partie du nombre de facteurs climatiques qu'elles intègrent.

Alors on l'estimation de l'évapotranspiration d'une manière générale dans le bassin de l'Oued Bouhamdane en cas de disponibilité de données climatiques (température, humidité relative, vitesse du vent et durée d'insolation) la formule de l'ANRH est la plus convenable.

Chapitre V :

Données nécessaires au Modèle GR

et paramètres de validation



Données nécessaires au modèle GR et paramètres de validation

V.1. Introduction:

Notre étude s'inscrit dans le domaine de la modélisation de la transformation de la pluie en débit et de sa représentation à l'échelle du bassin versant de Bouhamdane (Les caractéristiques hydrologiques du bassin sont présentées dans la première partie).

Les objectifs visés par cette étude peuvent être résumés dans ce qui suit :

- Etudier l'influence de l'ETP sur les performances du modèle mensuel de simulation des débits, celui du Génie Rural (GR).
- Tester le modèle pluie-débit au pas de temps mensuel. (Évaluation de la capacité de modèle à reproduire les débits observés à pas de temps).
- Vérifier l'influence de la durée de calage sur les performances du modèle.

Il s'agit donc d'étudier le fonctionnement du bassin versant, en réponse à des forçages météorologiques et hydrologiques, par des modèles à réservoirs, qui ont majoritairement été conçus pour avoir un minimum d'exigence en données suffisamment longues pour mieux représenter les différents processus hydrologiques intervenants dans la modélisation pluie-débit.

V.2. Description de l'échantillon de données utilisé pour tester les modèles pluie-débit (les entrées) :

V.2.1. Les précipitations (P) :

Les données de précipitations disponibles sur une seule station : la station du barrage (station de Medjez Ammar) ont été recueillies respectivement au niveau de l'Agence Nationale des Barrage et des transfères (ANBT) et par l'Office National Météorologique (ONM).

V.2.2. L'évapotranspiration (ETP) :

Représente une donnée climatique importante pour caractériser l'état du sol, elle est calculée à partir de la formule de l'ANRH qui utilise seulement ces données de températures.

V.2.3. Les débits (Q) :

Le débit à l'exutoire représente la réponse d'un bassin à un ensemble complexe de plusieurs processus hydrométéorologiques et hydrologiques.

Nous avons une série des données mensuelles de pluie, de débits observées et d'ETP calculés par la formule précédemment citées pour l'utilisation du modèles GR2M sur vingt et un ans (de 1990 à 2011), cependant l'ETP est considérée comme étant cyclique. Des séries concomitantes de débit sont nécessaires pour le calage et l'évaluation du modèle.[4]

Dans la suite, on désignera par **P** (mm) la pluie, par **E** (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP) et par **Q**(mm) le débit simulé (mm). **P** est une estimation de la pluie de bassin, calculée à partir de l'information pluviométrique disponible (postes au sol notamment). Toutes les variables internes des modèles sont exprimées en mm.

V.3. Le calage des modèles hydrologiques:

Le calage est une des étapes fondamentales dans la démarche de modélisation hydrologique. Elle consiste à rechercher les valeurs optimales des paramètres des différentes équations (régissant l'écoulement) utilisées dans le modèle hydrologique.

Le calage a pour but :

- De compenser les erreurs de mesures de données fournies aux modèles.
- Forcer les paramètres vers de valeurs dont l'interprétation ne correspond pas à la physique du modèle.
- Trouver une valeur moyenne pour un paramètre descripteur d'un bassin versant dont la variabilité spatiale n'est pas appréhendée par le modèle.

Pour caler un modèle, il faut choisir une série de référence (pluies-débits) et fixer un critère d'évaluation pour l'ajustement des simulations des modèles aux données de calage pour un jeu de paramètres donnés.

On peut procéder au calage de modèle par trois méthodes :

➤ Calage manuel :

Cette méthode consiste à donner des valeurs aux paramètres du modèle et évaluer manuellement l'erreur entre les valeurs de sortie et les valeurs observées et l'échantillon de référence pour faciliter cette opération on a une représentation graphique.

➤ Calage automatique :

Ce calage optimise automatiquement les paramètres de modèle par l'utilisation d'un algorithme numérique pour trouver un extremum d'un critère numérique donné afin de déterminer l'ensemble des paramètres qui satisferont un critère donné de précision à travers différentes combinaisons possibles (Kingumbi, 2006).

➤ Calage mixte :

Le calage mixte consiste à combiner les deux méthodes précédentes. On détermine manuellement l'intervalle de variation des paramètres, puis on utilise la méthode automatique pour trouver les valeurs de paramètres optimales. [10]

V.4. La Validation du modèle :

Il est essentiel de distinguer parmi les données disponibles deux périodes d'égale importance, dont l'une servira au calage du modèle et l'autre au contrôle (validation) sur des données étrangères au calage. [30]

V.4.1. Les procédures de validation :

Avant tout modèle peut être utilisé avec confiance, validation adéquate ou l'évaluation de l'ampleur des erreurs qui peuvent résulter de leur utilisation doit être effectuée. La validation du modèle, dans sa forme la plus simple, est une comparaison entre les valeurs simulées et observées. Elle se fait par des critères de validation, ils permettent de juger de la qualité des modèles. [4]

V.4.2. Les critères de validation des modèles conceptuels :

Il existe deux types de critères: Les critères graphiques et les critères numériques.
[1]

V.4.2.1. Les critères graphiques :

Quelque soit le modèle, ou le pas de temps utilisé, l'analyse graphique est indispensable et primordiale, pour juger de la qualité du modèle, cela est obtenu en ajustant graphiquement les courbes des débits observés avec celles des débits calculés (simulés) par le modèle. [30].

V.4.2.2. Les critères numériques:

Ils donnent une information quantitative sur les résultats de la modélisation, cela est réalisé par une estimation globale et numérique de l'écart entre les résultats calculés et les données observées sur la période de calage.

V.4.2.2.1. Critère de Nash:

Le critère de calage retenu ici pour l'optimisation des paramètres par la méthode pas à pas est le critère de Nash [31], calculé sur les débits par :

$$NASH = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})^2} \right) \dots\dots\dots V.1$$

Où :

Q_{obs} : débits observés.

Q_{sim} : les débits simulés.

$\overline{Q_{obs}}$: est la moyenne arithmétique des Débits observés sur la période de calage.

n : le nombre de pas de temps considérés.

Le critère de Nash peut être interprété comme étant la proportion du débit observé expliqué par le modèle. Si Nash = 100%, l'ajustement est parfait, par contre si Nash < 0, le débit simulé par le modèle est une plus mauvaise estimation que le simple débit moyen.[32]

Tableau V.1 : Qualité des modèles en fonction des valeurs du critère de NASH.

NASH (%)	Qualité
NASH<70	Très insuffisant
70<NASH<80	Insuffisant
80<NASH<85	Médiocre
85<NASH<90	Correct
90<NASH<95	Bon
NASH>95	Très bon

V.4.2.2.2. La moyenne (Moy) :

La moyenne est l'indicateur le plus simple pour résumer l'information fournie par un ensemble de données statistique : elle est égale à la somme de ces valeurs

numériques des débits divisée par leur nombre. Elle peut donc être calculée en ne connaissant que ces deux éléments, sans connaître toute la distribution.

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \dots\dots\dots V.2$$

V.4.2.2.3. L'écart type :

L'écart type sert à mesurer la dispersion, ou l'étalement, d'un ensemble de valeurs surtout de leur moyenne. C'est la racine carrée de la variance.

La variance est une mesure servant à caractériser la dispersion d'une distribution et d'un échantillon, c'est la moyenne des carrées des écarts à la moyenne.

Donc :

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^2 - \bar{Q}^2) \dots\dots\dots V.3$$

Sachant que :

$$\sigma = \sqrt{\delta} \dots\dots\dots V.4$$

Avec :

σ : L'écart type.

δ : Variance.

Plus l'écart type est faible, plus la population est homogène.

V.4.2.2.4. Le coefficient de variation :

Le coefficient de variation également nommé écart type relatif, est une mesure de dispersion relative. Le coefficient de variation est défini comme le rapport entre l'écart type σ et la moyenne $\bar{P}$:

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{P}} \dots\dots\dots V.5$$

V.4.2.2.5. Le coefficient de détermination R^2 :

Le coefficient de détermination (R^2) est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire, simple ou multiple. D'une valeur comprise entre 0 et 1, (Benahmed, 2012), il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées. Certes, le R^2 à ses imperfections, mais son utilisation n'a d'égal que sa simplification. Dans le cadre d'une régression linéaire simple, c'est le carré du coefficient de corrélation, il estime la distribution entre les valeurs simulées (Q_{sim}) et observées (Q_{obs}). Un R^2 proche de 1 est suffisant pour dire que l'ajustement est bon.

Il est important de préciser que si on souhaite faire des prévisions, il est souhaité que la valeur du coefficient de détermination soit élevée. Car plus la valeur de R^2 est élevée. Plus celle de la variation inexpliquée est petite.

$R^2=0$: pas de corrélation ; $R^2=1$: corrélation parfaite.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{i\ obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{i\ sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i\ obs} - \overline{Q_{i\ obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i\ sim} - \overline{Q_{i\ sim}})^2}} \right)^2 \dots\dots\dots V.6$$

V.4.2.2.6. L'erreur absolue moyenne (MAE : Mean Absolute Error) :

Cet indice mesure la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts induits en comparant les valeurs calculées par le modèle et les valeurs de base observées.

Il est définie par:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{sim} - Q_{obs}| \dots\dots\dots V.7$$

Avec:

Qsim : Débit simulé par le modèle.

Qobs : Débit observé pendant la période de calage.

n: Nombre de données durant la période de comparaison.

L'optimisation du modèle est obtenue en minimisant les valeurs du **MAE**.

V.4.2.2.7. La racine de la moyenne des erreurs quadratique notée RMSE :

La **RMSE** est un meilleur indicateur de la performance des modèles parce qu'il reflète la moyenne des écarts entre l'observé et le simulé. [33]

Il est donné par:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{n}} \dots\dots\dots V.8$$

Avec:

Qobs: Débit observé pendant la période de calage.

Qsim: Débit Simulé (calculé par le modèle).

n: Nombre de données durant la période de comparaison.

Le modèle est optimisé si la valeur du **RMSE** est proche de zéro.

MAE et **RMSE** indiquent l'ampleur de l'erreur moyenne, mais ne fournissent aucune information sur la taille relative de la différence moyenne entre (**Qsim**) et (**Qobs**).

V.4.2.2.8. L'indice de Willmott :

Cet indice est défini mathématiquement par la relation suivante:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (|Q_{sim} - \overline{Q_{obs}}| + |Q_{obs} - \overline{Q_{obs}}|)^2} \dots\dots\dots V.9$$

Bien que (**d**) est destiné à être utilisé principalement pour déterminer la supériorité relative des modèles alternatifs, il peut être évalué comme un paramètre descriptif de la performance du modèle. Plus (**d**) s'approche de 1, plus la précision du modèle.

Bien que les mesures sommaires décrivent la qualité de la simulation, des mesures de différence essaient de localiser et quantifier les erreurs. Celui-ci comprend implicitement l'erreur moyenne absolue (**MAE**). [34] [35] [36]

V.4.2.2.9. L'indice de Willmott raffiné:

C'est une amélioration de **d** (originellement introduit), il est défini par (Willmott et al, 2012) selon la relation suivante [37] :

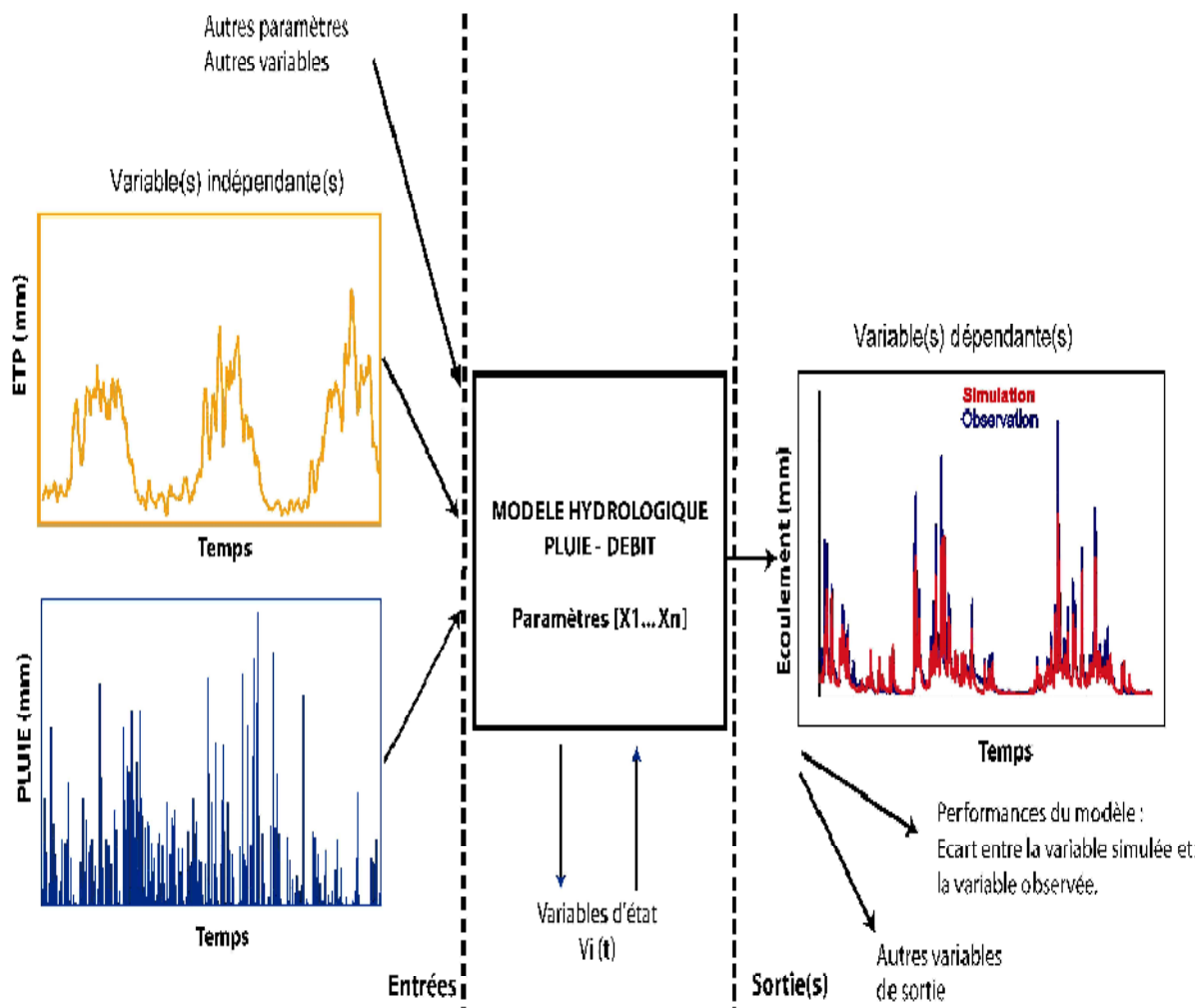
$$d(r) = 1 - \frac{\sum |Q_{sim} - Q_{obs}|}{2 \sum |Q_{obs} - \overline{Q_{obs}}|} \dots\dots\dots V.10$$

V.5. Conclusion:

Dans cette section, les critères de qualité ou les indices de performances sont rappelés par leurs définitions littéraires et éclaircis par leurs formulations mathématiques. Tous ces critères et indices servent à déceler le meilleur modèle à retenir dans une procédure de modélisation qui vise en finalité des simulations basées sur le choix approprié.

Chapitre VI :

La modélisation pluie-débit par GR2M



La modélisation pluie-débit par GR2M

VI.1. Introduction :

Pour une meilleure gestion des ressources en eau et des quantités d'eau disponible, il est nécessaire de transformer les données pluviométriques en données hydrométriques. D'où l'intérêt de la modélisation pluie-débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité.

En hydrologie, la simulation de la transformation de la pluie en débit dans les rivières constitue un axe de recherche dynamique. Dans notre cas, nous avons utilisés le modèle GR2M (Génie Rural à 2 paramètres mensuel).

La version que nous avons retenue est la version Excel disponible dans le site du CEMAGREF.

Le principe de calcul : On respecte la durée de l'année hydrologique (Septembre-Aout), La période de mise en route est toujours une année (initialisation des réservoirs). On utilise les données de la station de Medjez Ammar, On prend les ETP calculés par la formule de l'ANRH.

VI.2. Opérations de calages:

Pour mieux illustrer la qualité de simulation des modèles, nous présentons les résultats observés durant les périodes de calage et de validation, et cela pour mieux analyser la robustesse des modèles ainsi que leur pouvoir prédictif, et ce avec plusieurs périodes de calage (50%, 2/3 et 80%). [4]

VI.3. Variation mensuelle des pluies :

Les statistiques de base des pluies mesurées au niveau de la station de Medjaz Ammar, à savoir les moyennes arithmétiques, les écarts types, les coefficients de variation, les minimas et les maximas sont données par le tableau suivant :

Tableau VI.1: Caractéristiques statistiques de base des pluies mensuelles.

Paramètres	Formules	Valeurs (mm)
Moyenne	$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$	50.6
Variance	$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i^2 - \bar{P}^2)$	2594.31
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\delta}$	50.93
Coefficient de variation	$c_v = \frac{\sigma}{\bar{P}}$	1.0073
Max	-	278.6
Min	-	0

Le tracé de la pluie mensuelle interannuelle de la station de Medjaz Ammar met en évidence le caractère aléatoire de cette dernière, caractérisée par des piques (inondation) et des minimas (sécheresse), figure VI.1.

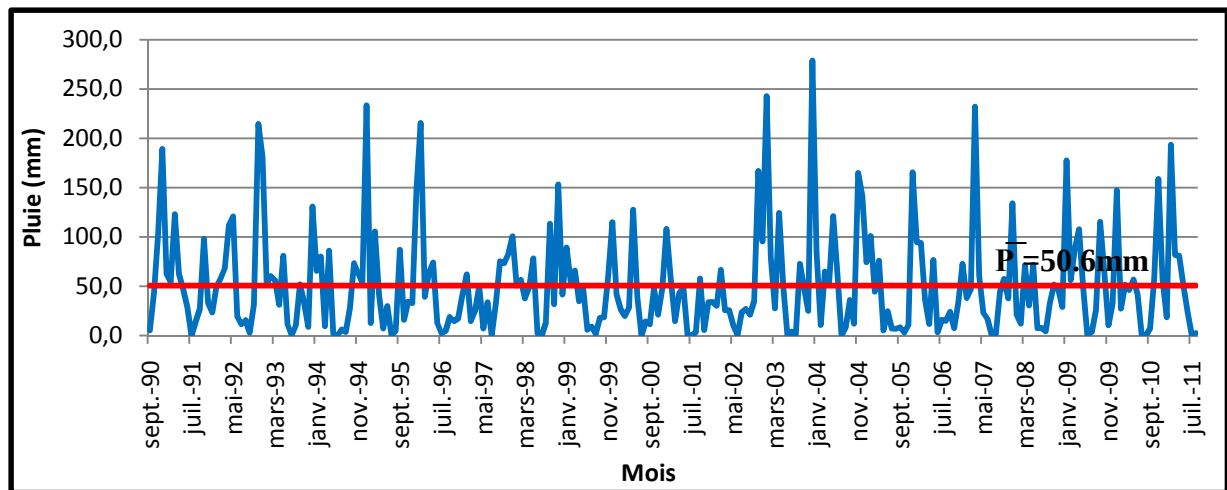


Figure VI.1: Variation mensuelle des pluies de la station Medjaz Ammar.

VI.4. Variation mensuelle des débits :

Les statistiques de base des débits en (mm) mesurées au niveau de la station de Medjaz Ammar, à savoir les moyennes arithmétiques, les écarts types, les coefficients de variation, les minimas et les maximas sont données par le tableau suivant :

Tableau VI.2: Caractéristiques statistiques de base des débits mensuels de la station de Medjaz Ammar.

Paramètres	Formules	Valeurs (mm)
Moyenne	$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$	7.47
Variance	$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^2 - \bar{Q}^2)$	335.78
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\delta}$	18.32
Coefficient de variation	$c_v = \frac{\sigma}{\bar{Q}}$	2.4610
Max	-	121.76
Min	-	0

Le tracé de l'apport mensuel de la station de Medjaz Ammar met en évidence le caractère aussi aléatoire de ce dernier, en concordance avec les pluies, caractérisé par des piques (crues) et des minimas (étiages), figure VI.2.

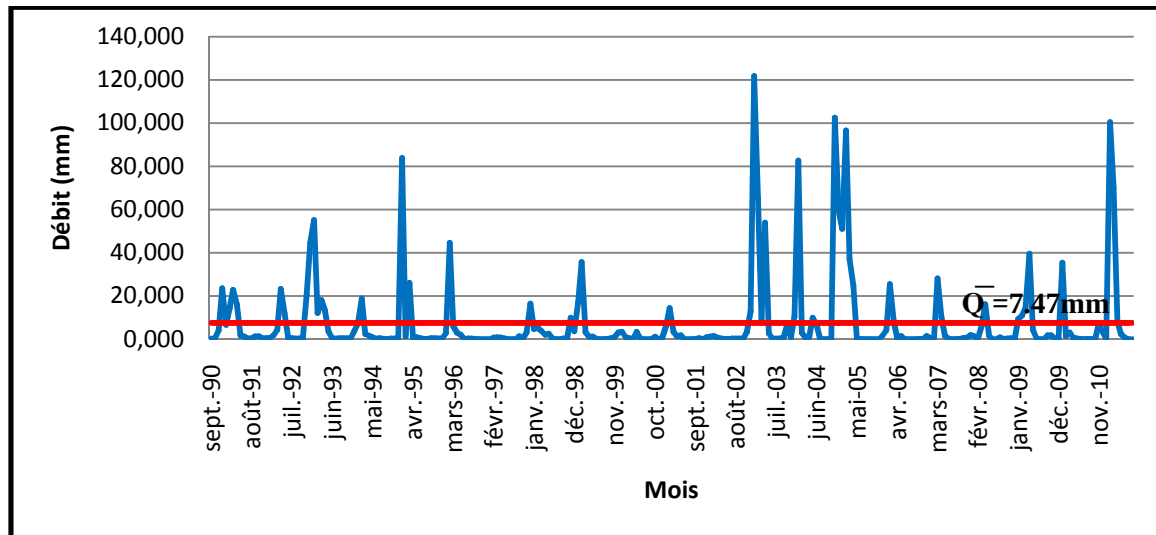


Figure VI.2 : Variation mensuelle des débits de la station de Medjaz Ammar.

VI.5. Variation mensuelle des évapotranspirations selon la formule dite ANRH :

Les statistiques de base des évapotranspirations, calculées selon la relation de l'ETP_{ANRH} au niveau de la station de Medjaz Ammar, à savoir les moyennes arithmétiques, les écarts types, les coefficients de variation, les minimas et les maximas sont données par le tableau VI.3.

Tableau VI.3: Caractéristiques statistiques de base des évapotranspirations mensuelles de la station de Medjaz Ammar.

Paramètres	Formules	Valeurs (mm)
Moyenne	$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$	112.98
Variance	$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i^2 - \bar{E}^2)$	4699,10
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\delta}$	68.55
Coefficient de variation	$c_v = \frac{\sigma}{\bar{E}}$	0.61
Max	-	221.92
Min	-	29.67

Le tracé de l'évapotranspiration mensuelle de la station de Medjaz Ammar met en évidence le caractère intermittent de cette dernière, figure VI.3.

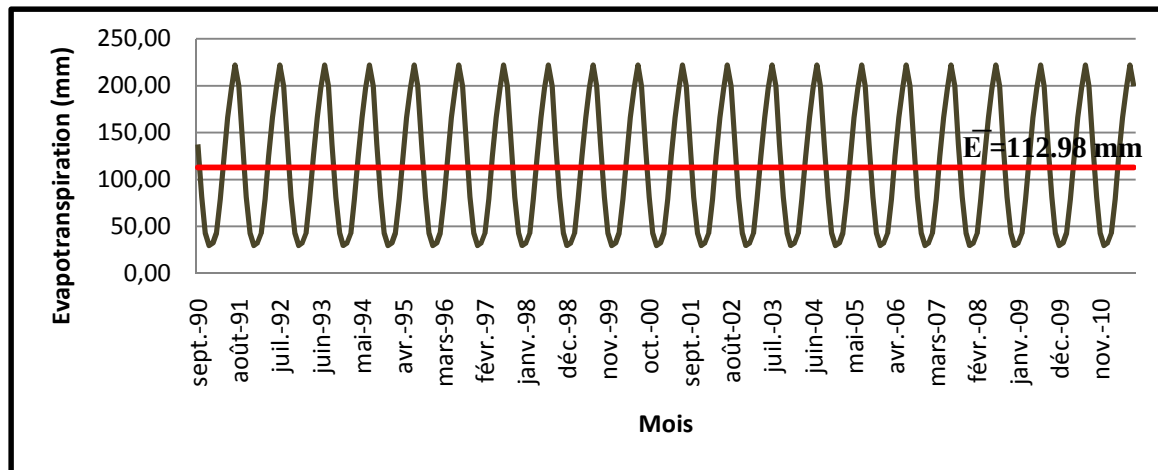


Figure VI.3: Variation mensuelle des évapotranspirations de station de Medjez Ammar.

VI.6. Modélisation au pas de temps mensuel (application modèle GR2M) :

Le modèle GR2M est un modèle conceptuel pluie-débit, à pas de temps mensuel et utilisant seulement deux paramètres à caler X_1 , X_2 . Pour prédire les variables de sortie sont les débits mensuels simulés nous avons utilisé les variables d'entrées sont les pluies, les débits et l'ETP relatives à la période 1990-2011.

Nous avons testé l'évapotranspiration (mensuelle) calculée par les méthodes de l'ANRH.

VI.7. Variantes liées aux périodes de calage et de validation :

Dans cette section d'étude, plusieurs variantes seront étudiées et analysées. Il s'agit du découpage de l'échantillon complet formé de 252 mois (du mois de septembre 1990 jusqu'au mois d'août 2011). Ce découpage sert à déterminer la phase de calage et la phase de validation correspondant à chacune des variantes à tester.

- En premier lieu, on cale le modèle par la première moitié et on le valide par la deuxième moitié.
- En deuxième lieu, on effectuera un calage par les 2/3 des valeurs de la série et on validera par les 1/3 restantes.
- En troisième lieu, on effectuera un calage par les 80% des valeurs de la série et on validera par les 20% restantes.

Résultats obtenus par la modélisation pluie-débit à l'aide du logiciel GR2M avec l'ETP de l'ANRH donne des résultats plus performants et représentatifs que celle par approche corrélative.

Un des objectifs de cette méthode est de pouvoir tracer directement sous Excel un graphique retraçant les débits simulés en fonction du temps (hydrogrammes) et les rapporter à ceux réellement mesurés à la sortie du réservoir S. Cela permet ainsi une bonne approche visuelle de la restitution des débits simulés par rapport aux observés.

CHAPITRE VI : LA MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR GR2M

Les résultats de la modélisation mensuelle par GR2M, en faisant varier les périodes de calage, sont consignés dans les tableaux suivants :

➤ 1ière 50% Calage et 2ème 50% Validation :

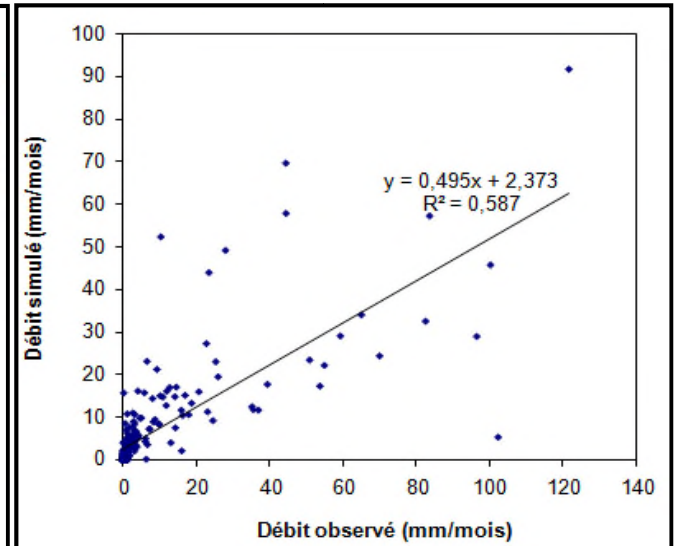
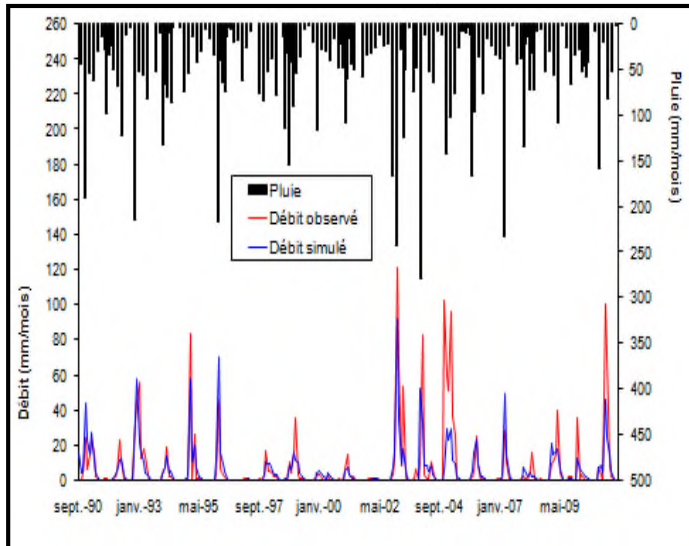


Figure VI.4: Modélisation par le modèle GR2M. **Figure VI.5:** Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

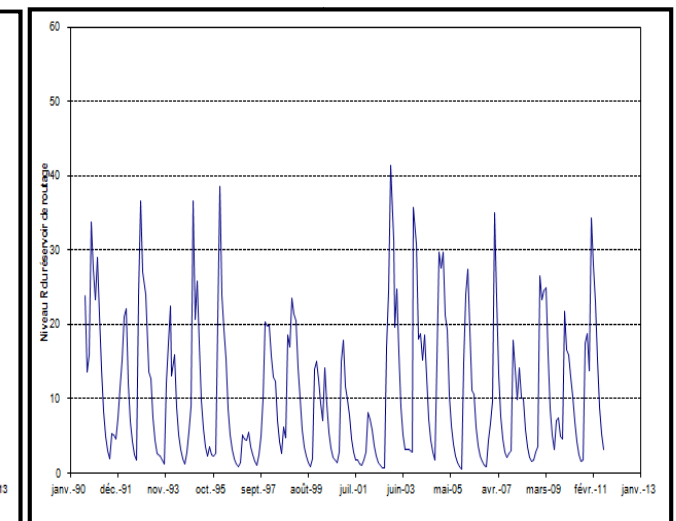
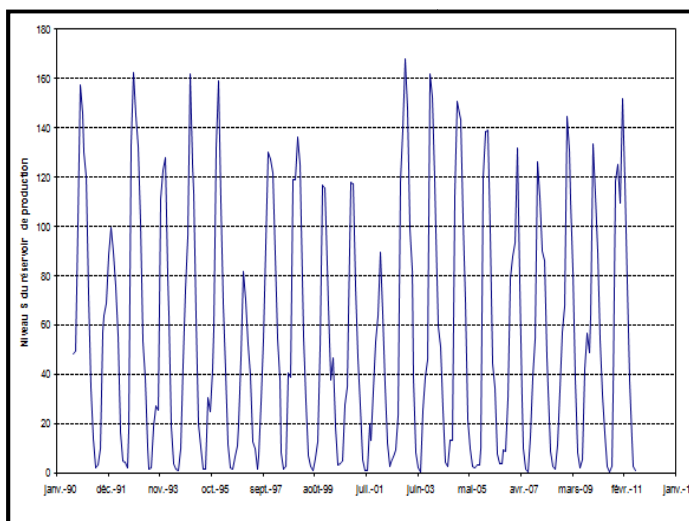


Figure VI.6: Courbe du niveau S du réservoir de production.

Figure VI.7: Courbe du niveau R du réservoir de routage.

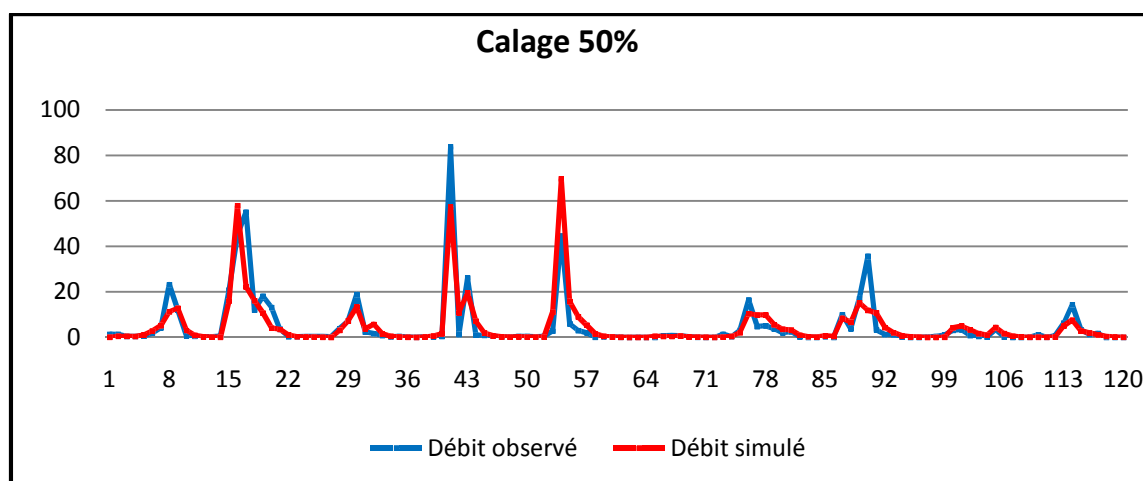


Figure VI.8 : Visualisation de la qualité de calage (période de calage de 120 mois).

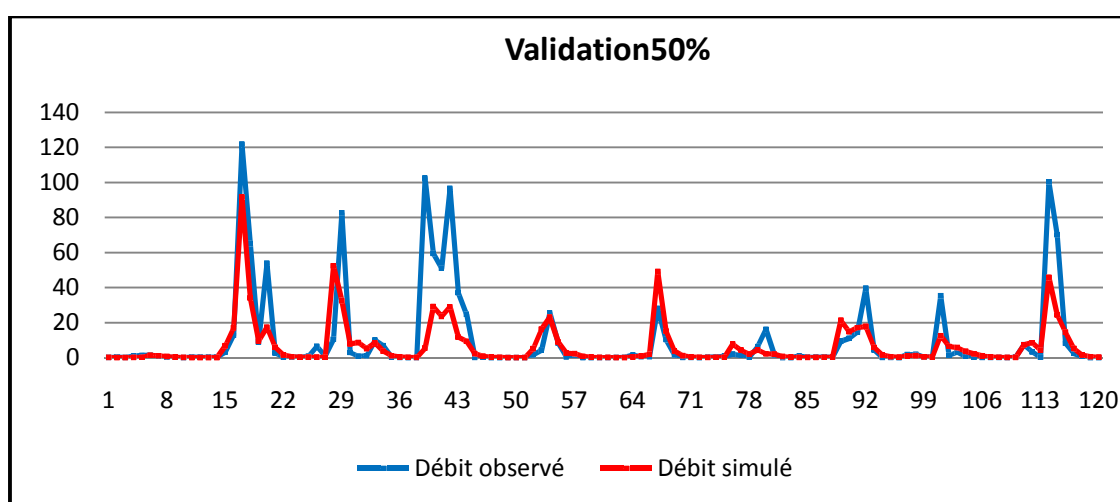


Figure VI.9 : Visualisation de la qualité de validation (période de validation de 120 mois).

Tableau VI.4: Résultats de la modélisation (période de calage de 120 mois).

Périodes	1ière 50% Calage et 2ème 50% Validation	
Critères de performance	calage	validation
Qmoy (mm)	4.87	10.01
R²	0.75	0.59
R	0.87	0.77
RMSE (mm)	5.89	16.20
MAE (mm)	2.56	6.60
NASH (%)	74.72	52.05
X₁		5.49
X₂		0.64

➤ 1ière 2/3 Calage et 2ème 1/3 Validation :

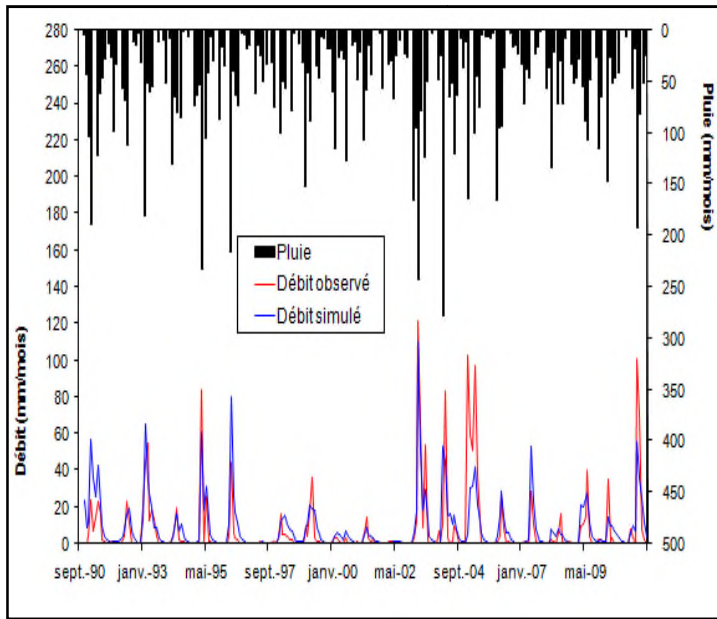


Figure VI.10: Modélisation par le modèle GR2M.

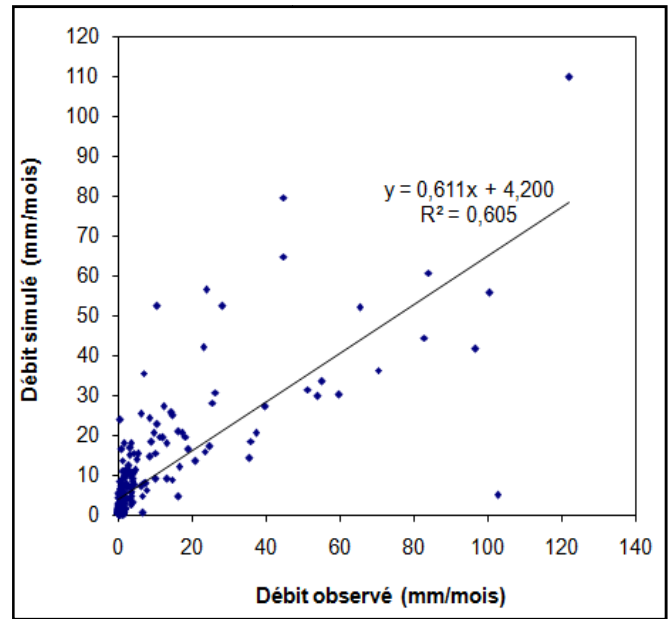


Figure VI.11: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

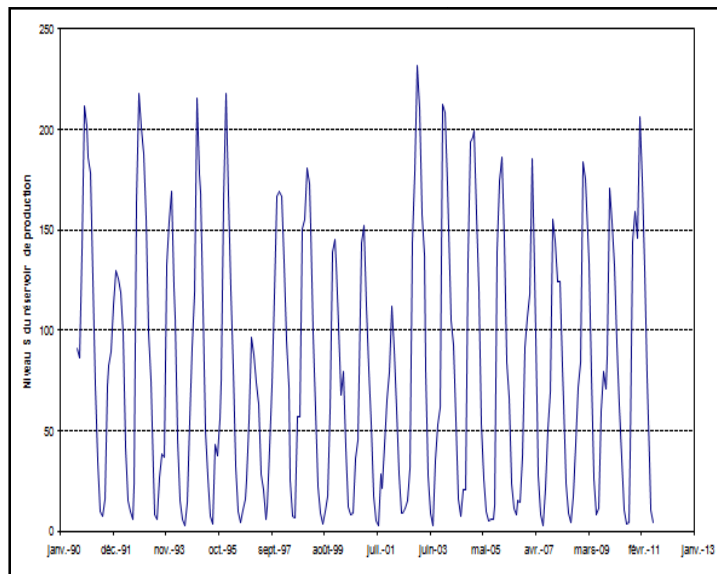


Figure VI.12: Courbe du niveau S du réservoir de production.

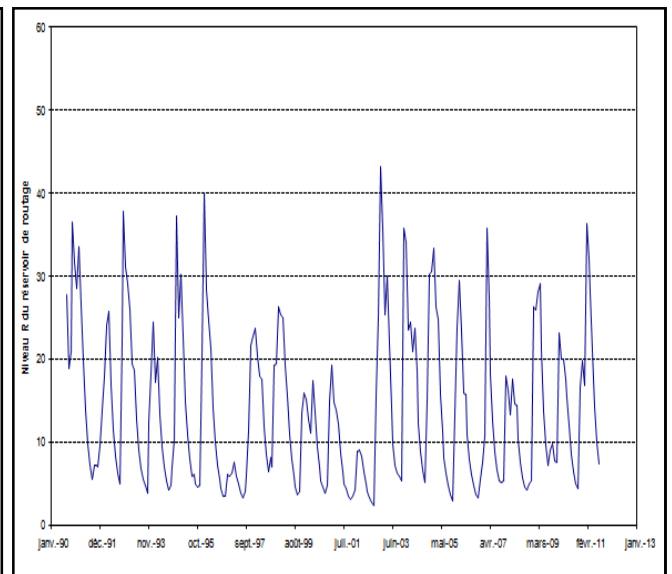


Figure VI.13: Courbe du niveau R du réservoir de routage.

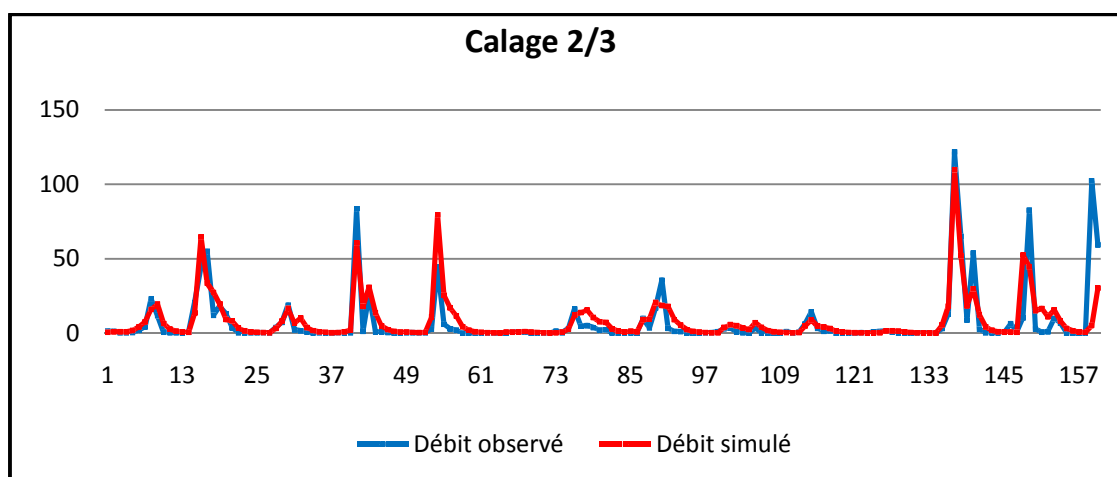


Figure VI.14 : Visualisation de la qualité de calage (période de calage de 160 mois).

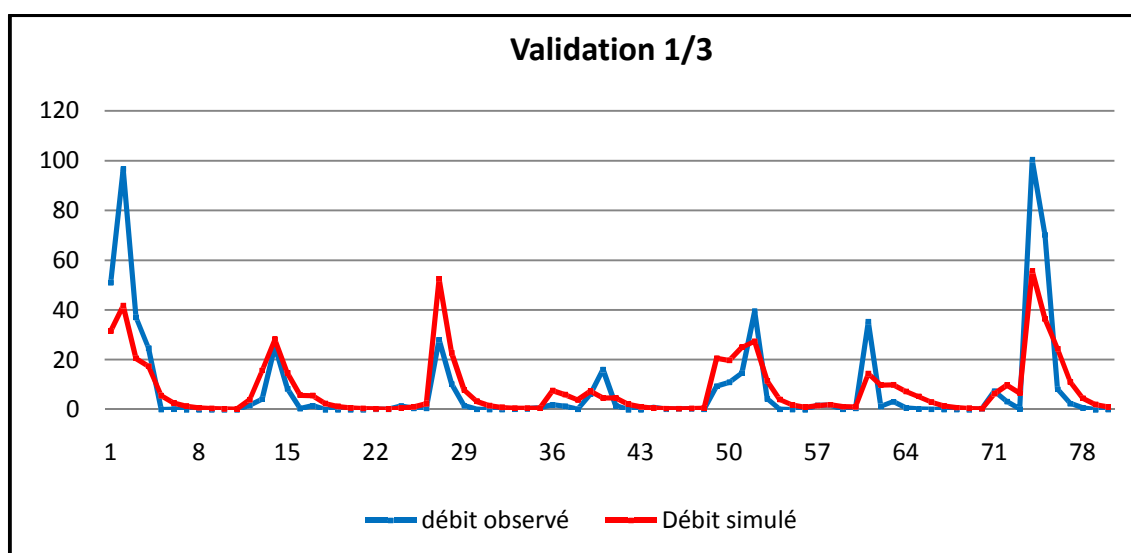


Figure VI.15 : Visualisation de la qualité de validation (période de calage de 80 mois).

Tableau VI.5 : Résultats de la modélisation (période de calage de 160 mois).

Périodes	1ière 2/3 Calage et 2ème 1/3 Validation	
Critères de performance	calage	validation
Qmoy (mm)	7.15	8.01
R²	0.62	0.72
R	0.79	0.85
RMSE (mm)	11.41	11.04
MAE (mm)	5.00	5.85
NASH (%)	61.80	66.50
X₁	5.84	
X₂	0.84	

➤ 1ière 80% Calage et 2ème 20% Validation :

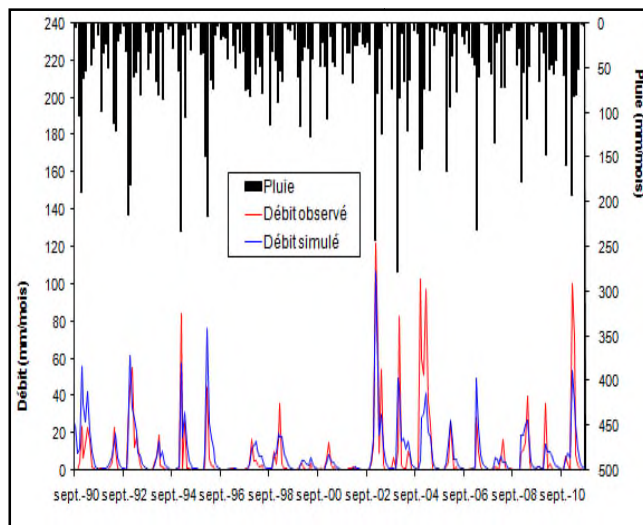


Figure VI.16: Modélisation par le modèle GR2M.

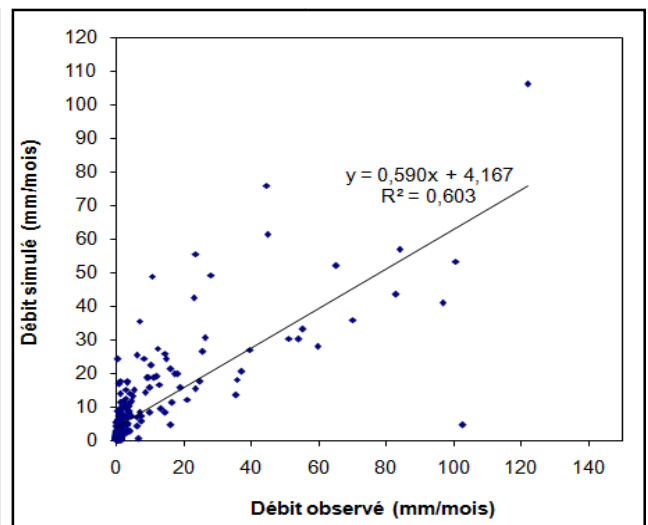


Figure VI.17: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés.

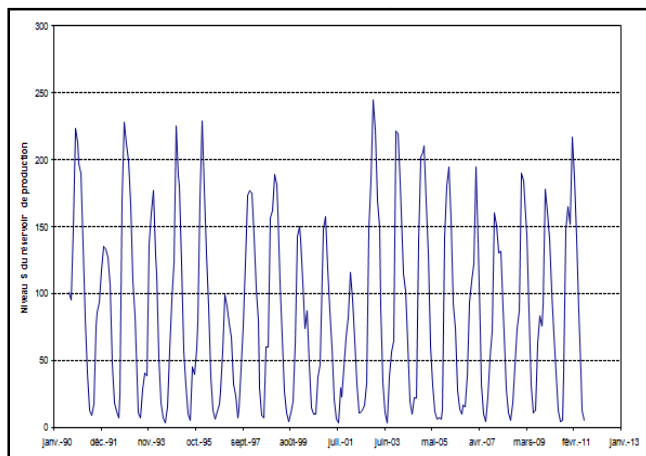


Figure VI.18: Courbe du niveau S du réservoir de production.

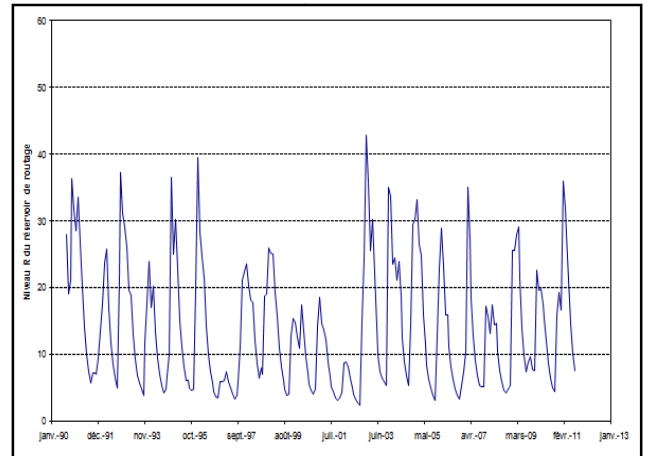


Figure VI.19 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.

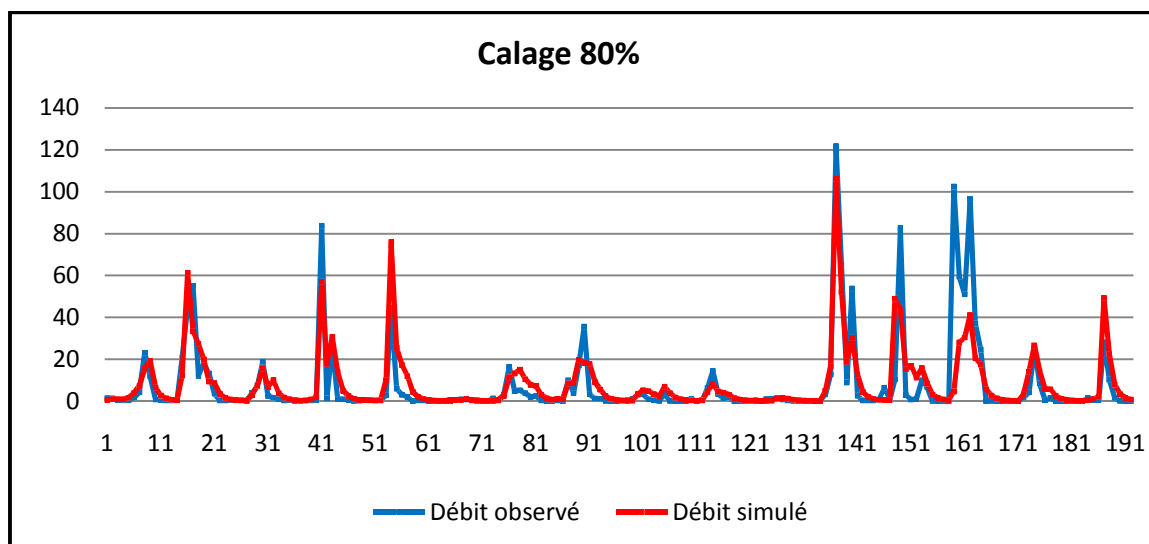


Figure VI.20 : Visualisation de la qualité de calage (période de calage de 192 mois).

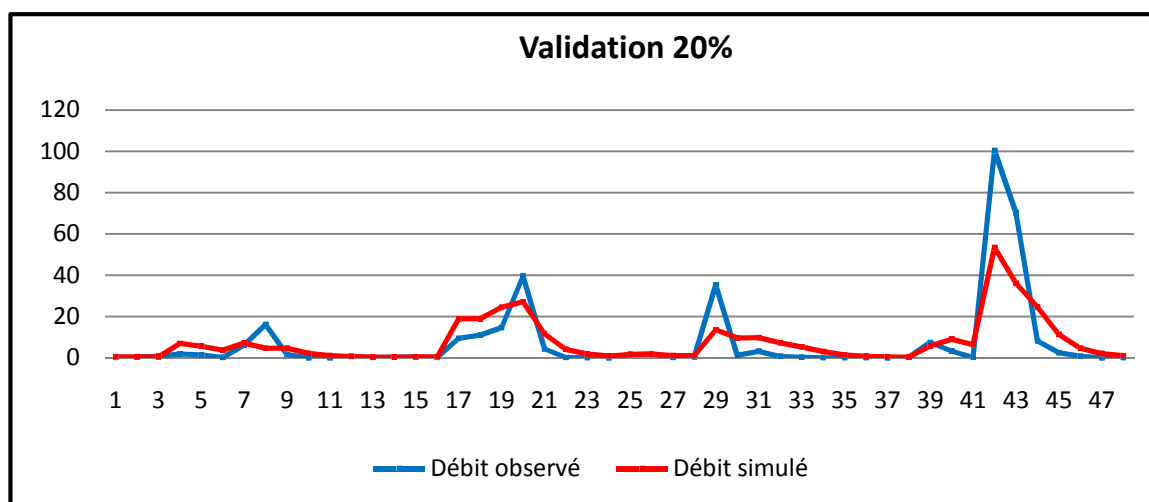


Figure VI.21 : Visualisation de la qualité de validation (période de calage de 48 mois).

Tableau VI.6: Résultats de la modélisation (période de calage de 192 mois).

Périodes	1ière 80% Calage et 2ème 20% Validation	
Critères de performance	calage	validation
Qmoy (mm)	7.49	7.23
R²	0.62	0.78
R	0.79	0.88
RMSE (mm)	11.53	10.36
MAE (mm)	5.18	5.62
NASH (%)	62.19	68.18
X₁	5.90	
X₂	0.84	

Les tableaux (VI.4, VI.5, VI.6) fait ressortir que tous les critères de qualité du modèle GR2M sont comparables en phase de calage et de validation et en conséquence,

Il semble très raisonnable que la dernière variante de découpage (80% Calage et 20% Validation), soit la meilleure modélisation, où on signale des valeurs du Nash moyennement élevées (62.19% pour le calage et 68.18 pour la validation), les valeurs des coefficients détermination R^2 , et le coefficient de corrélation R sont très satisfaisants, cependant les valeurs des RMSE et MAE sont relativement élevées, ce qui infirme l'adoption finale du modèle GR2M dans le contexte géographique de cette étude.

VI.8. Stabilité des paramètres et critère de NASH du modèle GR2M en fonction de la taille de l'échantillon de calage:

Comme convenu, on applique le modèle GR2M avec les données du bassin de l'oued Bouhamdane contrôlé au niveau de la station Medjaz Ammar.

Nous commençons par la variation de la taille de l'échantillon de calage en cherchant la stabilité des valeurs des deux paramètres (X_1 : capacité du réservoir de production (mm), X_2 : Paramètre d'échange (mm)). La variation de la taille se fait en augmentation d'une année par année (12 mois).

Nous pouvons faire ressortir que les paramètres X_1 et X_2 se stabilisent par l'utilisation du solveur d'Excel permet un calage des paramètres du modèle, en vue d'optimiser le critère de Nash, pour la variante qui correspond à (la taille de l'échantillon de calage).

Les résultats de cette procédure sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau VI.7: Paramètres et NASH du modèle GR2M pour des tailles différentes de calage.

X_1	X_2	La taille de l'échantillon de calage	NASH (%)
5.99	0.82	24	75.7
5.95	0.81	36	76.4
5.50	0.72	48	82.2
5.50	0.64	60	76
5.50	0.64	72	76.7
5.45	0.63	84	76.6
5.50	0.65	96	74.4
5.50	0.65	108	74.6
5.49	0.64	120	74.8
5.49	0.64	132	75.1
5.76	0.77	144	82.4
5.87	0.80	156	76.5
5.86	0.85	168	62.6
5.87	0.84	180	62.7
5.90	0.84	192	62.2
5.90	0.84	204	62.2
5.91	0.84	216	62.3
5.90	0.84	228	62
5.86	0.85	240	63.5
5.86	0.85	252	63.8

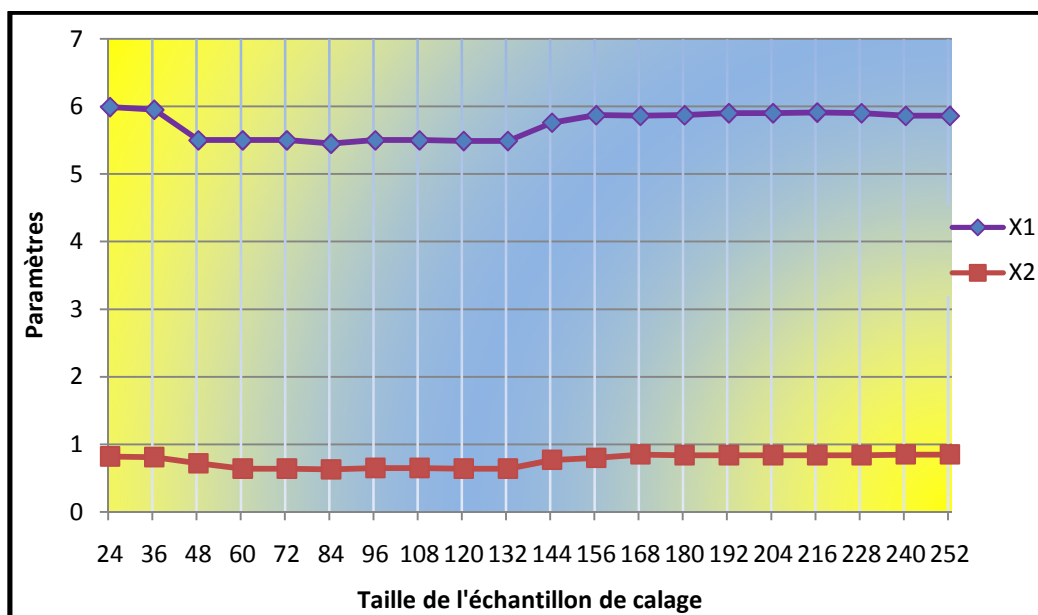


Figure VI.22 : Evolution des paramètres X1, X2 de GR2M.

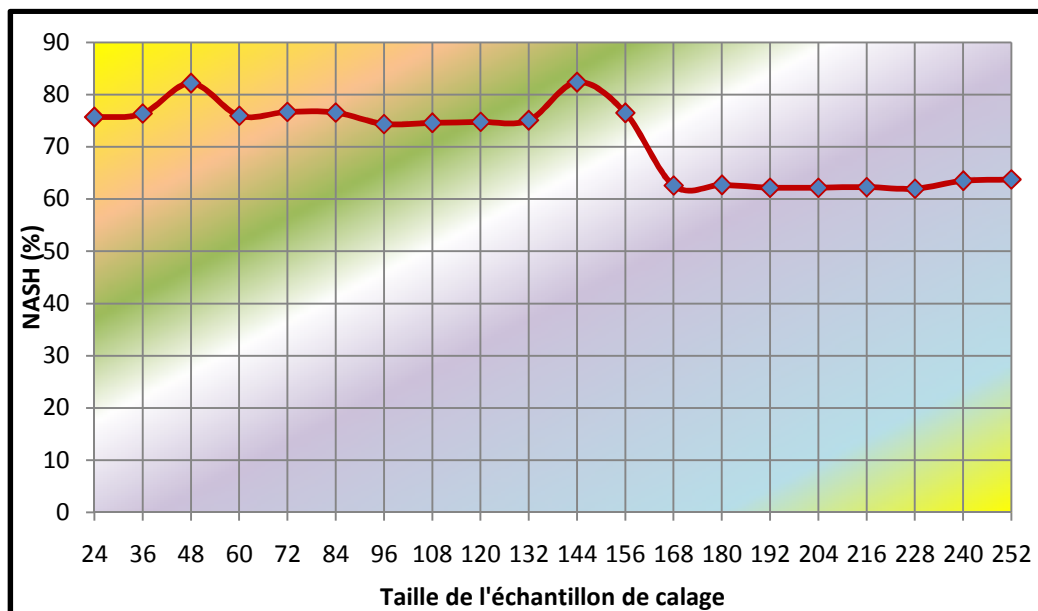


Figure VI.23 : Evolution des critères de Nash.

VI.9. Conclusion :

La modélisation pluie-débit à l'aide du logiciel GR2M donne des résultats plus performants et représentatifs.

Les résultats qui indiquent que le modèle est initialement calé sur la base des entrées et sorties historiques, on constate que l'hydrogramme des Débits simulé (calculé) est plus proches à celle d'observé avec une extrapolation entre les deux, mais on a quelque période caractérisé par des piques (crues), Les périodes des crues ne sont bien représentées tout au long de notre période de simulation et à l'autre c'est des minimas (parce que le modèle GR2M ne simule pas les crues), les périodes d'étiages pendant quelque mois, dû à la faible précipitation moyenne mensuelle. On not aussi un décalage entre le débit simulé et le débit observée.

Les résultats de la validation entre débits observés et débits simulés sont suffisants, ils varient en fonction du pas de temps utilisé. Le coefficient de corrélation varie entre 0.62 et 0.79 pour toutes les applications, sont suffisants, ceci peut s'expliquer par l'irrégularité des précipitations au cours des mois.

Il semble très raisonnable que la dernière variante de découpage (80% Calage et 20% Validation), soit la meilleure modélisation, où on signale des valeurs du Nash moyennement élevées (62.19% pour le calage et 68.18 pour la validation). Cette modélisation légèrement acceptable avec des critères de Nash de l'ordre de 65% en calage et validation. Pour matérialiser le transfert pluie-débit au sein de l'Oued Bouhamdane, il est conseillé d'aborder d'autres moyens plus rigoureux en vue d'une gestion rationnelle de la ressource hydrique.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif la modélisation de la relation pluie-débit sur le bassin versant de l'oued Bouhamdane, à la station de Medjez Ammar, au pas de temps mensuel, et à l'autre est la simulation des débits mensuels. Le modèle adopté est le modèle conceptuel parcimonieux à deux paramètres, du génie rural, dénommé GR2M.

Le bassin versant de l'oued Bouhamdane est situé au Nord- est de l'Algérie occupant la partie Ouest de la wilaya de Guelma, qui caractérisé par une superficie de 1105 Km², un périmètre de 170 Km, forme allongée et un climat semi-aride à hiver tempéré.

La formule de l'ETP de l'ANRH évaluée au sein de la station de Medjez Ammar a été retenue pour l'estimation des évapotranspirations mensuelles utilisées comme entrées du modèle avec les valeurs de pluie mensuelles mesurées dans la même station.

Les pluies mensuelles, considérées comme entrées primordiales du modèle sont simulées dans leurs lois de distributions adéquates, tout en considérant quasi-constantes les valeurs moyennes mensuelles interannuelles des évapotranspirations potentielles.

Les caractéristiques statistiques couramment utilisées sont comparables en valeurs pour l'historique (observé) et simulé.

Il n'y a pas de règle générale à propos de la décision finale sur la taille de calage qui donne un modèle idéal dans son évaluation au cours de la transformation pluie - débit, basée sur les résultats obtenus du critère de Nash. D'où et après plusieurs découpages, nous avons trouvé dans le GR2M que la période de calage de 80% de l'échantillon global a donné des résultats satisfaisants (Nash égal 65%).

La procédure de simulation est basée sur l'utilisation du GR2M Le modèle initialement calé sur la base des entrées et sorties (débit observé et débit simulé).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] : Toulmit Abd Elhafid, et al., 2013 ; Simulation des apports liquides du barrage Hammam Debagh (W. de Guelma) par les modèles conceptuels, Mémoire de Master en Hydraulique. Université Hadj lakhdar –Batna. 51p.

[2] : Chefrag Ibtissam, et al., 2014 ; Bassin Versant Paramètres Physiques et Morphométrique étude le sous bassin versant de l'oud zenati, mémoire de licence. Centre Universitaire de Mila. 30p.

[3] : Mansouri Zina., 2009 ; Les ressources en eau et gestion intégrée du bassin versant de l'oued Bouhamdane (Nord-Est Algérien), Mémoire de Magister, Hydrogéologie. Université Badji Mokhtar-Annaba. 132p.

[4] : KHELIF Hanane., 2013 ; Modélisation pluie-débit par les modèles conceptuels GR (application au bassin versant de Bouhamdane) «Wilaya de Guelma», Mémoire de l'ingénieur état en agronomie. Spécialité Hydraulique. Université Hadj lakhdar-Batna.83p.

[5] : Benchioukh Adel et Ghenim Abderrahmane Nekkache., 2014 ; Recherche d'une Corrélacion Débit Liquide-concentration des sédiments en suspension. Application au bassin versant de L'oued Bouhamdane. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. Revue El Wahat pour les recherches et les études, Vol.7 n°2. 13-22p.

[6] : Benchaiba Leila., 2006 ; Condition d'écoulement et impact sur la mobilisation des ressources en eau Bassin versant de l'oued Bouhamdane (W. De Guelma, Est Algérien), Mémoire de Magister, Option : Mobilisation des ressources hydriques. Université El Hadj Lakhdar Batna.213p.

[7] : Ladlani Ibtissem., 2007 ; Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba», Mémoire de Magister. Université Hadj lakhdar –Batna. 99p.

[8] : Khelalfa Mohamed., 2009 ; Etude du ruissellement pluvial des sous bassins de la seybouse, Mémoire de Magister, Hydraulique Urbaine et Ouvrages Hydrauliques. Université Badji Mokhtar-Annaba. 157p.

[9] : M.R Yaïche., 2010 ; Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel. Revue des Energies Renouvelables, Vol.13, N°4. 683-695p.

[10] : Radia Gherissi., 2012 ; Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued lakhdar (ex : chouly) Tafna-NW Algérien, Mémoire de Magister.

Ressources en eau dans leur Environnement., Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen. 103p.

[11] : Charles Perrin et al., 2007 ; modèles hydrologiques du génie Rural (GR), Cemagref, UR hydrosystèmes et Bioprocédés. 16p.

[12] : Medane Kheira., 2012 ; Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued boumessaoud (Tafna NW- algérien), Mémoire de Magister. Ressources en eau dans leur Environnement. Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen. 96p.

[13] : Ballah Abderrahmane., 2014 ; Etude de l'écoulement liquide et solide dans le bassin versant de l'Oued Sébaou (Wilaya de Tizi-Ouzou), Mémoire de Magister. Hydrologie et Aménagement des Bassins Versants., Université Hassiba Ben Bouali Chlef.173p.

[14] : Hadjimi S., 2011 ; Etude d'un projet d'irrigation sous pression au niveau du pirimetre Rmila Ouled Fdhala secteur Rmila(6749.66 ha) wilaya de chanchela. Thèse d'ing agro Batna p 113.

[15] : Soltner ., 1984 ; Les bases de la production végétale, tome II, le climat, collection sciences et techniques agricoles, édition BAILLIER, Paris. 312p.

[16] : Michel V., 2005 ; A propos de la modélisation.

[17] : Andreassian V., 1999 ; La modélisation pluie-débit sur les bassins versants de nouvelle Calédonie. Stage. Université Paris-Sud.76p.

[18] : 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. Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, 214 p.

[19] : Boudahraa H., 2007 ; Modélisation pluie - débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural Tunisien : Association d'approches directe et inverse. Thèse de Doctorat, Univ. 7 novembre Carthage (Tunisie), 227 p., 129 fig.

[20] : Chachoua A., 2010 ; Gestion de crue dans un bassin versant. Etude hydrologique, hydraulique et aménagement. Mém. Magister, Univ. Tlemcen, 134 p.

[21] : Michel C., 1983 ; Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? La Houille Blanche(1), 39-44.

[22] : Andréassian V., Hall A., Chahinian N., Schaake J., 2006 ; Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets? In: V. Andréassian, A. Hall, N. Chahinian and J. Schaake (Editors), large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX. IAHS Publication n°307, p. 1-5.

[23] : Mouelhi, S., 2003 ; Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 p.

[24] : Kabouya, M., 1990 ; Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 p.

[25] : Kabouya, M., Michel, C., 1991 ; Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. Revue des Sciences de l'Eau 4(4), 569-587p.

[26] : Makhlouf, Z. 1994 ; Compléments sur le modèle pluie -débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat. Université de Paris XI Orsay/Cemagref (Antony), 228p.

[27] : Makhlouf, Z., Michel, C. 1994 ; A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. Journal of Hydrology, 162, 299-318.

[28] : Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V. (2006b). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. Journal of Hydrology 318(1-4), 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.

[29] : Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279(1-4): 275-289.

[30] : Benkaci A., 2001 ; Contribution à la modélisation de la relation pluie débit au pas de temps mensuel et journalier par les modèles conceptuels et les réseaux de neurones. Thèse pour l'obtention du diplôme de magister. Institut national agronomique d'Alger.150pp.

[31] : Nash, J. E., Sutcliffe, J. V.,1970 ; River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology 27(3): 282-290.

[32] : Xanthoulis, D., 1985 ; Modélisation mathématique des débits d'étiage des cours d'eau : Application au bassin versant de la Lesse. Thèse de Doctorat. Faculté des sciences agronomiques de Gembloux. Université de Liège. Belgique.

[33] : Benahmed, L., 2012 ; Développement d'une nouvelle relation ajustée de Turc pour l'évaluation de l'évapotranspiration de référence dans la zone humide de l'Algérie. Yhèse de Magister, Université de Béjaia, Algérie.

[34] : Willmott, C.J.,1981 ; On the validation of model. Phys Geogr 2:184–194.

[35] : Willmott, C.J., 1982 ; Some comments on the evaluation of model performance. Bull Am Meteorol Soc 63:1309–1313.

[36] : Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema. J.J., Klink, K.M., Legate, D.R., O'Donnell, J., Rowe, C.M., 1985 ; Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research, Vol. 90, No. C5, 8995-9005p.

[37] : Willmott, C.J., Robeson, S.M., Matsuura, K., 2012 ; A refined index of model performance. Int. J. Climatol. 32: 2088–2094 (2012) Published online 9 September 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.2419.

[38] : Andréassian V., 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony), 276 pp.

[39] : Mathevet T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.

[40] : Fourmigué P et Lavabre J., 2005. Prévision de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. Revue des Sciences de l'Eau 18(1), 87-102.

[41] : Edijatno ., 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-debit au pas de temps journalier (Elaboration of a simple daily rainfall-runoff model). Ph.D. dissertation, Louis Pasteur University (Strasbourg) / Cemagref (Antony), France, 625 p.

[42] : Mouelhi S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.

[43] : Perrin C, Michel C et Andréassian V., 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés. 16p.

[44] : Horst G., 1978. Le pouvoir d'évaporation du climat marocain. INECO ., 2008. Instruments alternatifs pour améliorer la gestion de l'eau dans le bassin méditerranéen.cas de l'oued Seybouse-Algérie) Horst G., 1978. Le pouvoir d'évaporation du climat marocain.

Sites Internet

[14] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_Guelma (10-04-2016).

[15] : <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/resumes/chapitre4/resume4.pdf> (03-04-2016).

[16] : www.dcwguelma.gov.dz/fr/index.php/wilaya-guelma (10-04-2016).