

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji - Laghouat



FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

THÈSE DE DOCTORAT TROISIEME CYCLE

Spécialité : Ressources en eau

Présentée et soutenue publiquement

Le, 30/06/2018

Par

OULAD NAOUI Nouredine

THEME

**Contribution à l'étude hydrologique du bassin versant de l'oued
MZAB (Sud- Est de l'Algérie)**

JURY :

GAFSI Mustapha
CHERIF EL Amine
DJEHICHE Abdelkader
CHETTIH Mohamed
BESSENASSE Mohamed
KATEB Samir

Professeur à l'Université de Laghouat
Professeur à l'Université d'Oran
Professeur à l'Université de Laghouat
Professeur à l'Université de Laghouat
Professeur à l'Université de Blida
M.C.A à l'Université d'Ouargla

Président
Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse
Examineur
Examineur
Examineur

Remerciements

Premièrement, Je tiens à remercier chaleureusement pour l'achèvement de ce travail est mon **DIEU** avant tout.

En plus Je tiens à remercier chaleureusement mes encadrants M. **CHERIF EL-Amine** et M. **DJEHICHE Abdelkader** pour m'avoir accompagné dans ce travail de recherche et ma donner la liberté totale pour la construction de cette thèse. Aussi je tiens à exprimer toute ma gratitude à vous, Merci pour l'enthousiasme, le dynamisme, la bienveillance, les conseils avisés et la vision à cette belle science qu'est la modélisation hydrologique pour protéger les agglomérations contre les risques d'inondation que vous apportez, chacun à votre manière, à l'équipe et à vos élèves.

J'adresse également mes sincères remerciement aux membres de mon jury de thèse qui ont accepté d'évaluer ce travail : **GAFSI Mustapha**, professeur à l'Université de Laghouat, accepté le rôle de président du jury et **BESSENASSE Mohamed** professeur à l'Université de Blida, et **KATEB Samir**, maître de conférences class A à l'Université de Ouargla.

Je remercie du fond du cœur l'ensemble des professeurs et collègues qui contribuent à l'ambiance dynamique. Merci à M. **CHETTIH Mohammed**, pour votre orientation, tes conseils

Je tiens à remercier l'office national Météorologique et particulièrement son directeur pour la disponibilité des données utilisées dans cette thèse, leur aide et expertise.

Enfin, un énorme merci à mes proches, ma famille, mes parrains, mes amis qui m'ont toujours soutenu même s'ils n'ont jamais vraiment compris mes choix professionnels. Vous étiez nombreux à vous être déplacés pour assister à la soutenance de ce travail et je ne l'oublierai jamais.

Summaire

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale..... 1

Chapitre1 :

Étude des différents modèles hydrologiques existants

1.1) Introduction.....	4
1.2) Cycle de l'eau.....	4
1.2.1) Les zones arides.....	5
1.2.2) Cycle de l'eau en zones arides.....	5
1.3) La modélisation hydrologique.....	6
1.3.1) Définition du bassin versant.....	6
1.3.2) Comportement hydrologique des bassins versants.....	7
1.3.3) Définition des modèles hydrologiques.....	7
1.3.4) Chronologie de la modélisation de la relation pluie-débit sur les bassins non jaugés.....	8
1.3.5) Construction d'un modèle hydrologique.....	9
1.4) Utilisation de modèle hydrologique	10
1.4.1) Prévision de crues.....	10
1.4.2) Prévision d'étiages.....	11
1.4.3) Prédétermination de débits extrêmes.....	11
1.4.4) Études d'impact anthropique sur l'hydrologie	11
1.5) Différents types des modèles hydrologiques.....	11
1.5.1) Modèles Stochastiques.....	13
1.5.2) Modèles Déterministes.....	13
1.5.2.1) Modèles à Base physique.....	13
1.5.2.2) Modèle Paramétrique.....	13
a) Modèle Empirique	14
b) Modèle Analytique	14
c) Modèle Conceptuel	14
1.6) Problématique et objectif.....	15
1.7) Exemples des Modèles hydrologiques existants	15
1.7.1) Le modèle pluie-débit journalier GR4J	16
1.7.2) Le modèle hydrologique universel HBV	17
1.7.3) Le modèle hydrologique GRHUM.....	18
1.7.4) Modèles ATHYS.....	19
1.7.5) Le modèle hydrologique HEC-HMS.....	20
1.7.6) Les Algorithmes Génétiques	21
1.8) Conclusion	23

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

2.1) Introduction.....	24
2.2) Le milieu saharien	24
2.3) présentation de du bassin versant du MZAB.....	25
2.3.1) Localisation de la région du MZAB.....	25
2.3.2) Réseau hydrographique.....	26
2.3.3) Géologie.....	27
2.3.4) L'occupation des sols du bassin du MZAB.....	28
2.4) Etude du climat.....	29
2.4.1) Pluviométrie.....	29
2.4.2) Evaporation	30
2.4.3) Ensoleillement.....	31
2.4.4) Humidité.....	31
2.4.5) Les vents.....	31
2.4.6) Température.....	32
2.4.7) Relation précipitation – température.....	33
2.4.8) Détermination du type de climat.....	34
2.4.9) Géomorphologie du bassin du MZAB.....	35
2.5) Contexte géomorphologique.....	35
2.5.1) Paramètres géométriques.....	35
2.5.2) Paramètres de forme.....	36
2.5.3) Etude de relief.....	37
2.5.3.1) La courbe hypsométrique.....	37
2.5.3.2) Hauteurs caractéristiques.....	38
2.5.3.3) Indice de pente	39
2.5.3.4) La dénivelée	40
2.6) Caractéristiques hydrographiques du bassin versant du MZAB.....	40
2.6.1) Profil en long de l'axe de l'oued MZAB.....	40
2.6.2) Pente moyenne de cours d'eau principal (pm)	41
2.6.3) Densité de drainage	41
2.6.4) Coefficient d'allongement.....	42
2.6.5) La fréquence des thalwegs d'ordre 1 (F1)	42
2.6.6) Rapport de confluence (Rc).....	42
2.6.7) Rapport de longueur (R _l).....	42
2.6.8) Temps de concentration.....	43

Chapitre 3 : Homogénéisation des données et analyse statistique

3.1) Introduction.....	47
3.2) Etude des précipitations	47
3.2.1) Variation interannuelle de la pluviométrie	48
3.3) Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles	49
3.3.1) Variations temporelles.....	49
3.3.2) Variations spatiales	51
3.3.3) Méthode des écarts à la moyenne interannuelle.....	52
3.4) Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité.....	55

3.4.1) Analyse fréquentielle locale	55
3.4.2) L'hypothèse de l'Homogénéité	55
3.5) Précipitations mensuelles et les régimes saisonniers.....	58
3.6) Pluies maximales journalières et l'ajustement statistique.....	61
3.7) Les pluies de courte durée.....	63
3.7.1) Intensités maximales de courte durée.....	64
3.7.2) Construction des courbes IDF.....	65
3.8) Conclusion.....	68

Chapitre 4 : Evaluation des modèles aux conditions algériennes

4.1) Historique des crues.....	69
4.1.1) Les crues de la durée 1848 à 1920.....	69
4.1.2) Liste des crues de l'oued MZAB.....	71
4.1.3) Les inondations du 1 ^{er} octobre 2008.....	73
4.2) Evaluation des débits par formules empiriques.....	75
4.2.1) Formule de MALLET-GAUTHIER.....	75
4.2.2) Formule de SOKOLOVSKY.....	75
4.2.3) Formule TURRAZA.....	77
4.2.4) Formule de GIANDOTTI.....	78
4.2.5) Formule de POSSENTI	78
4.3) Méthode de Rodier et Auvray(1965).....	79
4.4) Hydrogramme de crues pour le bassin du MZAB.....	80
4.5) Détermination du volume de la crue du bassin du MZAB	87
4.6) Conclusion	89

Chapitre 5 : Application des Modèles Hydrologiques

5.1 Introduction	91
5.2 Adaptation des modèles empiriques par lois statistiques.....	92
5.2.1) prédétermination des débits de crues par modèles empiriques	92
5.3) Adaptation des modèles empiriques par algorithmes génétiques.....	93
5.3.1) Organigramme de calcul.....	94
5.3.2) Formulation du problème.....	95
5.4) Modèle Pluie – débit HEC-HMS	101
5.5) Couple AG-HEC HMS.....	104
5.6) La performance du couple AG-HEC HMS.....	106
5.7) Conclusion.....	107
Conclusion générale.....	109
Références bibliographiques.....	112

RESUME

En hydrologie et plus particulièrement sur le cycle hydrologique, l'étude de la modélisation de la relation pluie-débit est la partie la plus difficile. Cette modélisation étant nécessaire pour le bon dimensionnement des ouvrages hydrauliques, pour protéger les agglomérations contre les risques d'inondation.

Pour cela, la connaissance des différents paramètres hydrologiques d'un bassin versant est indispensable, tel que : les données météorologiques et hydrométriques sur des périodes plus ou moins longues et pour plusieurs stations d'observation. Plusieurs modèles existent pour étudier la relation pluie-débit pour les bassins non jaugés, cependant, ils ne sont pas tous disponibles aux aménagistes.

A ce titre, nous proposons dans le cadre de cette thèse une nouvelle technique utilisant un couplage appelé : couple Algorithmes Génétiques-HEC HMS. L'application de cette technique sur le bassin de MZAB a donné des résultats satisfaisants avec une meilleure valeur de l'erreur.

L'objectif de cette thèse est l'évaluation des débits des crues estimées par le couple Algorithmes Génétiques- HEC-HMS et de comparer les résultats trouvés avec les hydrogrammes estimés par une méthode régionale et par les formules classiques utilisées en Algérie dans le but d'évaluer le modèle aux conditions algériennes et de contrôler la validité des formules empiriques utilisées ou bien adapter ces formules aux conditions algériennes.

Une étude d'application sera réalisée pour le bassin versant de l'oued MZAB dans la région du sud Est de l'Algérie.

MOTS CLES :

Modélisation hydrologique, pluie-débit, bassin versant, débit de crue, couple AG- HEC-HMS, Oued MZAB.

ABSTRACT

In hydrology and particularly on the hydrological cycle, the study of the modeling Rainfall-Runoff relationship is the most difficult part. This modeling is necessary for the proper sizing of hydraulic structures, to protect agglomerations against food risks.

For this, knowledge of different hydrological parameters of watershed is essential, such as: meteorological and hydrometric data for periods and several observations stations. Several models exist to study the Rainfall-Runoff relationship for ungauged basins, however, they are not all available to forest managers.

Thus, we propose in this thesis a new technique using a coupling called: Genetic Algorithms-HEC-HMS couple. The application of this technique on MZAB basin has yielded satisfactory results with a better value of the error.

The objective of this thesis is the evaluation of the floods estimated by Genetic Algorithms-HEC-HMS couple and to compare the results found with the hydrographs estimated by a regional method and by the classical formulas used in Algeria for the purpose of evaluate the model under Algerian conditions and check the validity of the empirical formulas used or adapt these formulas to Algerian conditions.

An application study will be carried out for the watershed of Wadi MZAB in the south-eastern region of Algeria.

KEYWORDS

Hydrological modeling, rainfall-runoff, watershed, flood, AG-HEC-HMS couple, Oued MZAB.

ملخص

في مجال الهيدرولوجيا وعلى الأخص في الدورة الهيدرولوجية ، تعتبر دراسة نمذجة العلاقة بين هطول الأمطار والتدفق الجزء الأصعب. هذه النمذجة تعتبر ضرورية لدراسة تقنية للهياكل و المنشآت الهيدروليكية ، لحماية التجمعات السكانية من مخاطر الفيضانات.

لهذا، فمعرفة الخصائص الهيدرولوجية للأحواض تعتبر نقطة أساسية، مثل: بيانات الأرصاد الجوية والتدفق لفترات زمنية طويلة و عدد معتبر من محطات المراقبة. توجد عدة نماذج لدراسة العلاقة بين الأمطار والتدفق للأحواض، إلا أن جلها غير متاح للباحثين.

لهذا السبب، فإننا نقترح في هذه الأطروحة تقنية جديدة باستخدام اقتران مسمى: الخوارزميات الجينية- HEC-HMS وقد أدى تطبيق هذه التقنية على حوض واد ميزاب إلى نتائج مرضية مع قيمة أقل للخطأ.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تدفقات الفيضانات المقدره من طرف الإقتران بين الخوارزميات الجينية- HEC-HMS و مقارنتها مع قيم التدفق المقدره بالطريقة النموذجية و الطرق الكلاسيكية المستخدمة في الجزائر من أجل التحقق من صحة الصيغ المستخدمة أو تكيف هذه الصيغ على الظروف الجزائرية.

الدراسة تتم على مستوى حوض وادي ميزاب المتموقع في الجنوب الشرقي الجزائري.

الكلمات المفتاحية:

النمذجة الهيدرولوجية, أمطار-تدفق, حوض, فيضانات, الخوارزميات الجينية- HEC-HMS, واد ميزاب.

Liste des figures

Fig.1.1. Cycle hydrologique.....	5
Fig.1.2. Représentation schématique du cycle de l'eau.....	6
Fig.1.3. Schématisation d'un bassin versant topographique.....	7
Fig.1.4. Schématisation des paramètres de la fonction de production.....	8
Fig.1.5. Schématisation des paramètres de la fonction de transfert.....	8
Fig.1.6. Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique.....	10
Fig.1.7. Les Modèles hydrologiques.....	12
Fig.1.8. Schématisation d'un modèle Boite noir	14
Fig.1.9. Schéma conceptuel du modèle GR4j.....	16
Fig.1.10. Schéma conceptuel du modèle HBV.....	17
Fig.1.11. Schéma conceptuel du modèle GRHUM.....	18
Fig.1.12. Schéma conceptuel du modèle ATHYS.....	19
Fig.1.13. L'interface graphique d'utilisation de HEC-HMS.....	20
Fig.1.14. Types de distribution de précipitation.....	21
Fig.1.15. Principe de fonctionnement d'un algorithme génétique.....	23
Fig.2.1. Délimitation des wilayas de l'Algérie.....	25
Fig.2.2. Localisation du bassin du MZAB par apport au Sahara Septentrional.....	25
Fig.2.3. Réseau hydrographique du bassin du MZAB, au sud Est de l'Algérie.	26
Fig.2.4. Carte hypsométrique du bassin du MZAB.....	26
Fig.2.5. Les sous-bassins appartenant au bassin du MZAB.....	27
Fig.2.6. Carte géologique du bassin du MZAB.....	27
Fig.2.7. Coupe géologique du bassin du MZAB.....	28
Fig.2.8. Carte d'occupation des sols du bassin du MZAB.....	28
Fig.2.9 précipitation moyenne annuelle en (mm) station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).....	30
Fig.2.10. L'évaporation moyenne mensuelle de la station de Ghardaïa.....	30
Fig.2.11. Ensoleillement moyen mensuelle de la station de Ghardaïa	31
Fig.2.12. L'humidité et les vitesses de vent du bassin du MZAB.....	32
Fig.2.13. Représentation graphique de la variation des températures min, moy et max de la région de Ghardaïa.....	33
Fig.2.14. Diagramme Ombrothermique du bassin du MZAB.....	33
Fig.2.15. Abaque d'Indice annuel d'aridité de De Martonne (1926).....	34
Fig.2.16. Paysage géomorphologique du MZAB.....	35
Figure.2.17. Rectangles équivalents du bassins versants du l'oued MZAB.....	37
Fig.2.18. Carte hypsométrique du bassin versant du MZAB.....	37
Fig.2.19. Courbe hypsométrique du bassin du MZAB.....	38
Fig.2.20. Profil en long du bassin du MZAB.....	41
Fig.3.1. Précipitations moyennes annuelles de la station pluviométrique du bassin MZAB.....	49
Fig.3.2. Histogramme des répartitions des pluies annuelles au bassin du MZAB sur la période (1970-2014).....	50
Fig.3.3. Carte de la pluviométrie moyenne annuelle du nord d'Algérie et du Sahara.....	51
Fig.3.4. Variation interannuelle des précipitations de la station de Ghardaïa	53
Fig.3.5. Secteurs d'alternance de la variation interannuelle des précipitations de la station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).....	54

Fig.3.6. Test d'homogénéisation des précipitations annuelle du MZAB selon Pettitt.....	56
Fig.3.7. Ajustement des précipitations moyennes annuelles à la station de Ghardaïa (1970-2014) selon la loi du Gumbel.....	57
Fig.3.8. Ajustement des précipitations moyennes annuelles à la station de Ghardaïa (1970-2014) selon la loi du Lognormal.....	57
Fig.3.9. Ajustement des précipitations moyennes annuelles à la station de Ghardaïa (1970-2014) selon la loi du Lognormal(3paramètres).....	58
Fig.3.10. Précipitation moyenne mensuelle de la station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).....	59
Fig.3.11. Variations mensuelles de pluviométrie dans le bassin du MZAB.....	59
Fig.3.12. Les pluies moyennes mensuelles et leurs paramètres statistiques du bassin du MZAB.....	60
Fig.3.13. Variation saisonnière des précipitations dans le bassin du MZAB.....	60
Fig.3.14. Ajustement à la loi Gumbel de la station de Ghardaïa.....	62
Fig.3.15. Ajustement à la loi Lognormale de la station de Ghardaïa.....	62
Fig.3.16. Ajustement à la loi Lognormale à 3 paramètres de la station de Ghardaïa.....	63
Fig.3.17. Courbe des pluies à courte durée de la station de Ghardaïa selon la loi de Gumbel.....	65
Fig.3.18. Courbe Intensité-Durée-Fréquence de la station de Ghardaïa selon la loi de Gumbel.....	65
Fig.3.19. Courbe des pluies à courte durée de la station de Ghardaïa selon la loi de Lognormale.....	66
Fig.3.20. Courbe Intensité-Durée-Fréquence de la station de Ghardaïa selon la loi de Lognormale.....	66
Fig.3.21. Courbe des pluies à courte durée de la station de Ghardaïa selon la loi de Lognormale à 3 paramètres.....	67
Fig.3.22. Courbe Intensité-Durée-Fréquence de la station de Ghardaïa selon la loi de Lognormale à 3 paramètres.....	67
Fig.4.1. La crue de septembre 1994.....	69
Fig.4.2. Les crues de MZAB en 1974.....	70
Fig.4.3. Dégradation de digue Lahdhira en 2008.....	70
Fig.4.4. Gonflement des cours d'eau a Melika.....	70
Fig.4.5. Le niveau d'eau a atteint 9m en 2008.....	70
Fig.4.6. Image satellite 30septembre2008.....	74
Fig.4.7. Image satellite 01octobre2008.....	74
Fig.4.8. Situation en surface 30septembre2008.....	74
Fig.4.9. Situation en surface 01octobre2008.....	74
Fig.4.10. Situation en altitude 30septembre2008.....	74
Fig.4.11. Situation en altitude 01octobre2008.....	74
Fig.4.12. Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un évènement pluie-débit.....	81
Fig.4.13. Hydrogramme fréquentiels des différents modèles empiriques du bassin du MAZB.....	86
Fig.4.14. Représentation graphique de la variation d'apport totale selon les différents types de distributions.....	88
Fig.5.1. Organigramme de modélisation par Algorithme Génétique.....	94
Fig.5.2. Fluctuation de la fonction objective (critère quadratique) selon la méthode MALET GUETTIER pour 1-20 testes.....	96
Fig.5.3. Fluctuation de la fonction objective (critère quadratique) selon la méthode GIANDOTTI pour 1-20 testes.....	97

Fig.5.4 Fluctuation de la fonction objective (critère quadratique) selon la méthode POSSENTI pour 1-20 testes.....	98
Fig.5.5. Fluctuation de la fonction objective (critère quadratique) selon la méthode SOKOLOVSKY pour 1-20 testes.....	100
Fig.5.6. Hydrogrammes des crues, différents débits calculés à l'aide des différents modèles empiriques, et simulés à l'aide de l'algorithme génétique.....	101
Fig.5.7. La méthode SCS.....	102
Fig.5.8. Hydrogrammes de crue selon la méthode SCS.....	102
Fig.5.9. La méthode de l'hyétogramme spécifiée.....	103
Fig.5.10. Hydrogrammes de crue selon la méthode SPE-HYD.....	103
Fig.5.11. La méthode de la fréquence des tempêtes.....	104
Fig.5.12. Hydrogrammes de crue selon la méthode FRQ.....	104
Fig.5.13. Hydrogrammes de crue.....	106

Liste des tableaux

Tableau II.1 les précipitations moyennes annuelles à la station de Ghardaïa.....	29
Tableau II.2 : L'évaporation moyenne mensuelle du bassin du MZAB.....	30
Tableau II.3 : Ensoleillement moyen mensuelle du bassin du MZAB.....	31
Tableau II.4: Humidité moyenne mensuelle du bassin du MZAB.....	31
Tableau II.5: Les vents moyens mensuelle du bassin du MZAB.....	32
Tableau II.6 : Les données de la température de la station de Ghardaïa.....	32
Tableau II.7: Répartition altimétrique du bassin versant du MZAB.....	38
Tableau II.8 : Déférents indices de pentes du bassin du MZAB.....	40
Tableau II.9: Les valeurs de Rapport de confluence du bassin du MZAB.....	42
Tableau II.10 : Les valeurs de Rapport de longueur du bassin du MZAB.....	43
Tableau II.11: Sommaire des valeurs de Temps de concentration.....	44
Tableau II.12 : Récapitulatif des caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin du MZAB.....	45
Tableau III.1 : Caractéristiques de la station pluviométrique du bassin du MZAB.....	48
Tableau III.2 : caractéristiques de la précipitation annuelle de la station pluviométrique du bassin de l'oued MZAB.....	48
Tableau III.3 : pluie moyenne annuelle du bassin du MZAB sur la période (1970-2014).....	50
Tableau III.4 : Paramètres statistiques de base des pluies moyennes interannuelles du bassins versants du MZAB.....	51
Tableau III.5 : pluviométrie de la station de Ghardaïa sur la période (1970-2014).....	52
Tableau III.6 : Valeurs des précipitations pour les déférents lois d'ajustement et périodes de retours.....	58
Tableau III.7 Valeurs des précipitations moyennes mensuelles en (mm) de la station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).....	59
Tableau III.8 : Valeurs des pluies journalières maximales en (mm) de la station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).....	61
Tableau III.9 : Les paramètres statistiques des pluies maximale journalières.....	62
Tableau III.10 : Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station de Ghardaïa.....	63
Tableau III.11 : Les pluies de court durée pour déférents lois statistiques.....	64
Tableau VI.1 : Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de MALLET-GAUTHIER).....	76
Tableau VI.2: valeur de γ en fonction de bassin versant.....	76
Tableau VI.3 : Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de SOKOLOVSKY).....	77
Tableau VI.4: Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de TURRAZA).....	77
Tableau VI.5: Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de GIANDOTTI).....	78
Tableau VI.6 : Débit maximum de crue pour différents périodes de retour(Formule de POSSENTI).....	78

Tableau VI.7 : le débit de crue centennale estimé par la méthode de Rodier et Auvray.....	80
Tableau VI.8 : Coefficient de forme de l'Hydrogramme de crue γ	81
Tableau VI.9 : Tableau récapitulatif des temps de concentration, de montée et de décrue.....	82
Tableau VI.10 : Hydrogramme de crues du bassin du MAZB selon la méthode statistique Gumbel.....	82
Tableau VI.11 : Hydrogramme de crues du bassin du MAZB selon la méthode statistique Lognormale.....	83
Tableau VI.12 : Hydrogramme de crues du bassin du MAZB selon la méthode statistique Lognormale à 3 paramètres.....	84
Tableau VI.13 : Récapitulatif des résultats de débit de crue pour les différents méthodes.....	85
Tableau VI.14: Apport total du bassin du MZAB.....	88
Tableau V.1: Valeurs de débits de crues pour les différents modèles empiriques et lois statistiques.....	92
Tableau V.2 : Valeurs de la fonction objective pour le nombre de génération et de testes (méthode MALET GUETTIER).....	95
Tableau V.3: Valeurs de la fonction objective pour le nombre de génération et de testes (méthode GIANDOTTI).....	96
Tableau V.4 : Valeurs de la fonction objective pour le nombre de génération et de testes (méthode POSSENTI).....	97
Tableau V.5 : Valeurs de la fonction objective pour le nombre de génération et de testes (méthode SOKOLOVSKY).....	99
Tableau V.6 : la fonction objective pour les différentes méthodes.....	100
Tableau V.7 : les valeurs de débits obtenus par l'utilisation des algorithmes génétiques.....	100
Tableau V.8: les valeurs de débits obtenus par le modèle hydrologique Hec-Hms.....	105
Tableau V.9: les valeurs de débits obtenus par le couplage AG- HEC-HMS.....	105
Tableau V.10 : les indicateurs de performances pour différents modèles.....	106

Liste des symboles

P_s :	Partie de la pluie nette
X_1 :	Capacité du réservoir de production
S_k :	Le contenu du réservoir de production au début du jour k.
P_n :	Pluie nette
S' :	Le contenu nette du réservoir
E_s :	La quantité d'évaporation
X_4 :	Temps de base de l'hydrogramme unitaire
SH_1 :	Ordonnée de l'hydrogramme
t :	Le temps
SH_2 :	Ordonnée de l'hydrogramme
X_2	Coefficient d'échanges souterrains
F :	Echange souterrain en eau
X_3 :	Capacité à un jour du réservoir de routage
Q_d :	La composante d'écoulement
Q_1 :	La sortie de l'hydrogramme
K :	Le jour
ΔQ_s :	Le débit de ruissellement
$AUFT$:	Coefficient de ruissellement
P_e :	La précipitation moyenne d'entrée
HL_1 :	Paramètre de végétation
A_c :	La superficie du sous-bassin
T_sT :	Le pas de temps de calcul du modèle
EVP :	Le taux d'évapotranspiration potentielle journalière
CFA :	Coefficient d'ajustement
T :	La température moyenne journalière
TM :	La température mensuelle moyenne
EP :	La précipitation modifiée
EVR :	Le taux d'évapotranspiration réelle
SW :	L'humidité du sol
LP :	Contenu d'humidité critique
ΔQ :	Débit de recharge
ΔEP :	La fonction d'interception
STW_1 :	Le niveau du premier réservoir
STW_2 :	Le niveau de la 2 ^{ème} er réservoir
STW_3 :	Le niveau de la 3 ^{ème} réservoir
K_1 :	Réservoir supérieur
K_2 :	Réservoir inférieur 1
K_3 :	Réservoir inférieur 2
PR_g :	La production de la couche globale
σ_f :	Le taux de couverture végétale évaporant
ETP :	Evapotranspiration potentielle
E_g :	Evapotranspiration de la couche globale
E_{sol} :	Evaporation de sol

E_{veg} :	Transpiration des plantes
E_s :	Evapotranspiration de la couche de surface
q_m :	Le débit de la maille
$Pe(t)$:	La pluie efficace
K_m :	Le coefficient de réservoir
t_0 :	Le temps initial
T_m :	Temps de propagation
A :	La superficie de la maille
OBJFUN :	La fonction objective
Q_{sum} :	Le débit simulé
Q_{pro} :	Le débit de projet

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Contexte général

L'hydrologie est l'une des sciences qui s'attache à l'étude du cycle de l'eau d'une manière qualitative et quantitative, où la précipitation est la variable importante, et l'une des principaux moteurs du cycle de l'eau (RICHARD.H et al, 2002 ; MATHEVET.T, 2005 ;FOUCHIER.C, 2010 ; JENIFFER.K, 2011 ;WANDERS, 2015). Dans le domaine des ressources en eau, un grand nombre de victimes et pertes économiques sont causées par les risques d'inondations (Marjolein J.P. Mens,2015). Les précipitations ont un impact important sur la société et peuvent entraîner des pertes en vies humaines et des dommages matériels, par exemple en provoquant des glissements de terrain ou des inondations dus à une rupture de barrage. De tels événements peuvent également entraîner un dépassement de la capacité des réseaux d'égouts, ce qui entraîne une inondation des rues et des sous-sols. Pour éviter de tels risques et nuisances, des critères de conception appropriés doivent être formulés. Il appartient à la société de décider quel risque est acceptable, par exemple, à quelle fréquence les inondations sont permises. Par la suite, les scientifiques peuvent estimer les rejets et les précipitations, qui sont utilisés pour concevoir des structures hydrauliques selon les critères prévus par la loi ou l'accord. Ainsi, des estimations précises des profondeurs et des décharges des précipitations extrêmes sont de la plus haute importance (OVEREEM.A,2009).

Une partie essentielle de la gestion moderne de l'eau est la mesure des différents processus du cycle hydrologique. À cet effet, des réseaux de surveillance sont situés pour générer des données avec un contenu d'information utile, qui est utilisé par les gestionnaires des systèmes d'eau et par les décideurs pour maintenir une bonne performance de leur système d'eau (JOSE LEONARDO. A,2010). Si on s'intéresse à la problématique de la gestion des ressources en eau, la modélisation de la relation pluie-débit est un point très important (MORADKHANI et al, 2004 ; GRAHAM.D & BUTTS.M, 2005 ; LANNI.C, 2012 ; VANNIER.O, 2013 ;). En effet, les hydrologues et hydrauliciens élaborent plusieurs modèles hydrologiques nécessaires pour l'aide à la décision et afin de dimensionner les ouvrages hydrauliques qui protègent les agglomérations contre les risques naturels (FURUSHO.C, 2011). Ces modèles peuvent gagner du temps et de l'argent en raison de leur capacité à effectuer une simulation à long terme du comportement hydrologique des bassins versants (MORIASI.D &al, 2007).

La modélisation des données météorologiques est très importante pour comprendre le comportement hydrologique des bassins versants et le facteur de contrôle des risques naturels dans une zone particulière (zone aride). Les impacts hydrologiques de la variation des précipitations ont suscité un intérêt considérable pour l'hydrologie. Depuis le développement de modèles empiriques, la modélisation de la relation pluie-débit a été un sujet de recherche active pour les nombreux groupes de recherche du monde. Dans cette étude, notre objectif est le couplage entre les algorithmes génétiques et le système de modélisation hydrologique (HEC-HMS). C'est un outil essentiel qui permet de générer des résultats adaptés à un certain nombre de modèles dites empiriques.

Questions scientifiques

Qu'est-ce qu'une modélisation hydrologique ?

La modélisation hydrologique est appliquée pour vérifier la compréhension du processus hydrologique développée pendant la période d'étude. Plusieurs problèmes surviennent lorsque l'on travaille avec des modèles hydrologiques tels que la disponibilité des données (en particulier lorsqu'on travaille avec des modèles physiques), la diversité spatiale entre les paramètres observés et les paramètres du modèle, les différences entre les échelles de processus hydrologiques et les échelles de modélisation. Le choix d'un modèle dépend du but du modèle et de la disponibilité des données. (LOUISE MUL.M,2009).

Qu'est-ce qu'un bassin non jaugé ?

Un bassin non jaugé est un bassin dont les données hydrologiques sont considérées comme insuffisantes (autant au niveau de qualité, que la quantité) pour permettre le calcul des variables d'intérêt à des échelles spatiale et temporelle appropriées, et à une précision acceptable pour des applications pratiques (SIVAPALAN et al, 2003 ; RANDRIANASOLO.A,2012). Plusieurs études sur la simulation des débits dans les bassins non jaugés ont été menées au cours de ces trente dernières années, dans le but de pouvoir représenter au mieux le comportement hydrologique d'un bassin versant ne possédant pas de station hydrométrique à son exutoire (RANDRIANASOLO.A, 2012). Sans données hydrométriques, le modèle hydrologique ne peut être calé, par conséquent des méthodes régionales sont fournies pour relier les paramètres de modèle Pluie-Débit aux conditions de la région étudiée (FERNANDEZ.W, VOGEL.R & SANKARASUBRAMANIAN.A ,2000). Dans cette optique, l'utilisation d'un modèle de calcul des débits et d'estimation des eaux à l'échelle d'un bassin versant devient nécessaire (LOUKAS.A & VASILIADES.L, 2014). Il existe dans la littérature plusieurs modèles pour modéliser la relation pluie-débit, cependant ces modèles restent toujours des modèles applicables pour des cas bien précis et pour des régions tout à fait différents, et nécessitent des données adéquates pour la conduite et l'évaluation de leur performance (VERSINI.P, 2007 ; MORIN.S et al ,2012).

Plan de thèse

Cette thèse est structurée en cinq chapitres.

Le premier chapitre consiste à effectuer une analyse des différents modèles disponibles dans la littérature. L'objectif de cette étude est de ressortir vers la fin avec une synthèse sur le choix du modèle adapté au cas du bassin du MZAB caractérisé par l'absence totale des données hydrométriques.

Le deuxième chapitre présente la zone d'étude avec un descriptif détaillé sur les caractéristiques physiques, climatologiques, géomorphologiques, géologiques, ainsi que les principaux paramètres morphométriques du bassin versant du MZAB .

Le troisième chapitre présente l'étude du régime pluviométrique du bassin du MZAB à partir d'une analyse des données et tendances pluviométriques. Ce chapitre consiste à la recherche d'une distribution de fréquence capable pour déterminer les pluies, et ainsi qu'une estimation des paramètres et des quantiles pour la prévention des risques liés aux inondations pour le but

objectif est de trouver une loi théorique qui peut montrer une bonne présentation de la fonction de distribution des précipitations.

Le quatrième chapitre présente présente une liste des crues observées dans la région du MZAB ainsi que la méthode d'estimation des débits de crue fréquents. Ce chapitre consiste à évaluer des débits des crues par modèles hydrologiques, ces débits seront comparés avec le débit de projet dans le but d'adapter les modèles aux conditions algériennes.

Le cinquième chapitre sera donc réservée à l'application des modèles hydrologiques au bassin du MZAB et de mettre en évidence les principaux résultats et de faire ressortir les contributions ainsi que les propositions des modèles hydrologiques appropriés. Les résultats obtenus permettent d'autoriser un certain nombre de visions, où il serait intéressant d'expérimenter des modèles hydrologiques améliorant collectivement ou séparément les données d'un bassin versant par modèle hydrologique. Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle technique utilisant un couplage appelé : couple Algorithmes Génétiques-HEC-HMS.

1

ÉTUDE DES DIFFERENTS MODELES HYDROLOGIQUES EXISTANTS

Chapitre 1 :

Étude des différents modèles hydrologiques existants

1.1) Introduction

Compte tenu de l'utilisation toujours plus intense des ressources en eau, la modélisation hydrologique est l'un des aspects les plus importants de l'hydrologie appliquée. Elle intervient nécessairement pour le contrôle des inondations, la régularisation des cours d'eau, la production hydro-électrique, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques ainsi que pour le contrôle de la pollution. Pour répondre de façon adéquate à ces besoins, les hydrologues ont développé des outils que l'on appelle « modèles hydrologiques ». Ces modèles ont évolué très rapidement depuis quelques décades avec l'avènement des ordinateurs de plus en plus puissants.

1.2) Cycle de l'eau

Le cycle hydrologique est le mouvement continu de l'eau à travers les différentes composantes du système climatique de la terre (Fig.1.1). L'eau est absorbée par l'atmosphère de la surface de la terre sous forme de vapeur par évaporation. Il peut alors être déplacé d'un endroit à l'autre par le vent jusqu'à ce qu'il soit condensé à sa phase liquide pour former des nuages. L'eau revient ensuite à la surface de la terre sous forme de précipitation liquide (pluie) ou solide (neige, grésil, etc.) (CRACKEN.M & PERRY.J,2002). L'objet d'étude de l'hydrologie continentale est le cycle de l'eau sur ou à proximité des terres émergées. Un grand nombre de processus et de réservoirs sont mis en jeu au cours de ce cycle et la prise en compte des entrées et sorties d'eau dont ces processus sont responsables permet l'établissement du bilan de l'eau. L'hydrologie consiste à résoudre l'équation du bilan de l'eau. L'hydrologie est donc un vaste domaine d'étude qui fait appel à des disciplines variées telle la météorologie, la géologie, la nivologie, la glaciologie, l'écologie, etc (CHAPONNIERE.A,2005). Le transport de l'eau peut aussi avoir lieu sur ou sous la surface de la terre par écoulement. Le cycle hydrologique est utilisé pour modéliser le stockage et le mouvement de l'eau entre la biosphère, l'atmosphère, la lithosphère et l'hydrosphère. L'eau est stockée dans les réservoirs suivants : atmosphère, océans, lacs, rivières, glaciers, sols, champs de neige et eaux souterraines. Il se déplace d'un réservoir à l'autre par des processus tels que : évaporation, condensation, précipitation, ruissellement, infiltration, transpiration et écoulement des eaux souterraines.

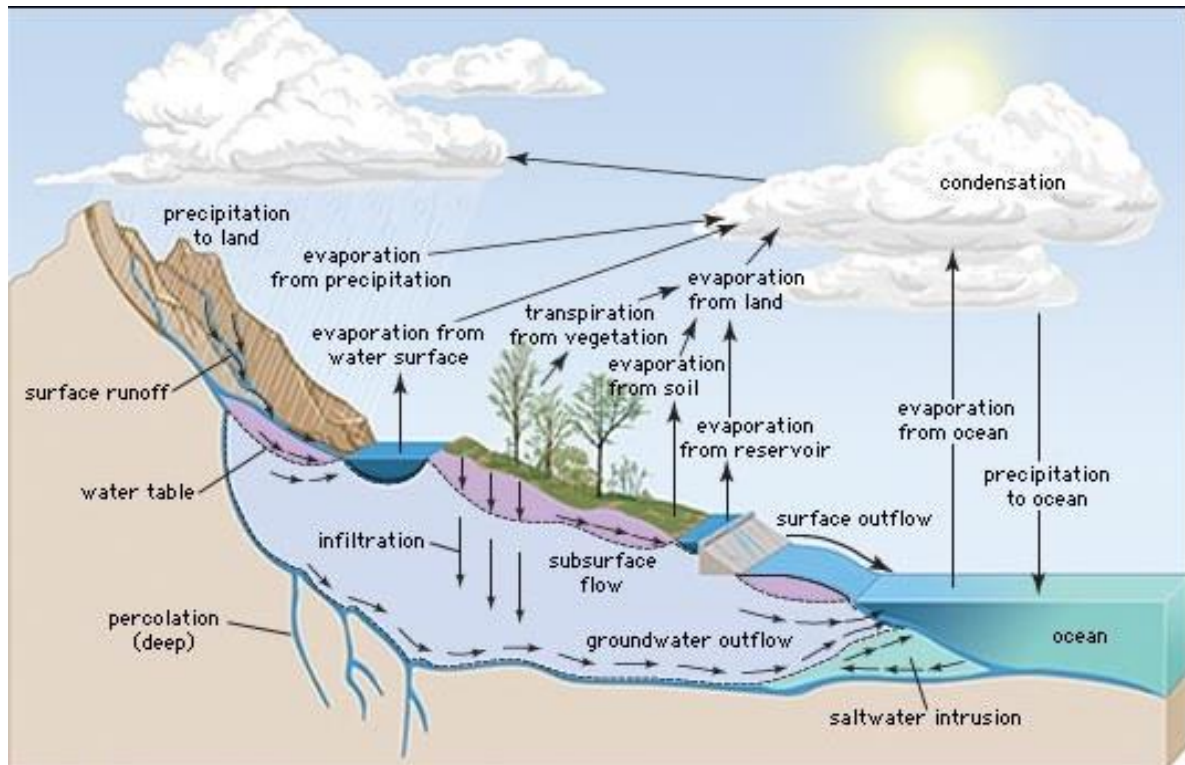


Fig.1.1. Cycle hydrologique (Encyclopædia Britannica,2008)

1.2.1) Les zones arides

Les zones arides sont des zones qui se caractérisent par une précipitation insuffisante et très variable et une chaleur extrême. Selon le programme intergouvernemental sur l'homme et la biosphère (**MAB**) de l'UNESCO en 1979, les régions arides sont principalement délimitées sur les indices d'aridité. L'aridité est la conséquence d'une diminution de précipitations et d'une augmentation de l'évaporation. Par conséquent, les valeurs du rapport entre précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle annuelle (P/ETP), ont été employées pour classifier des régions arides et semi-arides dans le monde. Le FAO/UNESCO (1976) a également adopté cet index pour son étude de risque de désertification, du fait qu'il exprime mieux l'aridité. Selon le classement de (MAB) si : $0.03 < P/ETP < 0.20$, la zone est caractérisée comme une zone aride là où la végétation dispersée composée de buissons et de petits arbustes épineux ou sans feuilles. L'utilisation pastorale très légère est possible mais aucune culture sous pluie. Les précipitations annuelles varient entre 80 et 350 mm (WEICHENG.W,2003).

1.2.2) Cycle de l'eau en zones arides

Le cycle hydrologique comporte les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre (Fig. 1.2). En zone aride, l'eau évaporée à partir du sol et des autres surfaces d'eau s'ils existent enlèvera à l'atmosphère et produire une masse d'air humide qui provoque le refroidissement nécessaire pour favoriser simultanément la saturation et la condensation de cette eau évaporée sous forme de gouttelettes et en résulte la naissance des nuages (pluie). Dans le cas de l'existence des végétaux, la circulation de la pluie tombée peut être coupée par ces végétaux puis être partiellement mise en forme de vapeur à l'atmosphère et autre partie atteint du sol. Selon l'occupation du sol, la quantité de la pluie tombée peut être s'écouler en surface jusqu'à l'accumulation dans des cours d'eau ou s'infiltrer dans le sol. La quantité reste doit être percoler vers les zones plus profondes pour provoquer le renouvellement des réserves souterraines. A partir des réserves souterraines, l'écoulement de l'eau peut arriver à la surface de la terre comme

des sources ou des cours d'eau. En fin, l'eau qui transpirée par les plantes et évaporée à partir du sol complété le cycle hydrologique. Plusieurs processus complexes génèrent le cycle de l'eau (Fig.1.2), ces processus constituent les principaux axes de l'hydrologie qui sont rendus par l'élément moteur et l'organe vital du cycle hydrologique (le soleil).

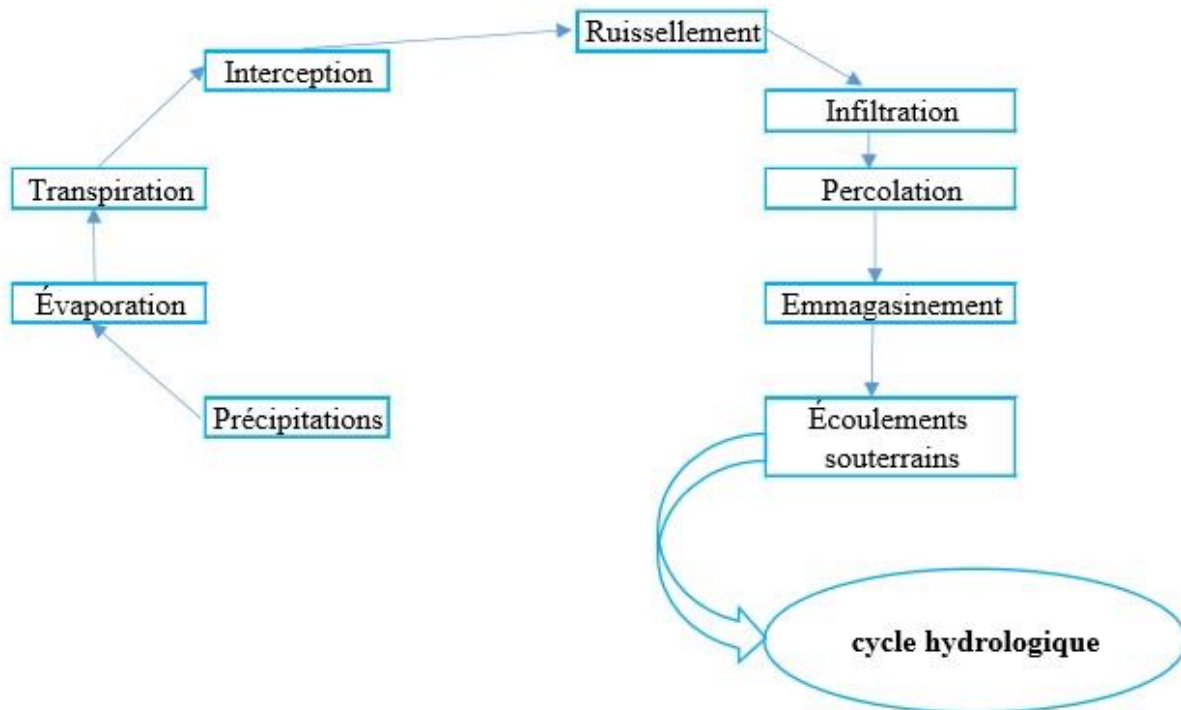


Fig.1.2. Représentation schématique du cycle de l'eau.

1.3) La modélisation hydrologique

1.3.1) Définition du bassin versant

Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et ses effets. Plus précisément, le bassin versant qui peut être considéré comme un « système » est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire. Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau, est donc défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est entièrement caractérisé par son exutoire, à partir duquel nous pouvons tracer le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite (MUSY.A,2005)

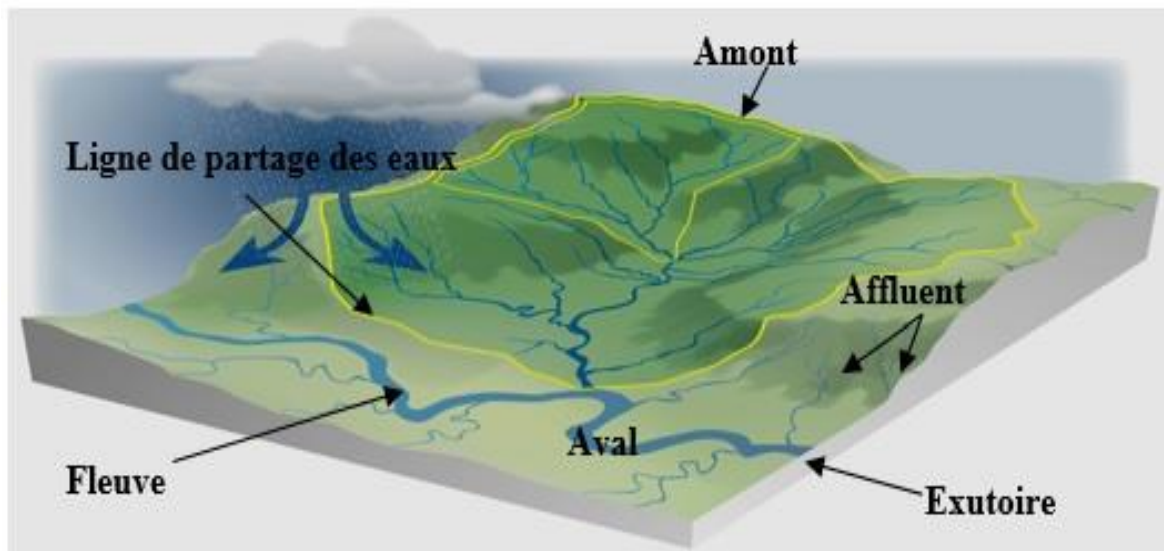


Fig.1.3. Schématisation d'un bassin versant topographique (SIAG)

1.3.2) Comportement hydrologique des bassins versants

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant s'effectue le plus souvent par le biais de l'étude de la réaction hydrologique du bassin face à une précipitation. Cette réaction est mesurée par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système. La représentation graphique de l'évolution du débit Q en fonction du temps T constitue un Hydrogramme de crue. La réaction du bassin versant peut également être représentée par un Limnigramme qui n'est que la représentation de la hauteur d'eau mesurée en fonction du temps. La réaction hydrologique d'un bassin versant à une sollicitation particulière est caractérisée par sa vitesse et son intensité. Ces deux caractéristiques sont fonction du type et de l'intensité de la précipitation qui le sollicite mais aussi d'une variable caractérisant l'état du bassin versant qui est le temps de concentration des eaux sur le bassin (MUSY.A,2005).

1.3.3) Définition des modèles hydrologiques

Pour un phénomène donné que ce soit physique, chimique, biologique ou bien hydraulique, le modèle joue un rôle très important pour trouver une représentation schématique de ce phénomène grâce à un ensemble de relations mathématiques. Les modèles sont le principal moyen pour gérer la complexité des systèmes dont ils offrent une représentation abstraite et simplifiée, où seuls les détails utiles permettant de modéliser une tâche donnée du système sont gardés. Les modèles hydrologiques permettent donc de transformer des séries décrivant le climat d'un bassin versant (précipitation et températures) parfois appeler les données en une série de débits parfois appeler les résultats. Cette transformation est souvent divisée en deux parties:

a. Fonction de production

La fonction de production consiste à déterminer le bilan d'eau à l'échelle du bassin versant. Ce bilan permet de répartir la pluie " brute " observée en pluie "nette", en quantité d'eau évapotranspirée et en quantité d'eau stockée par le bassin versant. Dans une fonction de production, cinq paramètres sont traités :

- Transpiration de la végétation ;
- L'évaporation du sol ;
- L'infiltration de l'eau dans le sol ;
- La percolation de l'eau le long du profil de sol ;

- La recharge profonde qui alimente les nappes souterraines.

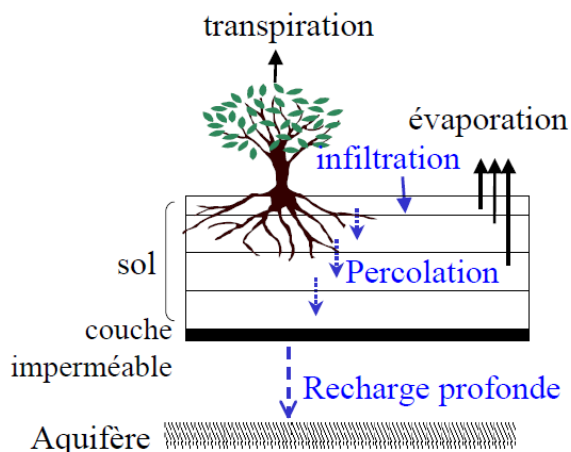


Fig.1.4. Schématisation des paramètres de la fonction de production

b. Fonction de transfert

Une deuxième partie souvent appelé le "**transfert**" ou "le routage", qui consiste à répartir dans le temps la quantité d'eau participant aux débits du bassin versant étudié. Plusieurs méthodes existent pour déterminer la fonction de transfert d'un bassin. Les plus complexes utilisent les équations de Barre Saint Venant avec les méthodes d'onde diffusante ou d'onde cinématique. Les plus simples utilisent la distance de chaque point de la grille à l'exutoire et affectent une vitesse (CARINA.,2008).

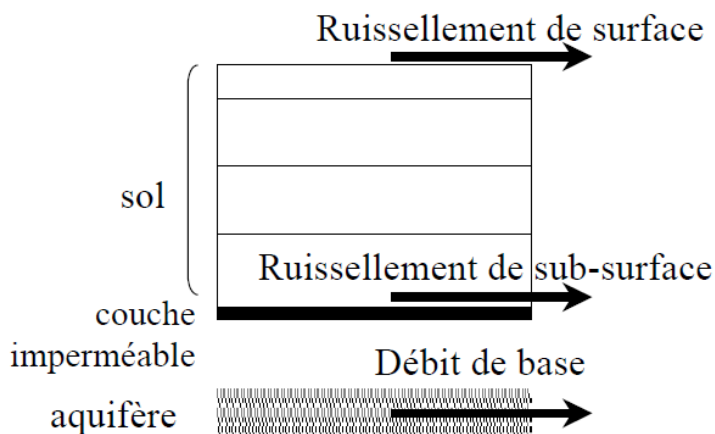


Fig.1.5. Schématisation des paramètres de la fonction de transfert

1.3.4) Chronologie de la modélisation de la relation pluie-débit sur les bassins non jaugés

Plusieurs études existent pour la représentation du comportement hydrologique du bassin versant qui ne comportent aucune station hydrométrique à son exutoire. Ces études consistent à produire un modèle hydrologique utilise des paramètres physiques qui peuvent être disponibles. La régionalisation parmi les approches utilisées dans le domaine de production des modèles hydrologiques des bassins non jaugés, cette approche permet de relier les caractéristiques climatiques et physiques d'un bassin versant avec les paramètres d'un modèle hydrologique pour transfère les paramètres d'un modèle, des bassins jaugés aux bassins non jaugés. A ce titre, nous proposons dans le cadre de ce point une chronologie de la modélisation de la relation pluie-débit sur les bassins non jaugés. Une liste des travaux sur la modélisation hydrologique est présentée dans ce point afin de placer notre recherche dans la catégorie des travaux menés par les

hydrologues sur le domaine de la modélisation de la relation pluie-débit dans les bassins non jaugés.

- Juncker (1971) a exploité des informations à l'échelle globale pour définir des régions homogènes, son étude a porté sur 48 bassins versants et analyser 7 paramètres du cycle hydrologique.
- Mimikou (1984) montre l'influence de la superficie du bassin sur des caractéristiques de l'écoulement au nord-ouest de la Grèce. Son étude a porté sur 11 bassins versants, (200 à 5000 km²).
- Eric SERVAT et Alain DEZETTER (1992) ont étudié la modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau. Essai d'extension aux bassins versants non jaugés, leur étude a porté sur 20 bassins versants au nord-ouest de la Côte-d'Ivoire (100 à 4 500 km²).
- Micovic et Quick (1999) montrent que l'hétérogénéité entre les bassins ne permet pas de relier le débit aux caractéristiques des bassins.
- Claudia Rojas Serna (2005) pose la question suivante : Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ?, elle s'intéresse à la détermination des paramètres d'un modèle pluie-débit sur les bassins non jaugés.
- Marie BOURQUI (2008) analyse l'impact de la variabilité spatiale des pluies sur les performances des modèles hydrologiques. Son étude a porté sur 200 bassins français.
- Annie RANDRIANASOLO (2012) étudié la Généralisation de l'approche d'ensemble à la prévision hydrologique dans les bassins versants non jaugés, elle s'appuie sur une large base de données constituée d'environ 1000 bassins versants français, dont un jeu clé de 211 bassins versants qui permet la validation des approches développées.
- Florent LOBLIGEOIS (2014) pose la question suivante : Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ?. Son étude concernant une Diagnostic sur 181 bassins versants français

1.3.5) Construction d'un modèle hydrologique

Généralement, un modèle hydrologique est construit par 5 paramètres importants (Fig.1.6) :

- a) **Paramètres d'entrée** : sont des séries décrivant le climat d'un bassin versant (précipitation, ETP et températures ...etc.).
- b) **Paramètres de sortie** : sont généralement les débits modélisés à l'exutoire du bassin versant
- c) **Paramètres d'état** : à un moment donné, l'état de système est évolué par les variables internes d'un modèle hydrologique. Pratiquement, ces variables peuvent être la fonction de production, l'opérateur d'un algorithme d'optimisation, ..., etc.
- d) **Paramètres d'un modèle** : les paramètres des modèles hydrologiques, qu'ils aient une pseudo-signification physique ou qu'ils soient calés, servent à adapter la paramétrisation des lois régissant le fonctionnement du modèle, au bassin versant étudié (MATHEVET.T, 2005).
- e) **La performance** : généralement, la performance permet d'estimer la fonction objective (erreur). La performance un modèle hydrologique est validé par les indicateurs statistiques de performance : L'erreur moyenne des carrés MSE (Mean Square Error), le coefficient d'efficacité de Nash–Sutcliffe NSC (Nash–Sutcliffe coefficient of efficiency), l'erreur root- moyenne-carrée- RMSE (Root-Mean-Square Error) et l'Erreur de pourcentage absolue moyenne MAPE (Mean Absolute Percentage Error).

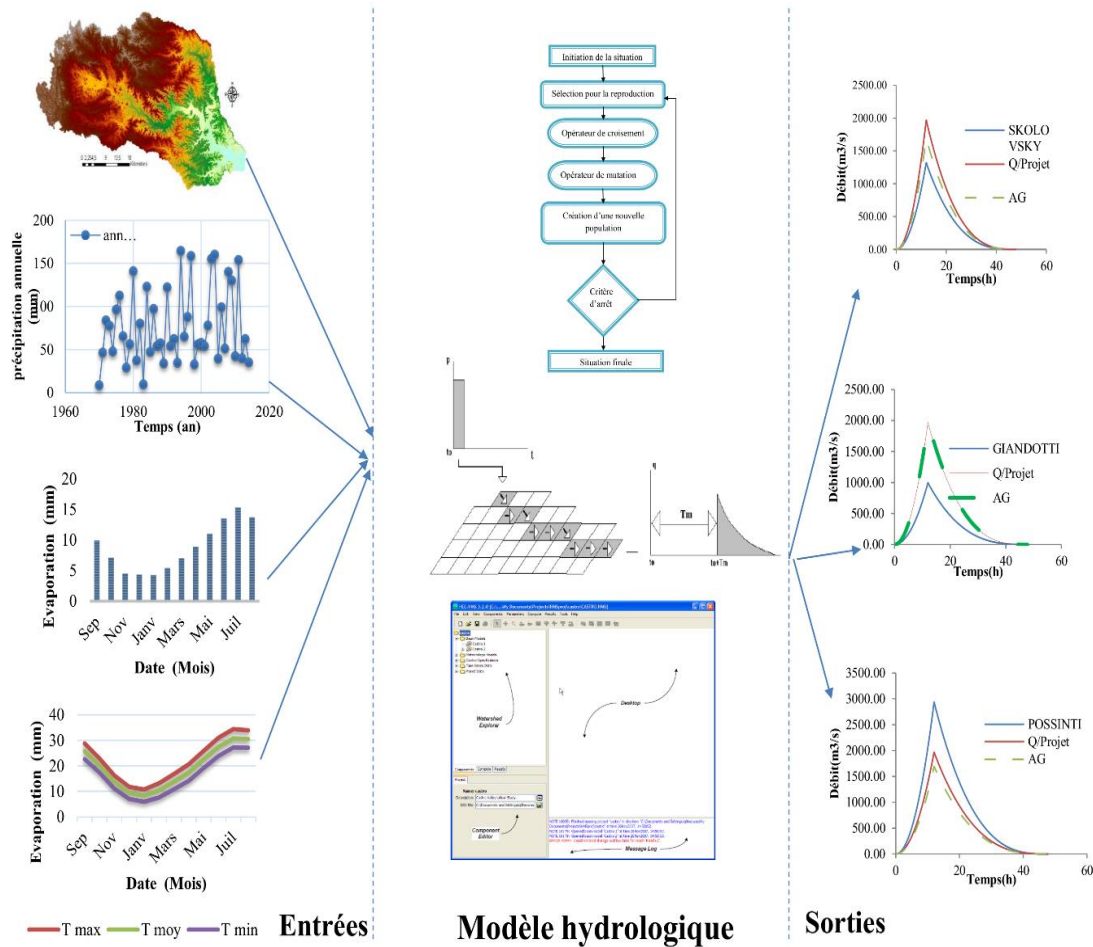


Fig.1.6. Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique

1.4) Utilisation de modèle hydrologique

1.4.1) Prédiction de crues:

La forte accumulation de pluie est la cause principale des inondations. Une forte pluie amène un grand volume d'eau dans un bassin hydrographique ce qui peut augmenter le débit du cours d'eau. De plus, pour mieux anticiper la variation du niveau des eaux, il faut connaître l'état préalable de saturation des sols et surtout les quantités d'eau qui s'ajouteront durant les jours suivants. En effet, l'eau qui tombe dans un bassin hydrographique prend un certain temps à s'écouler, selon le type de terrain et la pente. Durant cette période, les quantités qui s'ajouteront affecteront le ruissellement. A ce titre, une méthode appliquée pour déterminer la variation de la quantité d'eau en fonction du temps appelé « la prédiction ». La prédiction des crues est la modélisation des quantités de précipitations, solides ou liquides, reçues dans un bassin hydrographique et de leur effet sur l'écoulement dans les cours d'eau. Les hydrologues utilisent des modèles de prédiction numérique du temps pour estimer la quantité de pluie ou neige qui devraient tomber, et le débit des rivières et utilisent des programmes de modélisation des crues pour prévoir les débordements et tenter de limiter les dégâts d'inondation aux riverains. Ces systèmes servent aussi souvent à contrôler les systèmes d'égouts pluviaux, le niveau des barrages et les canaux de dérivations des crues.

1.4.2) Prévision d'étiages

La prévision d'étiage à long terme est l'une des questions émergentes en hydrologie en raison de la demande croissante en eau en période sèche. Des prévisions fiables de débits de longue de quelques semaines à quelques mois à l'avance, peuvent améliorer la gestion des ressources en eau et de ce fait l'économie de la société et les conditions de vie aquatique (PUSHPALATHA.R,2013). En hydrologie, l'étiage correspond sur plusieurs années à la période de l'année où le niveau d'un cours d'eau atteint son point le plus bas (basses eaux). Cette valeur est annuelle. Il intervient pendant une période de tarissement et est dû à une sécheresse forte et prolongée qui peut être fortement aggravée par des températures élevées favorisant l'évaporation, et par les pompages agricoles à fin d'irrigation.

1.4.3) Prédétermination de débits extrêmes

L'application des différentes méthodes de prédétermination des pluies et des débits peut conduire à des estimations parfois très différentes du risque hydrologique en un site donné, Si l'on s'intéresse aux crues, il se trouve que le débit est le résultat des interactions des précipitations et du sol. Sa modélisation se fait par des méthodes statistiques, conceptuelles et déterministes. Et pour chaque méthode, la pluie est une donnée importante pour la modélisation des débits. En effet, les études hydrologiques réalisées pour la prévention du risque d'inondation ou la proposition d'un aménagement ou dimensionnement d'ouvrages hydrauliques couvrent une large gamme de méthodologies. Elles visent à déterminer des valeurs de référence de pluie ou de crue extrême, associées à une période de retour T donnée ou à un maximum connu.

L'estimation des pluies extrêmes permet la localisation des risques, ainsi que leur répartition spatiale (extension spatiale du risque). Plusieurs recherches ont pour objet d'étudier le processus de génération des précipitations et des débits. Parmi ces recherches nous ne citons que la modélisation qui est la méthode utilisé dans notre travail

La théorie des valeurs extrêmes (EMBRECHTS et al., 1997, COLES.S, 2001, BEIRLANT et al., 2004), fondée sur des résultats de la théorie des probabilités, permet d'obtenir un cadre mathématique pour l'estimation des probabilités de valeurs rares à extrêmes de pluie et de débit.

1.4.4) Études d'impact anthropique sur l'hydrologie

toujours en hydrologie , le mot anthropique correspondant essentiellement a l'intervention de l'homme sur un paysage , sol ou relief pour objet de réaliser une propositions d'aménagement sur les oueds ou bien sur les cotes amont des bassin versant a fin de protéger les agglomérations contre les risques causer par l'enlèvement de niveau de l'eau en cas des crues. Ces changements affectent directement sur le comportement hydrologique des bassins.

A ce titre, les hydrologues proposent l'application des modèles pour estimer les différents facteurs qui influent sur la variation de la relation pluie – débit.

1.5) Différents types des modèles hydrologiques

Il existe de nombreux modèles pour l'étude et modélisation du comportement hydrologique des bassins versant avec une spécificité et domaine d'application pour chaque modèle. Après le choix du modèle, il faut avoir l'évaluation de sa capacité à représenter la réalité afin de valider la performance du modèle et vérifier la superposition des résultats simuler par rapport à l'observation.

Le premier modèle hydrologique était dû à Perreault en 1674. Il était annuel, global sur le bassin versant de la Seine à Paris. Il annonçait que l'écoulement correspondait au sixième de la pluie. Depuis, la modélisation hydrologique s'est largement développée et l'on peut différencier les modèles disponibles selon le type d'approche utilisé pour représenter le cycle hydrologique (CHKIR.N,1994). Selon Singh en 1995 et Payraudeau en 2002, le choix d'un type de modèle repose principalement sur la représentation de l'espace, du temps et des processus décrit. Donc les différences portent notamment sur les options de simulation en termes de discrétisation spatiale: les modèles sont globaux ou distribués. Les différences de représentation temporelle mènent à l'existence de modèles continus ou évènementiels. Et enfin, ils diffèrent au point de vue de l'expression des phénomènes hydrologiques, liés soit à des équations empiriques, soit à des équations physiques, soit à une simplification plus ou moins poussée de ces équations physiques : les modèles sont empiriques ou conceptuels. Cependant, certaines classifications distinguent encore les modèles déterministes ou stochastiques, les modèles cinématiques ou dynamiques, les modèles de prédiction, gestion ou aménagement. Nous avons repris la classification de Gume (2007), qui résume en deux grands groupes les différentes autres classifications existant dans la littérature, les différents modèles sont représentés dans la figure au-dessous.

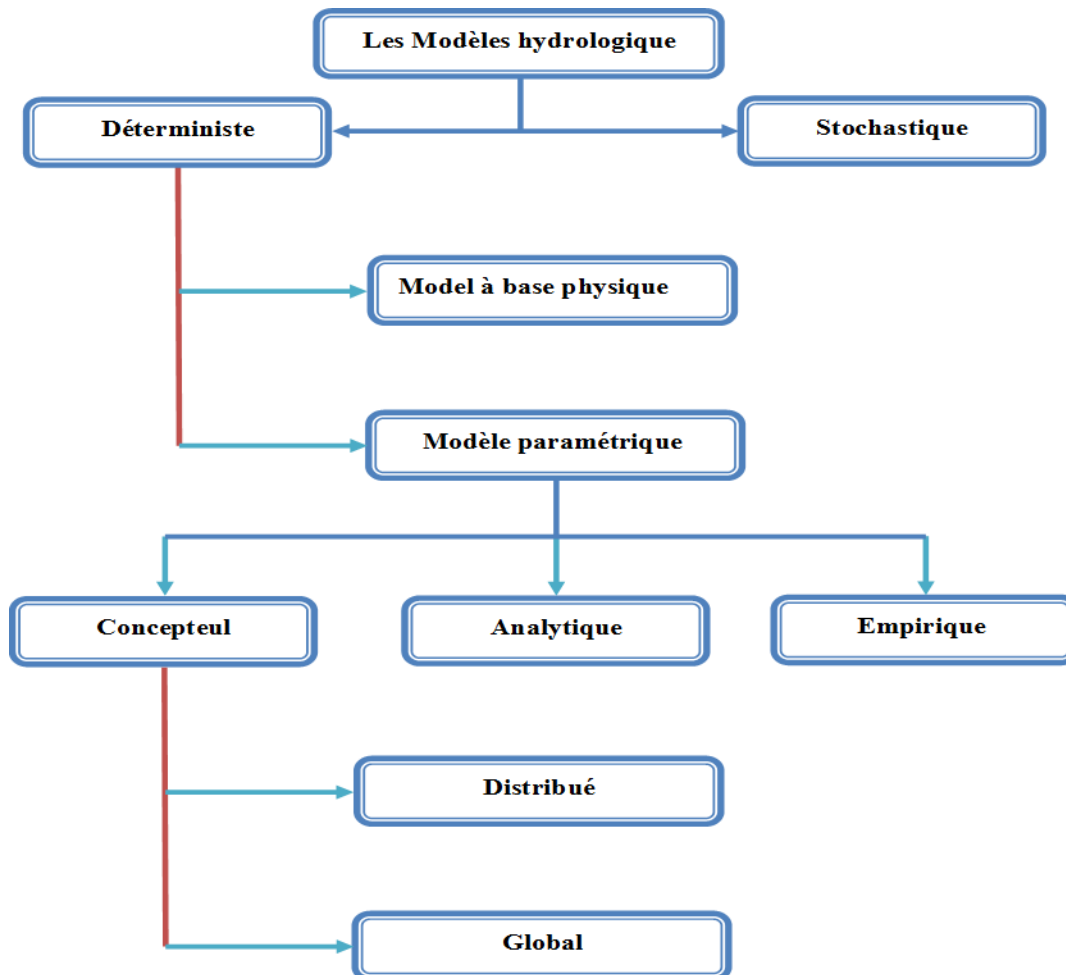


Fig.1.7. Les Modèles hydrologiques

1.5.1) Modèles Stochastiques

L'hydrologie stochastique est conçue comme la partie de l'hydrologie générale qui traite les processus aléatoires de l'hydrologie et lequel les composants aléatoires ne devraient pas être négligés de telles façons que chaque modèle stochastique contient habituellement une ou plusieurs composantes indépendantes. De tous les problèmes rencontrés dans l'hydrologie stochastique quatre points habituellement très importants dans la pratique:

- L'extraction d'information à partir de données disponibles;
- Transfert de l'information d'un endroit à placer ou de variable par variable;
- Description condensée des processus aux fins de leur simulation dans la forme d'échantillons;
- La prévision de l'événement par la création des nouvelles sorties. (YEVJEVIEH.V,1987).

Le modèle stochastique basée sur le concept que la variable d'intérêt est représenté par la variabilité et l'incertitude dans et la sortie représente la fonction de distribution de probabilité. (GLIŃSKI.J et al,2011).

1.5.2) Modèles Déterministes

Une modélisation déterministe ne fait intervenir aucune variable aléatoire. Les relations entre variables sont strictement fonctionnelles. La variabilité (système fluctue pour une cause inconnue ou non contrôlée) n'est pas modélisée par simulation.

Pour les modèles déterministes on distingue plusieurs types selon la classification de **Gume** en 2007 tel que:

1.5.2.1) Modèles à Base physique

Un modèle à base physique représente les processus de la relation pluie-débit en utilisant les lois physiques régissant ces processus. Les modèles de surface continentale sont des modèles à base physique qui représentent la relation pluie-débit. Ce type de modèle permet de plus, de calculer les différents termes du bilan d'eau du bassin versant étudié.

1.5.2.2) Modèle Paramétrique

L'identification de système consiste à rechercher un modèle mathématique d'un système dynamique à partir de données expérimentales et de connaissances disponibles a priori. Ce modèle est caractérisé par une structure et par des paramètres qu'il convient de choisir et d'ajuster, afin de reproduire au mieux le comportement entrée-sortie du système. (GARNIER.H et al ,2014).

Un modèle paramétrique c'est un modèle dans lequel les temps de survie sont supposés être distribués selon une loi parfaitement connue (BERCHTOLD.A,2014).

Traditionnellement, les méthodes d'identification de système sont employées afin de déterminer des modèles permettant la synthèse de lois de commande. Ce domaine d'utilisation conventionnel n'est toutefois pas le seul et les méthodes sont aussi utilisées pour :

- L'estimation de paramètres à physiques non directement mesurables ;
- Le diagnostic de systèmes à base de modèle ;
- La simulation, utilisée à des fins de conception, de prévision ou formation ;
- L'interprétation d'essais. (GARNIER.H et al, 2014).

Pour bien définir les modèles paramétriques on distingue :

a) Modèle Empirique

De nombreux outils de prévision sont des modèles empiriques basés sur une représentation très schématique du fonctionnement d'un bassin versant ou d'une rivière. Certains sont même des objets totalement « déconnectés » de la physique des écoulements, comme peuvent l'être des relations de régression (ex : des relations linéaires ou des réseaux de neurones artificielles). En modélisation hydrologique, un modèle empirique est construit autour de relations mathématiques directes établies entre les entrées et les sorties observées sur le bassin versant considéré. Ce type de modèle ne cherche pas à décrire les processus impliqués dans la relation pluie-débit et est donc souvent caractérisé comme des modèles "boîtes noires". C'est-à-dire une représentation d'un système sans considérer son fonctionnement interne, que ce soit un objet mécanique ou électronique, un organisme, une personne, un mode d'organisation sociale, un bassin versant, ou n'importe quel autre système. Il s'agit généralement de modèles globaux.



Fig.1.8. Schématisation d'un modèle Boîte noire

b) Modèle Analytique

Modèle pour lequel les relations entre les variables de sortie et les variables de forçage ont été établies par analyse de séries de données. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres des modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables. (GAUME.E ,2000)

c) Modèle Conceptuel

Modèle dans lequel le fonctionnement du bassin versant est représenté par des analogies : concepts. L'analogie la plus souvent utilisée pour représenter le fonctionnement des sols et des nappes est celle du réservoir dont le débit de vidange dépend du taux de remplissage (GAUME.E ,2000). Parmi les modèles hydrologiques conceptuels utilisées pour la modélisation de la relation pluie-débit nous avons Le modèles CEQUEAU qui est le parfait exemple.

Les modèles conceptuels sont divisés par deux familles :

❖ Modèle Conceptuel Distribué

Les modèles pluie-débit sont dit distribués géographiquement s'ils tiennent compte de la spatialisation des phénomènes, c'est-à-dire quand leurs fonctions de production et de transfert ne sont pas homogènes sur tout le bassin versant. Cette catégorie inclut des modèles empirique, conceptuels et à base physique. Bien qu'un modèle distribué soit susceptible de fonctionner de manière optimale avec, en forçage d'entrée, un champ de pluie, il peut être également utilisé avec une pluie moyennée sur le bassin.

❖ Modèle Conceptuel Globale :

Les modèles globaux sont conçus pour pouvoir traiter efficacement des problèmes où la fonction à optimiser est multi-modale. Les méthodes globales, par opposition aux locales, explorent une partie beaucoup plus grande de l'espace des paramètres. Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer.

La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue. Un exemple de ce type de modèle est le IHRACRES (CHARLES.P ,2000).

1.6) Problématique et objectif

Les zones arides sont des zones qui sont caractérisées par une valeur de précipitation très petite et irrégulière. Donc, il est nécessaire de développer notre compréhension au comportement hydrologiques du bassin versant en zones arides d'une part et augmenter nos capacités de modélisation des crues pour protéger les agglomérations contre les risques d'inondations. La résolution des problèmes liés à la gestion des bassins versants notamment l'aménagement des ponts et des barrages, la prévision des conséquences des inondations nécessite une parfaite connaissance de leurs étiages et de leurs crues.

Dans cette optique, l'utilisation d'un modèle de calcul des débits et d'estimation des eaux à l'échelle d'un bassin versant devient nécessaire. L'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse « satisfaisante » aux questions que l'on se pose à propos de l'objet modélisé, ce qui nous renvoie à l'objet assigné au modèle qui doit bien entendu précéder et orienter la conception et la construction du modèle.

Généralement les modèles sont utilisés pour la prévision, la prédétermination (évaluation de données d'un projet), la reconstitution ou l'extrapolation de données, etc. Dans ce travail, nous cherchons d'une part à comprendre le comportement hydrologique du bassin versant du MZAB située au Sud-Est de l'Algérie et d'autre part à sortir vers la fin avec une recommandation utile pour mieux cerner la gestion future des inondations.

Dans le cadre de la modélisation hydrologique, le but poursuivi n'est pas aisément la détermination optimale du débit à l'exutoire du bassin versant, mais aussi la modélisation la plus réaliste possible. Notre travail a pour objectif, l'adaptation des nouveaux modèles hydrologiques aux conditions de la zone aride et non jaugée. A la base de la comparaison entre les résultats obtenus et les valeurs de débit de projet, nous pourrions analyser plus aisément les capacités de couplage (AG & HEC-HMS).

L'objectif de travail est basé sur

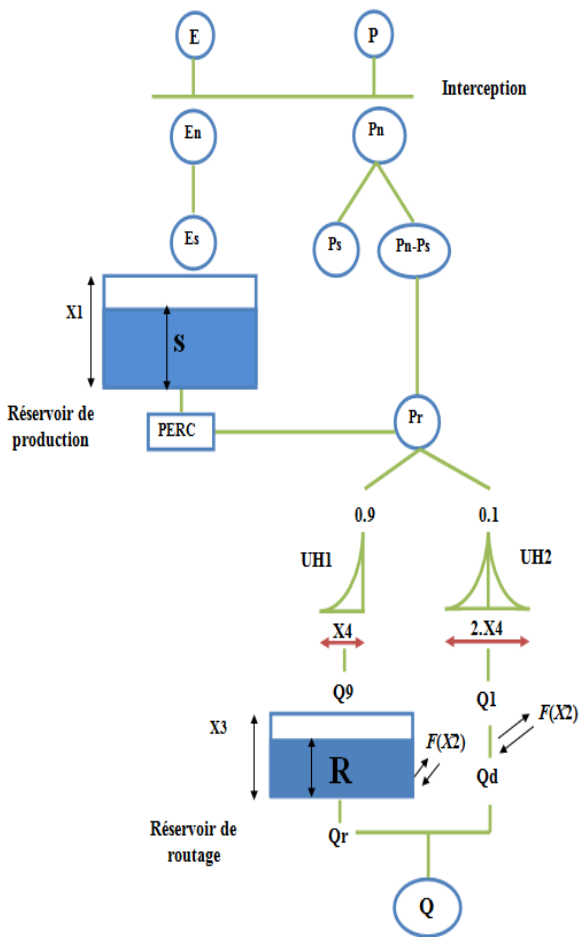
- La bonne compréhension du comportement hydrologique du bassin du MZAB
- L'évaluation des débits des crues par plusieurs modèles empiriques
- Modélisation de l'optimisation des données météorologiques à l'aide des algorithmes génétiques
- L'estimation des débits de crues par le modèle HEC-HMS, en utilisant pour cette estimation les données météorologiques optimisées
- La comparaison des valeurs de débits estimées par le couplage (AG & HEC-HMS) avec les hydrogrammes projetés dans le but d'adapter le modèle aux conditions algériennes et de contrôler la validité des formules empiriques largement utilisées.

1.7) Exemples des Modèles hydrologiques existants

Dans le domaine de l'hydrologie et spécialement la modélisation de la relation pluie-débit, plusieurs modèles sont utilisés pour l'aide à la décision aux aménagistes pour protéger les agglomérations contre les risques naturels. Dans cette thèse, on va énoncer quelques modèles essentiels utilisés dans le domaine de modélisation de la relation pluie-débit.

1.7.1) Le 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. 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, ...etc.).



$$P_s = \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tan\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \cdot \tan\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}$$

$$S' = S_k + P_s + E_s$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4, \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$$

$$\text{Pour } t \geq X_4, \quad SH1(t) = 1$$

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

$$F = X_2 \cdot \left(\frac{R_k}{X_3}\right)^{\frac{7}{2}}$$

$$Q_d = \max(0; Q_1(k) + F)$$

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

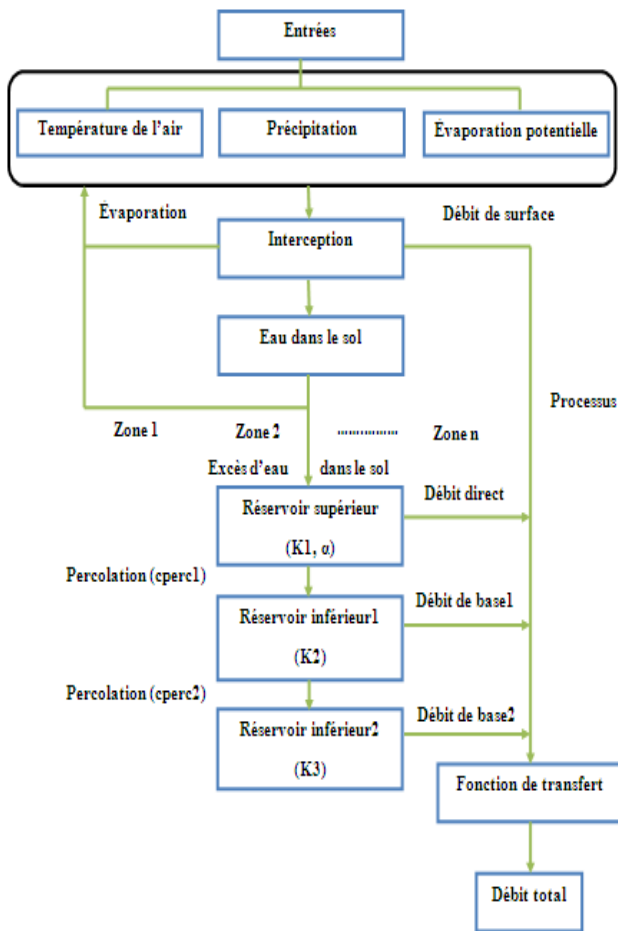
$$Q_r = R' \cdot \left(1 - \left(1 + \left(\frac{R'}{X_3}\right)^4\right)^{-\frac{1}{4}}\right)$$

$$Q_k = Q_r + Q_d$$

Fig.1.9. Schéma conceptuel du modèle GR4j

1.7.2) Le modèle hydrologique universel HBV

Le modèle hydrologique universel **HBV** est un modèle conceptuel global à l'échelle du bassin versant qui est capable de calculer le débit pour divers forçages et mécanismes. Ce modèle est connu pour sa robustesse, malgré sa simplicité relative. Pour simplifier d'avantage le modèle, certaines composantes peuvent être rendues inactives. Le modèle **HBV** consiste en une fonction de production pour l'écoulement vertical où la fonte de la neige est calculée par la méthode des degrés-jours, où la recharge de la nappe et l'évapotranspiration réelle sont des fonctions du stockage en eau actuel dans le réservoir sol et où la formation de l'écoulement de surface se fait à travers trois réservoirs dont le premier est non-linéaire. Pour les fonctions de production neige et sol, les calculs sont réalisés pour chaque zone. Ainsi le modèle est semi-distribué alors que les paramètres de la fonction de transfert sont globaux par sous-bassin (OUACHANI.R et al, 2010).



$$\Delta Q_s = AUFT (P_e - HL1) A_c / T_s T$$

$$PE = HL1 + (1 - AUFT) \cdot (P_e - HL1)$$

$$EVP = 1 + CFA \cdot (T - T_M) EP$$

$$EVR = \left(\frac{SW}{LP} \right) EVP \quad \text{si } SW < LP$$

$$EVR = EVP \quad \text{si } SW > LP$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta PE} = \left(\frac{SW}{FC} \right)^\beta$$

$$\text{Percolation 1} = c_{perc1} \cdot STW_1$$

$$Q_1 = K_1 (STW_1)^{1+\alpha}$$

$$\text{Percolation 2} = c_{perc2} \cdot STW_2$$

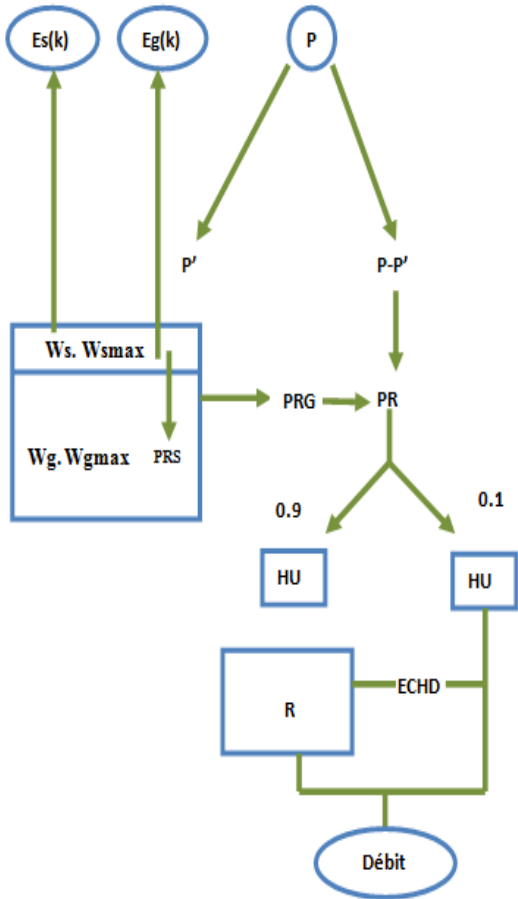
$$Q_2 = K_2 STW_2$$

$$Q_3 = K_3 STW_3$$

Fig.1.10. Schéma conceptuel du modèle HBV

1.7.3) Le modèle hydrologique GRHUM

Le modèle GRHUM (C. LOUMAGNE et al., 1996) est un modèle journalier conceptuel globale développé pour tester l'apport d'une prise en compte des indices hydriques. Il a été développée à partir du modèle pluie-débit journalier conceptuel GR4 (EDIJATNO et C. MICHEL, 1989 ; N. NASCIMENTO et C. MICHEL, 1992) qui a été testé avec succès sur plus de 300 bassins versants de différentes caractéristiques (sol, végétation, climat) (EDIJATNO, 1991 ; Z. MAKHLOUF, 1994).



Paramètre :

Wg max : contenu en eau max de la couche globale

Ws max : contenu en eau max de la couche de surface

K : paramètre du taux de couverture végétale évaporant

B : pseudo-capacité max du réservoir gravitaire

C : durée de base des hydrogrammes unitaires

D : paramètre des échanges souterrains

$$PR_g = W_g - w_g \max$$

$$\sigma_f = K \frac{ETP}{ETP_{\max}}$$

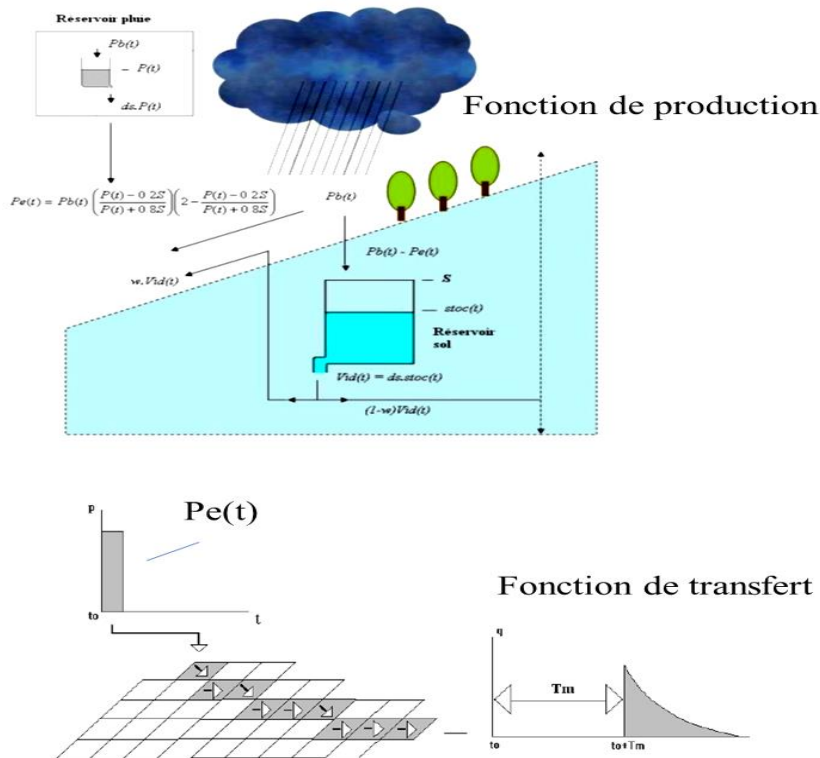
$$E_g = (1 - \sigma_f)E_{\text{sol}} + \sigma_f E_{\text{veg}}$$

$$E_s = (1 - \sigma_f)E_{\text{sol}} + 0.2\sigma_f E_{\text{veg}} \frac{W_s}{W_{s\max}}$$

Fig.1.11. Schéma conceptuel du modèle GRHUM

1.7.4) Modèles ATHYS

L'Atelier Hydrologique Spatialisé, ATHYS c'est un groupe de modèles pour traiter les données hydro-climatiques et géographiques. Plusieurs fonctions ont été faites par ce logiciel tel que la prévision des événements extrêmes, gestion des ressources en eau, l'impact du changement climatique et anthropiques sur le comportement hydrologique des bassins versant.



$$q_m(t) = \frac{Pe(t)}{K_m} \exp\left(\frac{-t - (t_0 + T_m)}{K_m}\right) \cdot A \quad (1-1)$$

Fig.1.12. Schéma conceptuel du modèle ATHYS

1.7.5) Le modèle hydrologique HEC-HMS

Le modèle hydrologique HEC-HMS est un modèle universel pour modéliser le processus pluie – débit dans un bassin versant (SCHARFFENBERG.W et al, 2010 ; DANIEL & al, 2011). Il est conçu pour être utilisé pour de grandes surfaces géographiques afin de résoudre si possible un plus grand nombre de problèmes (Fig.1.13).

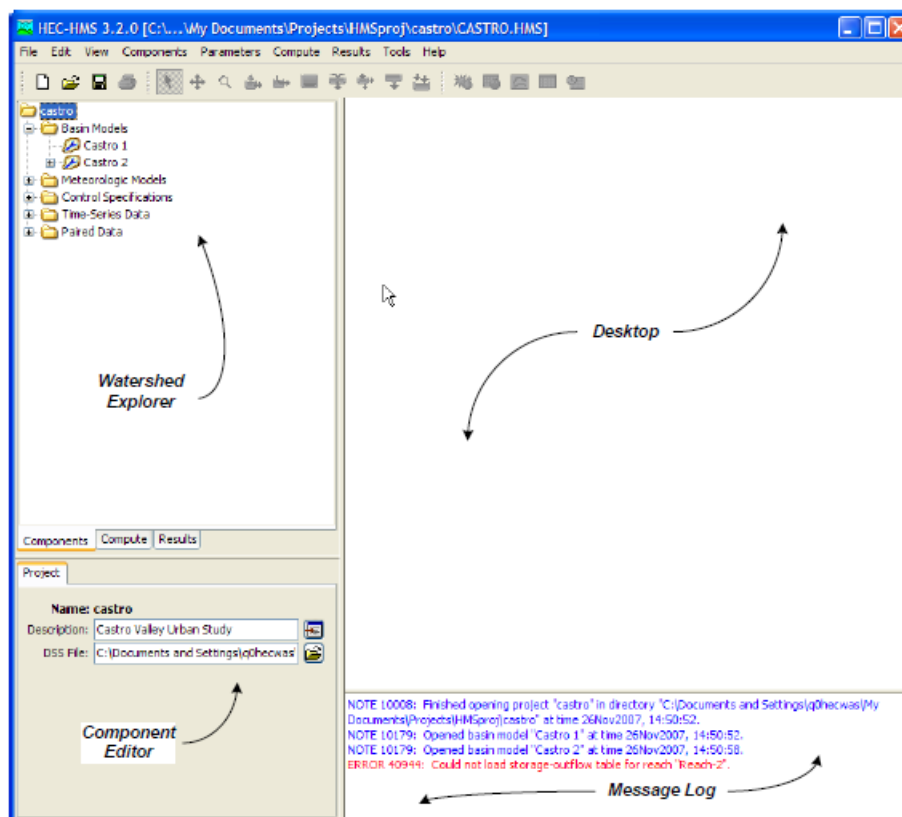


Fig.1.13. L'interface graphique d'utilisation de HEC-HMS

Pour étudier le comportement hydrologique des bassins versant, le HEC-HMS est constitué de trois méthodes d'évaluation de débit de crues, dont chacune utilise un ou plusieurs paramètres comme données, tel que les données météorologiques. Les trois méthodes sont : la méthode d'hyetogramme spécifique, la méthode des averses fréquentielles, et la méthode SCS.

a) la méthode d'hyetogramme spécifique:

La méthode d'hyetogramme spécifique permet de spécifier la série chronologique exacte à utiliser pour le hyetogramme aux sous-bassins. Cette méthode est également utile lorsqu'une seule jauge de précipitation peut être utilisée pour représenter ce qui se passe sur la façon dont les données sont traitées. Cette méthode utilise des données de paramètres distincts pour chaque sous-bassin dans le modèle météorologique, (SCHARFFENBERG.A, MATTEW.J, 2005).

b) la méthode des averses fréquentielles:

La méthode des averses fréquentielles est conçue pour produire une averse synthétique à partir de données de précipitations statistiques. Cette méthode est conçue pour utiliser les données pour calculer un hyetogramme pour chaque sous-bassin. Cette méthode utilise les mêmes données de paramètres pour tout le sous-bassin dans le modèle météorologique. Une seule probabilité de dépassement doit être choisie dans la liste des choix disponibles. Les choix varient de **0,2** à **50** pour cent et correspondent généralement les cartes de précipitation qui sont couramment disponibles. La méthode de la fréquence des averses est conçue pour admettre des données de précipitation de durée partielle. Cependant, le procédé est capable de calculer la production annuelle ou partielle (SCHARFFENBERG.A, MATTEW.J, 2005).

c) la méthode SCS (Soil Conservation Service) :

Cette méthode utilise les mêmes données de précipitations pour tous les sous-bassins dans le modèle HEC-HMS (HALWATURA.D, NAJIM.M, 2013). Chaque averse n'a qu'un seul type de distribution de précipitation qui doit être choisi dans la liste des choix disponibles. Les types disponibles sont : type1, Type1A, type2 et type3. (Fig.1.14) La simulation doit avoir une durée d'au moins 24 heures. (SCHARFFENBERG.A, MATTEW.J, 2005). La figure 1.14 représente les différents types de distribution de précipitation, le type correspond la région du MZAB c'est le type 1. Ce type est utilisé dans le cas où le pourcentage de distribution de la précipitation égale à 25%.

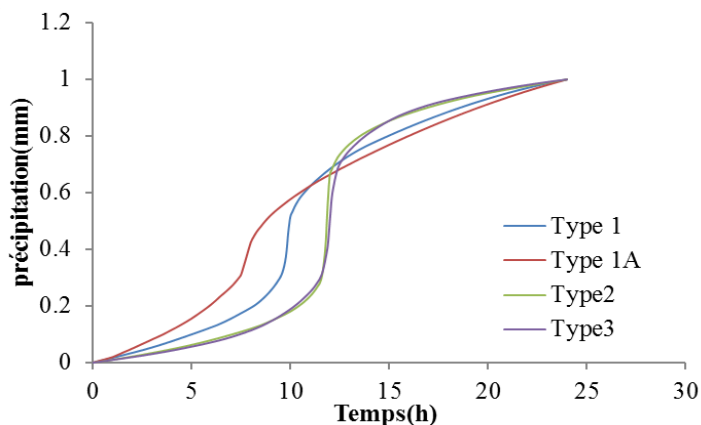


Fig.1.14. Types de distribution de précipitation.

1.7.6) Les Algorithmes Génétiques

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondus sur le mécanisme de la sélection naturelle et de la génétique, ils s'inspirent du concept de la sélection naturelle élaboré par **Darwin**. Les algorithmes génétiques commencent par la sélection aléatoire d'individus de taille constante appelée population initiale, de telles façons que ces individus entraînent dans une compétition pendant une certaine succession d'itérations appelée génération. Entre les générations, les individus soumettent à des opérateurs appelés successivement, croisement et mutation de telle façon que ces opérateurs permettront de transformer la population pour favoriser l'émergence de meilleurs individus.

1.7.6.1) Principe de l'algorithme génétique

L'algorithme génétique repose sur une boucle qui enchaîne des étapes de sélections et des étapes de croisements. Dans un premier temps, à partir d'une population de α individus, on désigne ceux autorisés à se reproduire. On croise ensuite ces derniers, de façon à obtenir une population d'enfants, dont on peut faire muter aléatoirement certains gènes. La performance des enfants est évaluée, grâce à la fonction fitness, et l'on désigne, dans la population totale résultante parents+enfants, les individus autorisés à survivre, de telle manière que l'on puisse repartir d'une nouvelle population de α individus. La boucle est bouclée, et l'on recommence une phase de sélection pour la reproduction, une phase de mutation, et ainsi de suite. Pour les Algorithmes génétiques, un critère d'arrêt permet de sortir de la boucle, par exemple un certain nombre d'itérations sans amélioration notable de la performance des individus.

1.7.6.2) Formulation du problème :

Le modèle empirique permet de calculer le débit pour les différentes périodes de routeur. Le problème revient donc à minimiser le critère quadratique :

$$\text{OBJFUN} = \sum_{i=1}^n (Q_{\text{sum}} - Q_{\text{pro}})^2 \quad (1-2)$$

Où Q_{sum} le débit simulé par AG
 Q_{pro} le débit projeté

1.7.6.3) opérateurs d'un algorithme génétique :

a) Fonction objectif

La fonction objective est le paramètre important d'un algorithme génétique qui définit l'aptitude de chaque chromosome où les valeurs des paramètres génétiques sont adaptées à mesure que l'évolution génétique progresse. À chaque génération, la valeur de forme de chaque chromosome est calculée en utilisant la fonction de forme physique. Si la condition physique de deux chromosomes est égale, alors le taux de mutation est augmenté, afin d'aider l'évolution génétique à sortir de questions telles que les maxima locaux ou les minima locaux, selon le cas. Une fois qu'il y a une amélioration de la condition physique globale, le taux de mutation d'origine est restauré pour continuer l'évolution normale. Si l'évolution se stabilise, mais la condition physique ne semble pas s'améliorer pendant plusieurs générations et la recherche ne trouve aucune erreur, un nouveau groupe de population initiale est généré en utilisant les valeurs des paramètres par défaut initiaux et une nouvelle graine générée de façon aléatoire (CHETAN CHUDASAMA et al, 2011).

b) Croisement

L'opérateur croisement est un opérateur génétique qui combine deux chromosomes (parents) pour produire un nouveau chromosome (progéniture). L'idée derrière (croisement) est que le nouveau chromosome peut être mieux que les deux parents si elle prend les meilleures caractéristiques de chacun des parents. Le croisement se produit pendant l'évolution selon une probabilité de croisement définie par l'utilisateur. Pour les besoins de ce travail, seuls les opérateurs croisés qui opèrent sur deux parents et qui n'ont pas de propriétés d'auto-adaptation seront considérés (KAYA.Y et al, 2011).

c) Mutation

La mutation est un processus important qui permet d'introduire un nouveau matériel génétique dans une population. Une probabilité de mutation est spécifiée qui permet des mutations aléatoires à des gènes individuels (SAMUEL.M & MADAN K, 2003).

d) Organigramme de fonctionnement

Les algorithmes génétiques commençant par la génération aléatoire d'une population initiale de taille constante, puis les opérateurs « le croisement et la mutation » sont générés. Une nouvelle population est créée. Le critère d'arrêt c'est le nombre de génération (Fig.1.15). Les individus autorisés à survivre, de telle manière que l'on puisse repartir d'une nouvelle population de α individus. La boucle est bouclée, et l'on recommence une phase de sélection pour la reproduction, une phase de mutation, et ainsi de suite (HOSSAM.A & Ali El-Hadi.H,2009). Pour les Algorithmes génétiques, un critère d'arrêt permet de sortir de la boucle, par exemple un certain nombre d'itérations sans amélioration notable de la performance des individus (SAMUEL.M & MADAN K, 2003).

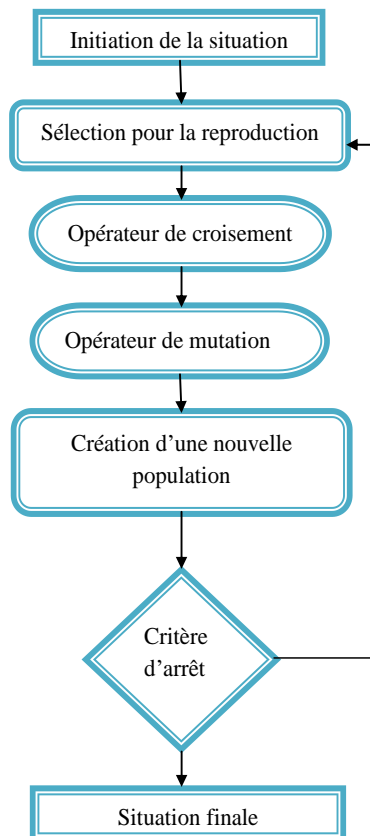


Fig.1.15. Principe de fonctionnement d'un algorithme génétique.

1.8) Conclusion

Après une description générale sur les différents modèles utilisés dans le domaine de la modélisation de la relation pluie-débit, la possibilité du choix du modèle adapté à notre cas, repose sur un modèle hydrologique qui touche toutes les contraintes pour simuler les débits avec une petite valeur de l'erreur. Et donc, sur l'intérêt particulier sur la gestion et le dimensionnement rationnel et économique des ouvrages hydrauliques proposés. En effet, avec l'absence des données hydrométriques et pour but de modéliser le comportement hydrologique du bassin versant du MZAB, notre choix de modèle repose sur le modèle hydrologique qui justifier les points suivants :

1. Le modèle utilisée pour les grandes surfaces géographiques ;
2. Résoudre un plus grand nombre de problèmes ;
3. Modéliser à la fois la totalité des sous bassins ;
4. La possibilité de modéliser la relation pluie-débit pour tous les pas de temps (court duré, journalière, mensuel, annuelle).

Théoriquement, tous les modèles hydrologiques sont applicables dans la majorité des bassins du globe, mais ces bassins doivent comprendre toutes les données physiques sur une période plus ou moins longue. Pour le cas particulier et malheureusement dans notre bassin (oued MZAB) aucune station hydrométrique n'a jamais été installée, ce qui engendre la difficulté de l'utilisation de plusieurs modèles qui demandent des données permanentes.

2

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

2.1) Introduction

La présentation d'une zone d'étude est une partie très importante pour un travail de recherche. Cette partie comprend des points de définition, localisation et la nature de la zone et aussi les entrées qui génèrent le comportement du phénomène afin d'obtenir des résultats plus ou moins acceptables. Ce chapitre est consacré à une description générale du bassin du MZAB afin de donner les indications hydrologiques, géographiques et géologiques, bases nécessaires à la compréhension future du comportement hydrologiques. L'objectif de ce chapitre est de présenter le bassin du MZAB afin de mieux connaître les contraintes climatiques auquel est dominé le bassin versant (les précipitations) et d'identifier les objets capables de traduit les pluies en débit (l'optimisation des pluies) puis ceux qui contrôlent la variation des débits (les crues et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques).

2.2) Le milieu saharien

Ce vaste territoire compte neuf Wilayas (préfectures) en totalité et huit partiellement, qui regroupent 289 communes pour une population évaluée à quatre millions d'habitants. La grande majorité de cette population est concentrée généralement dans les chefs-lieux des Wilaya, dont certaines dépassent les 150 000 habitants. La grande majorité de ce vaste territoire est occupée par des grandes étendues représentées par des regs, ergs et chotts, qui sont des espaces inaptes à toute culture. Le Sahara est un grand désert formé de vastes étendues sableuses, (dunes) de matériaux caillouteux (regs) et de massifs (Hoggar). Le Sahara est constitué d'un socle précambrien où repose une grande formation sédimentaire. Ces formations sont regroupées dans plusieurs unités géomorphologiques. Du point de vue climat le Sahara est l'un des déserts les plus chauds et les plus arides du globe. Il se caractérise par des précipitations très peu abondantes et irrégulières entre 120 mm au Nord et 12 mm au Sud, les températures élevées peuvent dépasser les 45°C, accusant des amplitudes thermiques significatives et également par une faible humidité relative de l'air. Les vents sont relativement fréquents et leur vitesse est importante d'avril à juillet, ce qui provoque pendant cette période le sirocco et / ou des vents de sable, responsables de la formation et des déplacements des dunes. L'évaporation varie entre 2 500 mm dans les régions de l'Atlas saharien et plus de 4500 mm au grand sud (Adrar). Toutes ces conditions négatives rendent impossible toute pratique de cultures sans irrigation. (ANRH,2014).

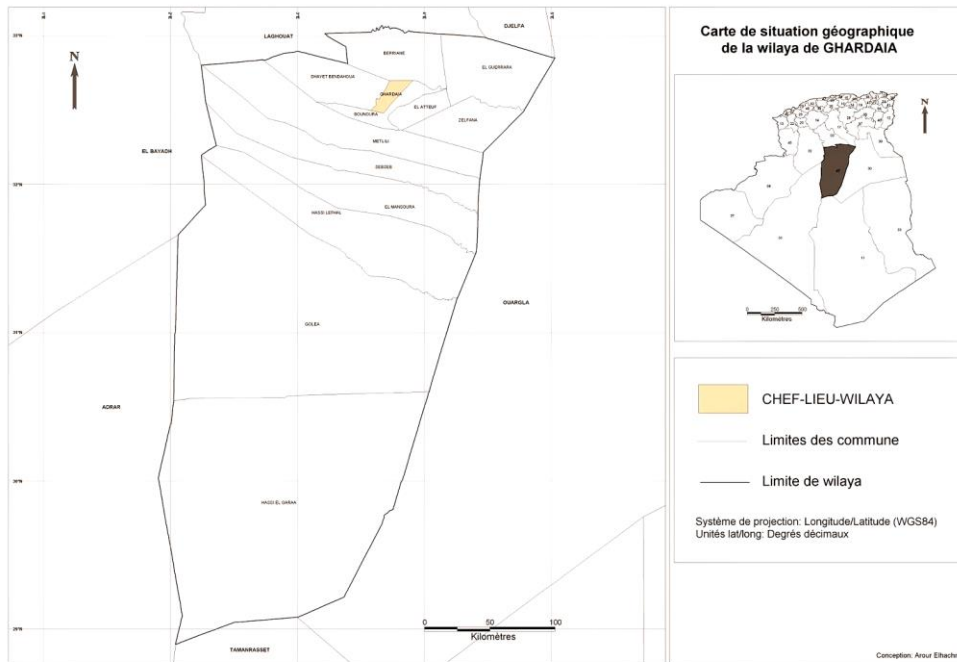


Fig.2.1. Délimitation des wilayas du sud de l'Algérie (BLOGSPOT)

2.3) Présentation de du bassin versant du MZAB

2.3.1) Localisation de la région du MZAB

Le bassin du MZAB est une partie du Sahara septentrional, la surface totale du Sahara est 600 000 Km² selon la déclaration de l'Agence de Bassin Hydrographique Sahara (ABHS) et regroupe plusieurs Wilays a part Ghardaïa tel que: Biskra, Ourgla, Eloued Adrar, Tamanrasset (Ain Salah) et Ilizi (DebDeb).

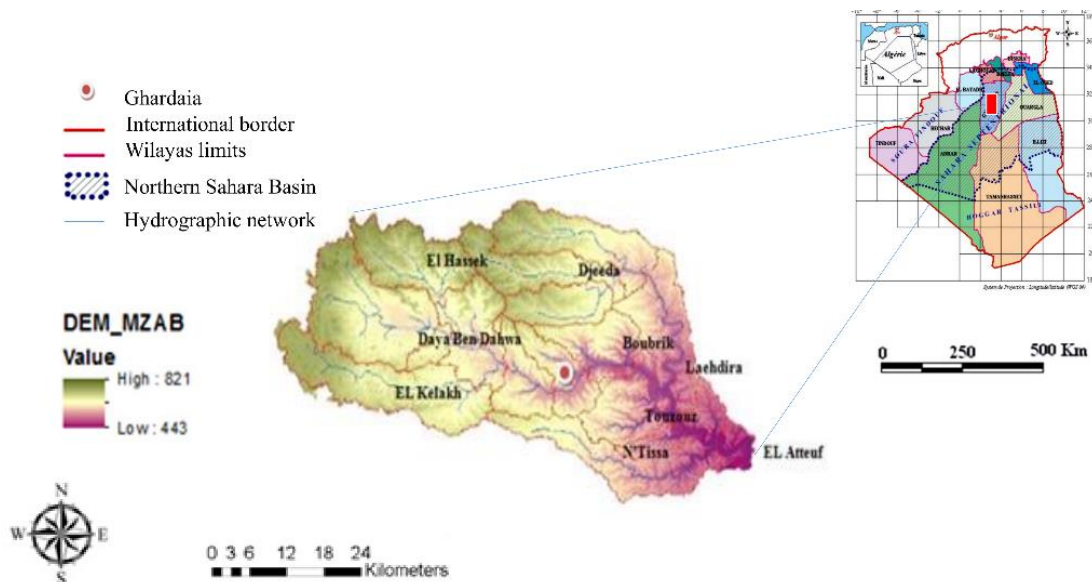


Fig.2.2. Localisation du bassin du MZAB par apport au Sahara Septentrional

2.3.2) Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est défini comme un ensemble hiérarchisé (ordres) et structuré de chenaux qui assurent le drainage permanent ou temporaire d'un bassin versant jusqu'au collecteur principal (Fig.2.3). Le réseau hydrographique est influencé par la variation de climat, le réseau hydrographique est d'autant plus dense que le climat est plus humide, que les pluies sont plus abondantes, les pentes plus fortes, les roches ou formations superficielles moins perméables.

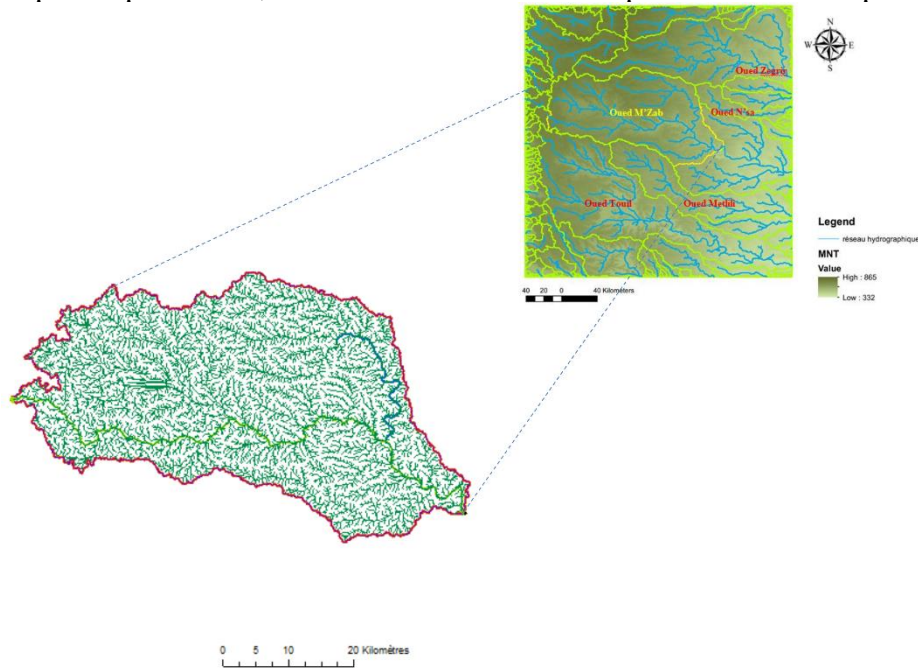


Fig.2.3. Réseau hydrographique du bassin du MZAB, au sud Est de l'Algérie.

La Figure 2.3 présente le bassin du MZAB. C'est un bassin au relief cisailé sachant que l'altitude est comprise entre 332et 865m. Délimitation du bassin sur le modèle numérique de terrain MNT à l'aide d'un outil SIG. Le bassin du MZAB est jalonné par un grand réseau d'oueds tel que : Oued METLILI, Oued N'SA, et Oued ZEGRIR.

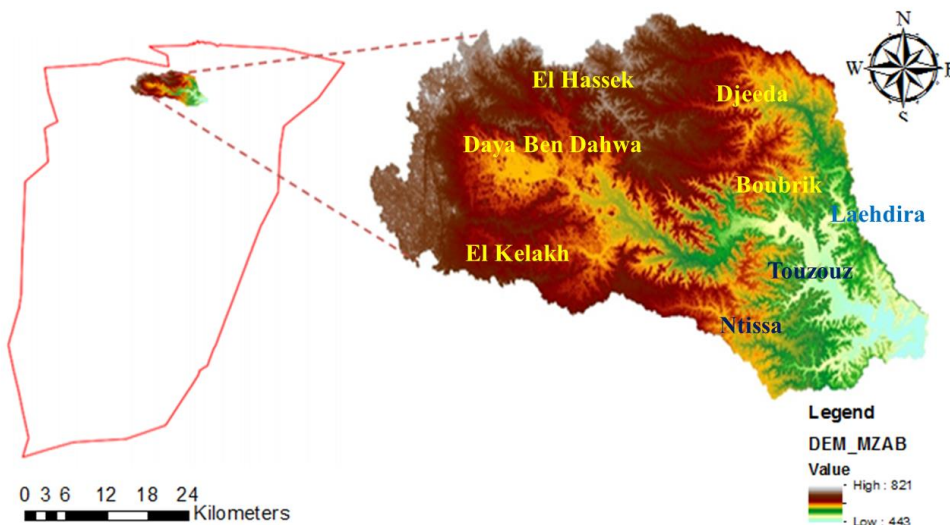


Fig.2.4. Carte hypsométrique du bassin du MZAB.

La carte hypsométrique du bassin est effectuée sur un modèle numérique de terrain avec un outil SIG (Arc Gis). L'Oued MZAB traverse le bassin d'Ouest en Est. Il est alimenté par les affluents rive gauche par apport au chef-lieu de la willaya de Ghardaïa (632 km au Sud d'Alger). Il en résulte un bassin versant allongé et symétrique dont les rives droite et gauche jouent un rôle hydrologique principal à cause de l'occupation de la majorité du bassin par la zone urbaine. Le bassin est composé d'une maille de plusieurs sous-bassins orientés nord-sud. La ligne de partage des eaux entre les sous bassins, en ligne rouge (Fig.2.5).

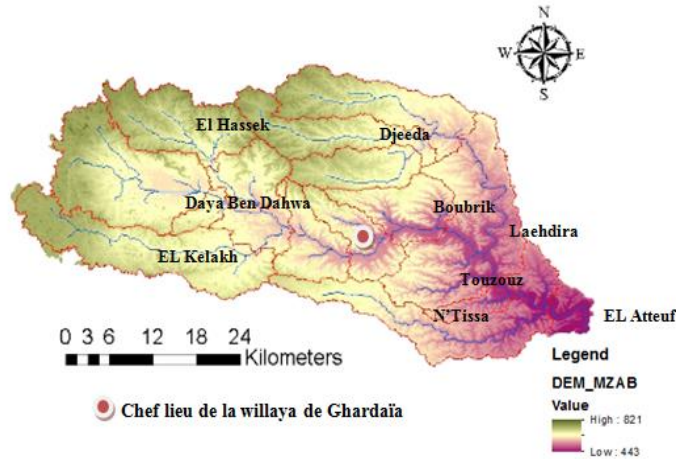


Fig.2.5. Les sous-bassins appartenant au bassin du MZAB.

2.3.3) Géologie

L'étude géologique a pour but de préciser succinctement les terrains rencontrés et leur contexte géologique (ABDELHAMID.K,2016).

Le bassin du MZAB est une partie de la région centrale de la sebkha (Dorsale MZABITE). Cette dernière se caractérise par un relief cisailé, ravine et serpenté d'innombrables oueds. Le substratum géologique est constitué de calcaires, dolomies et marnes d'âge Turonien. On distingue aussi, le long de la vallée des dépôts alluvionnaires d'âge quaternaire. Ces alluvions sont constituées de sables fins et grossiers (mêlés à des limons et des argiles), gravillons, galets consolidés. Cette formation superficielle, contient une nappe phréatique plus ou moins profonde, exploitée par des puits donnant de faibles débits. En profondeur la formation de continental intercalaire réserve la nappe albienne qui constitue la ressource principale d'eau potable.

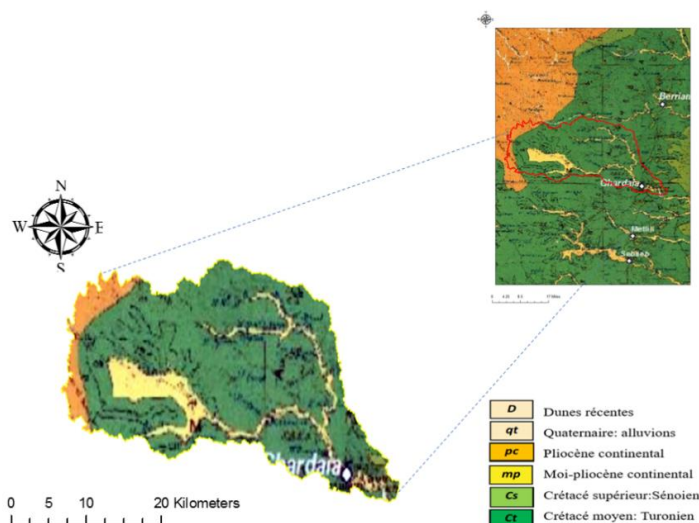


Fig.2.6. Carte géologique du bassin du MZAB.

La ville de Ghardaïa est située au cotés occidentales du bassin sédimentaire secondaire du Sahara. La géologie du bassin du MZAB est caractérisé par un grand plateau subhorizontal de massifs calcaires turonien (DORSALE du MZAB). L'épaisseur de cette couche est de l'ordre de 110m. Une couche d'argile vert et de marne qui riche en gypse et en anhydrite située sous le massif calcaire avec une profondeur de 220m. Une masse importante de sables fins à grès et d'argiles vertes compose l'étage de l'Albien avec une profondeur de 300m qui abrite des ressources hydrauliques considérables (Fig.2.7).

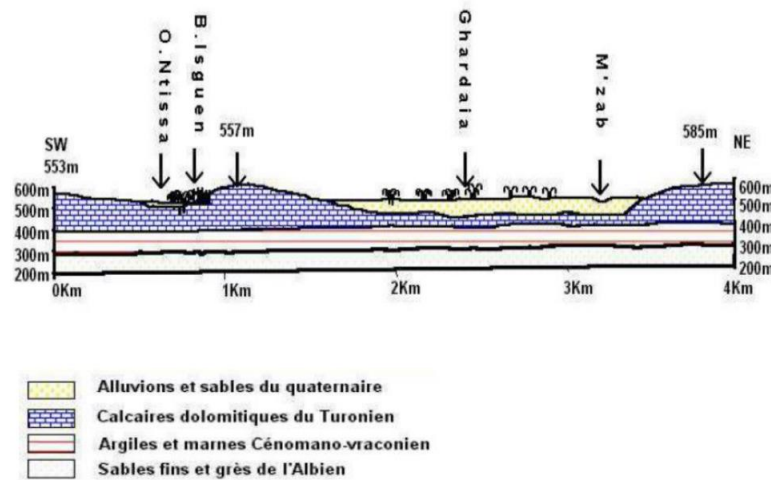


Fig.2.7. Coupe géologique du bassin du MZAB

2.3.4) L'occupation des sols du bassin du MZAB

L'occupation et utilisation des sols sont combinées par un système d'information de telle façon que le terme occupation des sols décrit les végétations naturelles et semi-naturelles, et le terme utilisation des sols décrit les superficies agricoles et urbanisées. Dans le cadre de cette thèse, l'occupation du sol montre que la majorité des activités sont concentrées au niveau de la vallée de MZAB, ce qui génère des dégâts significatifs en cas de montée (Fig. 2.8).

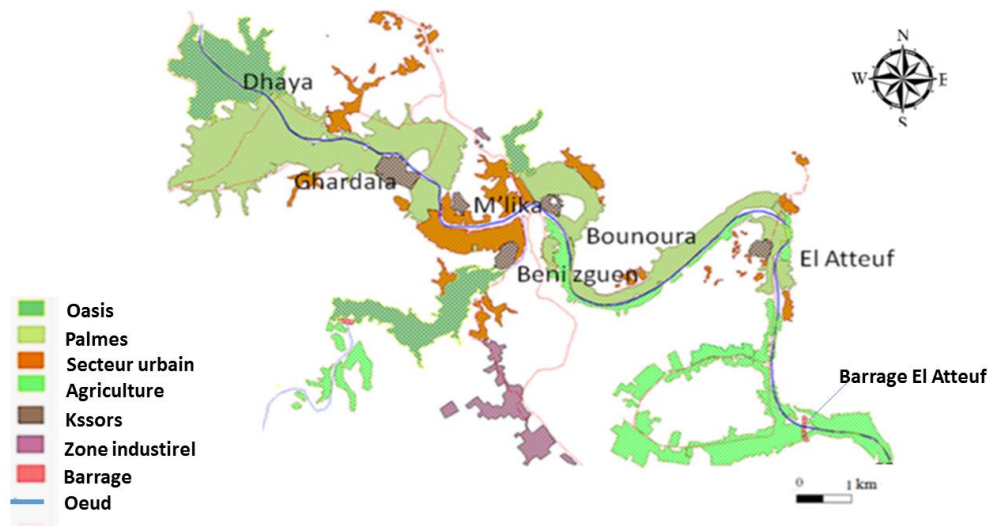


Fig. 2.8. Carte d'occupation des sols du bassin du MZAB (YAMANI.K & al, 2016)

La figure 2.8 représente les différents composants d'occupation des sols du bassin du MZAB tel que les oasis, palm Grove, urbanisation et agricultures, ..., etc. La concentration des oasis est en amont et aval du bassin du MZAB, les deux principaux affluents : oued N'tissa et Azouil sont aussi occupées par de ces oasis. Les zones mixtes sont localisées le long du bassin et plus particulièrement au niveau des lits mineurs, qui représente une grande probabilité de risque en cas

de crue. Les vieux Ksars sont occupés par les zones urbaines, cette occupation s'étend graduellement vers les oasis entoures.

2.4) Etude du climat

2.4.1) Pluviométrie

La nature de climat de la région de Ghardaïa est saharienne, ce climat est caractérisé par un hiver tempéré et un été chaud et sèche avec une grande différence entre les températures des deux saisons, tel que la température moyenne annuelle enregistrée est de 15.75 C° avec une hauteur de pluie moyenne de 67mm. Les précipitations moyennes annuelles enregistrées à Ghardaïa au cours de la durée de 45ans sont sélectionnées à partir l'Office Nationale Météorologique (station de Ghardaïa) dont les coordonnées géographiques de Ghardaïa sont : Latitude : 32°29'27" Nord, Longitude : 3°40'24" Est et les coordonnées en degrés décimaux sont : Latitude : 32.4909400°, Longitude : 3.6734700°, et en degrés et minutes décimales sont : Latitude : 32°29.4564' Nord, Longitude : 3°40.4082' Est. L'étude des précipitations dans le cas de notre étude couvre une période plus ou moins longue pour mieux connaitre la variation temporelle des précipitations. Cette étude est couverte sur la période de 1970 au 2014. Les valeurs de précipitations moyennes annuelles sont récapitulées dans le tableau au-dessous :

Tableau II.1 les précipitations moyennes annuelles à la station de Ghardaïa. (Office Nationale Météorologique), période (1970-2014).

Année	P annuelles(mm)	Année	P annuelles(mm)
1970	8.7	1993	34.6
1971	46.5	1994	164.5
1972	83.8	1995	64.9
1973	77.7	1996	87.8
1974	47.8	1997	158.64
1975	96.5	1998	32.81
1976	112.6	1999	56.13
1977	65.4	2000	57.91
1978	29.1	2001	54.1
1979	56.3	2002	78.04
1980	141.03	2003	155.18
1981	37.44	2004	160.01
1982	80.2	2005	39.33
1983	9.66	2006	99.06
1984	122.87	2007	51.05
1985	47.26	2008	140.07
1986	97.1	2009	130.06
1987	54.2	2010	42.41
1988	57.4	2011	153.94
1989	34	2012	39.89
1990	122.3	2013	62.21
1991	54.2	2014	35.29
1992	62.3		

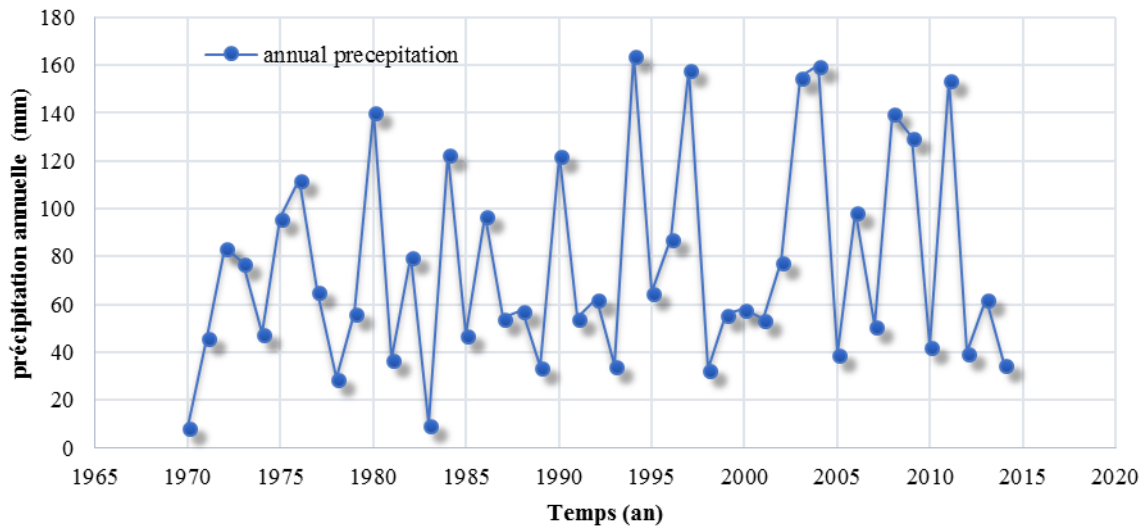


Fig.2.9 précipitation moyenne annuelle en (mm) station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).

On remarque que les pics les plus grandes sont enregistrés pendant l'année 1994 qui représente l'année la plus pluvieuse de la série, et celui de 1970 qui représente l'année la plus sec (moins pluvieuse), les pics du graphique sont plutôt, hétérogènes à l'exception de certaines années présentant des volumes de précipitations annuels proches les uns des autres.

2.4.2) Evaporation

Les valeurs de l'évaporation moyenne mensuelle enregistrées au niveau de la station de Ghardaïa sont issues de l'Atlas Climatologique National et mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : L'évaporation moyenne mensuelle du bassin du MZAB

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
E (mm)	9.9	7.1	4.5	4.3	4.2	5.4	7	8.9	11	13.5	15.3	13.7

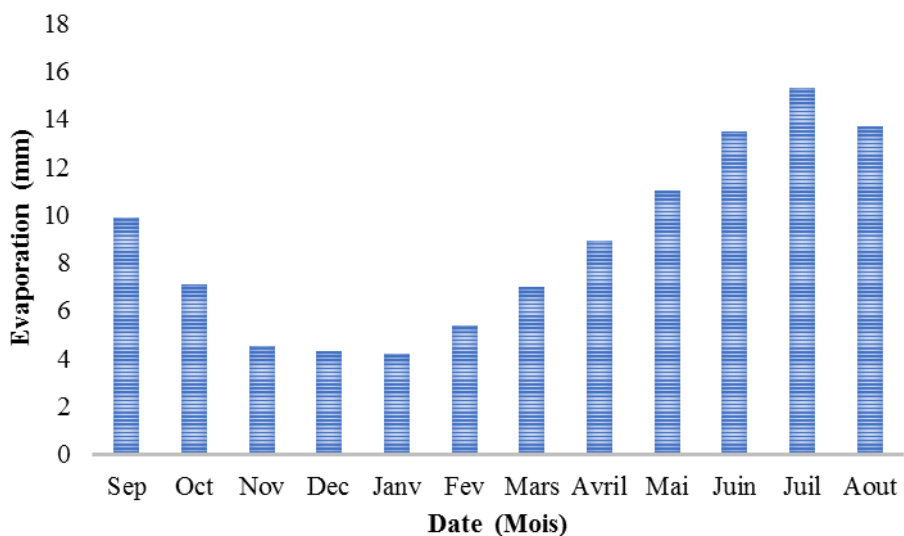


Fig.2.10. L'évaporation moyenne mensuelle de la station de Ghardaïa

2.4.3) Ensoleillement

L'ensoleillement ou bien insolation, c'est la quantité du rayonnement solaire que recueille par la surface de la terre pendant une période donnée, l'ensoleillement est exprimé en mégajoules par mètre carré, MJ/m² (selon la recommandation de l'Organisation météorologique mondiale). Les valeurs moyennes mensuelles moyennes de l'ensoleillement au niveau de la station de mesure de Ghardaïa (selon l'Atlas Climatologique National) sont les suivantes :

Tableau II.3 : Ensoleillement moyen mensuelle du bassin du MZAB

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
E (MJ/m²)	9.3	8.7	8.1	7.8	7.7	8.1	8.6	9.6	10.7	11.3	11.7	10.9

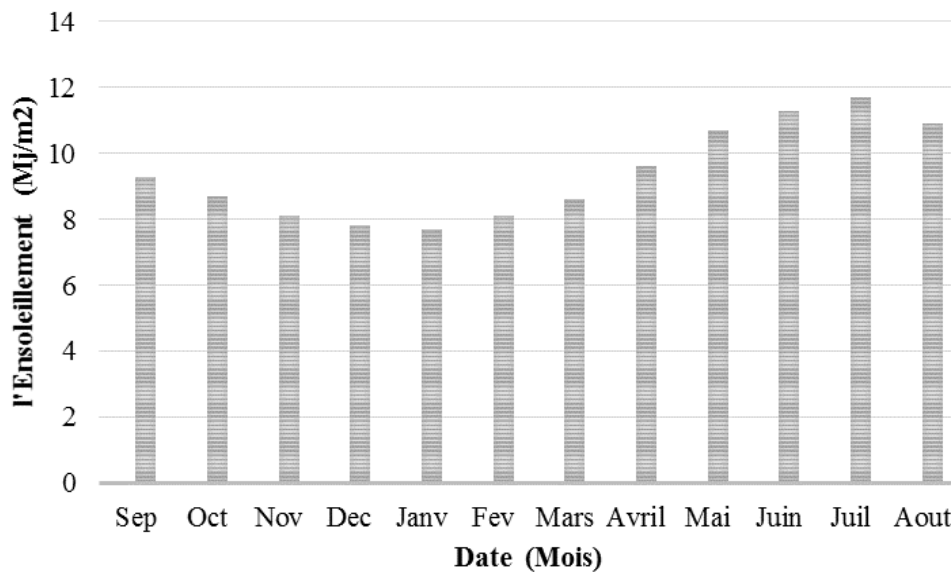


Fig.2.11. Ensoleillement moyen mensuelle de la station de Ghardaïa

2.4.4) Humidité

L'évaluation de l'humidité du sol et sa variation spatiotemporelle est un point très important dans plusieurs domaines des sciences de l'environnement, telles que l'agronomie, l'hydrologie, l'hydrogéologie et la météorologie. L'humidité relative représente le rapport de la tension de vapeur à la tension maximum correspondant à la même température. Les données recueillies de la station de Ghardaïa donnent une moyenne annuelle de l'ordre de 39,39% (Tableau II-4). Les moyennes mensuelles varient de 47.34% à 56.89% en hiver et de 23.17 à 27.75% en été.

Tableau II.4: Humidité moyenne mensuelle du bassin du MZAB

Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Humidité (%)	34.4	43.4	52.5	56.8	55	47.3	40.5	35.9	30.4	27.7	23.1	24.9	39.39

2.4.5) Les vents

Le désert est caractérisé par la présence du vent qui est le facteur important de la topographie désertique. Au cours d'une année, et plus particulièrement en mois de Mars et Avril, certaine quantité de sable se déplace avec violence surélèvent de certains mètres de hauteur. Par conséquent le vent affecte sur le niveau de vie économique et sociale.

En zones non habillées, là où les vents ne trouvent aucun obstacle ce qui provoque la naissance de la sécheresse, en plus de l'érosion hydrique. En été, les vents sont chauds, par contre, ils sont froids et humides en hiver. Pour la zone de Ghardaïa, et plus particulièrement en région El-Menia, les vents de sable sont permanents pendant la période de printemps, on note une moyenne annuelle de 13.84m/s (Tableau II-5).

Tableau II.5: Les vents moyens mensuelle du bassin du MZAB

Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Vitesse vent (m/s)	12.56	11.46	11.44	12.69	12.86	14.35	15.60	17.14	16.41	15.39	13.41	12.71	13.84

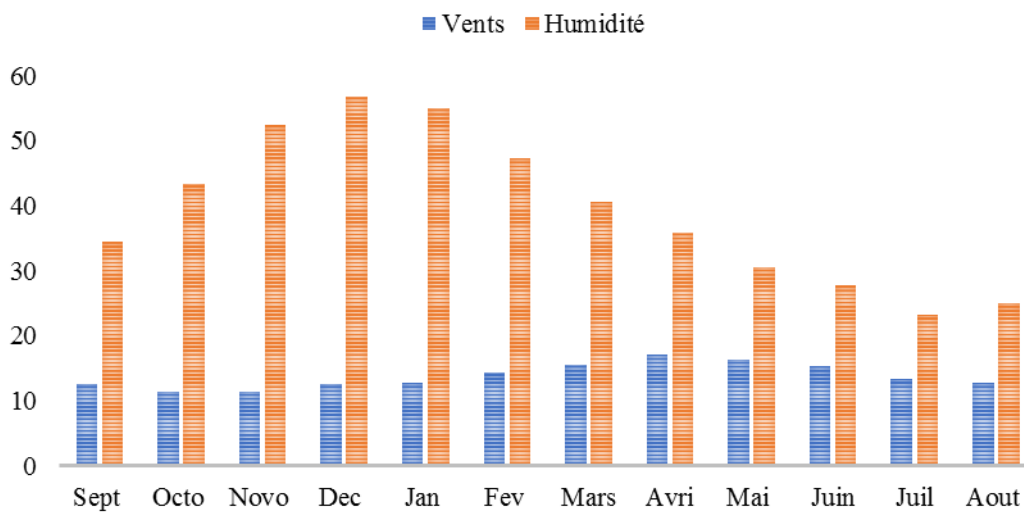


Fig.2.12. L'humidité et les vitesses de vent du bassin du MZAB.

2.4.6) Température

La température de l'air c'est une donnée très importante pour la classification climatique des régions, et aussi en hydrologie. La température contrôle l'intensité de l'évaporation et la transpiration du couvert végétal, plusieurs facteurs effectuer sur la valeur de la température, en distingue : les vents, la nature du sol, l'altitude et la latitude. Les données de la température sont mesurées au niveau de l'Office National Météorologique (station de Ghardaïa) pour la période (1970-2014), les valeurs de la température son données dans le tableau suivant :

Tableau II.6 : Les données de la température de la station de Ghardaïa pour la période 1970-2014.

t (°c)	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
Tmax	28.8	22.9	16.2	11.7	10.7	13.1	16.8	20.6	25.9	31	34.4	33.9	21.75
Tmoy	25.7	20.15	13.65	9.35	8.3	10.35	13.8	17.35	22.5	27.45	30.8	30.5	15.75
T min	22.6	17.4	11.1	7	5.9	7.6	10.8	14.1	19.1	23.9	27.2	27.1	18.75

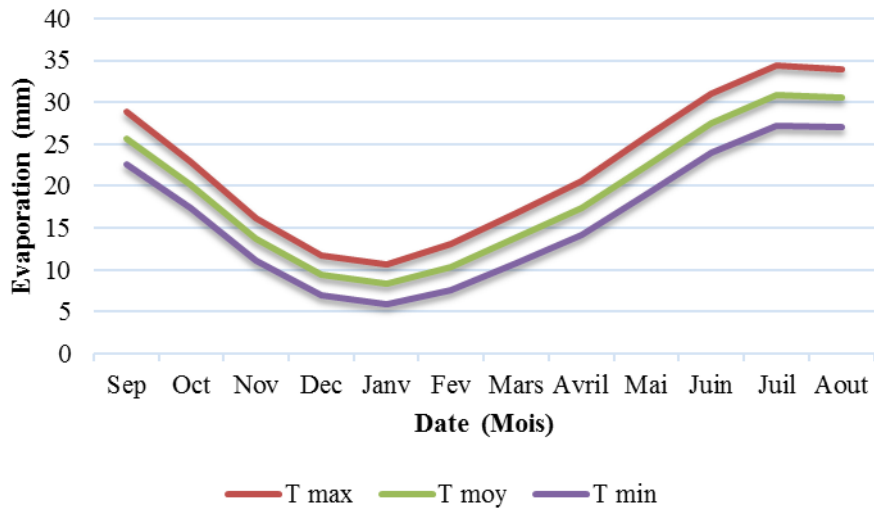


Fig.2.13. Représentation graphique de la variation des températures min, moy et max de la région de Ghardaïa.

La figure.2.13 représente la variation moyenne mensuelle de la température de la station de Ghardaïa pendant la période (1970-2014). La représentation graphique que la température moyenne la plus élevée est observée pendant l'été (juin, juillet, aout et septembre) avec des valeurs de températures comprise entre 22.5 et 30.8°C. Les valeurs les plus basses, qui varient entre 8.3 et 13.8°C, sont observées pendant la période hivernale (décembre – mars), avec un minimum enregistré pendant le mois de Janvier (8.3°C).

2.4.7) Relation précipitation – température

Durant l'année hydrologiques, la détermination des périodes sèches et humides ce fait à l'aide de la connaissance de la relation entre les précipitations et la température. Cette relation se détermine à partir de diagramme (Ombrothermique). Pour vérifier l'existence d'une relation entre les précipitations et la température, la représentation graphique de ces deux variables devient nécessaire (diagramme Ombrothermique). La comparaison doit être faite sur les moyennes mensuelles des deux variables pour permettre la meilleure présentation.

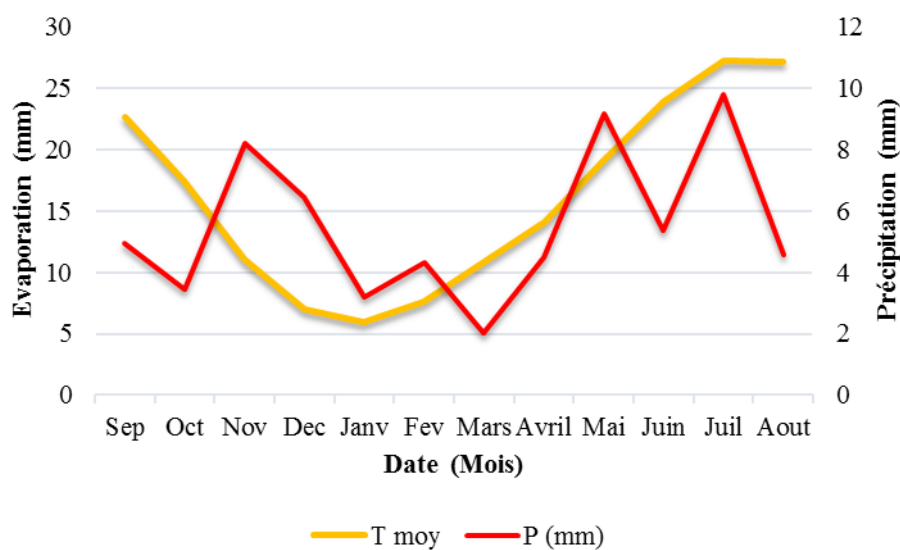


Fig.2.14. Diagramme Ombrothermique du bassin du MZAB.

La figure 2.14 présente la représentation graphique de la relation précipitation-température pendant la période (1970-2014). La figure montre que la température présente deux pics (milieu

du mois de septembre et milieu du mois de juillet). En générale, en période sèche durant les pluies les températures sont plus élevées ce qui permet les nuages qui génèrent la précipitation et limitent l'élévation de la chaleur de la terre vers l'atmosphère. La figure 2.14 montre aussi que la relation précipitation-température est proportionnellement varier, c'est-à-dire la température baisse rapidement en cas de la pluie est tombée.

2.4.8) Détermination du type de climat

• Indice annuel d'aridité de "DE MARTONNE "

L'indice d'aridité de DEMARTONNE (I_a ; mm/°C) est un indicateur utile pour caractériser le phénomène d'aridité en exprimant le caractère restrictif pour certaines formations végétales (IONAC.N et al,2015), cet indice est développé par DE MARTONNE en 1923. Il s'exprime par le rapport entre les précipitations moyennes annuelles et les températures. La valeur de cet indice permet de déterminer le type de climat d'une région, l'indice d'aridité est calculé par l'équation (II-1) suivante :

$$I_a = \frac{P}{T+10} \quad (2 - 1)$$

Où

P est la quantité annuelle de précipitations en mm ($P= 67\text{mm}$),

T est la température moyenne annuelle de l'air ($T=15,75 \text{ }^\circ\text{C}$).

A partir DE MARTONNE

Si

$I < 10$, donc nous avons un type de climat aride, écoulement temporaire.

$10 < I < 20$, climat semi-aride, écoulement temporaire.

$20 < I < 30$, zone tempérée drainage extérieur.

$30 < I < 40$, écoulements exoréiques.

Selon l'équation (II- 1) nous obtenons un Indice d'aridité égale à 2,6

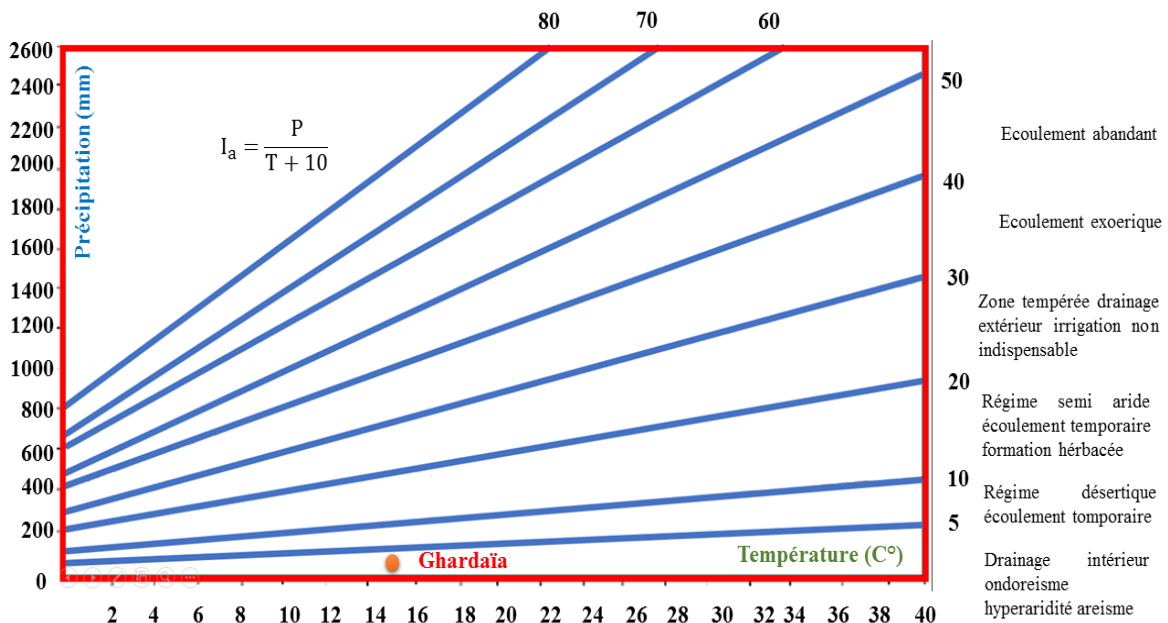


Fig.2.15. Abaque d'Indice annuel d'aridité de De Martonne (1926)

La figure 2.15 montre que le régime du bassin du MZAB est drainage intérieur – endoreisme hyperaridité areisme.

2.4.9) Géomorphologie du bassin du MZAB

Géomorphologiquement, la vallée du MZAB est caractérisée par un tissu urbain le long du bassin du MZAB et plus particulièrement en lit mineur du bassin. Aussi le bassin est caractérisé par une ramification de dalles calcaires du Turonien et sénonien (Fig.2.16).

Paysage géomorphologique du MZAB est composée par :

- Les plateaux de la SEBKHA qui comportant quelques micros dépressions et caractérisé par une faible pente
- Les versants des CHAABATS : caractérisés par une pente importante et une faible capacité d'infiltration.
- Les fonds des CHAABATS: ayant comporté un léger remplissage alluvionnaire ou détritique.



Fig.2.16. Paysage géomorphologique du MZAB.

2.5) Contexte géomorphologique

L'écoulement superficiel est influencé par les caractéristiques géomorphologiques d'un bassin versant. Par conséquent, dans une période de crue ou d'étiage, la réponse hydrologique et le régime d'écoulement sont influencées par les caractéristiques physiques d'un bassin versant. Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les facteurs physiographiques suivants :

2.5.1) Paramètres géométriques

a) Surface

Le bassin versant c'est la surface drainée par les cours d'eau vers l'exutoire, donc le débit est le paramètre qui relie par la variation du surface d'un bassin versant. La surface est exprimée en Km^2 . Dans les premiers temps, les hydrologues mesurent les surfaces des bassins versants à l'aide d'un planimètre par contre la techniques SIG est le technique la plus efficaces et utilisée pour déterminer les paramètres géométriques d'un bassin versant. Dans le cadre de ce thèse, l'outil Arc-Gis c'est l'outil utilisée pour déterminer les paramètres géométriques du bassin du MZAB. La surface du bassin du MZAB est égale à **1653.65** Km^2 .

b) Périmètre

Le périmètre d'un bassin versant c'est un paramètre géométrique important pour l'étude du contexte géomorphologique des bassins versants. Il comporte toutes les déviations du contour du bassin versant étudiée. Le périmètre est exprimé en **Km** et peut être mesuré par la méthode classique (curvimètre) ou bien par des outils SIG. Le périmètre du bassin du MZAB égale à **347.92** Km.

2.5.2) Paramètres de forme

La forme d'un bassin versant peut se caractériser par deux grandeurs principales, sa compacité et son allongement, qui influent les temps de concentration de l'eau de ruissellement des bords du bassin vers l'exutoire (MOURET.C,1979).

a) Indice de compacité de Gravelius (K_c)

Le coefficient de compacité sert à caractériser la forme d'un bassin versant. Son périmètre est comparé à une figure géométrique simple de même surface, GRAVELIUS a choisi un cercle. Dans ce cas, et en appelant P le périmètre du bassin étudié et A sa surface, le coefficient de compacité se trouve ainsi défini (MOURET.C,1979):

$$K_c = 0.282 \cdot \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (2 - 2)$$

P : le périmètre du bassin versant (Km).

S : la surface du bassin versant (Km²).

L'application numérique de la formule de Gravelius montre que l'indice de compacité pour le bassin du MZAB prend la valeur **2,41** ce qui permet un bassin versant **Allongé**

b) Rectangle équivalent

La transformation géométrique pure d'un bassin versant représentée par un rectangle, ce rectangle a été établi par Gravelius et comporte une forme de même surface et périmètre d'un bassin versant, aussi un même indice de compacité ce qui résulte la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau sont représentées par des lignes parallèles aux côtés du rectangle. La détermination de rectangle équivalent permet la comparaison des bassins entre eux de point de vue de l'influence de la forme sur l'écoulement. La longueur et la largeur du rectangle équivalent sont calculées par l'équation suivante :

- **La longueur du rectangle équivalent**

$$L = \frac{K_c}{1.128} \times \sqrt{S} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right] \quad (2 - 3)$$

Pour le bassin du MZAB la longueur $L = 163.87$ Km.

- **La largeur du rectangle équivalent**

$$l = \frac{K_c}{1.128} \times \sqrt{S} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right] \quad (2 - 4)$$

Pour le bassin du MZAB la longueur $L = 10.09$ Km.

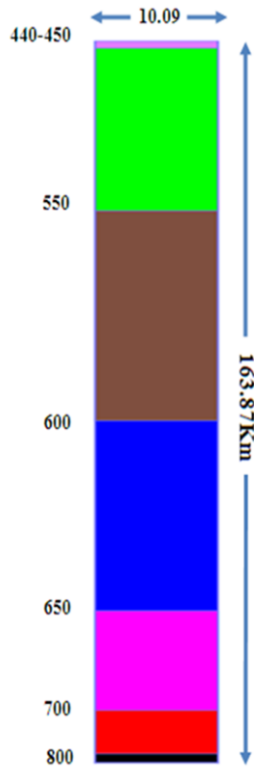


Figure.2.17. Rectangles équivalents du bassins versants du l'oued MZAB

2.5.3) Etude de relief

Le relief d'un bassin versant est défini comme un ensemble des formes topographiques. Le relief est un élément important pour l'étude du comportement hydrologique des bassins versants. L'étude de relief mélange souvent l'aptitude au ruissellement des terrains, l'évaporation et l'infiltration.

2.5.3.1) La courbe hypsométrique

Dans un bassin versant, la variation des facteurs météorologiques et hydrologiques est en fonction de l'altitude, donc l'étude de l'hypsométrie d'un bassin versant devient nécessaire. Le courbe hypsométrique regroupe deux graphiques, l'un représente les valeurs des altitudes en un intervalle sur l'axe des X et la surface en pourcentage sur l'axe des Y et l'autre représente la surface du bassin versant au-dessus des valeurs d'altitudes.

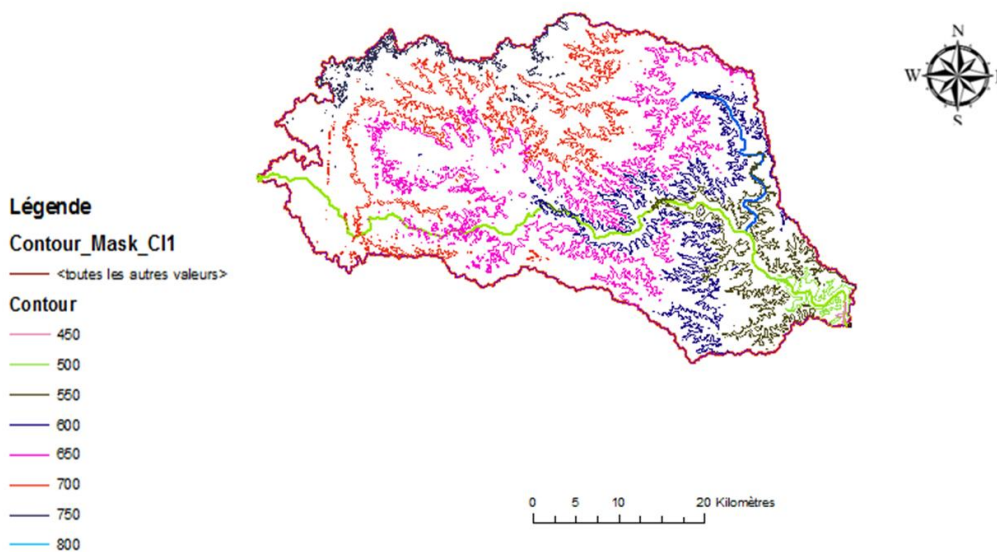


Fig.2.18. Carte hypsométrique du bassin versant du MZAB.

Tableau II.7 : Répartition altimétrique du bassin versant du MZAB

Altitudes (m)	Altitudes Moyennes (m)	Superficies Partielles		Superficies cumulées	
		(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
775-800	787.5	0.99	0.06	0.99	0.06
750-775	762.5	8.10	0.49	9.10	0.55
725-750	737.5	12.07	0.73	21.17	1.28
700-725	712.5	34.40	2.08	55.56	3.36
675-700	687.5	65.15	3.94	120.72	7.30
650-675	662.5	106.83	6.46	227.54	13.76
625-650	637.5	120.55	7.29	348.10	21.05
600-625	612.5	190.01	11.49	538.10	32.54
550-600	587.5	246.73	14.92	784.83	47.46
550-575	562.5	263.92	15.95	1048.75	63.42
525-550	537.5	215.14	13.01	1263.89	76.43
500-525	512.5	207.20	12.53	1471.09	88.96
475-500	487.5	166.19	10.05	1637.29	99.01
450-475	462.5	16.21	0.98	1653.49	99.99
440-450	445	0.17	0.01	1653.66	100

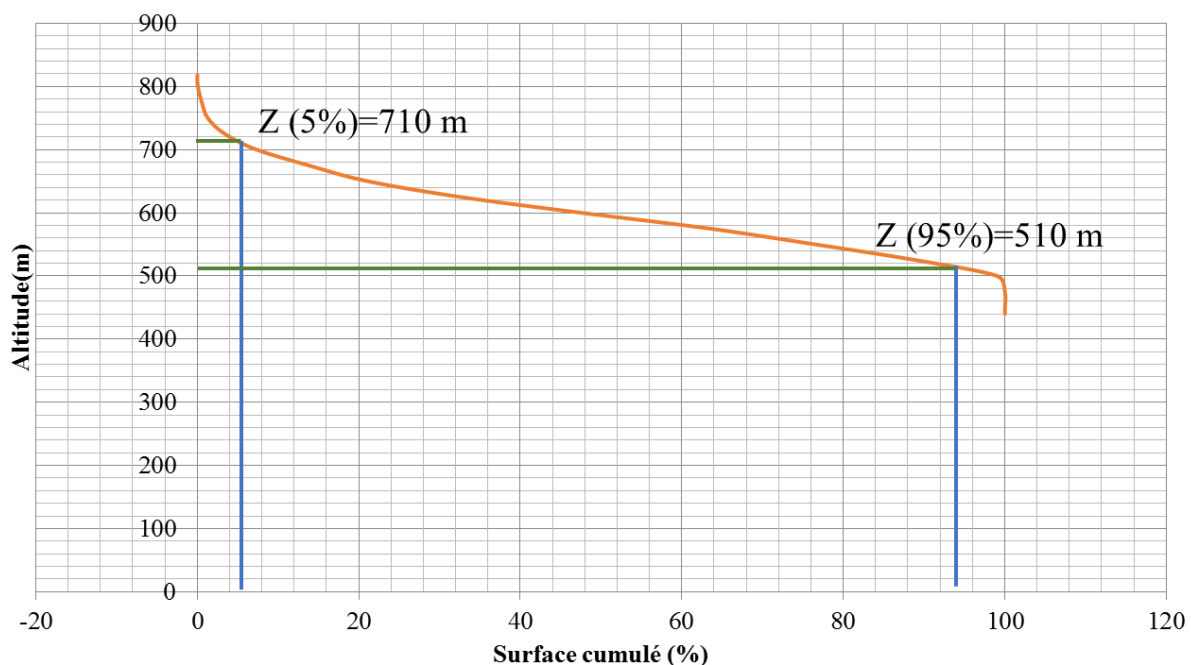


Fig.2.19. Courbe hypsométrique du bassin du MZAB

La figure 2.19 présente la courbe hypsométrique. Cette courbe montre que la majorité du bassin du MZAB est les plateaux dont le pourcentage des plateaux est 90%. Pour le bassin du MZAB, l'altitude la plus fréquente est : 562.5m qui prend une surface de 263.92 Km² pour les plateaux par contre le pourcentage du montagnes et falaises est plus petit que le pourcentage du plateau.

2.5.3.2) Hauteurs caractéristiques

Les hauteurs caractéristiques d'un bassin versant sont des facteurs importants pour définir le relief d'un bassin versant. Ces hauteurs sont obtenues à partir la carte topographique qui représente le point le plus élevé généralement à l'amont du bassin et le point le plus bas, généralement à l'exutoire et d'autres hauteurs entre ces deux hauteurs, donc en distingue :

a) Altitude moyenne du bassin versant

L'altitude moyenne obtenu à partir la courbe hypsométrique ou une carte topographique.

L'altitude moyenne peut se calculée comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum h_i \cdot S_i}{S} \quad (2 - 5)$$

Avec

S_i : surface partielle entre deux courbes de niveau (Km^2) ;

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives en (m) ;

S : Superficie du bassin versant (Km^2).

b) L'altitude maximale (H max)

L'altitude maximale (H max) désignée par le point le plus haut du bassin. Cette altitude influence sur les facteurs météorologiques et hydrologiques d'un bassin versant. Sur la courbe hypsométrique, l'altitude maximale correspond à une surface cumulée de 5%. Pour le bassin du MZAB, L'altitude maximale est égale à **825 m**.

c) L'altitude médiane (H med)

L'altitude médiane (H med) correspond à 50% de la surface du bassin. La répartition des différentes altitudes d'un bassin versant est traduite par la courbe hypsométrique. Pour le bassin du MZAB, L'altitude médiane est égale à **590 m**.

d) L'altitude minimale (H min)

Comme toutes les hauteurs caractéristiques d'un bassin versant, l'altitude minimale est un facteur important pour définir le relief d'un bassin versant, L'altitude minimale (H min) désignée par le point le plus bas du bassin qui correspond l'exutoire. Pour le bassin du MZAB, L'altitude minimale est égale à **440 m**.

2.5.3.3) Indice de pente**a) Indice de pente globale I_g**

L'indice global de pente. Sur la courbe hypsométrique, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de A. On déduit les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ entre lesquelles s'inscrit 90% de l'aire du bassin et la dénivelée $D = H_{5\%} - H_{95\%}$ (BENTEKHICLI.N, 2006). L'indice global est calculé par:

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad (2 - 6)$$

Où:

L : longueur du rectangle équivalent

b) Indice de pente moyenne (I_{pm})

L'indice de pente c'est une caractéristique morphométrique importante pour connaître la variation de ruissellement des eaux dans un bassin versant. C'est-à-dire, plus la pente est plus grande plus les eaux de ruissellement sont plus importantes . Par conséquent, les crues dans les montagnes où les sont grandes plus importantes qu'en plaine où les pentes sont plus faibles. L'indice de pente moyenne est le rapport entre la dénivelée et la longueur de rectangle équivalent comme montre par la relation suivante :

$$I_{pm} = \frac{\Delta h}{L} = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}}{L} \quad (2 - 7)$$

c) Indice de pente de ROCHE (I_p)

Il traduit la forme générale de la déclivité de son bassin. L'indice global de pente est calculé après construction de la courbe hypsométrique du bassin qui donne le pourcentage de la superficie du bassin versant situé au-dessus d'une altitude donnée en fonction de cette même altitude. Puisque

dans un bassin, la pente diminue de l'amont vers l'aval, l'indice I_p diminue lorsque la surface augmente (FAYE.C, 2014). Indice de pente de ROCHE est donné par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i D_i} \quad (2 - 8)$$

Où :

I_p : indice de pente de Roche

L : longueur du rectangle équivalent (m)

D_i : différences entre deux altitudes du rectangle équivalent

S_i : superficie partielle en (%) comprise entre deux altitudes.

Tableau II.8 : Déférénts indices de pentes du bassin du MZAB

	Indice de pente globale (m/Km)	Indice de pente Moyenne (%)	Indice de pente de ROCHE
Bassin du MZAB	1,22	2,35	0,46

2.5.3.4) La dénivelée

La dénivelé « **D** » c'est la différence entre l'altitude élevée supérieur à une hauteur donnée qui représente **H**_{5%} de la surface du bassin et l'altitude basse supérieur à une hauteur donnée qui représente **H**_{95%} de la surface du bassin.

Pour le bassin du MZAB, $D=710-510=200$ m.

2.4.3.5) La dénivelée Spécifique « **D_s** »

La dénivelée spécifique (D_s) c'est un paramètre qui génère la variation de l'indice de pente global (I_g). Cette variation est en fonction de la racine carrée de la superficie du bassin (S). La dénivelée spécifique est exprimée en Mètres et est indépendante, en théorie, de l'aire du bassin. La dénivelée spécifique désigne les différentes classes de relief selon la classification de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M), en distingue :

- Relief très faible dans le cas où la dénivelée spécifique $D_s < 10$ m ;
- Relief faible dans le cas où la dénivelée spécifique $D_s < 50$ m ;
- Relief assez faible dans le cas où $25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$
- Relief modéré dans le cas où $50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$;
- Relief assez fort dans le cas où $100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$;
- Relief fort dans le cas où $250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$;
- Relief très fort dans le cas où la dénivelée spécifique $D_s > 500$ m.

La dénivelée spécifique (D_s) est calculée Par la relation suivante :

$$D_s = I_g \times \sqrt{S} = \frac{D}{L} \times \sqrt{S} \quad (2 - 9)$$

Avec :

L : longueur du rectangle équivalent (m) ;

S : surface du bassin versant (Km^2) .

Pour le bassin du MZAB, $D_s = 49.63$ ce qui désigne un relief assez faible.

2.6) Caractéristiques hydrographiques du bassin versant du MZAB

2.6.1) Profil en long de l'axe de l'oued MZAB

Ces profils sont établis en portant sur un graphique, en abscisse les longueurs à partir d'un point de référence, en ordonnée l'altitude de la surface de l'eau ou parfois celle du fond de la rivière. Le point de référence des longueurs est généralement la source, mais le profil peut être aussi effectué

sur un tronçon de rivière. Les profils en long permettent d'estimer la pente moyenne du cours d'eau, cette dernière est calculée en décomposant le profil en long en tronçons de pente constante (MERRIEN.V,2004).

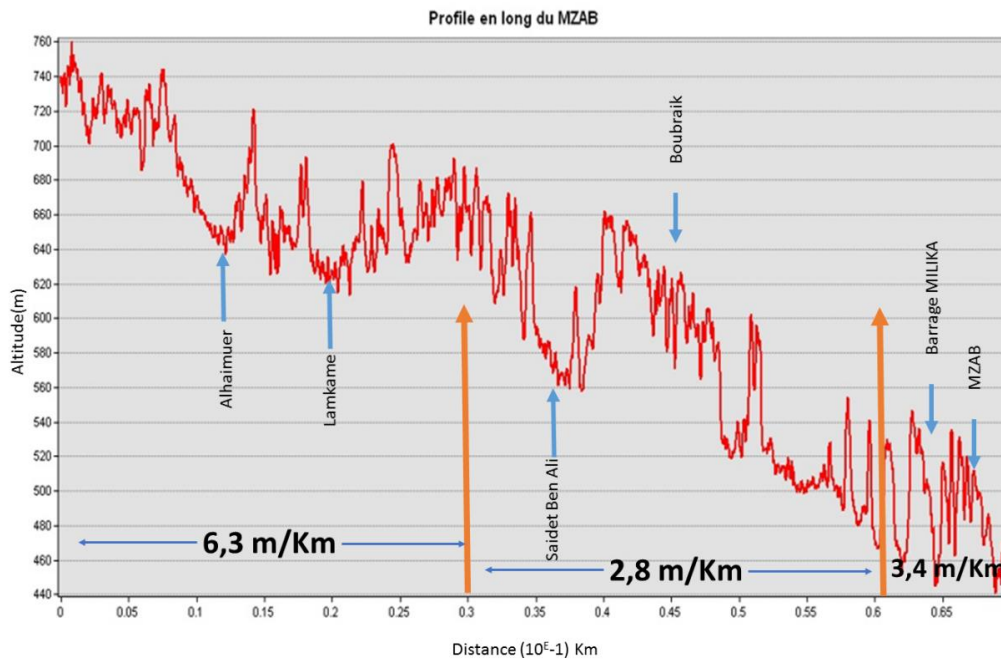


Fig.2.20. Profil en long du bassin du MZAB.

2.6.2) Pente moyenne de cours d'eau principal (pm)

La pente moyenne de cours d'eau principal désigne le rapport entre la dénivelée D et la longueur comprise entre deux points suffisamment éloignés du cours d'eau principal, Il est donné par la formule suivante :

$$P_m = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2 - 10)$$

Où

ΔH : dénivelée entre deux points suffisamment distants (m) ;

ΔL : distance entre ces deux points (km).

Pour le bassin du MZAB $P_m=0,10\%$.

2.6.3) Densité de drainage

Cet indice est particulièrement intéressant pour évaluer l'influence du développement des réseaux sur les débits mesurés. Pour obtenir la densité de drainage La somme totale de leur longueur (Km) est ensuite divisée par la surface drainée (Km²). (DENIS.M, 2011) La densité de drainage est ainsi exprimée en Km / Km² et calculée par l'équation suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (2 - 11)$$

Où

$\sum_{i=1}^n Li$: somme des longueurs de tous les cours d'eau d'ordre i en (km) ;

S : surface du bassin versant (Km²).

Pour le bassin du MZAB, Dd= **0.043** Km / Km².

2.6.4) Coefficient d'allongement

Le coefficient d'allongement c'est un indice très souvent utilisé en hydrologie de surface, ce coefficient est influencé par la surface du bassin versant et la longueur moyenne des talwegs au niveau de chaque oued. Le coefficient d'allongement est calculé pour caractériser l'allongement d'un bassin versant. Ce coefficient est obtenu par la relation :

$$E = \frac{\left[2 \cdot (S/\pi)^{\frac{1}{2}} \right]}{L} \quad (2 - 12)$$

Où

L : la Longueur de rectangle équivalent (Km) ;

S : la superficie du bassin versant en Km² ;

E : Coefficient d'allongement.

Pour le bassin du MZAB, E= 1,18.

2.6.5) La fréquence des talwegs d'ordre 1 (F1)

La fréquence des talwegs d'ordre 1 est le rapport du nombre total des cours d'eau d'ordre 1 (N1) à la surface du bassin versant (S).

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \quad (2 - 13)$$

Où

N1 : nombre total des cours d'eau ;

S : la surface (Km²) ;

Pour le bassin du MZAB, N1=478, S=1653.65 donc F₁= 0,28.

2.5.6) Rapport de confluence (Rc)

Le rapport de confluence c'est le rapport du nombre de coures d'eau d'ordre N au rapport du nombre de coures d'eau d'ordre N+1(MERRIEN.V,2004). Il est donné par la relation suivante :

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad (2 - 14)$$

Où

N_n : nombre de talwegs d'ordre n ;

N_{n+1} : nombre de talwegs d'ordre n+1.

Tableau II.9 : Les valeurs de Rapport de confluence du bassin du MZAB.

	01--02	02--03	03--04
Rc	4.97	0.70	8

2.6.7) Rapport de longueur (Rl)

Le rapport de longueur l'un des caractéristiques hydrographiques importantes pour définir la forme hydrographique d'un bassin. C'est le rapport des longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre N aux longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre N- 1

$$R_l = \frac{l_n}{l_{n-1}} \quad (II - 15)$$

Ln : nombre de talwegs d'ordre n

Ln-1 : nombre de talwegs d'ordre n-1

Tableau II.10 : Les valeurs de Rapport de longueur du bassin du MZAB.

	01--02	02--03	03--04
RL	0.48	1.70	0.19

Le rapport de longueur est égal à **0.58**

2.6.8) Temps de concentration

Le temps de concentration T_c des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point situé le plus loin possible de l'exutoire pour atteindre ce dernier. Théoriquement on estime que T_c est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement, le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques (BADR.L& al, 2012). Différentes formules existent pour mesurer le temps de concentration (T_c). Les principales formules utilisées dans cette thèse sont : GIANDOTTI, BASSO, KIRPICH, TURRAZA, SCS et VENTURA.

a) Formule de GIANDOTTI (Sud Italie 1937)

Le temps de concentration est calculé par la relation suivante :

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5 L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (2 - 16)$$

Où :

T_c : temps de concentration en Heures ;

S : superficie du bassin versant (Km^2) ;

L : longueur de l'Oued (m) ;

H_{moy} : altitude moyenne (m) ;

H_{min} : altitude minimale (Km).

b) Formule de BASSO

$$T_c = 0.067x \frac{L^{1.155}}{(H_{max} - H_{min})^{0.385}} \quad (2 - 17)$$

Où :

T_c : temps de concentration en Heures ;

L : longueur du bassin versant (Km) ;

H_{min} : altitude minimale (Km) ;

H_{max} : altitude maximale (Km).

c) Formule de KIRPICH

La méthode de KIRPICH est appliquée pour les petits bassins versants de superficie comprise entre 0,4 ha et 81 ha, qui sont caractérisés par des sols argileux et pente moyenne comprise entre 3% et 10%. Le temps de concentration est alors calculé à partir de l'équation suivante :

$$T_c = 0.6615x L^{0.77} x Ig^{0.385} \quad (2 - 18)$$

Où :

L : longueur du bassin versant (Km) ;

I_g : indice de pente globale (%).

d) Formule de Turraza

$$T_c = 0.1013 \times \left[\frac{S \times L}{\sqrt{L}} \right]^{1/3} \quad (2 - 19)$$

Où :

S : superficie du bassin versant (Km²) ;

L : longueur de l'Oued (m).

e) Formule SCS (Soil Conservation Service)

$$T_c = \left[\frac{0.87 \times L^3}{H_{\max} - H_{\min}} \right]^{0.385} \quad (2 - 20)$$

Où :

L : longueur du bassin versant (Km) ;

H_{max} : hauteur maximale du bassin versant ;

H_{min} : hauteur minimale du bassin versant.

f) Formule de de Ventura

$$T_c = 0.1272 \times \sqrt{\frac{S}{I_{\text{moy}}}} \quad (2 - 21)$$

Où :

S : superficie du bassin versant (Km²)

I_{moy} : Pente moyenne de cours d'eau principal

Les formules utilisées dans cette thèse donnent des valeurs différentes pour le temps de concentration. Par conséquent et pour le bassin du MZAB les formules Basso et Turraza ne sont pas applicables, les valeurs de ces formules de temps de concentration sont très faibles.

A ce titre, l'application de plusieurs formules de calcul de temps de concentration est nécessaire pour obtenir une valeur moyenne de temps de concentration. Le tableau (II-10) résume les valeurs de temps de concentration pour les différentes formules.

Tableau II.11: Sommaire des valeurs de Temps de concentration

méthode	Giandotti	Basso	Kirpich	Turraza	SCS	Ventura	Moyen
MZAB	19.09	2.45	11.95	2.35	34.60	16.36	14.47

Tableau II.12 : Récapitulatif des caractéristiques morpho métriques et hydrographiques du bassin du MZAB.

Caractéristiques géométriques du bassin du MZAB				
Désignation		Symbole	Unités	Valeur
Superficie		S	km ²	1653.65
Périmètre		P	km	347.92
Longueur du thalweg principal		L	Km	38.8
Rectangle équivalent	longueur	L	Km	163.87
	largeur	l	Km	10.09
Caractéristiques du chevelu hydrographique du bassin du MZAB				
Rapport de confluence		Rc	-	4.56
Rapport de longueur		Rl	-	0.58
Fréquence des thalwegs d'ordre 1		F1		0.28
Densité de drainage		Dd	Km/Km ²	0.043
Temps de concentration		Tc	h	14.47
Caractéristiques de relief du bassin du MZAB				
Altitudes	maximale	Hmax	m	825
	moyenne	Hmoy	m	649.15
	médiane	Hmed	m	590
	minimale	Hmin	m	440
Indice de pente globale		Ig	‰	1.22
Indice de pente de M Roche		Ip	‰	0.46
Indice de pente moyenne		Im	‰	2.35
Dénivelée		D	m	200
Dénivelée spécifique		Ds	m	49.63
Pente du thalweg principal		Pm	%	0.1
Indice de compacité		Kc	-	2.41
Coefficient d'allongement		Ca	-	1.18

2.6. Conclusion

L'étude du comportement hydrologique des bassins versants comprend plusieurs axes. Ces axes touchent toutes les contraintes et rassemble les données techniques et sociales d'une zone d'étude. Pour l'étude du comportement hydrologique du bassin du MZAB, le chapitre : présentation de la zone montre que la vallée du MZAB c'est une partie du Sahara septentrional qui caractérisée par un réseau hydrographique dense. Ce bassin à une superficie plus ou moins importante qui génère l'irrégularité de précipitation et en résulte la présence du risque d'inondation. Plusieurs outils informatiques ont été utilisés dans ce chapitre pour faciliter la présentation de la zone et gagner le temps. Les outils utilisés sont :

- Arc Gis pour la détermination les caractéristiques géométriques et hydrologiques et aussi les caractéristiques de relief.
- Hyfran, pour l'étude statistique des précipitations qui sont utilisent dans le chapitre de l'homogénéisation des données.
- Excel et PowerPoint pour la présentation graphique des figures et tableaux.

3

HOMOGENEISATION DES DONNEES ET ANALYSE STATISTIQUE

Chapitre 3 :

Homogénéisation des données et analyse statistique

3.1) Introduction

On englobe sous le terme précipitations, toutes les eaux météoriques, ou hydrométéores, qui tombent à la surface de la terre, tant sous forme liquide (pluie) que solide (neige, grêle, grésil). La variation des précipitations à l'échelle spatio-temporelle influence sur la quantité d'eau ruisselée vers l'exutoire d'un bassin versant.

Ces précipitations sont la cause principale de plusieurs catastrophes désignée par les risques d'inondation. Il existe plusieurs lois de probabilité qui permettent la détermination de certaines valeurs des précipitations moyennes annuelles, mensuelles ou bien journalières et a pour but de les utiliser pour connaître les débits et la gestion parfaite des ressources en eau et la localisation des risques. La stabilité et la performance de ces lois restent toujours liés aux problèmes de l'ajustement.

L'intérêt essentielle de l'étude des pluies est de déterminer les zones à risques et l'utilisation des informations pluviométriques pour la modélisation des débits qui pose un problème, à ce titre, ce chapitre traite les précipitations qui jouent un rôle très important dans le comportement hydrologique des bassins versants. Les raisons d'utilisation de l'information pluviométrique sont :

- Dans la majorité des cas, les pluies fortes sont génératrices des crues fortes ;
- Les stations pluviométriques sont plus nombreuses et plus longues que les stations hydrométriques ;
- L'ajustement des lois de probabilité sur les pluies est plus facile à faire que sur les débits. En effet, on constate que les débits présentent une cassure dans leur distribution, à cause de la relation non linéaire entre les pluies et les débits (DJERBOUA.A,2001)

3.2) Etude des précipitations

Toute étude climatique ou hydrologique est basée sur l'exploitation de séries de données recueillies pendant des périodes plus ou moins longues continues ou discontinues. Les méthodes statistiques d'analyse de ces séries exigent de celle-ci une homogénéité de leur composante. En d'autres termes, on ne peut faire une analyse statistique, d'un échantillon composé de n réalisations d'une variable climatique ou hydrologique, que si certaines de ces n réalisations ne présentent pas d'erreurs systématique rendant l'échantillon hétérogène.

En particulier, les données pluviométriques sont tirées généralement des relevées journalières effectués sur un pluviomètre. Cet appareil est relativement facile à mettre en place et à utiliser ; cela explique, sans le justifier que l'on a souvent changé l'emplacement d'un pluviomètre, ou bien de faire successivement à de nombreuse observateurs plus ou moins qualifiés et mal rémunérés.

Il en résulte que les séries de données présentent des lacunes qu'elles représentent, comme disent les statisticiens, un échantillon d'une seule population. (DUBREUIL.P,1974) Tout d'abord les précipitations ont été fournies par **ONM** (l'Office National de la Météorologie).

Les différentes caractéristiques des précipitations se rapportent essentiellement à Ghardaïa car aucune autre station pluviométrique n'a été observée sur les bassins versants du MZAB situés en amont de cette ville. Les caractéristiques géographiques avec leurs périodes d'observations sont données dans le tableau (III.1).

Tableau III.1 : Caractéristiques de la station pluviométrique du bassin du MZAB

	Code	Coordonnées			Période
		Latitude	Longitude	Altitude	
Station Ghardaïa	605660 (DAUG)	32,4 N	3,81 E	450 m	1970-2014

L'extrémité la plus éloignée des bassins se situe en ligne droite à 60 km à l'ouest de Ghardaïa et à 120 km de Laghouat. La station de Berriane, pour laquelle peu de données sont disponibles, est à 19 km de la pointe nord-est du bassin versant de l'oued Lahdhira alors que Ghardaïa se trouve à 24 km de cette extrémité.

Les autres stations météorologiques de la région sont relativement plus éloignées de Ghardaïa. C'est ainsi que Ouargla est à 160 km au sud-ouest, Laghouat à 170 km au nord-nord-ouest, El Goléa à 230 km, Touggourt à 245 km à l'est-nord-est, et El Oued à 330 km à l'est-nord-est. (ROCHE.M,1996).

3.2.1) Variation interannuelle de la pluviométrie

Par son nom, la pluviométrie d'une année correspondant la somme de la hauteur des précipitations mensuelles. Sur une période donnée la variabilité de la pluviométrie est mesurée grâce à la moyenne interannuelle.

Les données pluviométriques que nous avons utilisées pour cette analyse couvrent la période **1970-2014**. Malheureusement une seule station a été installée, il s'agit du poste pluviométrique situé à l'intérieur de la direction de l'Office Nationale Météorologique.

Il est caractérisé par la proximité de l'exutoire (commune ELATTEUF) et l'aéroport en même temps. Pour déterminer la variation interannuelle de pluviométrie pour la station du bassin de l'oued MZAB, nous avons utilisé des paramètres statistiques tels que la moyenne annuelle.

Il existe une méthode qui permet de montrer la variabilité interannuelle des précipitations. C'est le cas du moyen arithmétique. Cette méthode permet de calculer le moyen des pluies annuelles de la station, et le coefficient d'immodération donnée par le rapport des pluies extrêmes (PM/Pm).

Tableau III.2 : caractéristiques de la précipitation annuelle de la station pluviométrique du bassin de l'oued MZAB

Station	Moyenne (mm)	Max (P _M) (mm)	Min (P _m) (mm)	Nbre d'années > moy	P _M /P _m
Ghardaïa	76.5	164.5(94-95)	8.7 (70-71)	25	18.9

Le tableau (III.2) présente respectivement les valeurs maximum et minimum de la pluviométrie à la station de Ghardaïa pendant la période **1970-2014**. Une irrégularité visuelle des précipitations à la région de MZAB traduite par une grande valeur de coefficient d'immodération. Donc on peut dire que la répartition de la pluie dans notre bassin est définitivement hétérogène (Fig.3.1).

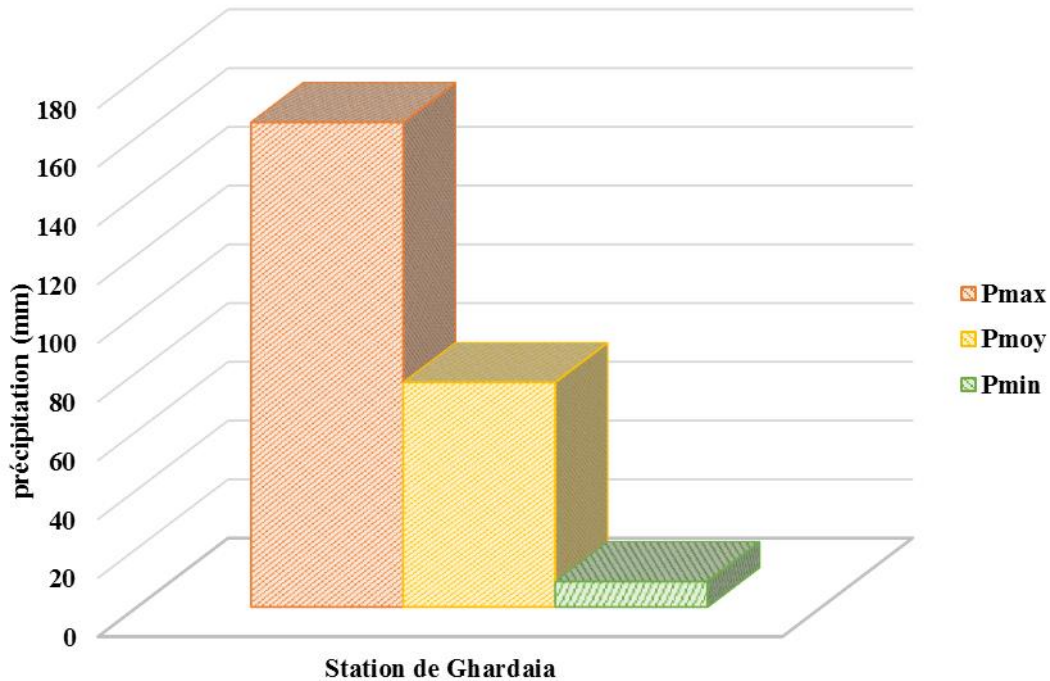


Fig.3.1. Précipitations moyennes annuelles de la station pluviométrique du bassin MZAB

3.3) Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles

3.3.1) Variations temporelles

Il existe plusieurs travaux de recherches qui identifient et évaluent les différents types de périodes tel que les périodes sèches et pluvieuses ou l'alternance entre les deux périodes le long d'une série. Parmi ces recherches, on distingue : P.J. LAMB, 1982, J.P. CAMBONNEL et P. HUBERT, 1985, S.E. NICHOLSON, 1986, J.E. PATUREL et al, 1998, E. SEVAT et al, 1999, L'HOTE et al 2002. Ces études montrent quelques conclusions la variation pluviométrique d'une année sur plusieurs bassins versants d'une hydrologie définitivement différente.

Les données pluviométriques utilisées dans cette étude sont obtenues de L'Office National de la Météorologie Alger (ONM). Elles concernent la station de Ghardaïa et couvrent la période 1970-2014. le tableau (III.3) dresse la pluviométrie moyenne annuelle

L'ensemble des pluies retenues sont variables le long de la période d'étude (tableau III.3). La variation des précipitations moyennes annuelles montre une alternance d'années humides et d'années sèches.

Tableau III.3 : pluie moyenne annuelle du bassin du MZAB sur la période (1970-2014).

Année	P annuelles(mm)	Année	P annuelles(mm)
1970	8.7	1993	34.6
1971	46.5	1994	164.5
1972	83.8	1995	64.9
1973	77.7	1996	87.8
1974	47.8	1997	158.64
1975	96.5	1998	32.81
1976	112.6	1999	56.13
1977	65.4	2000	57.91
1978	29.1	2001	54.1
1979	56.3	2002	78.04
1980	141.03	2003	155.18
1981	37.4	2004	160.01
1982	80.2	2005	39.33
1983	9.66	2006	99.06
1984	122.87	2007	51.05
1985	47.26	2008	140.07
1986	97.1	2009	130.06
1987	54.2	2010	42.41
1988	57.4	2011	153.94
1989	34	2012	39.89
1990	122.3	2013	62.21
1991	54.2	2014	35.29
1992	62.3		

Pendant cette période, on remarque que la hauteur maximum de précipitation a été enregistrée pendant l'année hydrologique 1994 avec 164.5mm (Fig.3.2), par contre le minimum a été enregistré pendant l'année hydrologique 1970 avec 8.7mm.

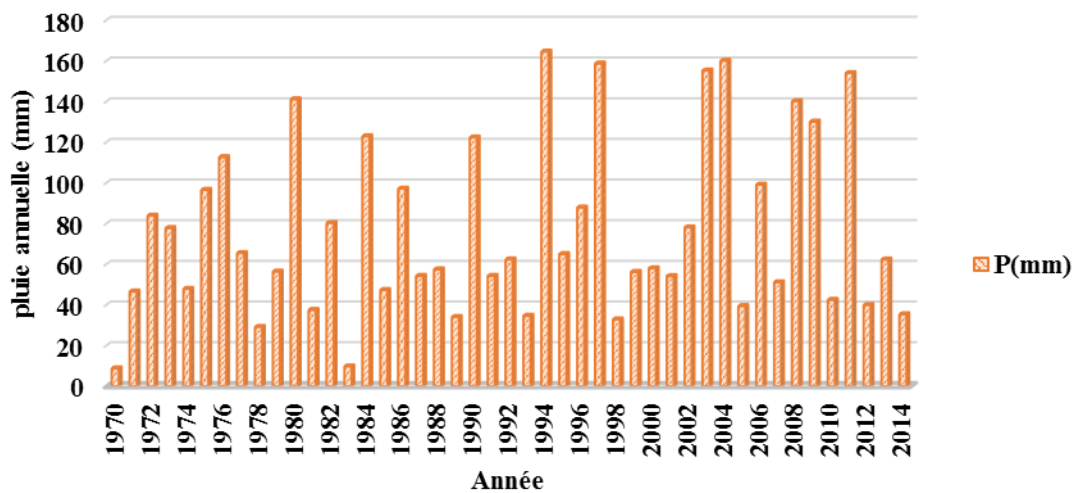


Fig.3.2. Histogramme des répartitions des pluies annuelles au bassin du MZAB sur la période (1970-2014).

La représentation graphique des précipitations moyennes annuelles permet de mettre en évidence la succession de périodes plus ou moins marquées d'années sèches et d'années pluvieuses et au même temps la régularité ou non de la série observée. Dans le cas du bassin du MZAB, on remarque qu'une irrégularité de la précipitation annuelle sur la période d'étude. Le tableau (III.4) résume les différents paramètres statistiques de base des pluies moyennes interannuelles du bassin versant du MZAB.

Tableau III.4 : Paramètres statistiques de base des pluies moyennes interannuelles du bassin versant du MZAB.

Bassin versant du MZAB	
Nombre d'observations	45
Minimum	8.7
Maximum	165
Moyenne	76.5
Ecart-type	43.3
Médiane	62.2
Coefficient de variation (Cv)	0.566
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.684
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2.22

L'homogénéité de la série de précipitation est déterminée par le coefficient de variation de telle façon que ce coefficient prend une valeur inférieure à 15% dans le cas où la série est homogène. Dans le cadre de notre cas d'étude, le coefficient de variation est égal à 56.6%, ce qui permet de dire que la série de précipitation est hétérogène.

3.3.2) Variations spatiales

La carte de pluviométrie moyenne du nord d'Algérie et du Sahara, sur la période 1926-1960, permet de situer Ghardaïa et les sous bassins du MZAB dans une pluviométrie moyenne annuelle qui varie de 50 à 100 mm.

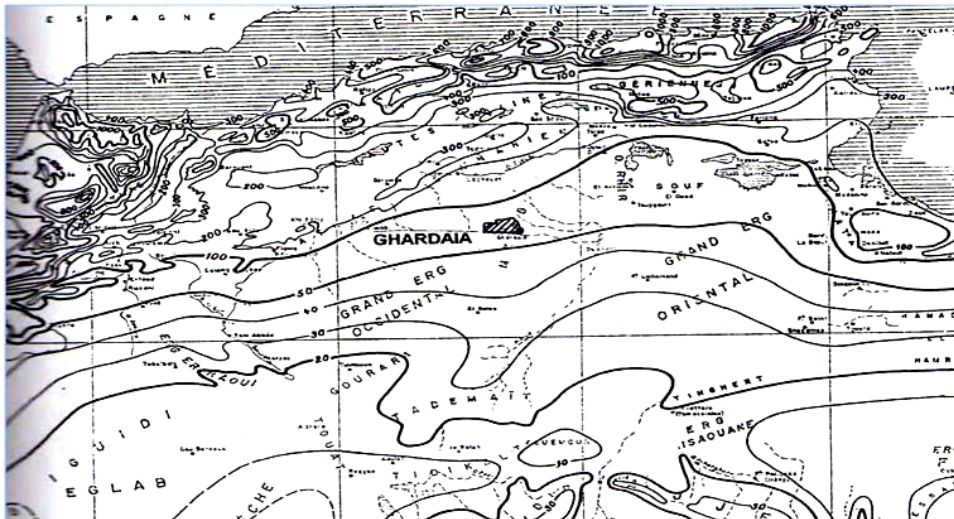


Fig.3.3. Carte de la pluviométrie moyenne annuelle du nord d'Algérie et du Sahara (Dubief, 1963).

La variabilité spatiale des précipitations illustrées par la carte citée dans la figure 3.3 montre qu'une baisse remarquable de la pluviométrie à l'échelle du Bassin versant du MZAB (entre 50 et 100mm). Le croisement des isohyètes sur l'ensemble du bassin montre globalement un glissement vers le nord (de 20 à 100 mm) de la willaya de Ghardaïa.

3.3.3) Méthode des écarts à la moyenne interannuelle

La méthode des écarts à la moyenne interannuelle permet d'analyser la variabilité interannuelle des précipitations. Cette méthode évalue les excédents ou les déficits d'une année quelconque par rapport à la moyenne de la série de précipitation. Les valeurs de l'écart à la moyenne absolues et relatives sont données par les équations suivantes :

$$EM(\text{valeur absolues}) = P_x - P_m \quad (3-1)$$

$$EM(\text{valeur relative}) = \left(\frac{P_x - P_m}{P_m} \right) * 100 \quad (3-2)$$

Où :

EM représente l'écart à la moyenne

P_x : cumul pluviométrique annuelle

P_m : moyenne pluviométrique interannuelle de la période

L'étude des précipitations ann

uelles par la méthode des écarts à la moyenne interannuelle présente l'avantage de décrire et de caractériser leur distribution spatio-temporelle. Elle permet également d'apprécier l'ampleur des déficits et des excédents.

Tableau III.5 : pluviométrie de la station de Ghardaïa sur la période (1970-2014).

Année	P annuelles	ÉM-VA	ÉM-VR(%)	Année	P annuelles	ÉM-VA	ÉM-VR(%)
1970	8.7	-53.50	-86.01	1994	164.5	102.30	164.47
1971	46.5	-15.70	-25.24	1995	64.9	2.70	4.34
1972	83.8	21.60	34.73	1996	87.8	25.60	41.16
1973	77.7	15.50	24.92	1997	158.64	96.44	155.05
1974	47.8	-14.40	-23.15	1998	32.81	-29.39	-47.25
1975	96.5	34.30	55.14	1999	56.13	-6.07	-9.76
1976	112.6	50.40	81.03	2000	57.91	-4.29	-6.90
1977	65.4	3.20	5.14	2001	54.1	-8.10	-13.02
1978	29.1	-33.10	-53.22	2002	78.04	15.84	25.47
1979	56.3	-5.90	-9.49	2003	155.18	92.98	149.49
1980	141.03	78.83	126.74	2004	160.01	97.81	157.25
1981	37.4	-24.80	-39.87	2005	39.33	-22.87	-36.77
1982	80.2	18.00	28.94	2006	99.06	36.86	59.26
1983	9.66	-52.54	-84.47	2007	51.05	-11.15	-17.93
1984	122.87	60.67	97.54	2008	140.07	77.87	125.19
1985	47.26	-14.94	-24.02	2009	130.06	67.86	109.10
1986	97.1	34.90	56.11	2010	42.41	-19.79	-31.82
1987	54.2	-8.00	-12.86	2011	153.94	91.74	147.49
1988	57.4	-4.80	-7.72	2012	39.89	-22.31	-35.87
1989	34	-28.20	-45.34	2013	62.21	0.01	0.02
1990	122.3	60.10	96.62	2014	35.29	-26.91	-43.26
1991	54.2	-8.00	-12.86				
1992	62.3	0.10	0.16				
1993	34.6	-27.60	-44.37				

Les valeurs des précipitations nous donnent une valeur de la moyenne arithmétique de : **62.2 mm**. La figure ci-dessous présente la variation interannuelle et les écarts de la moyenne absolus et relatives de la station de Ghardaïa pendant la période **1970-2014**. L'évaluation des écarts à la moyenne illustrée par la figure.4.2. Celle-ci montre que la variation de la pluviométrie d'une année à l'autre est irrégulière. Sur les 45 années d'observation de la pluviométrie, 20 années sont inférieures à la moyenne interannuelle soit : **44%** et 25 sont supérieures soit : **56%**. Cette moyenne interannuelle prend une valeur de **62.2mm**. Le minimum pluviométrique est intervenu en **1970** et prend une valeur de **8.7 mm** et en cette année-là, le déficit est de **-53.5 mm** soit - **86.01%**. Le maximum, pour sa part est survenu en **1994** avec un excédent de **102.3 mm** soit : **164.47%** qui représente une valeur de 2 fois supérieure à la moyenne interannuelle.

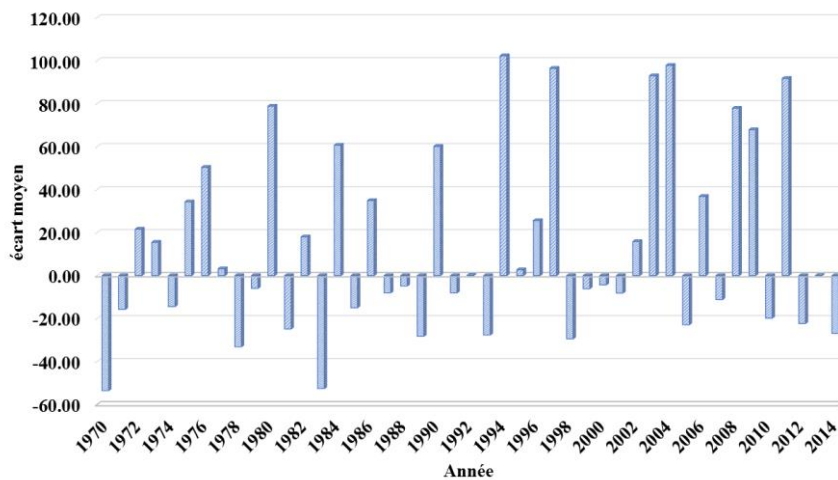


Fig.3.4. Variation interannuelle des précipitations de la station de Ghardaïa

Le long de la période **1970-2014** plusieurs conséquences peuvent être retenues :

1. Une alternance d'année sèche et d'année pluvieuse pendant la période (1970 -1973) dont la moyenne pluviométrique est de 62.2 mm et représentant un déficit moyen de -0.1% par rapport à la moyenne interannuelle.
2. Une année sèche pendant l'année hydrologique 1974 qui représente un déficit moyen de - 23.15% par rapport à la moyenne interannuelle.
3. Une période très pluvieuse pendant la période (1975-1977), qui représente un excédent moyen de 96.5mm soit 34.3%.
4. Une période sèche de 1978 à 1979 dont la moyenne pluviométrique est de 42.7mm et représentant un déficit moyen de -19.5% par rapport à la moyenne interannuelle.
5. Sur la période 1980-1986 nous avons une alternance vers la période pluvieuse dont la moyenne pluviométrique est de 80.2mm et représentant un excédent moyen de 18% par rapport à la moyenne interannuelle.
6. Une période sèche de 1987 à 1989 dont la moyenne pluviométrique est de 54.2mm et représentant un déficit moyen de -8% par rapport à la moyenne interannuelle.
7. Sur la période 1990-1993 nous avons une alternance vers la période sèche dont la moyenne pluviométrique est de 58.25mm et représentant un déficit moyen de -3.95% par rapport à la moyenne interannuelle.

8. Une période très pluvieuse de 1994 à 1997, qui représente un excédent moyen de 123.22mm soit 61.02%. C'est dans ce cas-là, on trouve le maximum pluviométrique de ces 45 années : 1994 avec un excédent de 102.30 mm soit : 164.47%. C'est-à-dire 2 fois supérieurs à la moyenne interannuelle.
9. Une période sèche de 1998 à 2001 dont la moyenne pluviométrique est de 55.12mm et représentant un déficit moyen de -7.09% par rapport à la moyenne interannuelle.
10. Une très période pluvieuse de 2002 à 2004 dont la moyenne pluviométrique est de 155.18mm et représentant un excédent moyen de 92.98% par rapport à la moyenne interannuelle. Cette période représente la période la plus pluvieuse durant la série chronologique des précipitations de la station de Ghardaïa.
11. Une alternance vers la période sèche pendant le période (2005-2007) dont la moyenne pluviométrique est de 51.05mm et représentant un déficit moyen de -11.15% par rapport à la moyenne interannuelle.
12. Une très période pluvieuse de 2008 à 2009 dont la moyenne pluviométrique est de 135.07mm et représentant un excédent moyen de 72.87% par rapport à la moyenne interannuelle.
13. Une alternance vers la période sèche pendant le période (2010-2014) dont la moyenne pluviométrique est de 42.41mm et représentant un déficit moyen de -19.79% par rapport à la moyenne interannuelle.

Sur une période totale de 35 ans d'observations, on divise la variation interannuelle des pluviométries en trois grands secteurs (Fig.3.5) :

1. Un secteur d'alternance d'années sèches et pluvieuses qui couvre la période 1970-1980 ;
2. Un secteur des périodes très pluvieuses qui couvre les périodes 1994-1996, 2002-2004 et 2008-2010 ;
3. Un secteur des périodes moyennement pluvieuse qui couvre les périodes 1980-1994, 1998-2002 et 2010-2014.

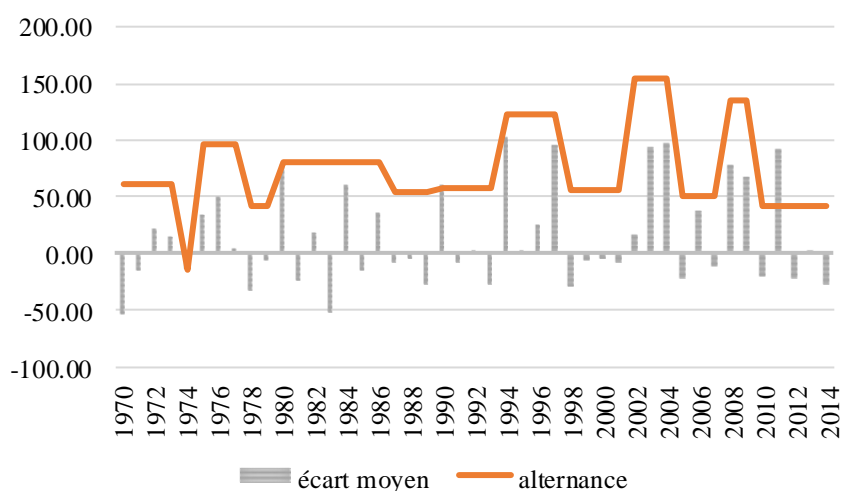


Fig.3.5. Secteurs d'alternance de la variation interannuelle des précipitations de la station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).

3.4) Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité

Dans le domaine des sciences de l'eau, l'estimation des précipitations associées aux événements extrêmes est un sujet d'intérêt très important. Parmi les méthodes couramment utilisées en hydrométéorologie pour estimer les précipitations, on peut distinguer d'une part, les méthodes d'interpolation spatiale (DELHOMME.J,1978 ; CREUTIN & OBLED,1982 ; AMANI &LEBEL,1998) et, d'autre part, les méthodes d'analyses de fréquence régionale (HOSKING et al, 1985 ; OURADA ET AL, 1999).

Les méthodes d'interpolation utilisent des approches géométriques (la méthode de trois stations les plus proches, les polygones de Thiessen) ou les fonctions de corrélation spatiale pour estimer à un site ciblé la précipitation associée à un événement ou à une fréquence donnée. Par contre, les méthodes d'analyse de fréquence régionale permettent d'estimer pour un site donné, et sur la base de l'information régionale, les quantiles de période de retour T (DUBREUIL.P,1974).

3.4.1) Analyse fréquentielle locale

Un des outils de base de l'analyse de l'occurrence d'événements extrêmes est l'analyse fréquentielle. Cette méthode statistique a comme objectif principal d'utiliser des mesures d'événements passés pour estimer les probabilités futurs d'occurrences. L'analyse fréquentielle est utilisée, en particulier pour estimer l'ampleur de l'événement temporel x_t auquel est associé un période de retour T (ST-HILAIRE.A,2005). L'estimation de la valeur du quantile s'obtient en ajustant une loi de probabilité $F(x)$ à un échantillon de 45 observations dans le cas de notre étude.

Les étapes principales de l'analyse fréquentielle sont :

1. La vérification des hypothèses de base tel que : l'homogénéité, stationnarité et l'indépendance ;
2. L'ajustement d'une distribution statistique à l'échantillon ;
3. Evaluation des quantiles à l'aide de modèle théorique et la connaissance de la relation entre la probabilité au non dépassement et le période de retour.

3.4.2) L'hypothèse de l'Homogénéité

Dans le cas où il n'y a pas de différence significative dans la moyenne de sous échantillon, le terme inhomogénéité représente les variations non naturelles qui sont causées par des modifications dans les réseaux d'observations. L'homogénéisation consiste à détecter puis à corriger ces variations. Les tests d'homogénéité rassemblent un grand nombre de tests de telle façon que la série temporelle doit être homogène entre deux temps donnés. Pour tester l'homogénéité de la série, le test de Mann et Whitney (1947) est appliqué, où l'échantillon $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ est décomposé en deux sous échantillons de taille p et q ($p \leq q$ et $n=p+q$). La cause d'hétérogénéité peut être : le déplacement d'une station de mesure ou saisonnalité des crues d'automne et de printemps. Les deux sous échantillons sont regroupés dans un échantillon unique et sont classés par ordre croissant. Soit U la somme des rangs des éléments du premier échantillon dans l'échantillon combiné. L'hypothèse $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu$, c'est-à-dire les deux échantillons proviennent de populations de même moyenne (YAHIAOUI.A, 2012).

Il existe plusieurs méthodes de l'homogénéisation des séries de précipitations on cite à titre d'exemple : **Teste de Pettitt** Le test de Pettitt est un test non paramétrique ne nécessitant aucune hypothèse quant à la distribution des données. Le test de Pettitt est une adaptation de test de Mann-Whitney basé sur les rangs, permettant d'identifier le temps auquel se produit un changement. Dans son article 1979 Pettitt décrit l'hypothèse nulle comme étant que les T variables suivent une même distribution F , et l'hypothèse alternative comme étant qu'à un temps t se produit un changement de distribution. Néanmoins le test de Pettitt ne permet pas de détecter

un changement de distribution s'il n'est pas assorti d'un changement de position. Par exemple, si avant le temps t , les variables suivent une distribution normale $N(0,1)$ et à partir du temps t une distribution $N(0,3)$, le test de Pettitt ne détectera pas de changement, de la même manière qu'un test de Mann-Whitney ne permettrait pas de détecter un changement de position dans un tel cas.

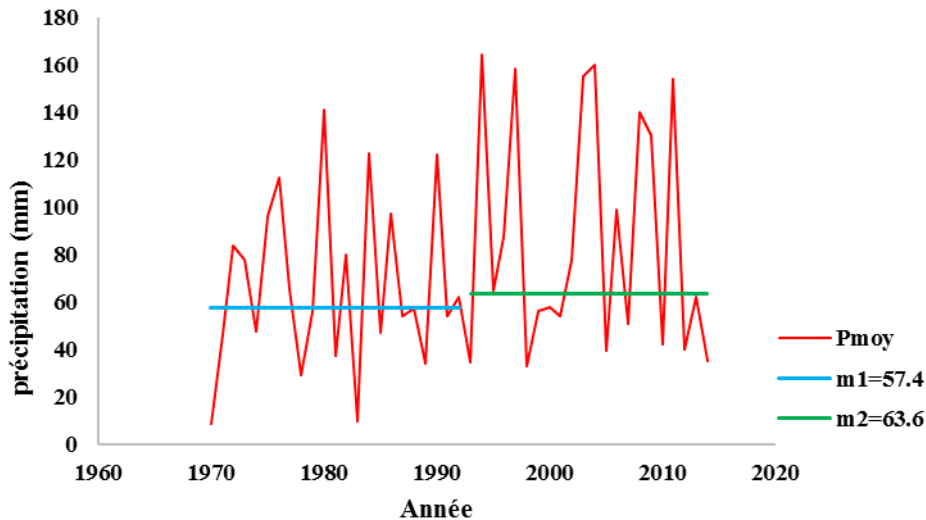


Fig.3.6. Test d'homogénéisation des précipitations annuelle du MZAB selon Pettitt

La figure 3.6. montre qu'une différence entre les moyennes des sous échantillons, ce qui permet l'existence d'une hétérogénéité de la distribution des précipitations. Plusieurs points et questions va se poser sur cette hétérogénéité, la première question c'est le prélèvement sérieux des observateurs qui est le point le plus essentielle de l'homogénéité des séries de précipitations.

Dans ce cas-là, nous avons repris la remarque de Monsieur A. ROCHE en 1996 qui est l'ingénieur chargé d'études de dimensionnement des barrages en amont de la Wilaya de Ghardaïa. Monsieur ROCHE mentionne que pour la vallée de MZAB, aucune mesure hydrométrique n'a jamais été faite, mise à part l'observation sommaire et qualitative, mais fort utile, des crues qui ont traversé l'agglomération de Ghardaïa. Pour les précipitations, éventuellement nécessaires aux évaluations, on dispose de statistiques diverses, notamment sur les pluies journalières à Ghardaïa et d'autres stations environnantes.

L'autre point, c'est le changement des appareils ou bien les positions des stations qui est le problème général de l'homogénéité des séries de précipitations.

En hydrologie, l'étude statistique des précipitations exige une série pluviométrique pour une période plus ou moins longue. Nous prenons comme base de calcul la série.

La série pluviométrique de la station de Ghardaïa a une période de fonctionnement de 1970 à 2014 qui a été fournie par l'Office Nationale de la Météorologie (ONM). L'analyse statistique des données pluviométriques consiste à déterminer les caractéristiques empiriques d'un échantillon d'une série d'observations de précipitations maximales journalières, de 45 années.

L'objectif principal de l'ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité est le développement d'une méthode d'analyse statistique qui permet d'estimer des quantiles de précipitations journalières maximums. Les méthodes d'ajustement utilisées sont respectivement la loi du Gumbel, la loi du log-normal et log-normal à 3 paramètres (Figs.3.7,3.8 et 3.9).

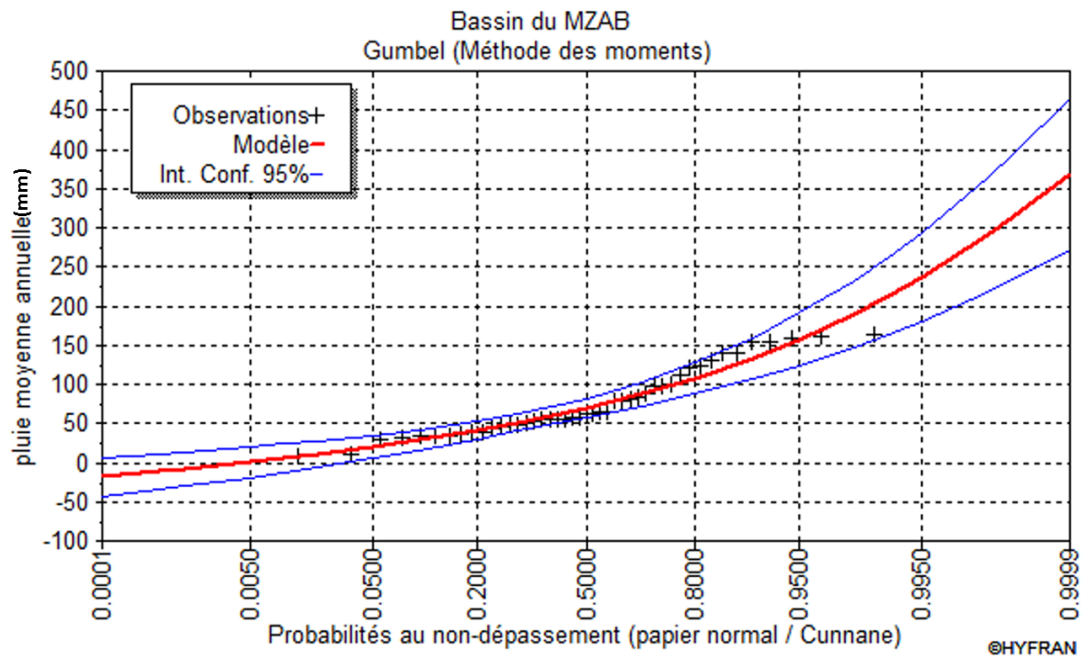


Fig.3.7. Ajustement des précipitations moyennes annuelles à la station de Ghardaïa (1970-2014) selon la loi de Gumbel.

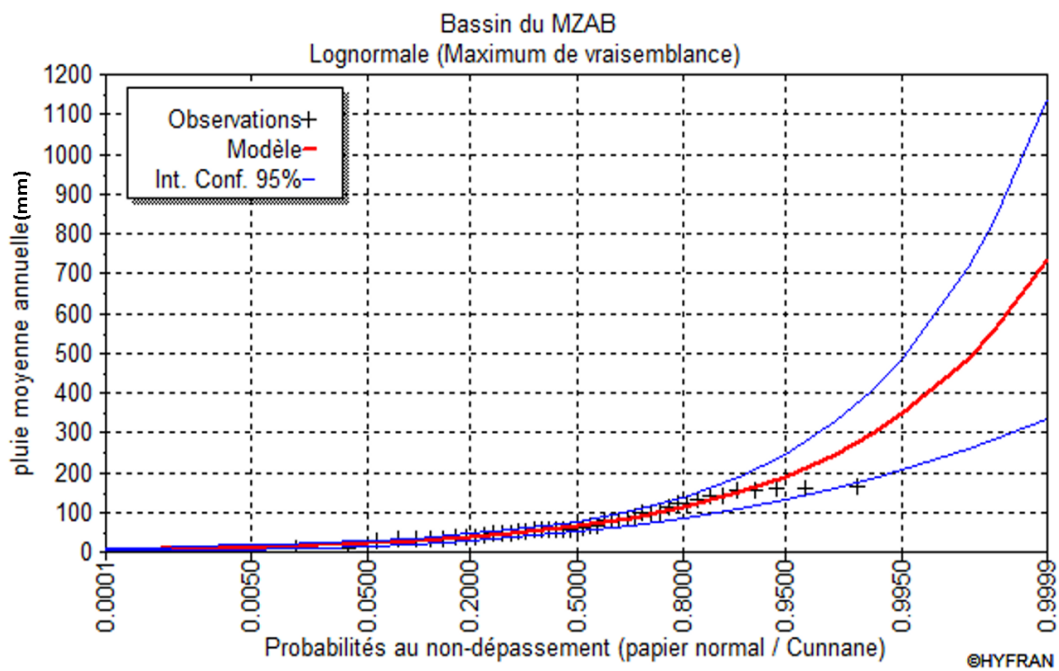


Fig.3.8. Ajustement des précipitations moyennes annuelles à la station de Ghardaïa (1970-2014) selon la loi de Lognormal.

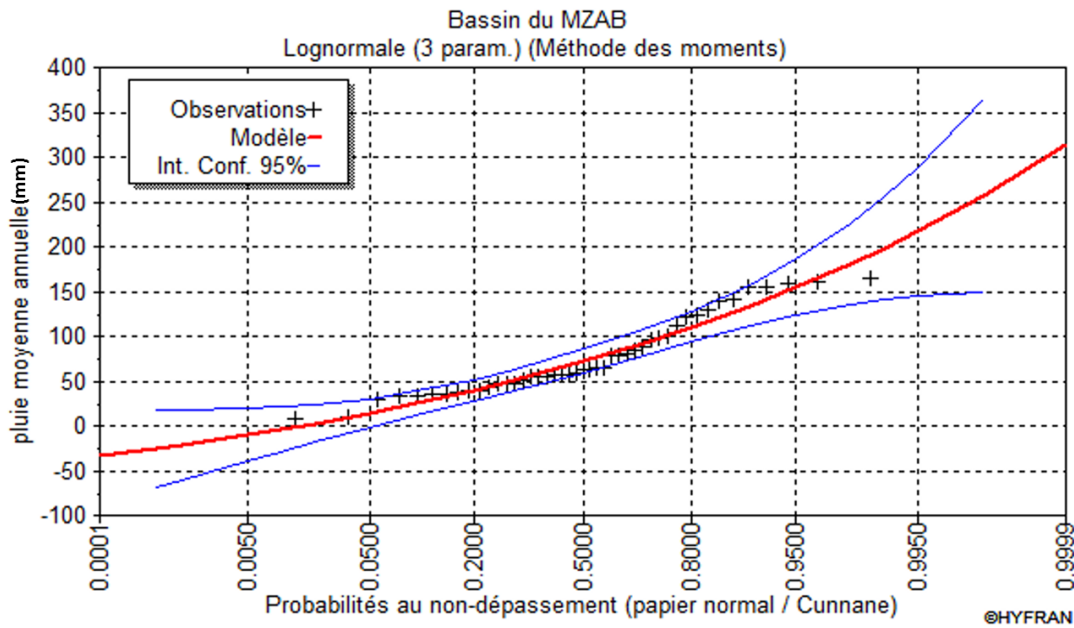


Fig.3.9. Ajustement des précipitations moyennes annuelles à la station de Ghardaïa (1970-2014) selon la loi de Lognormal(3paramètres).

L'ajustement graphique de la série des précipitations moyens annuelles de la station de Ghardaïa étudiée pour la période (1970-2014) doit s'ajuster suivant l'une des lois d'ajustement (Gumbel, lognormal ou lognormal à 3 paramètres). A cet effet, nous avons calculé pour la station de Ghardaïa au bassin du MZAB, les précipitations relatives (Tableau III.6).

Tableau III.6 : Valeurs des précipitations pour les différents lois d'ajustement et périodes de retours

	10ans	20ans	50ans	100ans
	F=0.9	F=0.95	F=0.98	F=0.99
Gumbel	133	157	189	212
Log-normal	148	188	246	295
Log-normal à 3 paramètres	134	155	180	199

Le tableau III.6 montre que les résultats obtenus par les différentes méthodes compris entre 199 et 295 pour les précipitations centennale, ces résultats sont utilisées comme données météorologiques dans les modèles empiriques pour la prédétermination de débit centenal et pour but objectif de comparer les lois statistiques entre eux et de choisir la loi qui nous donne des résultats acceptables.

3.5) Précipitations mensuelles et les régimes saisonniers

Le climat comprend plusieurs composantes, la composante la plus importante et majeure est le cycle de l'eau. Le facteur précipitation est le facteur le plus important du climat tant pour les populations et écosystèmes. Pour définir les mois humides et les mois secs, l'étude de la répartition mensuelle et saisonnière des précipitations devient nécessaire qui est le facteur principal pour connaître la période qui soutient l'écoulement dans notre bassin versant. Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles pendant la période 1970-2014, pour la station de Ghardaïa, et les paramètres statistiques tels que la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation sont résumés dans le tableau (III.7).

Tableau III.7 Valeurs des précipitations moyennes mensuelles en (mm) de la station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).

	Automne			Hiver			Printemps			Été		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jet	A
Moyenne	8.96	5.25	9.58	4.46	4.94	3.35	8.01	6.3	3.11	4.22	1.97	4.39
Ecart type	14.3	8.05	18.5	9.37	7.78	5.17	12.6	14.5	4.03	12.2	8.52	12.6
Cv	1.59	1.53	1.93	2.1	1.57	1.54	1.58	2.31	1.29	2.89	4.32	2.86

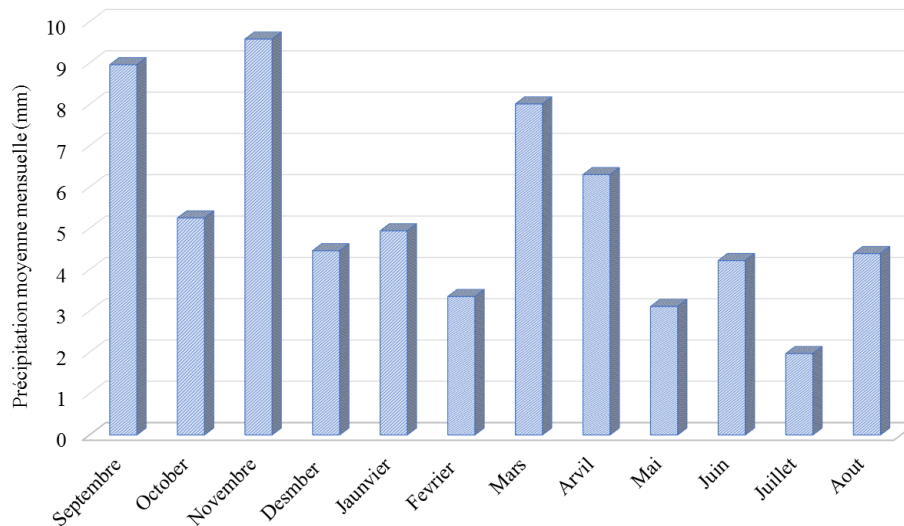


Fig.3.10. Précipitation moyenne mensuelle de la station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).

La répartition mensuelle des précipitations de la station de Ghardaïa au bassin du MZAB montre que le maximum de précipitations a été enregistré au mois de Novembre avec 9.58 mm et le minimum de précipitations a été enregistré au mois de juillet avec 1.97mm. Pour la représentation graphique des précipitations moyennes mensuelles (Fig.3.11), on constate que l'année hydrologique dans le bassin du MZAB est divisée en deux périodes pluviométriques :

1. une période sèche correspondant aux mois (mai, juin, juillet et août);
 2. une période relativement sèche correspondant aux mois (décembre, janvier et février);
- D'autre part, les mois les plus pluvieux sont Septembre, Décembre et Mars, et le mois le plus sec est représenté par Juillet.

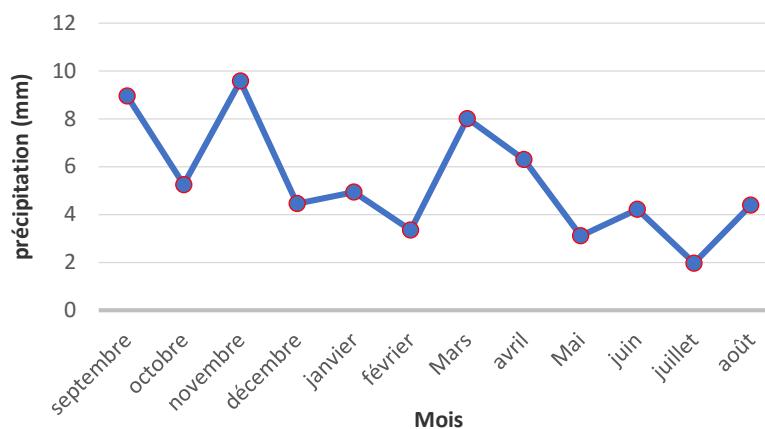


Fig.3.11. Variations mensuelles de pluviométrie dans le bassin du MZAB

Pour mieux cerner la variation mensuelle de la série de précipitation de la station de Ghardaïa, il est important de calculer le coefficient de variation mensuel. Ce dernier et comme le coefficient de corrélation, permet la comparaison entre les stations faiblement ou abondamment arrosées, et explique nettement la variation mensuelle et saisonnière des précipitations durant l'année hydrologique. Pour la période 1970-2014, le coefficient de variation passe de 1.53 en septembre à 4.32 pour le mois de juillet soit presque quatre fois double. Pour les mois janvier, février et mars on constate qu'une légère stabilité de coefficient de variation (Fig.3.12).

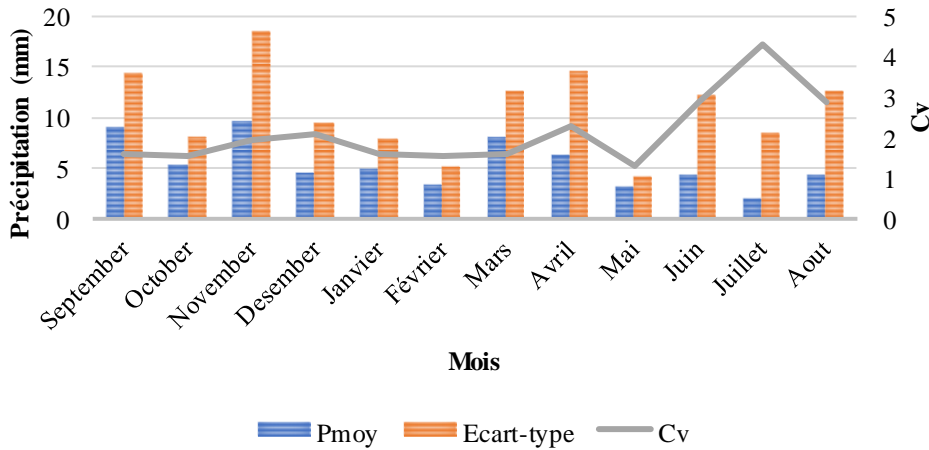


Fig.3.12. Les pluies moyennes mensuelles et leurs paramètres statistiques du bassin du MZAB.

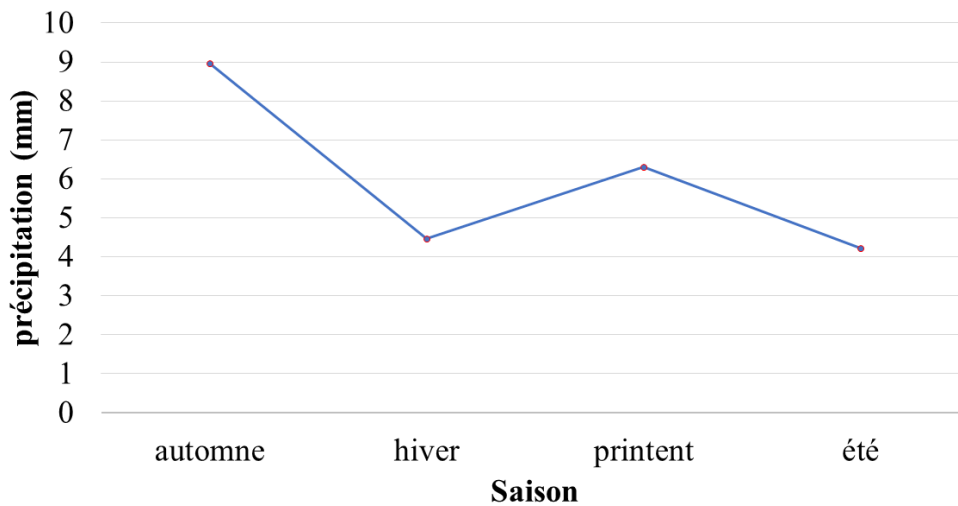


Fig.3.13. Variation saisonnière des précipitations dans le bassin du MZAB.

La figure 3.13 montre que dans l'ensemble du bassin du MZAB, les saisons les plus pluvieuses sont l'automne et l'hiver. La saison la plus sèche est l'été. Les saisons d'automne et de printemps sont caractérisées par des pluies orageuses et intenses qui provoquent des inondations dans le bassin du MZAB.

3.6) Pluies maximales journalières et l'ajustement statistique

Selon Dubief (1953), les précipitations ont pratiquement toujours lieu sous forme des pluies. Ces dernières sont caractérisées par leur faible importance quantitative et les pluies torrentielles sont rares. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes.

Cette insuffisance de pluies sahariennes est accompagnée d'une irrégularité très marquée du régime pluviométrique et d'une variabilité interannuelle considérable, ce qui accentue la sécheresse. C'est le cas de Ghardaïa.

L'étude de phénomène des pluies journalières et la quantification de leur valeur pour différentes périodes de retours sont des facteurs principaux pour la protection des ouvrages et des agglomérations contre les risques d'inondations.

Dans le cadre de notre étude et pour le bassin du MZAB, les méthodes Gumbel, Log-normal et Log-normal à 3 paramètres sont utilisées pour estimer les pluies journalières maximales pour différentes périodes de retours, dont l'objectif est de comparer les résultats obtenus dans les chapitres suivants.

Tableau III.8 : Valeurs des pluies journalières maximales en (mm) de la station de Ghardaïa pour la période (1970-2014).

Année	P annuelles(mm)	Année	P annuelles(mm)
1970	8	1993	11,9
1971	10,5	1994	54,8
1972	21	1995	37
1973	18,1	1996	13
1974	9,8	1997	47
1975	24,7	1998	4
1976	17,2	1999	23
1977	17,9	2000	18
1978	11,3	2001	18
1979	18,6	2002	24
1980	46,5	2003	44
1981	13	2004	32
1982	9,4	2005	7
1983	3,05	2006	16,2
1984	20,07	2007	10
1985	7,87	2008	48
1986	36,6	2009	40
1987	8,8	2010	7.11
1988	8,9	2011	48.01
1989	6,7	2012	7.11
1990	27,9	2013	9.91
1991	10,9	2014	14.99
1992	12.6		

La série d'observation enregistrée entre 1970 jusqu'à 2014 nous a permis de déduire la pluviométrie maximale journalière qui est de 54.8mm pendant l'année 1994. L'ajustement a été effectué à l'aide du logiciel "HYFRAN". Le tableau (III-9) donne les différentes caractéristiques statistiques des pluies journalières maximales pour la station de Ghardaïa.

Tableau III.9 : Les paramètres statistiques des pluies maximale journalières

Bassin versant du MZAB	
Nombre d'observations	45
Minimum	3.05
Maximum	54
Moyenne	19.8
Ecart-type	14.1
Médiane	16
Coefficient de variation (Cv)	0.712
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.04
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2.67

L'analyse des pluies maximum journalières et son ajustement à pour bout objectif de rechercher une distribution de fréquence capable de rendre compte du régime des pluies du bassin du MZAB, et les inondations devient être anticipées par l'estimation des paramètres et des quantiles. Ainsi, l'objectif principal de cette analyse est de sortir vers la fin avec une loi qui peut présenter une bonne distribution de la fonction du processus étudié (Fig.3.14,3.15 et 3.16).

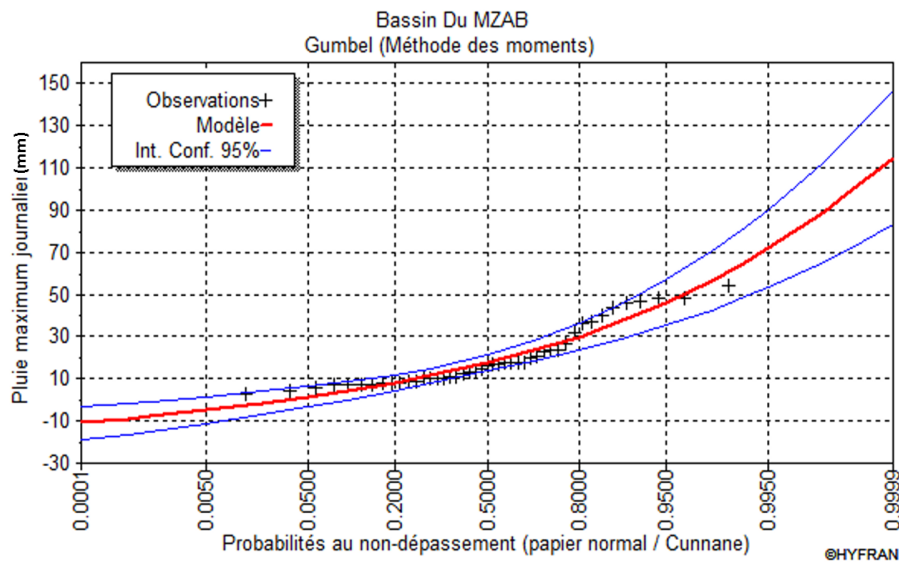


Fig.3.14 Ajustement à la loi Gumbel de la station de Ghardaïa

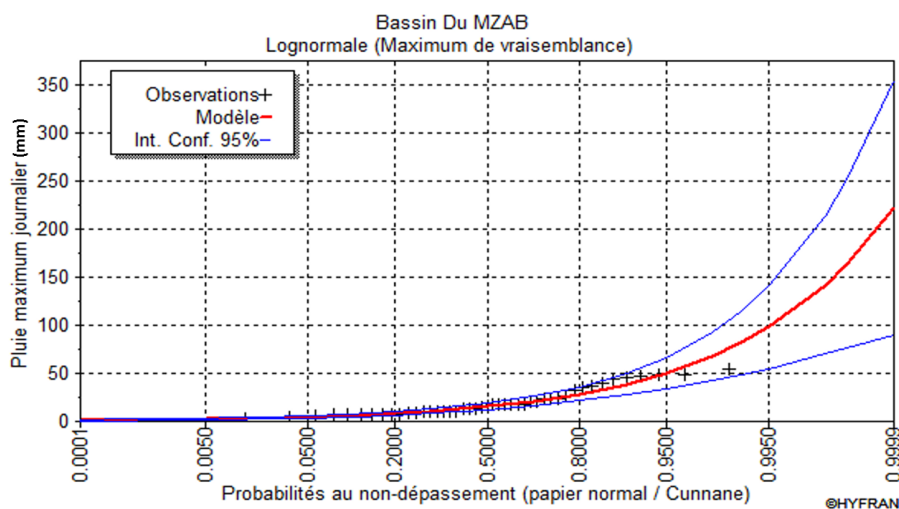


Fig.3.15 Ajustement à la loi Lognormale de la station de Ghardaïa

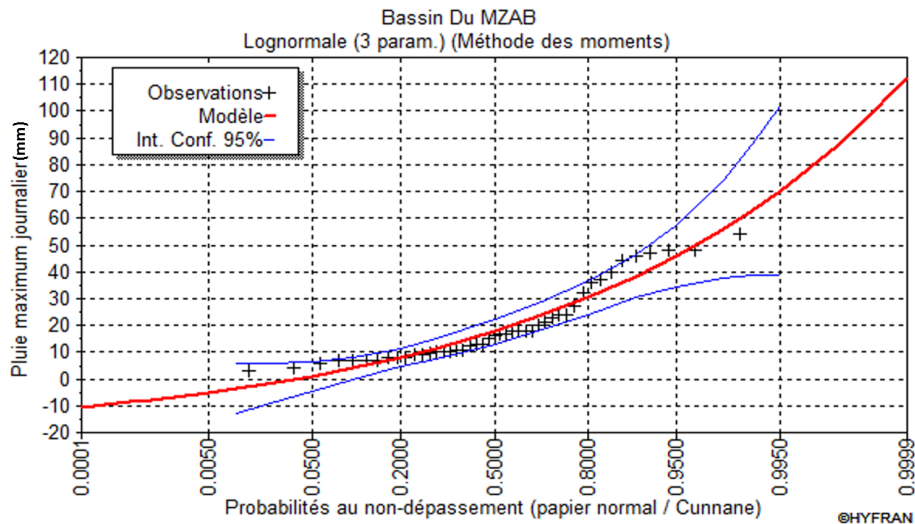


Fig.3.16 Ajustement à la loi Lognormale à 3 paramètres de la station de Ghardaïa

Les lois d’ajustements utilisées dans l’analyse des pluies journalières maximales de la station de Ghardaïa tel que : Gumbel, Log normale et Log normale à 3 paramètres ont donné des résultats différents. D’après les résultats et à titre d’illustration, le tableau 3.9 donne les valeurs des pluies journalières maximales pour les différentes périodes de retours.

Tableau III.10 : Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station de Ghardaïa

T	q	Loi du Gumbel				Loi Lognormal				Loi Lognormal à 3 paramètres			
		P	Ecart type	IDC (95%)		P	Ecart type	IDC (95%)		P	Ecart type	IDC (95%)	
10000	0.9999	115	16.1	83.2	146	222	67.3	90.3	354	112	44.3	N/D	N/D
2000	0.9995	97.1	13.3	70.9	123	164	44.6	76.2	251	94.5	31.2	N/D	N/D
1000	0.999	89.5	12.2	65.6	113	142	36.6	69.9	214	87.1	26.2	N/D	N/D
200	0.995	71.7	9.43	53.2	90.2	98.1	21.9	55.1	141	70.2	16.1	38.6	102
100	0.99	64.1	8.25	47.9	80.3	82.1	17	48.8	115	63	12.5	38.5	87.5
50	0.98	56.4	7.08	42.5	70.3	67.5	12.8	42.5	92.6	55.7	9.33	37.5	74
20	0.95	46.1	5.55	35.3	57	50.4	8.3	34.2	66.7	46	5.92	34.4	57.6
10	0.9	38.2	4.39	29.6	46.8	38.9	5.62	27.9	49.9	38.4	4.11	30.3	46.4

Il ressort de divers ajustements que les pluies journalières centennales sur la station de Ghardaïa sont comprises entre 63mm et 82.1 mm.

3.7) Les pluies de courte durée

Les pluies de courte durée sont des pluies qui apportent sur un intervalle d'une heure à une journée une importante quantité d'eau. Cette quantité peut égaler celle reçue habituellement en un mois, voire en plusieurs mois. La pluie de courte durée est utilisée essentiellement pour l'estimation des crues. Le calcul des pluies de courte durée pour différentes fréquences a été effectué à l'aide de la relation de **BODY** exprimée par l'équation eq.3.3 suivante :

$$P_t = P_{j_{\max}} \left(\frac{t}{24} \right)^b \quad (3- 3)$$

P_t : Pluie fréquentielle de durée t ;

$P_{j_{\max}}$: Pluie journalière fréquentielle ;

t : durée de l'averse ;
b : Exposant climatique.
Avec

$$b = 1 + \frac{\ln\left(\frac{P_{j\max}}{24}\right) - \ln(25)}{\ln(24) - \ln(0.5)} \quad (3 - 4)$$

3.7.1) Intensités maximales de courte durée

Une averse est définie comme un épisode pluvieux continu, pouvant avoir plusieurs pointes d'intensité. L'intensité moyenne d'une averse s'exprime par le rapport entre la hauteur de pluie observée et la durée t de l'averse.

Avec

$$I_t = \frac{P_t}{t} \quad (3- 5)$$

I_t: est l'intensité maximale de la pluie (mm/h).

Les calculs ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.10 pour les périodes de retour (10 ans, 20 ans, 50 et 100 ans) et pour des durées d'averse de 30 min jusqu'à 24 heures.

Tableau III.11 : Les pluies de courte durée pour différentes lois statistiques

		10		20		50		100	
	t (h)	pt (mm)	It (mm/h)	pt (mm)	It (mm/h)	pt(mm)	It (mm/h)	pt (mm)	It (mm/h)
	Gumbel	0.5	23.15	46.30	27.94	55.88	34.18	68.36	38.85
1		25.32	25.32	30.56	30.56	37.39	37.39	42.49	42.49
2		27.70	13.85	33.43	16.71	40.90	20.45	46.48	23.24
3		29.19	9.73	35.23	11.74	43.10	14.37	48.98	16.33
4		30.30	7.57	36.56	9.14	44.73	11.18	50.84	12.71
7.37		32.79	4.45	39.57	5.37	48.41	6.57	55.02	7.47
14.47		34.93	2.91	42.15	3.51	51.57	4.29	58.61	4.88
18		36.80	2.04	44.42	2.47	54.34	3.02	61.76	3.43
24		38.20	1.59	46.10	1.92	56.40	2.35	64.10	2.67
Lognormal	0.5	23.58	47.15	30.55	61.09	40.91	81.82	49.76	99.52
	1	25.79	25.79	33.41	33.41	44.75	44.75	54.43	54.43
	2	28.21	14.10	36.55	18.27	48.94	24.47	59.53	29.77
	3	29.73	9.91	38.51	12.84	51.58	17.19	62.74	20.91
	4	30.85	7.71	39.97	9.99	53.54	13.38	65.12	16.28
	7.37	33.39	4.53	43.26	5.87	57.94	7.86	70.47	9.56
	14.47	35.57	2.96	46.08	3.84	61.72	5.14	75.07	6.25
	18	37.48	2.08	48.56	2.70	65.03	3.61	79.10	4.39
	24	38.90	1.62	50.40	2.10	67.50	2.81	82.10	3.42
lognormal (3p)	0.5	23.27	46.55	27.88	55.76	33.76	67.52	38.18	76.36
	1	25.46	25.46	30.49	30.49	36.92	36.92	41.76	41.76
	2	27.84	13.92	33.35	16.68	40.39	20.19	45.68	22.84
	3	29.34	9.78	35.15	11.72	42.56	14.19	48.14	16.05
	4	30.46	7.61	36.48	9.12	44.18	11.04	49.97	12.49
	7.37	32.96	4.47	39.48	5.36	47.81	6.49	54.08	7.34
	14.47	35.11	2.92	42.06	3.50	50.93	4.24	57.60	4.80
	18	37.00	2.06	44.32	2.46	53.67	2.98	60.70	3.37
	24	38.40	1.60	46.00	1.92	55.70	2.32	63.00	2.63

3.7.2) Construction des courbes IDF

Les courbes IDF sont des courbes assurent le lien entre les intensités, la durée et la fréquence d'apparition des pluies. Elles permettent d'une part de reprendre l'information pluviométrique au droit d'une station donnée et, d'autre part de calculer grossièrement des débits de projet, d'estimer des débits de crue, et aussi de déterminer des pluies de projet. Elles sont établies de manière analytique (formule de Montana ou de Talbot) ou statistique (analyse fréquentielle).

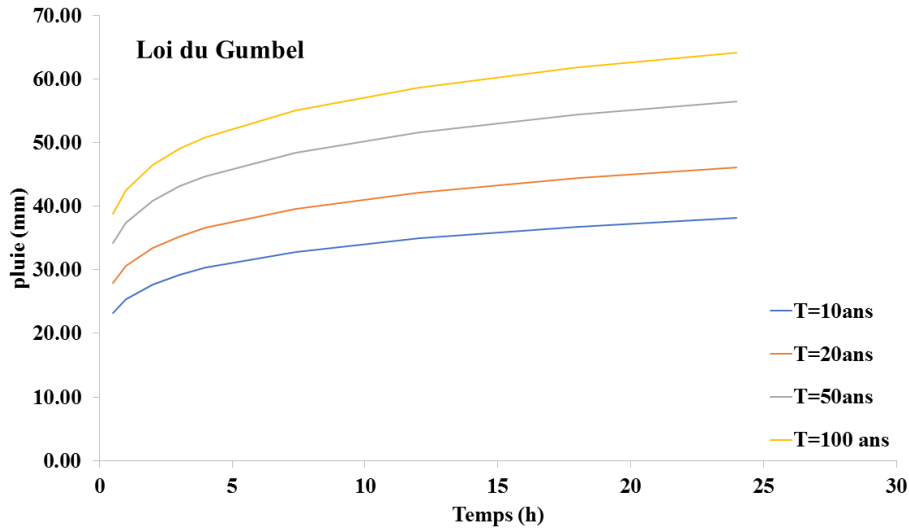


Fig.3.17. Courbe des pluies à courte durée de la station de Ghardaia selon la loi de Gumbel.

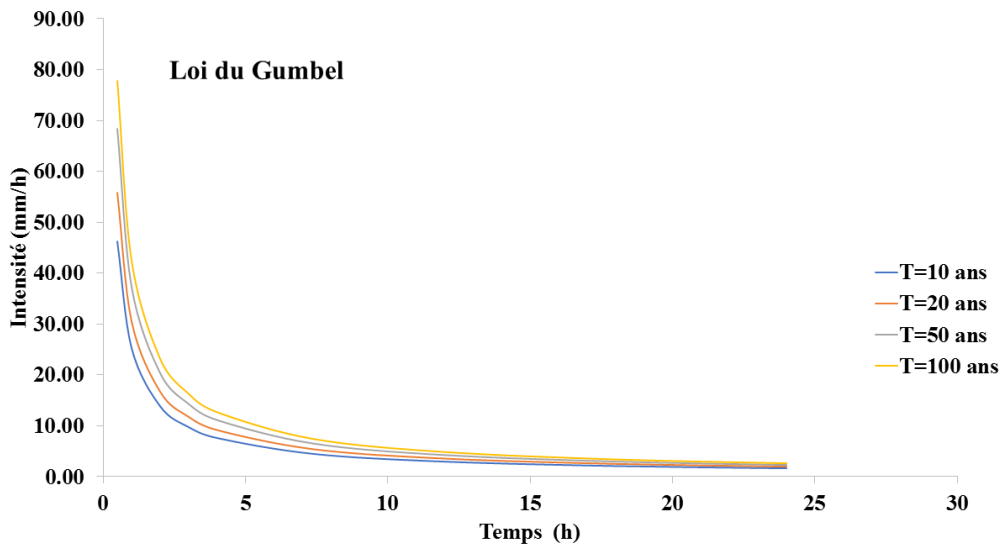


Fig.3.18. Courbe Intensité-Durée-Fréquence de la station de Ghardaia selon la loi de Gumbel.

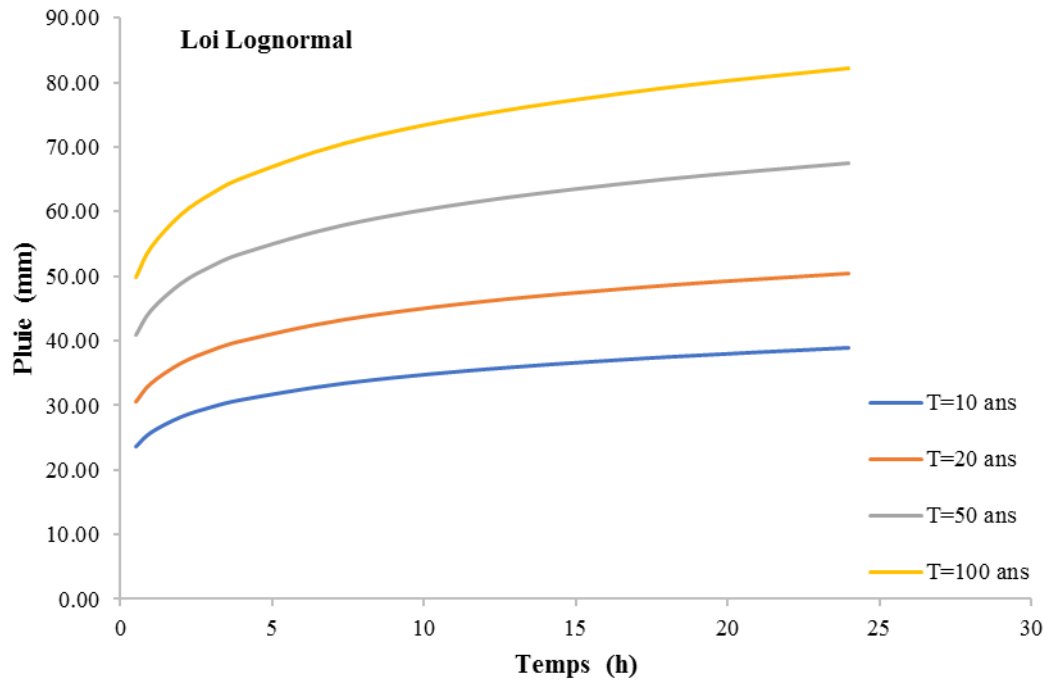


Fig.3.19. Courbe des pluies à courte durée de la station de Ghardaia selon la loi de Lognormale.

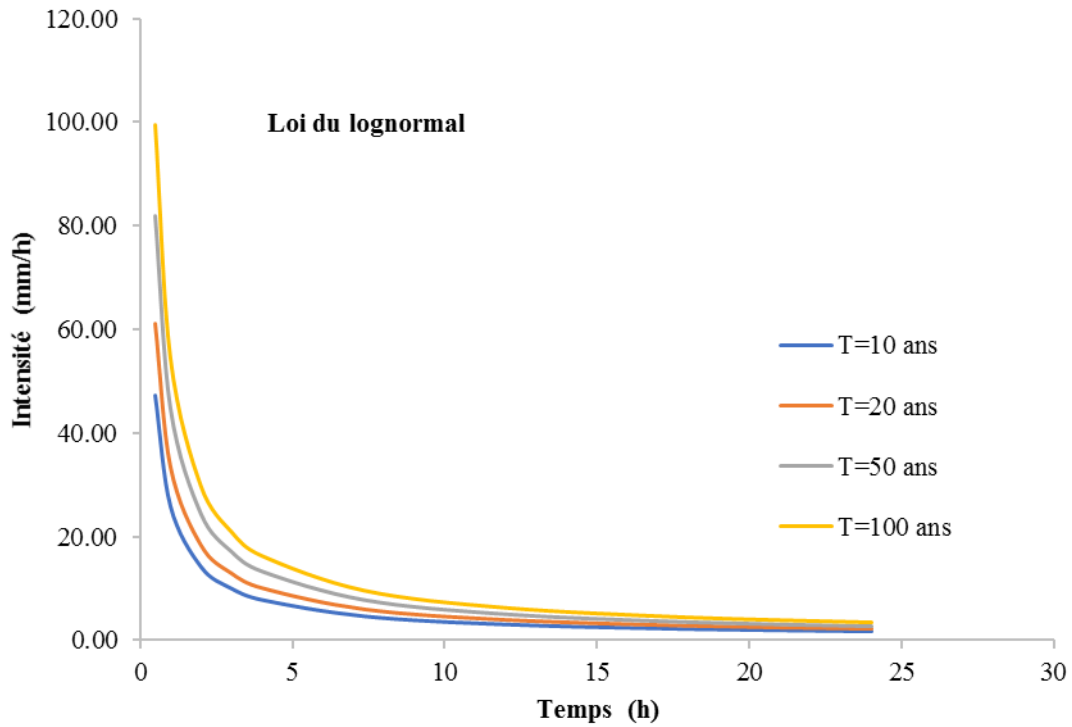


Fig.3.20. Courbe Intensité-Durée-Fréquence de la station de Ghardaia selon la loi de Lognormale.

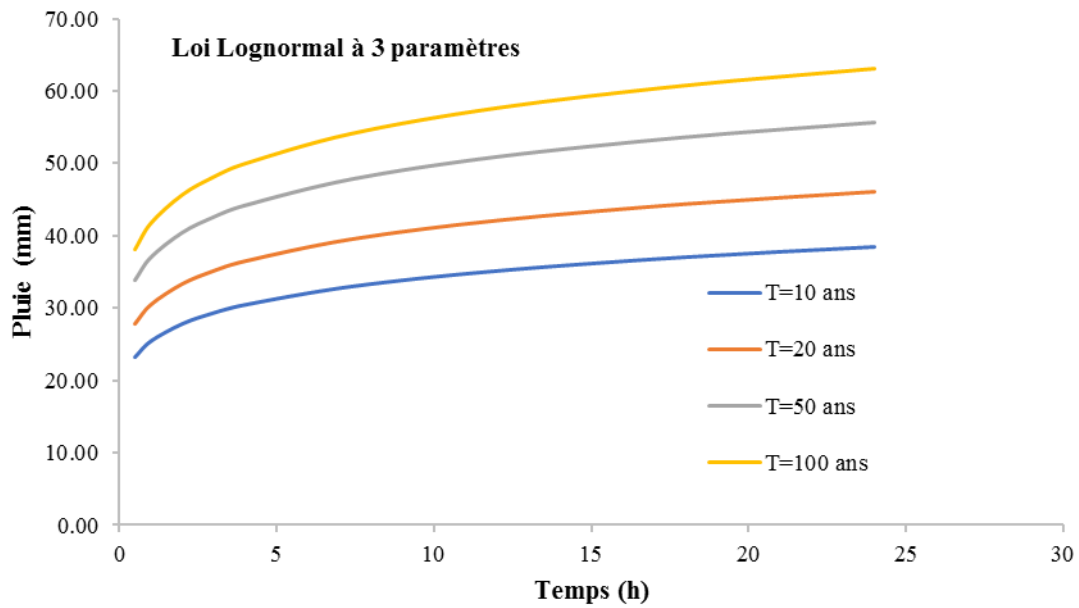


Fig.3.21. Courbe des pluies à courte durée de la station de Ghardaïa selon la loi de Lognormale à 3 paramètres.

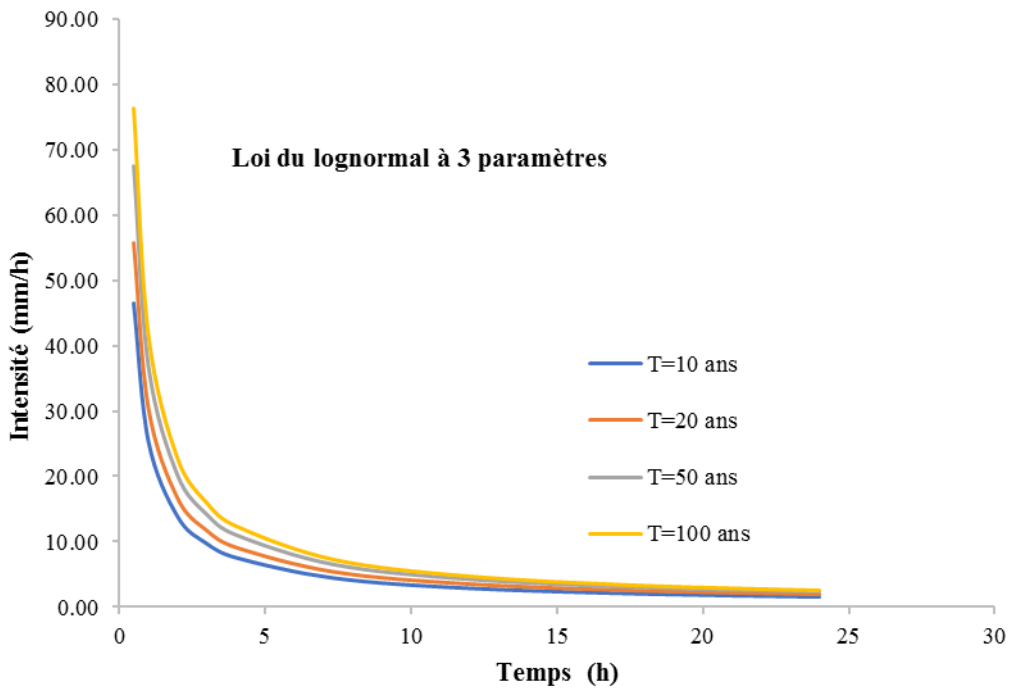


Fig.3.22. Courbe Intensité-Durée-Fréquence de la station de Ghardaïa selon la loi de Lognormale à 3 paramètres.

3.8) Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité les points essentiels pour l'homogénéisation des données et l'analyse statistique qui touche l'étude de précipitation. Pour la vallée de MZAB, il existe malheureusement qu'une seule station météorologique, elle est représentative de la totalité du bassin, ce qui permet d'engendrer l'existence de risque d'hétérogénéité des données pluviométriques.

D'après l'étude de la variation interannuelle de la pluviométrie, une succession de périodes plus ou moins marquées d'années sèches et d'années pluvieuses et au même temps la non régularité de la série pluviométrique a été démontré dans ce chapitre.

La variabilité spatiale des précipitations du bassin du MZAB montre qu'une baisse remarquable de la pluviométrie à l'échelle de ce bassin (entre 50 et 100mm selon la carte de la pluviométrie citée dans la figure 3.3) et la variabilité temporelle montre qu'une alternance d'années sèche et d'année humides le long de la période d'observation (45 ans).

Les saisons les plus pluvieuses sont l'automne et l'hiver. La saison la plus sèche est l'été. Les saisons d'automne et de printemps sont caractérisées par des pluies orageuses et intenses qui provoquent des inondations dans le bassin du MZAB (ex : inondation d'octobre 2008).

4

EVALUATION DES MODELES AUX CONDITIONS ALGERIENNES

Chapitre 4 :

Evaluation des modèles aux conditions algériennes

4.1) Historique des crues

Les méthodes utilisées pour évaluer une crue de projet se fondent principalement sur la connaissance et l'analyse des écoulements observés, d'une part, et des pluies d'autre part. Pour le MZAB, aucune mesure hydrométrique n'a jamais été faite, mise à part l'observation sommaire et qualitative, mais fort utile, des crues qui ont traversé l'agglomération de Ghardaïa. **Dubief** (1953) On récapitule la liste pour la période 1907-1951, et on propose une analyse fréquentielle selon les sites atteints. Une liste complémentaire a été obtenue jusqu'à 1953 (communication personnelle, **Dubief**, 1996). Par la suite, les informations dont nous disposons concernent les crues de juin 1991 et septembre 1994. Des hauteurs d'eau peuvent être évaluées sur des photos prises à cette occasion.

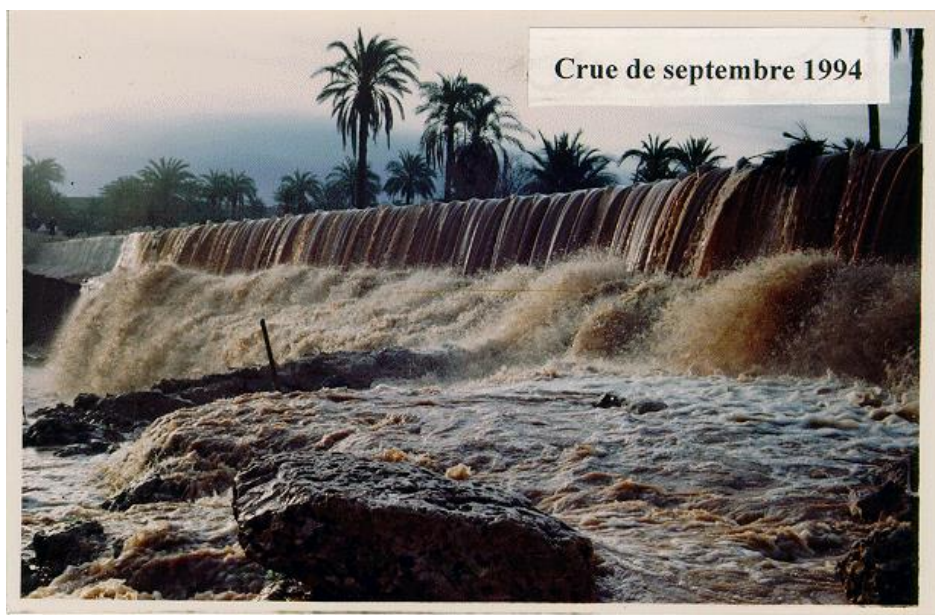


Fig.4.1. La crue de septembre 1994

4.1.1) Les crues de la durée 1848 à 1920

Jean Dubief (1953) nous transmet une précieuse information sur les crues de l'oued MZAB que l'on retranscrit ci-après. Les tolbas de Ghardaïa auraient conservé depuis 1728 des informations sur ces crues. Il ne nous a pas été possible d'obtenir des renseignements à ce sujet. D'après Matylinski (1885), il est rapporté qu'en 1264 de l'Hégire, soit autour de 1848 après JC, à la suite d'une longue période de « sécheresse » qui aurait duré sept ans, une crue formidable a causé des dégâts importants dans toute la vallée de l'oued MZAB. Les habitants d'El Atteuf se sont réfugiés dans les mosquées. A Ben Isguen 300 maisons auraient été détruites.

Les plus anciennes crues notées dans les archives françaises sont celles d'octobre 1884 et du 15 janvier 1886. De 1887 à 1900 il n'y a aucun document. Les observations sont à nouveau notées pour la crue catastrophique du 30 septembre 1901. Les Mozabites l'appelèrent "la rivière qui balaie tout" en raison de sa violence exceptionnelle. La hauteur d'eau atteignit 10 m avant la rupture du barrage. L'inondation dépassa 2 m de hauteur dans la palmeraie. Tous les barrages furent détériorés. L'oued coula à plein bord pendant deux jours et atteignit la Sebkhet Safioune.

En 1902 et 1903, Charlet vit couler l'oued à trois reprises, notamment les 17 et 18 septembre 1903. Plus tard, les 18 et 19 février 1906, les oasis d'El Atteuf et de Beni Isguen furent inondées par une crue. D'autres crues furent observées en avril et octobre 1909. Des crues furent ensuite observées les 7 et 8 février 1914, ainsi que le 20 juillet 1915. De l'été 1915 au printemps 1920, on rapporte une longue période de sécheresse, une crue intervenant enfin à cette dernière date.



Fig.4.2. Les crues de MZAB en 1974



Fig.4.3. Dégradation de digue Lahdhira en 2008

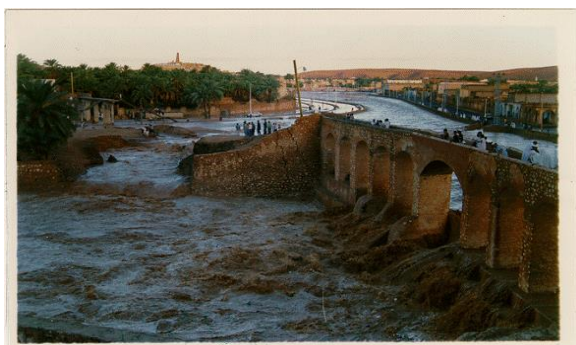


Fig.4.4. Gonflement des cours d'eau a Melika



Fig.4.5. Le niveau d'eau a atteint 9m en 2008

A partir de 1921, on dispose de la liste ci-dessous, également recueillie par Dubief (1953). En première colonne, les indices N et M signifient que des crues ont eu lieu simultanément dans les oueds Nsa (N) et Metlili (M) (ROCHE.M, 1996).

4.1.2) Liste des crues de l'oued MZAB

a. Durée 1921-1935 :

NM	1921	28Mai	Importante	La crue arrive au 3 ^{ème} barrage, la palmeraie est inondée.
	1923	23Mai	Importante	Inondation des oasis de Ghardaïa, Melika, Bou Noura, El Atteuf. Atteint Zelfana à 64 km en aval de Ghardaïa, à 150 km de la source.
	1925	15-17Mars	Importante	Dépasse Bou Noura après avoir rempli tous les barrages situés en amont.
NM	1929	7Septembre	Importante	Remplit tous les barrages.
M	1931	29Mai	Importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
NM	1932	8Novembre 8Decembre	Importante Importante	Coule jusqu'au barrage; oasis arrosée. Important Remplit les barrages de Ghardaïa et s'arrête à celui de Melika.
	1933	3Novembre	Très importante	Franchit les barrages de Ghardaïa, Melika, et Bou Noura. S'arrête à celui d'El Atteuf qui n'a pas été atteint depuis 1932.
	1935	23Avril	Peu importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa

Source : Documents de l'Annexe de Ghardaïa, communiqués à Capot-Rey, en février 1938.

b. Durée 1938-1942

N	1938	18Avril 25Novembre	Importante Importante	Coule jusqu'à la ville de Ghardaïa. Inondation totale des oasis de Ghardaïa, Beni Isguen, partielle de celle de Bou Noura (oued Zouil). Arrive jusqu'à El Atteuf, remplissant à moitié le barrage d'aval de l'oasis. Tous les barrages situés sur le parcours aval de l'oued ont été remplis.
NM	1939	Février	Importante	
	1940	Mars	Légère	Crues des affluents des oueds El Abïodh et MZAB. Le barrage dit "Sed Edjedid" (dit aussi "Habbas Djedid") presque entièrement rempli.
NM	1941	Mars Avril	Importante Moyenne	Inondation de la palmeraie; premier barrage (à 1500 m en amont du Ksar) rempli. Inondation de l'oasis; barrage en parti rempli.
M	1942	7Juin	Moyenne	Crue des oueds secondaires.

Source : D'après les états mensuels fournis par l'Annexe de Ghardaïa depuis avril 1938. Complétés par ceux du poste Météorologique de Ghardaïa.

c. Durée 1943-1951

NM	1943	18 Février	Faible	Oued Adira au NW de Ghardaïa.
NM		Mars	Faible	Partie N de la palmeraie arrosée.
NM		Avril	Faible	Inondation de l'oasis. Fortes crues des oueds secondaires.
NM		Octobre	Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa; premier barrage rempli.
N	1944	Décembre	Peu Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa.
		Février	Peu Importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
NM	1946	21 Janvier	Très importante	Inondation de toutes les oasis. L'oued MZAB est arrivé à El Atteuf, tous les barrages ont été remplis sauf El Atteuf qui ne l'a été qu'en partie.
		24 Avril	Assez importante	Inondation de la partie nord de l'oasis de Ghardaïa.
		15 Septembre	Faible	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
NM	1947	6 Avril	Moyenne	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
NM	1948	Septembre	Forte	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa, oueds secondaires.
	1949	24 Mars	Légère	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
		24 Avril	Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa. Barrages partiellement remplis.
	1950	6 Septembre	Forte	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa. Inondation de l'oasis de Ghardaïa; barrage de Ghardaïa rempli.
		Octobre	Forte	Inondation de l'oasis de Ghardaïa. La crue arrive jusqu'à El Atteuf.
	1951	5 Mars	Forte	

Source : D'après les états mensuels fournis par l'Annexe de Ghardaïa depuis avril 1938. Complétés par ceux du poste Météorologique de Ghardaïa.

d. Durée 1951-1953

NM	1951	13-19 Septembre	Moyenne	Crue moyenne des oueds secondaires Bouchamdne, Takdit, Touzouze, Argdane. Une partie de la palmeraie a été arrosée. Une crue de l'oued MZAB a été signalée dans son cours inférieur (renseignement de l'annexe d'Ouargla).
		20 Octobre	Forte	L'oued MZAB est arrivé jusqu'à El Atteuf, après avoir rempli les barrages de Ghardaïa et Melika. Plus en aval, la crue alimentée par les affluents inférieurs du MZAB atteint Hassi Chegga le 4 octobre. Le 17 le lit de l'oued était encore humide; un plan d'eau de 250 m ² subsistait à Chaab MZAB.
NM	1952	24 Avril	Très forte	La chute de pluie a été considérable à partir d'un point situé à 15 km en amont de Ghardaïa et jusqu'au-delà de Zelfana. Les oueds du bassin supérieur du MZAB n'ont pas ou peu coulé (oueds El Kekakh, El Abiod, Djaref). A Ghardaïa, la crue ne s'est fait sentir qu'à partir de la Daïa ben Dahoua; elle est de courte durée, mais violente par suite d'un ruissellement intense. A Zelfana, le débit maximum a pu être évalué entre 500 et 1000 m ³ seconde. La crue emporta des tentes, noya plus de 1200 têtes de bétail (renseignements d'Ouargla).
		23 Septembre	Assez forte	Crue de l'oued MZAB alimentée par les oueds immédiatement en amont; barrages remplis. Forte crue

				de l'oued N'Tissa qui remplit le barrage d'El Atteuf: léger déversement de celui-ci. Le barrage de Beni-Isguen a été très endommagé. L'oued coule en aval d'El Atteuf, grâce aux crues des oueds inférieurs et surtout Noumerate.
N	1953	Mars 12Juillet 5Septembre	Faible Faible faible	La palmeraie de Ghardaïa a été partiellement arrosée. Oued Zouil. Quelques jardins de l'oasis de Bou- Noura ont été arrosés. Oueds secondaires: Touzouze, Akhalkhal, Les crues sont arrivées.

Source : Communication personnelle de J. Dubief recueillie par M.A. Roche (1996).

e. Durée 1954-1996

1984	Fin Octobre			Au moins le barrage en amont de la palmeraie de Ghardaïa est rempli.
1990	11Mai		Importante	Laisse de crue repérée à l'altitude de 498,85 à la distance de 473,70 m en amont du pont Adaoud.
1991	2Juin		Très Importante	Nombreux dégâts.

Remarque : lacune d'information et liste incomplète à cause de la difficulté de remplissage des données dû par les guères de révolution et le problème nationale de terrorisme de la durée de 1990-2000.

4.1.3) Les inondations du 1 octobre 2008

Après quatre années de sécheresse et plus précisément le lundi 29 septembre 2008, une forte accumulation des pluies continuées progressivement le mardi avec une intensité moyenne. Le jour de catastrophe correspond malheureusement le 1re octobre 2008 le jour de L'AIDE avec une pluie de 150mm dans une heure.

Les autorités déclarent un débit de 900m³/s d'une part et L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques ANRH un débit de 1200m³/s d'autre part. La vallée de MZAB présente une forte vulnérabilité face aux risques météo hydrologiques. C'est la conséquence de ses contraintes naturelles et de son développement socio-économique. Cela a été mis en évidence lors des inondations d'octobre 2008, qui, par leurs dégâts, s'inscrivent parmi les plus graves événements hydrologiques extrêmes ayant affecté cette région. Le rôle de l'aléa météo-hydrologique dans la genèse de ces inondations a été amplifié par l'activité humaine, notamment par une urbanisation anarchique et un développement des installations et des activités économiques dans des zones inondables. Les évènements ont démontré que les digues ne sont pas toujours une mesure efficace de protection contre les inondations. Dans le cas des aléas météo-hydrologiques extrêmes, de fréquence rare, leur rupture amplifié les effets. L'absence jusqu'à présent d'un système d'annonce des crues à distance explique les lords dégâts enregistrés (MEDEJERAB.A, 2009).

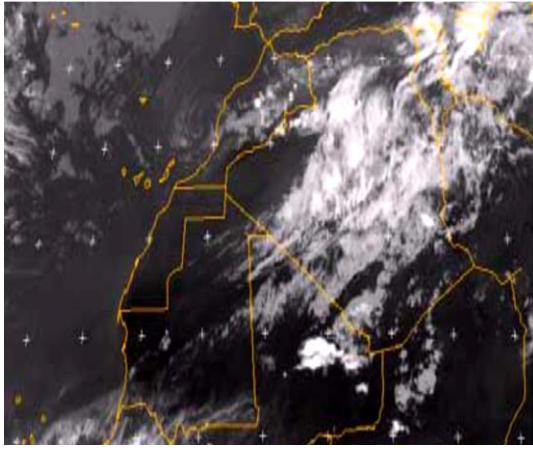


Fig.4.6. Image satellite 30septembre2008



Fig.4.7. Image satellite 01octobre2008

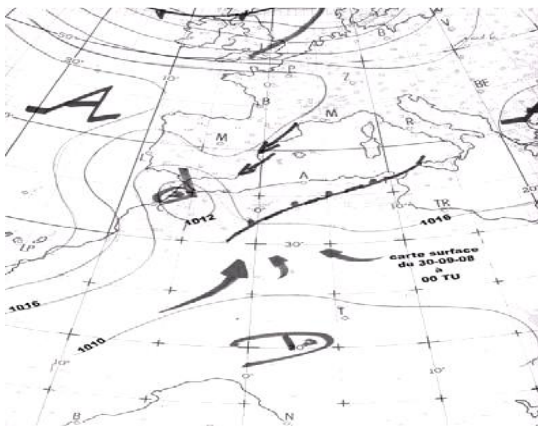


Fig.4.8. Situation en surface 30septembre2008

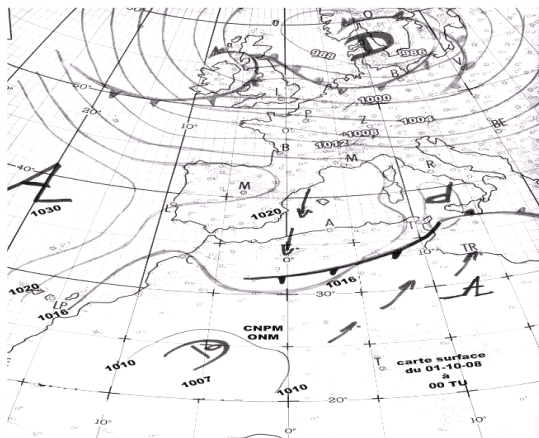


Fig.4.9. Situation en surface 01octobre2008

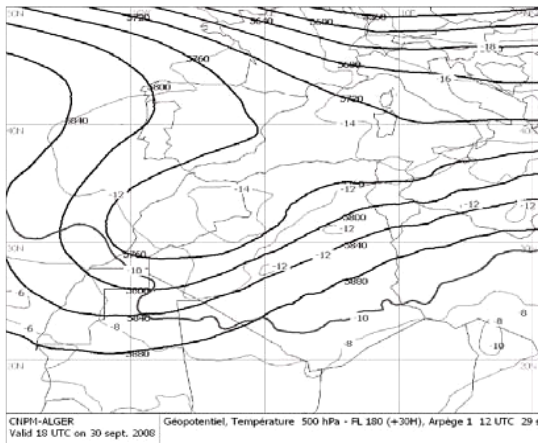


Fig.4.10. Situation en altitude 30septembre2008

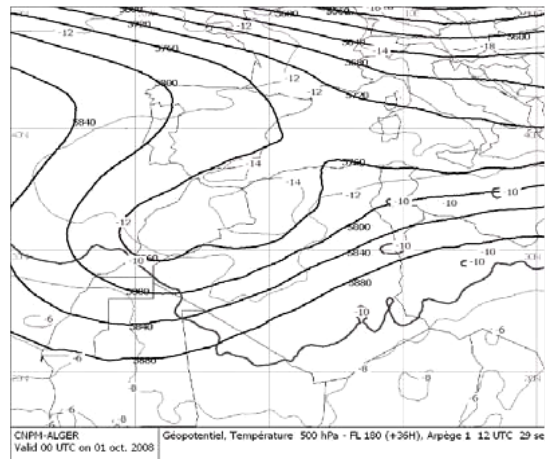


Fig.4.11. Situation en altitude 01octobre2008

Source : MEDEJERAB.A, 2009

4.2) Evaluation des débits par formules empiriques

Pour l'Algérie, toutes les études des inondations établies montrent qu'il y a un phénomène des inondations catastrophiques avec des lacunes sur la majorité des bassins versants Algériens, tel que le bassin du MZAB qui est le cas de notre étude. A cet effet ce chapitre, consiste à proposer une méthode empirique de calcul des hydrogrammes de crues dans un bassin non jaugé afin de la caller avec notre modèle utilisé dans ce travail, et améliorer les conceptions des ouvrages hydrauliques. Pour dimensionner ces ouvrages pour une période de retour bien connue, il faut déterminer les débits de projet de la crue en se basant sur l'étude hydrologique. D'une façon générale, la détermination des valeurs exactes des débits de projet se fait à partir de deux méthodes :

- **Méthodes empiriques :** sont utilisées dans le cas de l'absence des données hydrométriques. Il existe plusieurs formules empiriques pour la détermination des débits de projet, dans notre travail on utilisera : la formule de MALLET-GAUTHIER, SOKOLOVSKY, TURRAZA, GIANDOTTI, POSSENTI.
- **Méthode statistique :** est utilisée dans le cas de la disponibilité des données hydrométriques collecter au niveau de plusieurs stations climatiques qui couvrent le secteur d'étude. Cette méthode est utilisée pour estimer en tout point les valeurs des débits de différentes périodes de retour au niveau de l'exutoire du bassin versant d'une part et chercher la meilleure loi statistique qui donne un bon ajustement des séries (Gumble, Log-normale, loi normale...) d'autre part.

4.2.1) Formule de MALLET-GAUTHIER

La formule de MALLET-GAUTHIER permet de donner le débit maximal correspond à une période de retour, par la relation suivante :

$$Q_{\max p\%} = 2K \log (1+20.P_{\text{moy}}) \cdot \frac{S}{\sqrt{L}} \sqrt{1+4 \log T - \log S} \quad (4-1)$$

Où :

$Q_{\max p\%}$: Débit maximum pour une fréquence donnée (m^3/s).

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (m).

S : Superficie du bassin versant (Km^2).

L : Longueur du talweg principal (Km).

K : Constante dépendant des caractéristiques du bassin : K varie de (1-3)

On prend $K = 2$

T : Période de retour (an).

Le bassin du MZAB est caractérisé par une superficie de 1653.65Km^2 et de longueur du talweg principal de 38.8Km et pluie moyenne annuelle de 130.15mm . Ces caractéristiques permettent de calculer le débit maximal pour différentes périodes de retour, si on utilise la formule de MALLET-GAUTHIER. Pour le bassin de la vallée de MZAB, la formule est appliquée et donne les résultats cités sur le tableau au-dessous :

Tableau VI.1 : Débit maximum de crue pour différentes périodes de retour (Formule de MALLET-GAUTHIER).

Fréquence (%)	10	5	2	1
Période de retour (an)	10	20	50	100
Q_{max} (m ³ /s)	571.37	739.68	915.87	1029.31

4.2.2) Formule de SOKOLOVSKY

La formule de skolovsky est d’usage très répandue chez les hydrologues du nord d’Afrique, celle-ci tient compte de tous les paramètres caractéristiques du bassin versant, le temps de monté de la crue, ainsi que de la pluie fréquentielle génératrice de celle-ci (HAFNAOUI.M et al, 2013).

La formule de skolovsky permet de calculer le débit max et donnée par :

$$Q_{max\%} = \frac{0.28.(p_t - H_0).\alpha p \% .F.S}{T_c} \quad (4-2)$$

S: superficie du bassin versant.

H₀ : pertes initiales en mm. H₀ = 8 mm

$\alpha p\%$: coefficient de ruissellement de la crue probable pour une période donnée ;

$$\alpha p \% = \frac{\sqrt{Pct \%} - \sqrt{H_0}}{\sqrt{Pct \%} + \sqrt{H_0}} \quad (4-3)$$

P_t : pluies de courte durée.

T_c: temps de concentration.

F: coefficient de forme de l'hydrogramme de crue :

$$F = \frac{12}{4+3\gamma} \quad (4-4)$$

Tableau VI.2: valeur de γ en fonction de bassin versant

Condition	γ
Surface du B.V compris entre 1 et 50 km ²	$\gamma = 2$
Pour un bassin boisé avec un sol peut perméable	$2 \leq \gamma \leq 2.5$
Pour un bassin boisé	$3 \leq \gamma \leq 4$
Pour les grand bassin	$4 \leq \gamma \leq 7$

On prend $\gamma = 4$ d’où : **F=0.75**

Pour les différentes lois d’ajustement et périodes de retours, les valeurs de débits sont illustres dans le tableau (VI.3).

Tableau VI.3 : Débit maximum de crue pour différentes périodes de retour (Formule de SOKOLOVSKY)

		10	20	50	100
Lognormale	$p_{j_{max}}$	38.9	50.4	67.5	82.1
	$\alpha p\%$	0.38	0.43	0.49	0.52
	Q	335.94	527.41	839.23	1123.16
Gumbel	$p_{j_{max}}$	38.2	46.1	56.4	64.1
	$\alpha p\%$	0.372	0.412	0.453	0.478
	Q	324.92	453.72	633.73	775.20
Lognormale3	$p_{j_{max}}$	38.4	46	55.7	63
	$\alpha p\%$	0.37	0.41	0.45	0.47
	Q	328.06	452.03	621.13	754.68

4.2.3) Formule TURRAZA

Cette formule est un peu plus élaborée que les autres formules, utilisant les précipitations car elle fait appel également au temps de concentration (T_c) du bassin. Le débit de crue maximale est exprimé par la formule suivante :

$$Q_{max\%} = \frac{C.S.I_t}{3.6} \quad (4-5)$$

Où :

S : Superficie du bassin versant (Km^2).

C : Coefficient de ruissellement.

I_t : Intensité des pluies pour une fréquence donnée correspondant au temps de concentration en (mm/h)

Tableau VI.4 : Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de TURRAZA)

		10	20	50	100
Lognormale	I_t	2.96	3.84	5.14	6.25
	C	0.36	0.41	0.47	0.51
	Q	484.89	726.31	1111.02	1457.82
Gumbel	I_t	2.91	3.51	4.29	4.88
	C	0.353	0.393	0.435	0.460
	Q	471.40	633.78	856.94	1031.82
Lognormale3	I_t	2.92	3.5	4.24	4.8
	C	0.35	0.39	0.43	0.46
	Q	474.53	631.25	842.01	1007.64

4.2.4) Formule de GIANDOTTI

$$Q_{\max \%} = \frac{C.S.(H_{\text{moy}} - H_{\text{min}})^{1/2}}{4(S)^{1/2} + 1.5L} \cdot P_t \quad (4-6)$$

Qmax (%): débit maximum de crue en m3/s de même fréquence que celle de la pluie de courte durée.

C : Coefficient topographique varie entre 66 et 166. nous prenons C = 160

S: superficie du bassin versant.

L: longueur du talweg principal.

Hmoy, Hmin: altitudes moyennes et minimales en (m).

Pt: pluies de courte durée.

Pour les différentes lois d’ajustement et périodes de retours, les valeurs de débits sont illustrées dans le tableau (VI-5).

Tableau VI.5 : Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de GIANDOTTI)

		10	20	50	100
Lognormale	P _t	35.57	46.08	61.72	75.07
	Q _{max} (m ³ /s)	378.23	456.41	558.41	634.64
Gumbel	P _t	34.93	65.07	80.44	91.88
	Q _{max} (m ³ /s)	385.15	498.96	668.31	812.87
Lognormale3	P _t	35.11	42.06	50.93	57.6
	Q _{max} (m ³ /s)	380.18	455.43	551.48	623.70

4.2.5) Formule de POSSENTI

Cette formule a été établie par POSSENTI pour les bassins montagneux dans la région d’Italie et donne la valeur empirique de débit par la formule suivante :

$$Q_{\max} = \frac{\mu.P_{\max j\%}.S}{L_p} \quad (4-7)$$

P_{max j%} : Pluie maximale journalière correspondante à la période de retour donnée (m).

μ : Coefficient compris entre 700 et 800, nous choisissons μ = 750

L_p : Longueur du cours d'eau principal en (Km).

On obtient les résultats ci-après - Tableau suivant :

Tableau VI.6 : Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de POSSENTI)

		T	10	20	50	100
Lognormale	P _t		35.57	46.08	61.72	75.07
	Q _{max}		1136.99	1472.94	1972.87	2399.60
Gumbel	P _t		34.93	42.15	51.57	58.61
	Q _{max}		1116.53	1347.32	1648.43	1873.46
Lognormale 3	P _t		35.11	42.06	50.93	57.6
	Q _{max}		1122.29	1344.44	1627.97	1841.18

L'une des causes principales de l'utilisation des modèles empiriques, est l'absence des données hydrométriques. Ces modèles, nous donnent des valeurs acceptables de débits de projet, pour l'utilisation dans le domaine de dimensionnement des ouvrages hydrauliques ou des grands aménagements (déviations des cours d'eau principales, enherbement, ...etc.) qui nécessitent une valeur de débit plus ou moins précis.

De plus des modèles utilisés dans notre travail, il existe d'autres modèles empiriques qui peuvent être utilisés. Le choix de ces quelques modèles cités au-dessus, vulgarisés et testés dans plusieurs régions et pour différents régimes hydrologiques. Actuellement, à la lumière de ce qui a été développé concernant les recherches sur la modélisation de la relation pluie-débit, aucun travail de recherche existant est basé sur ces formules empiriques afin d'évaluer les débits journaliers et passer sur des modèles à pas de temps journaliers (ex : GR4j). Enfin les modèles empiriques restent toujours des modèles plus ou moins applicables dans certaines régions et donnent des résultats plus ou moins acceptables.

4.3) Méthode de Rodier et Auvray (1965)

Pour la vallée du MZAB située dans le sud Algérien, aucune mesure hydrométrique n'existe (M.A. ROCHE, 1996). Le chercheur Dubief (1953) a travaillé sur les crues de la vallée du MZAB et a effectué une analyse fréquentielle des crues pour la période allant de 1907-1953. Ce travail montre que des bassins versants situés au Nord Est du Brésil dont les caractéristiques hydrologiques se rapprochent de celle du bassin du MZAB, les résultats obtenus sur le principe de l'hydrogramme unitaire ont pu être « régionalisés », c'est-à-dire qu'il est possible d'interpoler les valeurs de caractéristiques de crue pour le bassin du MZAB en fonction des caractéristiques pluviométriques et physiques (superficie, perméabilité, relief, etc.) (ROCHE.M, 1996).

La détermination de débit repose généralement soit sur une étude statistique de la chronique des débits observés, soit sur une modélisation de la pluie en débit. Cette détermination nécessite des informations hydro climatiques qui ne sont disponibles que pour les bassins versants jaugés (DIDIER.O & al ,2012). Dans notre travail, nous nous intéressons à l'utilisation de la méthode régionale établie par RODIER et AUVRAY (1965) très utilisée dans l'ensemble du monde. Selon la méthode de Rodier et Auvray (1965), revue par Rodier et Ribstein (1988) pour les petits bassins, le débit de pointe est évalué par

$$Q_{\max} = \alpha \times Q_{\text{moy}} = \alpha \times 277 \times \frac{V}{T_b} \quad (4-8)$$

où :

α est le coefficient de pointe donnée par l'équation suivante :

$$\alpha = 0,24 \times \ln(A) + 2 \quad (4-9)$$

Le volume de crue V est calculé par l'équation suivante :

$$V (10^6 \text{ m}^3) = P_j (\text{mm}) \times K_a \times K_r \times A (\text{km}^2) / 1000 \quad (4-10)$$

Tel que :

P_j (mm) est la hauteur de la pluie journalière maximum

Ka et Kr sont respectivement le coefficient d'abattement et de ruissellement donnés par les équations suivantes :

$$K_a = 1,1943 - 0,0604 * \ln(A) \quad (4-11)$$

$$K_r = 110 * A^{-0,186} \quad (4-12)$$

Tb le temps de base est donné par l'équation suivante (eq 11) :

$$T_b = 2,146 * A^{0,368} \quad (4-13)$$

Les caractéristiques de crue évaluées aux équations au-dessus ont été utilisées pour estimer le débit de crue du bassin du MZAB. Ces résultats se référant à une pluie journalière de 76.5 mm, et pour une période de retour de 100 ans. Pour le MZAB on a retenu les valeurs de caractéristiques de crue (α , V, Ka, et Tb).

La valeur de débit centennal est représentée dans le tableau (VI.7) suivant :

Tableau VI.7 : Le débit de crue centennale estimé par la méthode de Rodier et Auvray

	A (km ²)	Tm (h)	Tb (h)	Kr	Ka	V (10 ⁶ m ³)	Qmoy (m ³ /s)	α	Qmax (m ³ /s)
MZAB	1653,65	8,16	32,86	27,7	0,75	61,6	520	3,8	1967

La valeur calculée du débit de projet est utilisée comme une valeur de débit de référence.

4.4) Hydrogramme de crues pour le bassin du MZAB

L'hydrogramme de crue est une représentation graphique de la variation du débit dans une durée bien déterminée. Les hydrogrammes de crues sont utilisés essentiellement pour étudier la variation temporelle de débit soit au point d'un bassin versant ou bien à une section d'un cours d'eau et donnent quelques caractéristiques et connaissances qui déterminent la nature de la catastrophe et évaluent les dégâts.

Pour une bonne proposition des aménagements de protection contre les crues, assainissement, ou d'hydroélectricité, l'hydrogramme de crue est l'une des informations essentielles. On utilise l'hydrogrammes pour aider à la décision et proposer des solutions de protection des agglomérations contre les crues.

La forme de l'hydrogramme de crues est découpée par trois parties :

- La période de l'accroissement de débit ;
- La partie qui donne la valeur maximale de débit (débit de point) ;
- La période de décroissance de débit ;

Le débit de point est la partie la plus importante dans un hydrogramme de crues parce que c'est la seule caractéristique qui est utilisée dans la conception de la majorité des aménagements hydrauliques.

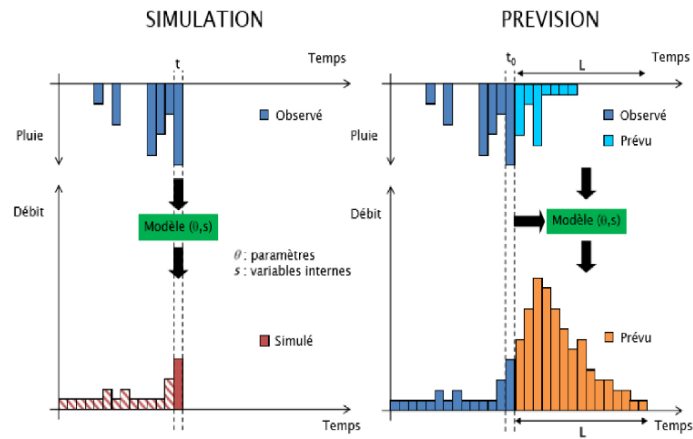


Fig.4.12. Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un évènement pluie-débit (BOURGIN.F, 2014).

Dans le cas de l'absence des données hydrométriques, des modèles empiriques pour calculer des hydrogrammes de crues deviennent nécessaires. Dans cette thèse, on utilise la méthode **SOKOLOVSKY**, cette méthode rassemble l'hydrogramme de crue en deux équations paraboliques l'une pour le temps de montée et l'autre pour la décrue :

$$Q_t = Q_{\max \%} \left(\frac{t}{t_m} \right)^m \quad (4-14)$$

$$Q_t = Q_{\max \%} \left(\frac{t_d - t}{t_d} \right)^n \quad (4-15)$$

$Q_{\max \%}$: débit maximum de fréquence donnée.

Q_t : débit instantané au moment (t).

t_m, t_d : temps de montée et de décrue.

m, n : puissances des paraboles pour l'Algérie m=2 et n=3.

Le temps de la décrue est donné par

$$T_d = \gamma.T_m = \gamma.T_c \quad (4-16)$$

γ : Coefficient de forme de l'hydrogramme des crues (tableau (VI.8)).

Tableau VI.8 : Coefficient de forme de l'Hydrogramme de crue γ .

Condition	γ
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dénudés et faiblement perméables.	2 à 2,5
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants brisés ou perméables, moyens cours d'eau avec terrasses de lit majeur normales.	3 à 4
Grands et moyens cours d'eau avec des terrasses de débordements étendues.	4 à 7

D'après les caractéristiques du bassin versant on prend $\gamma = 3$

Le tableau suivant donner les valeurs de Tc, Td et Tm pour le bassin du MZAB :

Tableau VI.9 : Tableau récapitulatif des temps de concentration, de montée et de décrue

	Tc	Td	Tm
Bassin du MZAB	14.47	43.41	14.47

Pour construire l'hydrogramme des crues du bassin du MZAB, on utilise des valeurs des débits de crues calculées par les différentes formules empiriques pour différentes périodes de retour (tableau (VI.10), (VI.11) et (VI.12).

Tableau VI.10 : Hydrogramme de crues du bassin du MAZB selon la méthode statistique Gumbel.

T(h)	Ma-Gau	Sokolovsky	Possenti	Turraza	Giandotti	Moy	Q projet
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	9.85	5.37	12.99	7.15	5.64	8.20	13.64
2	39.42	21.50	51.95	28.61	22.54	32.80	54.55
3	88.69	48.37	116.90	64.38	50.72	73.81	122.73
4	157.67	85.99	207.82	114.46	90.17	131.22	218.19
5	246.35	134.36	324.71	178.84	140.89	205.03	340.92
6	354.75	193.48	467.59	257.53	202.88	295.24	490.93
7	482.85	263.34	636.44	350.52	276.14	401.86	668.21
8	630.66	343.96	831.26	457.82	360.67	524.88	872.77
9	798.18	435.32	1052.07	579.43	456.48	664.30	1104.60
10	985.41	537.44	1298.85	715.35	563.55	820.12	1363.70
11	1192.35	650.30	1571.61	865.57	681.90	992.35	1650.08
14.47	1421.36	775.20	1873.46	1031.82	812.87	1182.94	1967.00
15	1096.05	597.78	1444.68	795.67	626.83	912.20	1516.81
16	999.51	545.13	1317.43	725.59	571.62	831.86	1383.21
17	908.82	495.66	1197.89	659.75	519.75	756.37	1257.70
18	823.78	449.28	1085.80	598.01	471.12	685.60	1140.02
19	744.22	405.89	980.94	540.26	425.62	619.38	1029.92
20	669.95	365.39	883.05	486.35	383.14	557.58	927.14
21	600.80	327.67	791.90	436.15	343.60	500.02	831.44
22	536.58	292.65	707.25	389.52	306.87	446.57	742.57
23	477.11	260.21	628.86	346.35	272.85	397.08	660.26
24	422.20	230.26	556.49	306.49	241.45	351.38	584.27
25	371.67	202.71	489.89	269.81	212.56	309.33	514.35
26	325.35	177.44	428.83	236.18	186.06	270.77	450.24
27	283.04	154.37	373.07	205.47	161.87	235.56	391.70
28	244.57	133.39	322.36	177.54	139.87	203.55	338.46
29	209.75	114.40	276.47	152.27	119.96	174.57	290.28
30	178.41	97.30	235.16	129.52	102.03	148.48	246.90
31	150.36	82.00	198.18	109.15	85.99	125.14	208.08
32	125.41	68.40	165.30	91.04	71.72	104.37	173.55
33	103.38	56.39	136.27	75.05	59.13	86.04	143.07
34	84.10	45.87	110.85	61.05	48.10	70.00	116.39

35	67.38	36.75	88.81	48.92	38.54	56.08	93.25
36	53.04	28.93	69.91	38.50	30.33	44.14	73.40
37	40.89	22.30	53.90	29.68	23.38	34.03	56.59
38	30.75	16.77	40.54	22.33	17.59	25.60	42.56
39	22.45	12.24	29.59	16.30	12.84	18.68	31.07
40	15.79	8.61	20.82	11.47	9.03	13.14	21.86
41	10.60	5.78	13.98	7.70	6.06	8.82	14.67
42	6.70	3.65	8.83	4.86	3.83	5.57	9.27
43	3.89	2.12	5.13	2.82	2.22	3.24	5.38
44	2.00	1.09	2.64	1.45	1.15	1.67	2.77
45	0.85	0.47	1.13	0.62	0.49	0.71	1.18
46	0.26	0.14	0.34	0.19	0.15	0.21	0.36
47	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.03	0.05
47.25	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
47.5	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01

Tableau VI.11 : Hydrogramme de crues du bassin du MAZB selon la méthode statistique Lognormale.

T(h)	Ma-Gau	Sokolovsky	Possenti	Turraza	Giandotti	Moy	Q projet
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	9.85	7.79	16.64	10.11	4.40	9.76	13.64
2	39.42	31.15	66.54	40.43	17.60	39.03	54.55
3	88.69	70.08	149.73	90.96	39.60	87.81	122.73
4	157.67	124.59	266.18	161.71	70.40	156.11	218.19
5	246.35	194.67	415.90	252.67	110.00	243.92	340.92
6	354.75	280.32	598.90	363.85	158.40	351.24	490.93
7	482.85	381.55	815.17	495.24	215.59	478.08	668.21
8	630.66	498.35	1064.71	646.84	281.59	624.43	872.77
9	798.18	630.73	1347.53	818.66	356.39	790.30	1104.60
10	985.41	778.67	1663.62	1010.69	439.99	975.68	1363.70
11	1192.35	942.20	2012.97	1222.93	532.39	1180.57	1650.08
14.41	1421.36	1123.16	2399.60	1457.82	634.64	1407.32	1967.00
15	1096.05	866.10	1850.40	1124.17	489.39	1085.22	1516.81
16	999.51	789.82	1687.42	1025.15	446.28	989.64	1383.21
17	908.82	718.15	1534.30	932.13	405.79	899.84	1257.70
18	823.78	650.95	1390.74	844.91	367.82	815.64	1140.02
19	744.22	588.08	1256.42	763.31	332.30	736.87	1029.92
20	669.95	529.40	1131.05	687.14	299.14	663.33	927.14
21	600.80	474.75	1014.30	616.21	268.26	594.87	831.44
22	536.58	424.01	905.88	550.34	239.58	531.28	742.57
23	477.11	377.01	805.47	489.34	213.03	472.39	660.26
24	422.20	333.62	712.77	433.03	188.51	418.02	584.27
25	371.67	293.69	627.47	381.20	165.95	368.00	514.35
26	325.35	257.09	549.26	333.69	145.27	322.13	450.24
27	283.04	223.66	477.84	290.30	126.38	280.24	391.70

28	244.57	193.26	412.89	250.84	109.20	242.15	338.46
29	209.75	165.75	354.12	215.14	93.66	207.68	290.28
30	178.41	140.98	301.20	182.99	79.66	176.65	246.90
31	150.36	118.81	253.84	154.21	67.13	148.87	208.08
32	125.41	99.10	211.72	128.62	55.99	124.17	173.55
33	103.38	81.69	174.54	106.04	46.16	102.36	143.07
34	84.10	66.46	141.99	86.26	37.55	83.27	116.39
35	67.38	53.25	113.76	69.11	30.09	66.72	93.25
36	53.04	41.91	89.54	54.40	23.68	52.51	73.40
37	40.89	32.31	69.03	41.94	18.26	40.49	56.59
38	30.75	24.30	51.92	31.54	13.73	30.45	42.56
39	22.45	17.74	37.90	23.03	10.02	22.23	31.07
40	15.79	12.48	26.66	16.20	7.05	15.64	21.86
41	10.60	8.38	17.90	10.87	4.73	10.50	14.67
42	6.70	5.29	11.30	6.87	2.99	6.63	9.27
43	3.89	3.07	6.57	3.99	1.74	3.85	5.38
44	2.00	1.58	3.38	2.06	0.89	1.98	2.77
45	0.85	0.67	1.44	0.88	0.38	0.85	1.18
46	0.26	0.20	0.44	0.26	0.12	0.26	0.36
47	0.03	0.03	0.06	0.04	0.02	0.03	0.05
47.25	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02
47.5	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
47.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau VI.12 : Hydrogramme de crues du bassin du MAZB selon la méthode statistique Lognormale à 3 paramètres.

T(h)	Ma-Gau	Sokolovsky	Possenti	Turraza	Giandotti	Moy	Q projet
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	9.85	5.23	12.76	6.99	4.32	7.83	13.64
2	39.42	20.93	51.06	27.94	17.30	31.33	54.55
3	88.69	47.09	114.88	62.87	38.92	70.49	122.73
4	157.67	83.71	204.24	111.77	69.18	125.31	218.19
5	246.35	130.80	319.12	174.65	108.10	195.80	340.92
6	354.75	188.36	459.53	251.49	155.67	281.96	490.93
7	482.85	256.37	625.47	342.31	211.88	383.78	668.21
8	630.66	334.86	816.94	447.09	276.74	501.26	872.77
9	798.18	423.80	1033.94	565.85	350.25	634.41	1104.60
10	985.41	523.21	1276.47	698.59	432.40	783.22	1363.70
11	1192.35	633.09	1544.53	845.29	523.21	947.69	1650.08
14.41	1421.36	754.68	1841.18	1007.64	623.70	1129.71	1967.00
15	1096.05	581.96	1419.79	777.02	480.95	871.15	1516.81
16	999.51	530.70	1294.74	708.58	438.59	794.42	1383.21
17	908.82	482.54	1177.25	644.28	398.79	722.34	1257.70
18	823.78	437.39	1067.10	584.00	361.48	654.75	1140.02
19	744.22	395.15	964.04	527.60	326.57	591.51	1029.92

20	669.95	355.72	867.84	474.95	293.98	532.49	927.14
21	600.80	319.00	778.26	425.92	263.63	477.52	831.44
22	536.58	284.90	695.07	380.40	235.45	426.48	742.57
23	477.11	253.32	618.03	338.23	209.36	379.21	660.26
24	422.20	224.17	546.90	299.31	185.26	335.57	584.27
25	371.67	197.34	481.45	263.49	163.09	295.41	514.35
26	325.35	172.74	421.44	230.65	142.76	258.59	450.24
27	283.04	150.28	366.64	200.65	124.20	224.96	391.70
28	244.57	129.86	316.81	173.38	107.32	194.39	338.46
29	209.75	111.37	271.71	148.70	92.04	166.72	290.28
30	178.41	94.73	231.11	126.48	78.29	141.80	246.90
31	150.36	79.83	194.77	106.59	65.98	119.50	208.08
32	125.41	66.59	162.45	88.90	55.03	99.68	173.55
33	103.38	54.89	133.92	73.29	45.37	82.17	143.07
34	84.10	44.66	108.94	59.62	36.90	66.85	116.39
35	67.38	35.78	87.28	47.77	29.57	53.56	93.25
36	53.04	28.16	68.70	37.60	23.27	42.16	73.40
37	40.89	21.71	52.97	28.99	17.94	32.50	56.59
38	30.75	16.33	39.84	21.80	13.50	24.44	42.56
39	22.45	11.92	29.08	15.92	9.85	17.84	31.07
40	15.79	8.39	20.46	11.20	6.93	12.55	21.86
41	10.60	5.63	13.73	7.52	4.65	8.43	14.67
42	6.70	3.56	8.67	4.75	2.94	5.32	9.27
43	3.89	2.07	5.04	2.76	1.71	3.09	5.38
44	2.00	1.06	2.60	1.42	0.88	1.59	2.77
45	0.85	0.45	1.11	0.61	0.37	0.68	1.18
46	0.26	0.14	0.33	0.18	0.11	0.21	0.36
47	0.03	0.02	0.04	0.02	0.01	0.03	0.05
47.25	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
47.5	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
47.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Les valeurs de débit centennale pour les différents modèles empiriques et ainsi que pour les différentes méthodes statistiques, sont regroupées dans le tableau cité au-dessous :

Tableau VI.13 : Récapitulatif des résultats de débit de crue pour les différentes méthodes

	Ma-Gau	Sokolovsky	Possenti	Turraza	Giandotti	Moy	Q projet
Gumbel	1421.36	775.20	1873.46	1031.82	812.87	1182.94	1967.00
Lognormale	1421.36	1123.16	2399.60	1457.82	634.64	1407.32	
Lognormale (3P)	1421.36	754.68	1841.18	1007.64	623.70	1129.71	

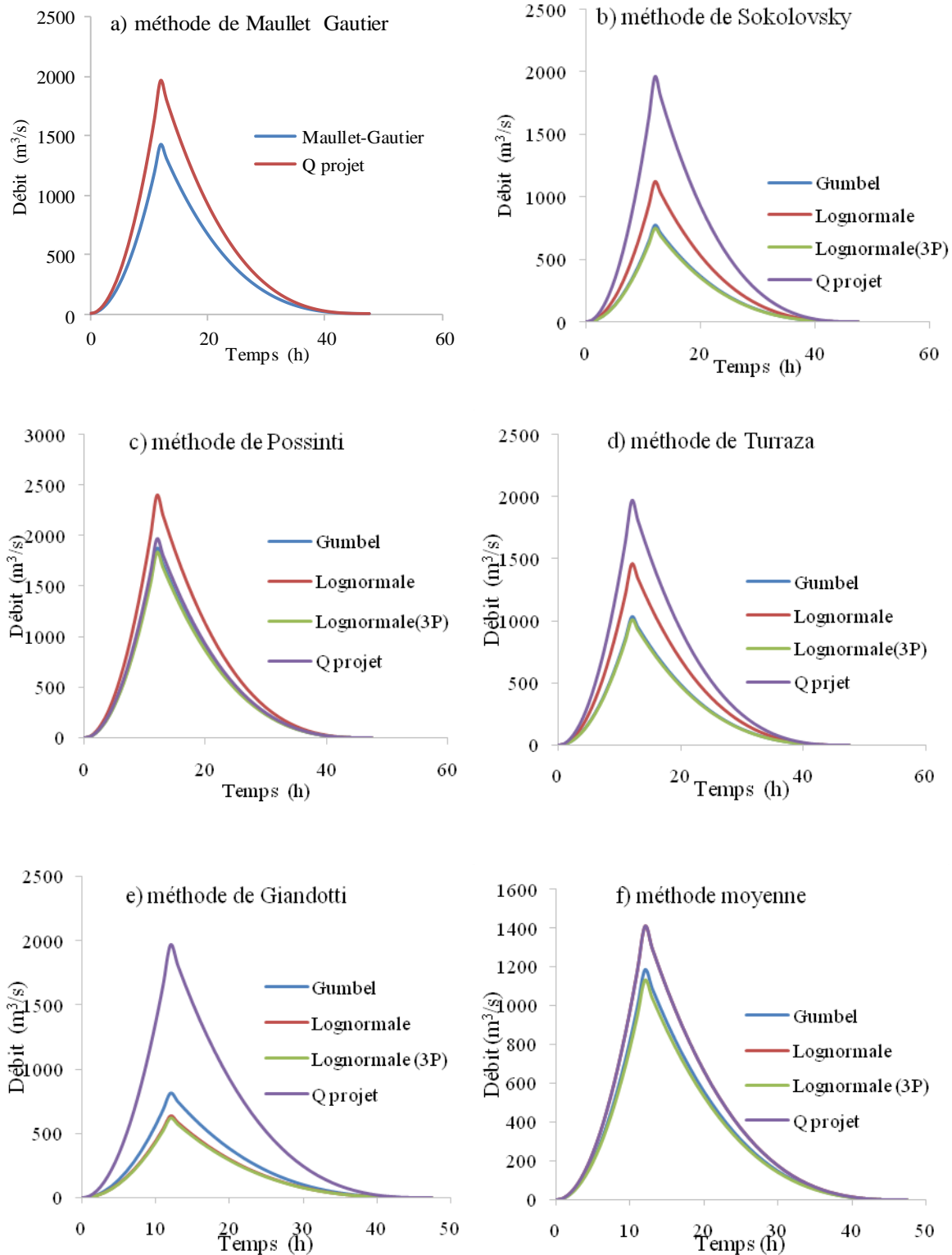


Fig.4.13. Hydrogramme fréquentiels des différents modèles empiriques du bassin du MAZB.

Le tableau (VI.13) et la figure 4.13 représentent les résultats obtenus par les différents modèles empiriques d'une part et par les différentes méthodes statistiques d'autre part. A titre de discussion de ces résultats, deux points importants doivent être cités :

- La valeur de débit estimée par le modèle empirique POSSENTI c'est la valeur la plus proche de la valeur de débit de projet par une différence de 93 qui représente 95% d'estimation.
- La valeur de débit estimée par la méthode statistique Lognormale c'est la valeur la plus proche de la valeur de débit de projet par une différence de 552 qui représente 71% d'estimation.

4.5) Détermination du volume de la crue du bassin du MZAB

Dans le domaine de l'hydraulique, l'étude technico-économique et le dimensionnement rationnelle des ouvrages hydrauliques tel que les barrages, l'aménagement des oueds et les réseaux d'assainissements, l'estimation du volume écoulé durant le temps de base est un point très important. Cette estimation permet de connaître les caractéristiques de ces ouvrages.

L'apport totale de crue du bassin du MAZB est donné par

$$W_t = W_1 + W_2 \quad (4-18)$$

Tel que :

$$W_1 = \frac{Q_{max} \times t_m}{m+1} \quad (4-19)$$

$$W_2 = \frac{Q_{max} \times t_d}{n+1} \quad (4-20)$$

Avec :

W_1 : apport pendant la crue (Hm^3) ;

W_2 : apport pendant la décrue ;

W_t : apport total (Hm^3).

Pour prendre la décision optimale aux études hydrologiques, la loi de distribution joue un rôle très important. Comme on a montré au cours de l'étude concernant la modélisation du comportement hydrologique du bassin de la vallée de MZAB et plus particulièrement en absence des données hydrométriques, les trois lois de distribution (Gumel, lognormale et lognormale à 3 paramètres) donnent des résultats tout à fait différents.

A titre de comparaison, le tableau (VI-14) donne les valeurs des débits centennales du bassin du MZAB pour différentes lois statistiques et aussi pour différents modèles empiriques.

Tableau VI.14: Apport total du bassin du MZAB

		Gumbel	Lognormale	Lognormale (3P)
W1	Ma-Gau	20.48	20.48	20.48
	Sokolovsky	11.17	16.19	10.88
	Possenti	27.00	34.58	26.54
	Turraza	14.87	21.01	14.52
	Giandotti	11.72	9.15	8.99
	Moy	17.05	20.28	16.28
	Q projet	28.35	28.35	28.35
W2	Ma-Gau	46.09	46.09	46.09
	Sokolovsky	25.14	36.42	24.47
	Possenti	60.75	77.81	59.70
	Turraza	33.46	47.27	32.67
	Giandotti	26.36	20.58	20.22
	Moy	38.36	45.64	36.63
	Q projet	63.78	63.78	63.78
W	Ma-Gau	66.58	66.58	66.58
	Sokolovsky	36.31	52.61	35.35
	Possenti	87.75	112.39	86.24
	Turraza	48.33	68.28	47.20
	Giandotti	38.07	29.73	29.21
	Moy	55.41	65.92	52.91
	Q projet	92.13	92.13	92.13

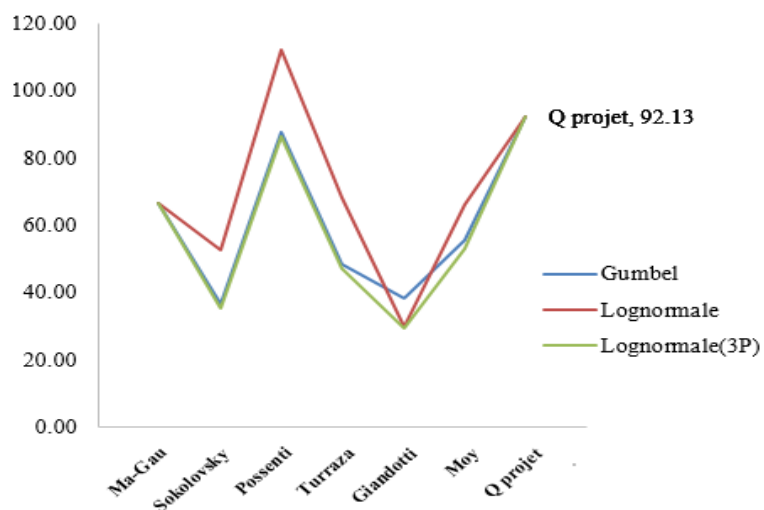


Fig.4.14. Représentation graphique de la variation d’apport totale selon les différents types de distributions.

La fig.4.14 représente une analyse des apports totaux des crues fréquentielles selon les différents types de lois de distributions (Gumel, lognormale et lognormale à 3 paramètres)

Ces lois nous donnent des valeurs de précipitation pour différentes les périodes de retours, ces précipitations sont utilisées pour prédéterminer la valeur de débit de projet du bassin de la vallée de MZAB.

Les résultats obtenus montrent que le volume des crues pour une période de retour de 100 ans, pour la station de Ghardaïa prend une valeur minimale de **29.21** Hm³ pour la formule de GIANDOTTI et la loi du lognormale à 3 paramètres, une valeur maximale de **112.39** Hm³ pour la formule de POSSENTI et la loi du lognormale.

La valeur de débit de projet donne une valeur d'apport totale de **92.13** Hm³, ce qui permet de choisir la meilleure formule et loi de distribution. A partir de ces résultats obtenus, on peut dire que la formule de POSSENTI n'est pas applicable dans le cas de la loi de distribution lognormale, par contre elle est bonne si on prend la loi de Gumbel. L'adaptation de cette formule est traduite par une valeur de **87.75** Hm³ représentée par **95.25%** d'estimation.

La formule GIANDOTTI sous la loi lognormale à 3 paramètres n'est pas applicable et représente la valeur minimale d'apport totale, par conséquent, elle provoque la sous-estimation des caractéristiques hydrauliques des ouvrages. Pour améliorer la qualité des résultats obtenus par cette formule, le changement de la loi statistique doit être nécessaire, par exemple, on prend d'autres lois qui donnent des valeurs meilleures (Gumbel $W=38.07$ pour 41.33%).

4.6) Conclusion

En conclusion, les caractéristiques des crues, et notamment les débits, ont été évaluées dans les chapitres précédents par une ou plusieurs méthodes (modèles empiriques et méthodes statistiques) sur le bassin versant du MZAB.

Dans ce chapitre, la méthode de RODIER et AUVREY, a été appliquée comme une méthode régionale, pour prendre une valeur de référence de débit de crue à partir des travaux de recherches et des conclusions obtenus par DUBIEF en 1953. Cette méthode a permis d'obtenir le maximum de résultats sur les caractéristiques de crue transposées aux conditions du bassin du MZAB.

Un des objectifs de l'évaluation des modèles aux conditions algériennes était de pouvoir comparer les modèles statistiques d'une part et d'autre part de tester l'influence des méthodes mises au point pour le bassin du MZAB à l'aide d'un ensemble de modèles empiriques là où leur structure mathématique est simple et ainsi que ces modèles utilisent plusieurs types de précipitation.

5

APPLICATION DES MODELES HYDROLOGIQUES

Chapitre 5 :

Application des Modèles Hydrologiques

5.1 Introduction

Le bassin versant est l'unité de gestion du territoire pertinente du point de vue hydrologique, écologique et géomorphologique. Il est le cadre analytique à considérer pour toute prise de décision en matière d'aménagement. C'est pourquoi les gestionnaires et les décideurs réclament des outils opérationnels adaptés à cette échelle. Mais le bassin versant est une unité complexe : l'ensemble des composantes du cycle hydrologique y est représenté et des facteurs anthropiques perturbateurs s'y ajoutent souvent. Rares sont les outils qui prennent en compte tous ces aspects de façon spatialisée, répondant ainsi aux attentes des gestionnaires.

(CHAPONNIER.A, 2005).

Pour un bassin versant, plusieurs processus sont écrits à but de prendre la décision de construire un aménagement ou une protection contre les crues, à l'aide d'une plate-forme qui fait la combinaison entre ces processus, la plate-forme permet de représenter le fonctionnement hydrologique du bassin versant en prenant en compte les processus d'infiltration, de ruissellement et de propagation des ondes de crue dans le réseau hydrographique. L'utilisation des modèles pour modéliser la relation pluie – débit se fonde principalement sur la connaissance des débits observés ou bien les valeurs obtenues par modèles empiriques en cas d'absence de données hydrométriques d'une part et les valeurs des pluies d'autre part.

Après avoir défini, dans les chapitres précédents, plusieurs modèles hydrologiques existants et applicables dans des bassins versants du globe avec une certaine condition d'utilisation, et après avoir présenté la zone du MZAB avec l'étude de l'homogénéisation des données météorologiques, on va s'intéresser à l'adaptation des modèles hydrologiques aux conditions de la région du MZAB.

Ce chapitre a pour objectif de présenter une application de deux modèles hydrologiques ; le premier modèle est un modèle universel appelé « HEC-HMS » et l'autre est une approche appelée « les Algorithmes Génétiques ».

L'objectif du chapitre est de proposer un modèle qui permet de faire un couplage entre ces deux modèles. Ce couplage est basé sur l'utilisation des paramètres optimisés par Algorithmes Génétiques (précipitations) comme des données du modèle HEC-HMS.

L'identification de la valeur de débit maximum d'une averse et la localisation des zones inondables dans un bassin versant est d'une importance majeure pour les hydrologues. Dans ce travail, une approche fondée sur l'optimisation est présentée pour simultanément quantifier le débit et adapter quelques modèles aux conditions de la région du MZAB grâce au processus de calage du modèle hydrologique.

Le calage du modèle est formulé en tant que problème d'optimisation de plusieurs paramètres (pluie de cour durée, l'intensité pluviométrique, pluie moyenne annuel, le coefficient de ruissellement, etc.) résolu par l'utilisation d'un algorithme génétique.

La méthode utilisée est basée sur une modélisation du comportement hydrologique du bassin versant de l'oued MZAB. Dans ce travail, on considère comme exemple d'application le bassin du MZAB, afin de valider notre couplage entre les algorithmes génétiques et le système de modélisation hydrologique HEC-HMS et de vérifier la stabilité et la convergence des résultats obtenus.

5.2 Adaptation des modèles empiriques par lois statistiques

Les fluctuations saisonnières et interannuelles sont des facteurs essentiels pour l'étude de la sensibilité de phénomène climatique et hydrologique. Ces fluctuations ne sont pas homogènes et dépendent de deux paramètres aléatoires tel que les débits et les précipitations qui provoquent la bonne compréhension du comportement hydrologiques des bassins versant.

Pour assurer la fiabilité des données précipitations et débits pour leur usage, il est important d'appliquer plusieurs méthodes statistiques qui débute par le tirage aléatoire d'un échantillon à partir d'une population pour déterminer les probabilités d'ajustement à l'aide des lois spécifiques. Dans ce point-là " l'adaptation des modèles empiriques par lois statistiques" le problème revient donc à indiquer de notre souci d'assurer une fiabilité des données météorologiques et de mieux cerner l'influence du changement des lois statistiques sur le comportement hydrologique du bassin du MZAB.

Cette étude statistique articulée autour des points suivants :

- La reprise des résultats obtenus par les différentes lois utilisées dans le chapitre 04 ;
- Dans le second point, une étude comparative par les différents indicateurs de stabilité et de performance des lois statistiques utilisés, cette étude permet de souligner l'importance de l'analyse statistique pour l'étude du comportement hydrologique des bassins versants.

5.2.1) prédétermination des débits de crues par les modèles empiriques

Nous proposons dans ce qui suit, la variation de la valeur de débit de crue estimée par des modèles empiriques, sur le plan statistique, en passant d'une loi à une autre en prenant en compte les lois statistiques suivantes : Gumbel, lognormale, lognormale à 3 paramètres. Le but est de proposer un modèle empirique qui présente une certaine adhésion en passant d'une loi à une autre. Cette adhésion peut être améliorée et précisée, si elle existe, et l'utilisée comme critère de choix final si les modèles en compétition présentent des performances très voisins.

Afin d'avoir une vue générale, les résultats acquis sont résumés tout au long du chapitre 04 (voir tableau V.1).

Tableau V.1: Valeurs de débits de crues pour les différents modèles empiriques et lois statistiques.

		Gumbel	Lognormale	Lognormale (3P)
Q _{max}	Ma-Gau	1421.36	1421.36	1421.36
	Sokolovsky	775.2	1123.16	754.68
	Possenti	1873.46	2399.6	1841.18
	Turraza	1031.82	1457.82	1007.64
	Giandotti	812.87	634.64	623.7
	Moy	1182.94	1407.32	1129.71
	Q projet	1967	1967	1967

L'adaptation des modèles empiriques par lois statistiques nous a permis de 'réévaluer' et 'valider' les différentes composantes et paramètres des modèles empiriques (MALLET-GAUTHIER, SOKOLOVSKY, TURRAZA, GIANDOTTI, POSSENTI) proposées dans le chapitre 04.

Cependant un changement sur l'ordre de choix d'une loi statistique en faisant opérer la pluie journalière maximale ou de courte durée, a permis un certain gain d'adaptation des formules empiriques utilisées entre 29% et 112% par rapport à la valeur du débit de projet qui reste utile sur le plan pratique, mais permet une meilleure stabilité des paramètres.

Pour mieux comprendre la performance de cette adaptation par les lois statistiques, plusieurs indicateurs de performance deviennent nécessaires.

Les indicateurs de performances utilisés dans ce point sont :

- L'erreur moyenne des carrés **MSE** (Mean Square Error) ;
- Le coefficient d'efficacité de Nash–Sutcliffe **NSC** (Nash–Sutcliffe coefficient of efficiency) ;
- L'erreur root- moyenne-carrée- **RMSE** (Root-Mean-Square Error) ;
- Erreur de pourcentage absolue moyenne **MAPE** (Mean Absolute Percentage Error).

Le **MSE** mesure la moyenne des carrés des "erreurs". Le MSE est donné par l'équation suivante

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Qt_i - \hat{Q}t_i)^2 \quad (5 - 1)$$

Le coefficient d'efficacité de Nash–Sutcliffe est donné par l'équation suivante :

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qt_i - \hat{Q}t_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qt_i - \bar{Q}t)^2} \quad (5 - 2)$$

Le RMSE est donné par l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Qt_i - \hat{Q}t_i)^2} \quad (5 - 3)$$

L'erreur de pourcentage absolue moyenne MAPE est un autre paramètre statistique qui mesure la performance et la précision de précision des modèles (SENTAS.A & al,2016). Le MAPE est donnée par l'équation suivante :

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Qt_i - \hat{Q}t_i}{\bar{Q}t_i} \right| \times 100 \quad (5 - 4)$$

où Qt_i est la valeur mesurée du débit, $\hat{Q}t_i$ est le débit calculé par le modèle, $\bar{Q}t$ est le débit moyen mesuré $\bar{Q}t$ est le débit moyen simulé et N est le nombre de données.

Il est possible de comparer évidemment les lois d'ajustement utilisées, mais pour assurer que ces lois modélisent efficacement les précipitations, une comparaison ou une validation d'adaptation des données par rapport à une valeur de référence doit être indispensable.

A ce titre, le modèle (loi) le plus adapté est le modèle qui donne une valeur acceptable, en se référant toujours au indicateurs de performance citées au-dessus.

5.3) Adaptation des modèles empiriques par algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques ont été initialement développées en 1975 par John Holland (TRIEU & al, 2013), ce sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondus sur le mécanisme de la sélection naturelle et de la génétique (UJJWAL.M & SANGHA.M, 2000 ;AYADI, 2010). Les algorithmes génétiques commencent par la sélection aléatoire d'individus de taille constante appelée population initiale, de telles façons que ces individus entraînent dans une compétition pendant une certaine succession d'itérations appelée génération. Entre les générations, les individus soumettent à des opérateurs appelés successivement, croisement et mutation de manière à ce que ces opérateurs permettront de transformer la population pour favoriser l'émergence de meilleurs individus.

Il existe dans la littérature plusieurs modèles empiriques, ces modèles ont pour but de prédéterminer la valeur de débit de crue pour les bassins versants non jaugés. Cependant, la plupart de ces modèles sont applicables dans des régions particulières. Le but principal de ce point est l'adaptation de quelques modèles empiriques (MALLET-GAUTHIER, SOKOLOVSKY, GIANDOTTI, POSSENTI).

5.3.1) Organigramme de calcul

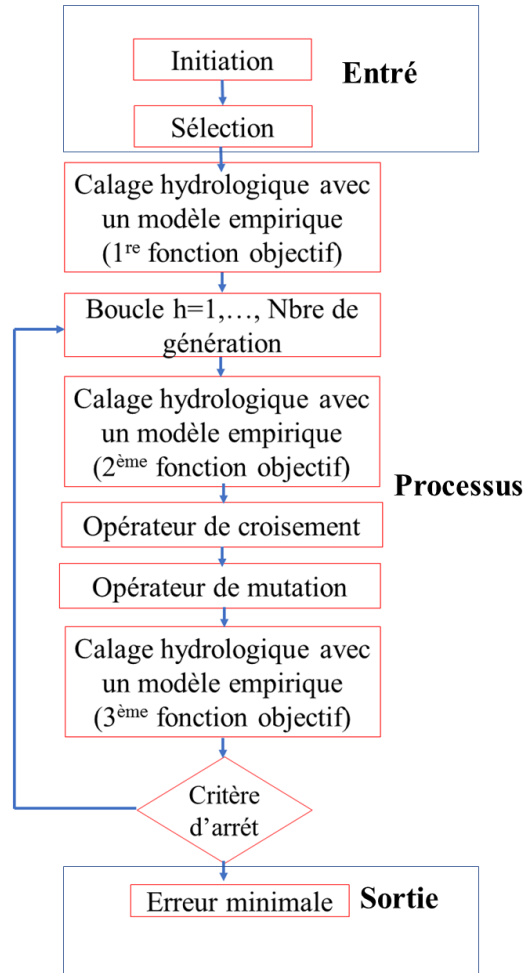


Fig.5.1. Organigramme de modélisation par Algorithme Génétique

Les différents types de précipitations (pluie moyen annuel, pluie de court durée, pluie maximum journalière), qui sont des entrées des modèles empiriques utilisées. La figure 5.1 présente les phases de l'optimisation des données météorologiques à l'aide des algorithmes génétiques. Donc l'organigramme de démarche est structuré par trois phases :

1. La phase d'entrée qui contient de deux opérations essentielles, l'initiation et sélection des individus qui sont les différents types de précipitations.
2. La phase processus qui regroupe l'étape de calage hydrologique avec les modèles empiriques, c'est-à-dire le calcul de la fonction objective.
3. Après un nombre de génération qui est le critère d'arrêt pour les algorithmes génétiques, le choix d'une fonction objective repose sur la valeur de précipitation qui donne une valeur minimale de l'erreur.

5.3.2) Formulation du problème

Le modèle empirique permet de calculer le débit pour les différentes périodes de retour. Le problème revient donc à minimiser le critère quadratique :

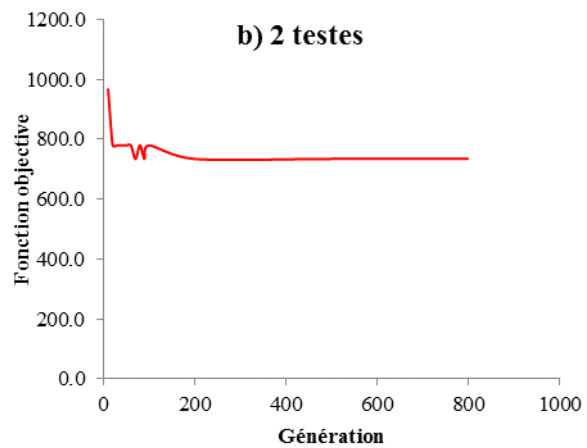
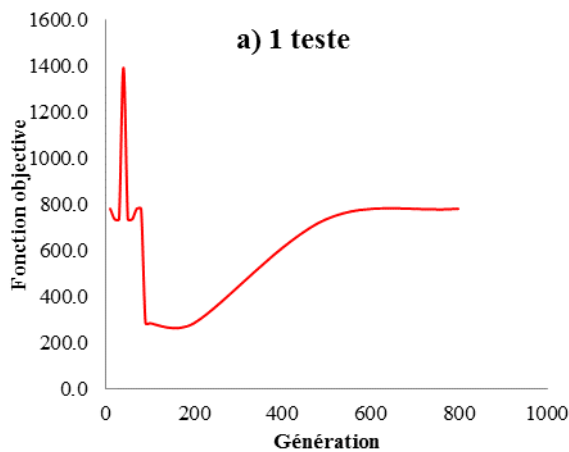
$$OBJFUN = \sum_{i=1}^n (Q_{sum} - Q_{pro})^2 \quad (5 - 5)$$

Où : Qsum le débit simulé par Algorithmes Génétiques ;
 Qpro le débit de projet.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux (tableau V.2,3,4 et V.5) et les figures (Fig.5.2,3,4 et 5.5)

Tableau V.2 : Valeurs de la fonction objective pour le nombre de génération et de testes (méthode MALET GUETTIER).

Génération	T1	T2	T3	T4	T5	T6
10	780.8	966.7	735.9	735.9	735.9	735.9
20	735.9	780.8	1299.5	780.8	780.8	780.8
30	735.9	780.8	966.7	780.8	780.8	780.8
40	1391.1	780.8	966.7	735.9	780.8	735.9
50	735.9	780.8	780.8	735.9	735.9	735.9
60	735.9	780.8	735.9	735.9	826.1	735.9
70	780.8	735.9	735.9	735.9	735.9	735.9
80	780.8	780.8	735.9	735.9	735.9	735.9
90	286.1	735.9	735.9	735.9	735.9	735.9
100	286.1	780.8	735.9	735.9	735.9	735.9
200	286.1	735.9	780.8	735.9	735.9	735.9
500	735.8	735.9	735.9	735.9	735.9	735.9
800	780.8	735.9	735.9	735.9	735.9	735.9



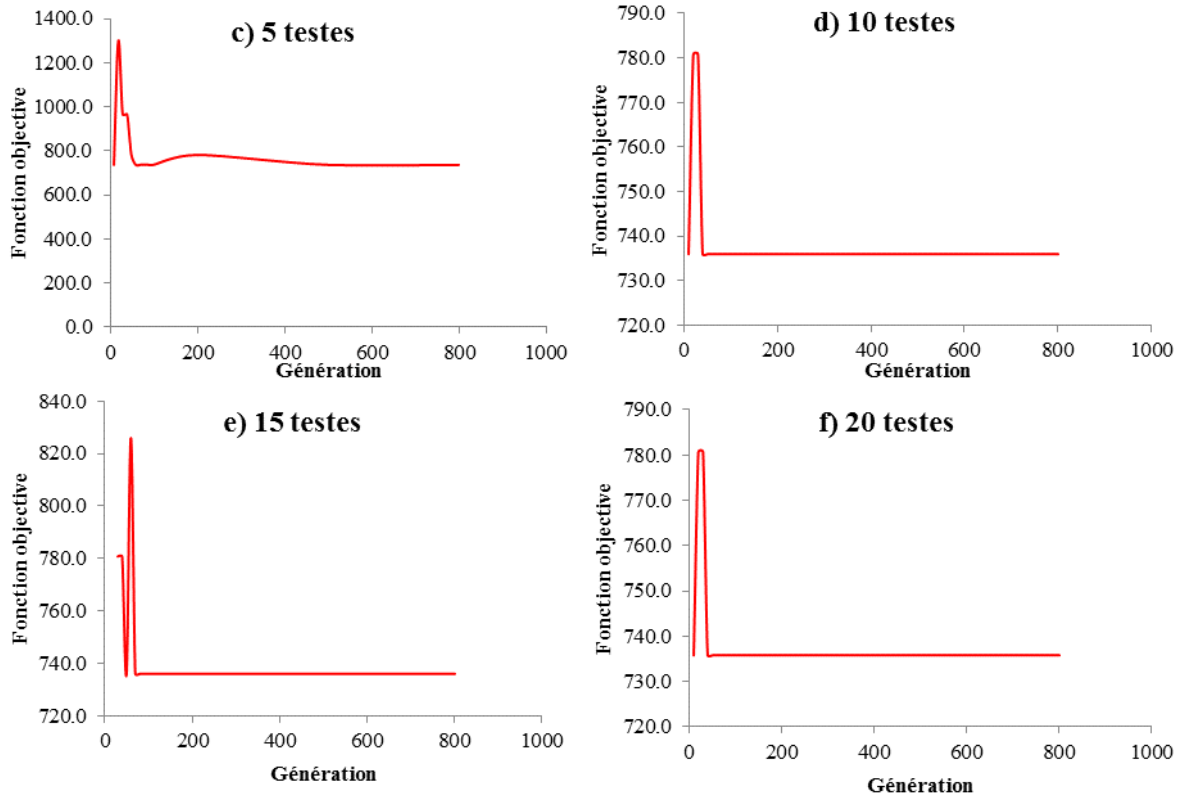


Fig.5.2. Fluctuation de la fonction objective (critère quadratique) selon la méthode MALET GUETTIER pour 1-20 testes.

Tableau V.3: Valeurs de la fonction objective pour le nombre de génération et de testes (méthode GIANDOTTI).

Génération	T1	T2	T3	T4	T5	T6
10	781.80	733.86	2350.70	733.86	781.80	733.86
20	1143.50	1475.30	903.80	918.36	781.80	9468.60
30	733.86	781.80	733.86	6134.80	918.36	1428.20
40	774.52	1859.70	8268.70	1428.20	733.86	6134.80
50	7070.10	918.36	2350.70	781.80	1823.30	781.80
60	1143.50	4355.30	774.52	1121.70	5128.00	3598.50
70	733.86	1859.70	1823.30	2350.70	2879.30	2350.70
80	781.80	2930.30	5200.80	903.80	733.86	733.86
90	733.86	5200.80	781.80	918.36	918.36	918.36
100	781.80	781.80	733.86	918.36	918.36	903.80
200	774.52	903.80	918.36	733.86	903.80	733.86
500	733.86	733.86	733.86	903.80	733.86	733.86
800	733.86	733.86	733.86	733.86	733.86	733.86
1000	733.86	733.86	733.86	733.86	733.86	733.86
2000	733.86	733.86	733.86	733.86	733.86	733.86

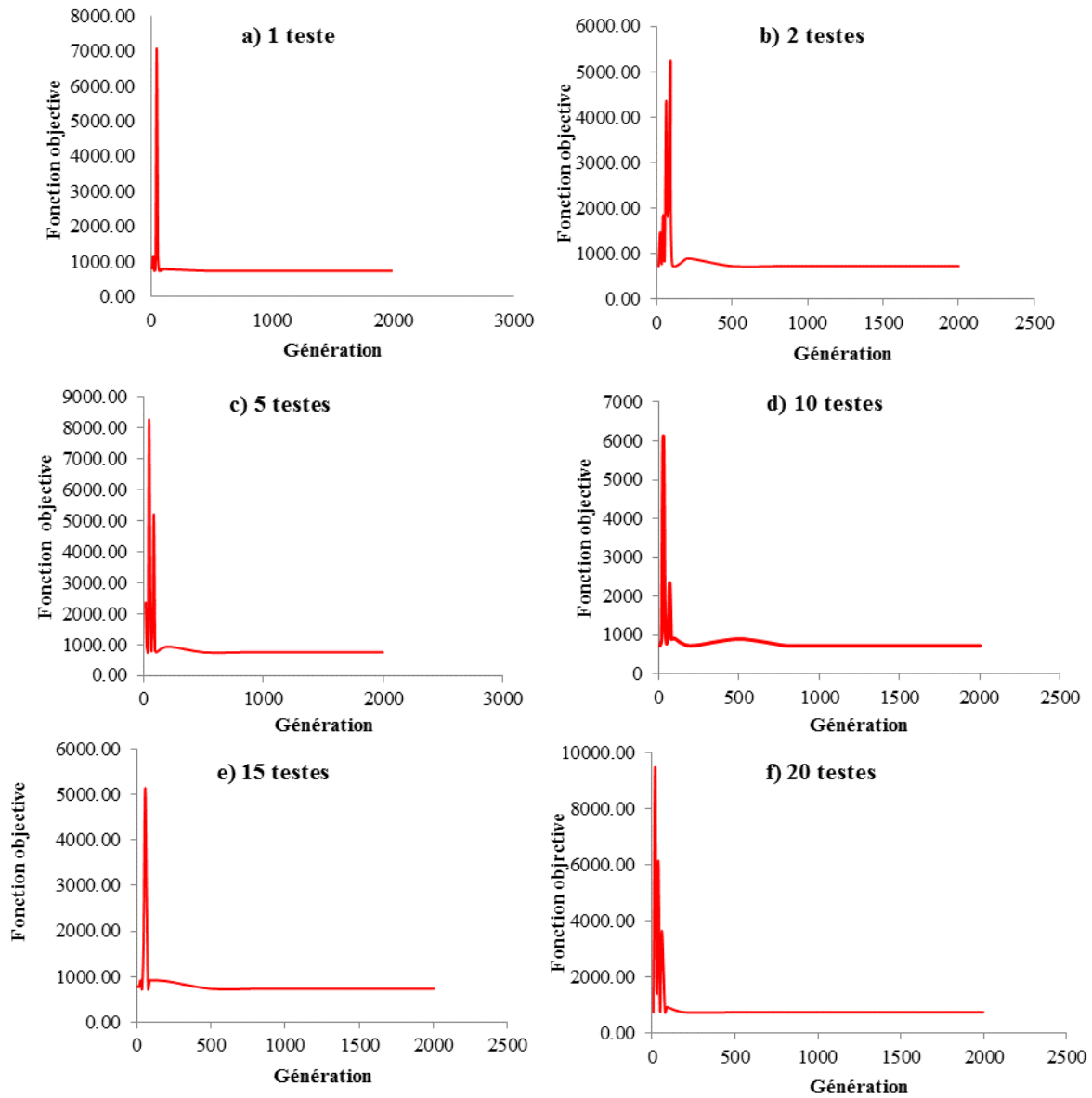


Fig.5.3. Fluctuation de la fonction objective (critère quadratique) selon la méthode GIANDOTTI pour 1-20 testes.

Tableau V.4 : Valeurs de la fonction objective pour le nombre de génération et de testes (méthode POSSENTI).

Génération	T1	T2	T3	T4	T5	T6
10	294.28	293.66	293.26	294.69	296.49	293.26
20	295.30	293.06	300.24	293.87	296.53	294.48
30	293.06	293.26	293.46	294.48	294.28	294.48
40	294.07	293.66	294.69	294.69	294.07	294.69
50	293.06	293.26	294.69	301.89	293.87	297.97
60	293.87	295.30	295.51	294.48	294.69	294.69
70	294.07	293.87	294.07	294.89	294.07	293.06
80	293.87	293.26	297.15	294.48	293.06	293.06
90	293.87	294.69	293.06	296.94	293.06	293.06
100	293.26	293.87	296.74	293.87	293.06	293.06
200	293.26	293.87	296.74	293.87	293.06	293.06

500	293.06	293.06	293.06	293.06	293.06	293.06
800	293.06	293.06	293.06	293.06	293.06	293.06
1000	293.06	293.06	293.06	293.06	293.06	293.06
2000	293.06	293.06	293.06	293.06	293.06	293.06

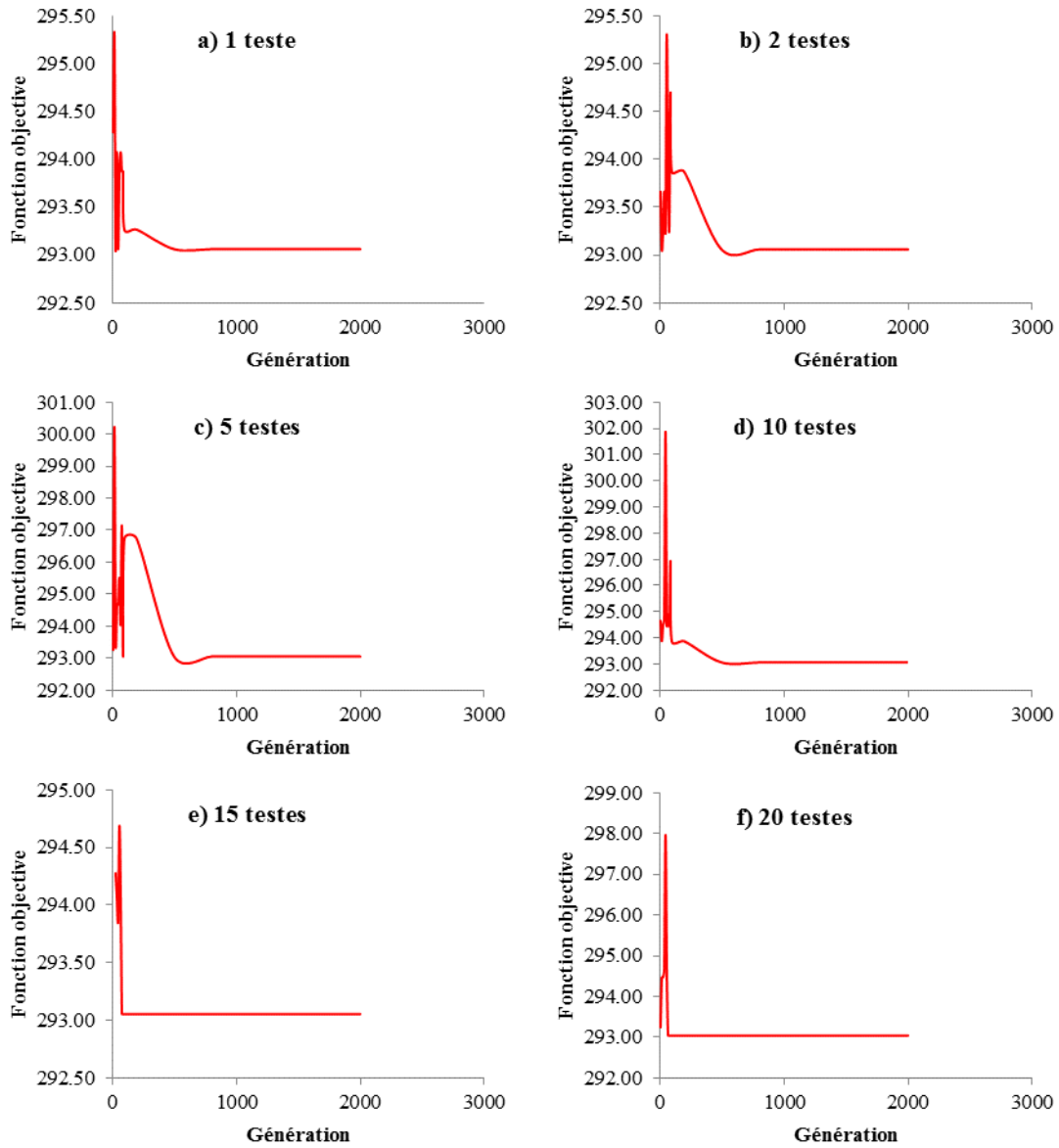
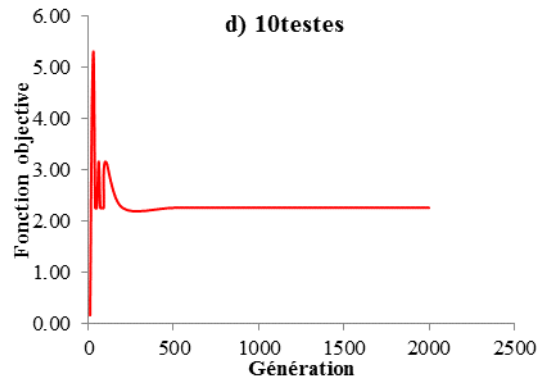
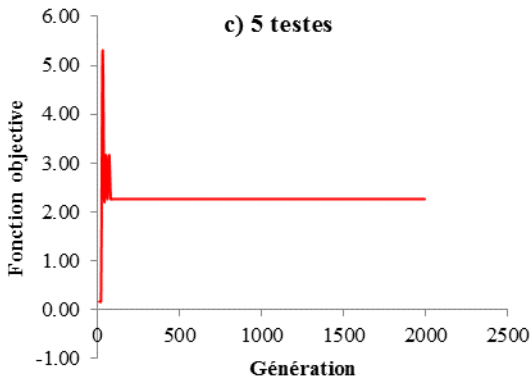
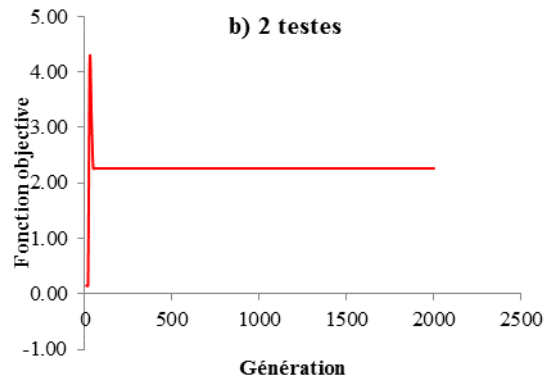
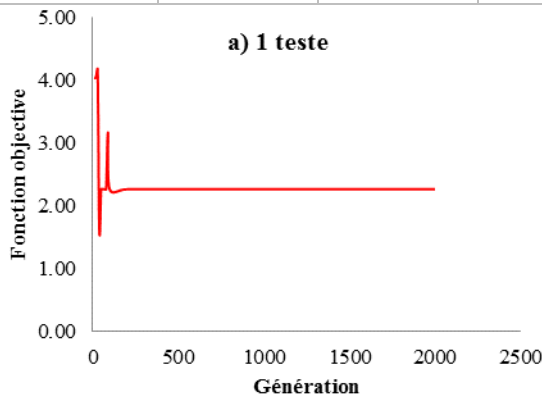


Fig.5.4. Fluctuation de la fonction objective (critère quadratique) selon la méthode POSSENTI pour 1-20 testes.

Tableau V.5 : Valeurs de la fonction objective pour le nombre de génération et de testes (méthode SOKOLOVSKY).

Génération	T1	T2	T3	T4	T5	T6
10	4.04	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
20	4.04	0.16	0.16	4.04	0.16	0.16
30	4.17	4.17	5.29	5.29	4.17	4.17
40	1.59	3.17	2.26	2.26	3.17	2.26
50	2.26	2.26	3.17	2.26	2.26	2.26
60	2.26	2.26	2.26	3.17	2.26	2.26
70	2.26	2.26	3.17	2.26	2.26	2.26
80	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
90	3.17	2.26	2.26	2.26	2.26	3.17
100	2.26	2.26	2.26	3.17	2.26	2.26
200	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
500	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
800	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
1000	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
2000	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26



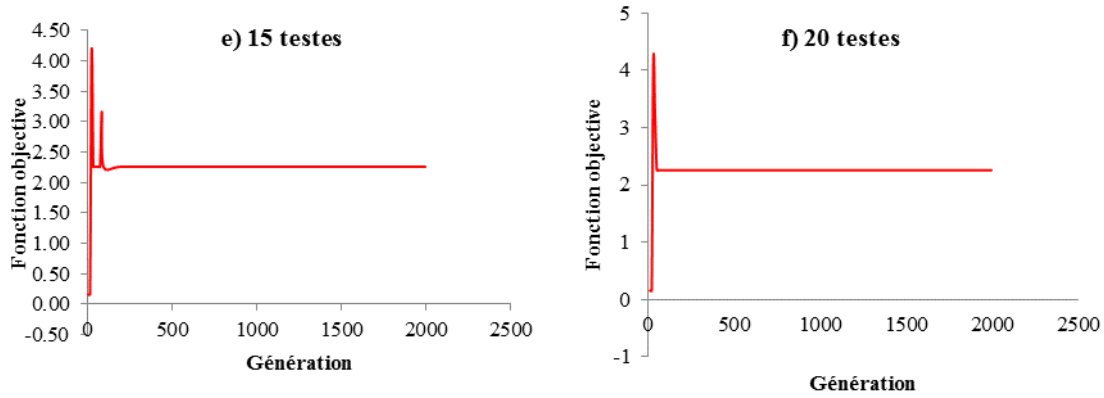


Fig.5.5. Fluctuation de la fonction objective (critère quadratique) selon la méthode SOKOLOVSKY pour 1-20 testes.

La performance des Algorithmes génétiques est validée par la stabilité de l’erreur le long de génération et par le nombre de test (Fig.5.1,2,3 et 4) pour donner la chance de sélectionner des meilleurs d’individus. Pour construire l’Hydrogramme de crue, la valeur qui correspond le minimum de l’erreur doit être utilisé comme la valeur maximum du débit correspond au temps de concentration d’une averse (tableau V.6).

Tableau V.6 : la fonction objective pour les différentes méthodes

Méthode	M-G	SKOLOV	GIAN	POSS	PROJ
Q (m3/s)	1421.36	1320,16	994,89	2936	1967.00
OBJFUN	735.8	2.26	733.86	293.06	-----

Le tableau V-6 représente les valeurs de la fonction objective (OBJFUN), pour cette valeur les algorithmes génétiques doivent être stables (Fig.5.2,3,4 et 5). Après l’utilisation des algorithmes génétiques, les valeurs de débits centennaux sont résumées dans le tableau V.7 suivant :

Tableau V.7 : les valeurs de débits obtenus par l’utilisation des algorithmes génétiques

Méthode	M-G	SKOLOV	GIAN	POSS	PROJ
Q (m3/s)	1421.36	1320,16	994,89	2936	1967.00
Q/AG	1987.4	1940	1985.2	1694.2	-----

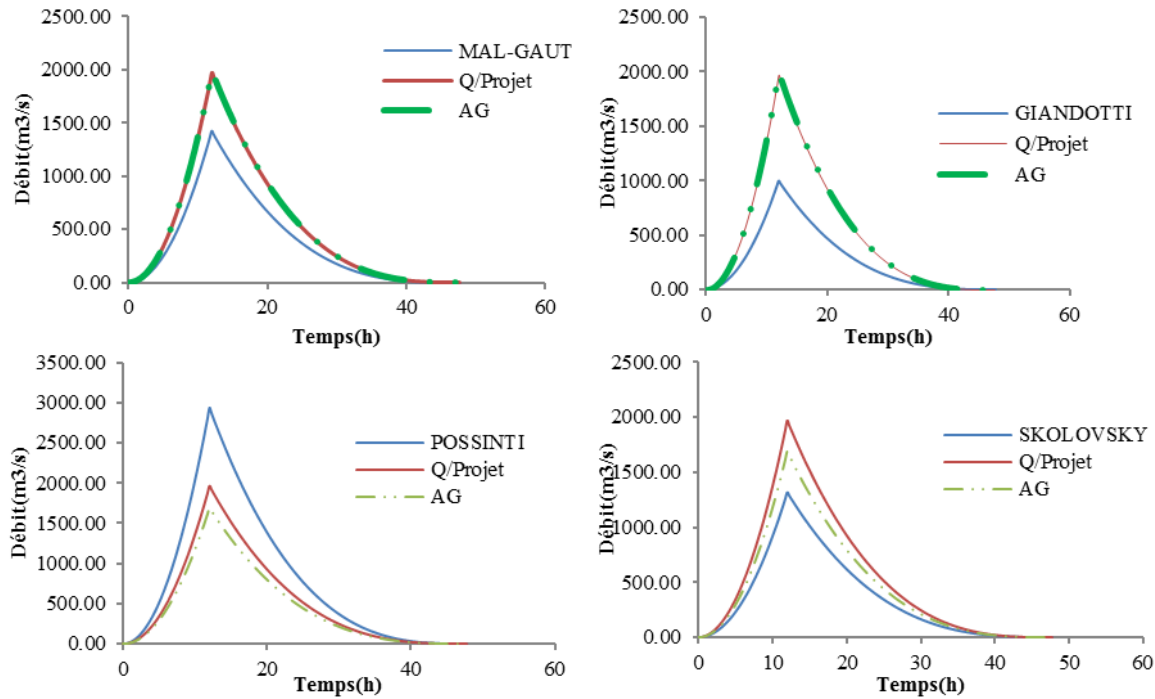


Fig.5.6. Hydrogrammes des crues, différents débits calculés à l'aide des différents modèles empiriques, et simulés à l'aide de l'algorithme génétique.

5.4) Modèle Pluie – débit HEC-HMS

Le système de modélisation hydrologique HEC-HMS est un logiciel très flexible employé pour modéliser le processus pluie-débit dans un bassin versant ou une région. Il est conçu pour être utilisé pour de grandes surfaces géographiques afin de résoudre si possible un plus grand nombre de problèmes.

Pour étudier le comportement hydrologique des bassins versant, le HEC-HMS est composée par Trois méthodes d'évaluation de débit de crues, chaque méthode utilise un ou plusieurs paramètres comme donnée, les données les plus importantes sont les données météorologiques. Les trois méthodes sont les suivantes :

a) La méthode SCS

La méthode **SCS** tempête implémente la conception de la tempête développée par le Service de Conservation des Ressources Naturelles. La méthodologie originale a été développée pour fournir des conseils lors de la conception de sécurité des installations de stockage de l'eau pour des applications agricoles. Cependant, la tempête a été appliquée dans une variété d'applications agricoles. Le même hydrogramme est calculé pour tous les sous-bassins. Cette méthode utilise les mêmes données de paramètres pour tous les sous-bassins dans le modèle météorologique. L'explorateur de bassin versant indique le niveau de précipitation dans le modèle météorologique. Chaque tempête n'a qu'un seul type de distribution de temps qui doit être choisi dans la liste des choix disponibles. Les types disponibles sont : **type1**, **Type1A**, **type2** et **type3**. Chaque tempête est de 24 heures. La simulation doit avoir une durée d'au moins 24 heures. Toutes les valeurs de précipitation après les premières 24 heures sera zéro.

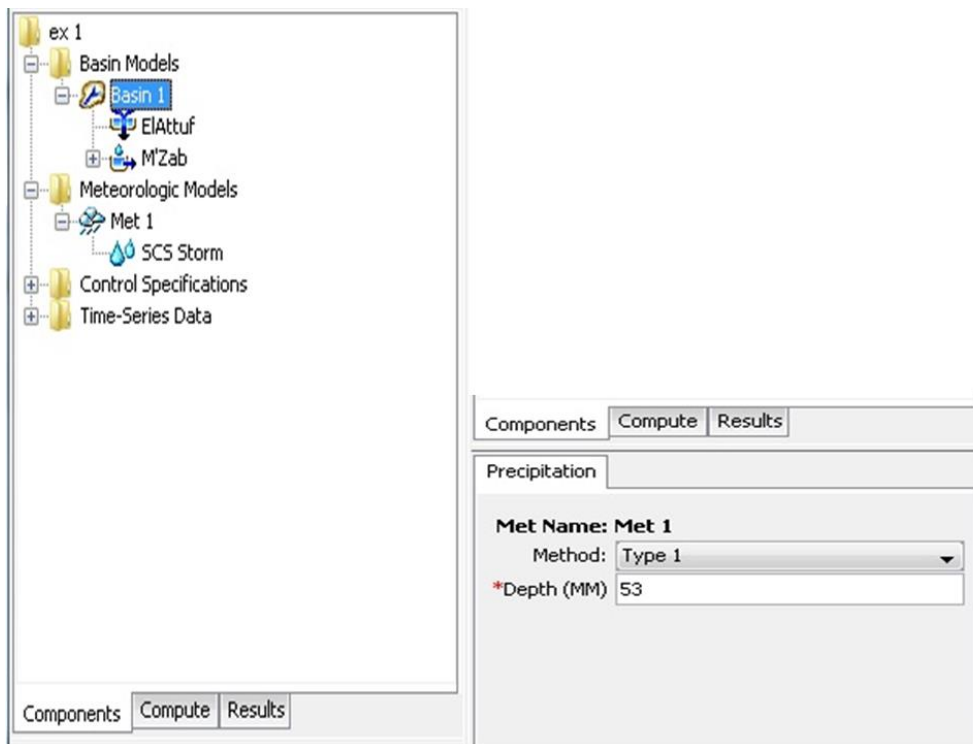


Fig.5.7. La méthode SCS, la hauteur totale de précipitation est 53mm, le type choisi est le type 1.

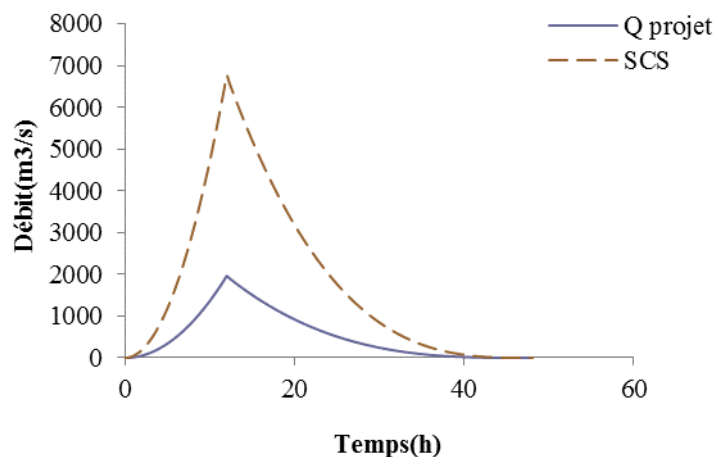


Fig.5.8. Hydrogrammes de crue selon la méthode SCS

Le débit est simulé à l'aide de HEC HMS. La valeur de débit est de $6778\text{m}^3/\text{s}$, est ce que cette valeur est suffisante ? La réponse est non, peut être les précipitations observées ne sont des valeurs exactes c'est-à-dire le prélèvement n'est pas sérieux.

a) La méthode hyétoigramme spécifiée

La méthode de hyétoigramme spécifiée permet à l'utilisateur de spécifier la série chronologique exacte à utiliser pour le hyétoigramme aux sous-bassins. Cette méthode est utile lorsque les données de précipitations seront traitées à l'extérieur du programme et essentiellement importés sans altération. Cette méthode est également utile lorsqu'une seule jauge de précipitation peut être utilisée pour représenter ce qui se passe sur la façon dont les données sont traitées. Cette méthode utilise des données de paramètres distincts pour chaque sous-bassin dans le modèle météorologique, mais tous les sous-bassins sont présentés dans une seule table. Chaque sous-bassin est indiqué sur une ligne distincte de la table.

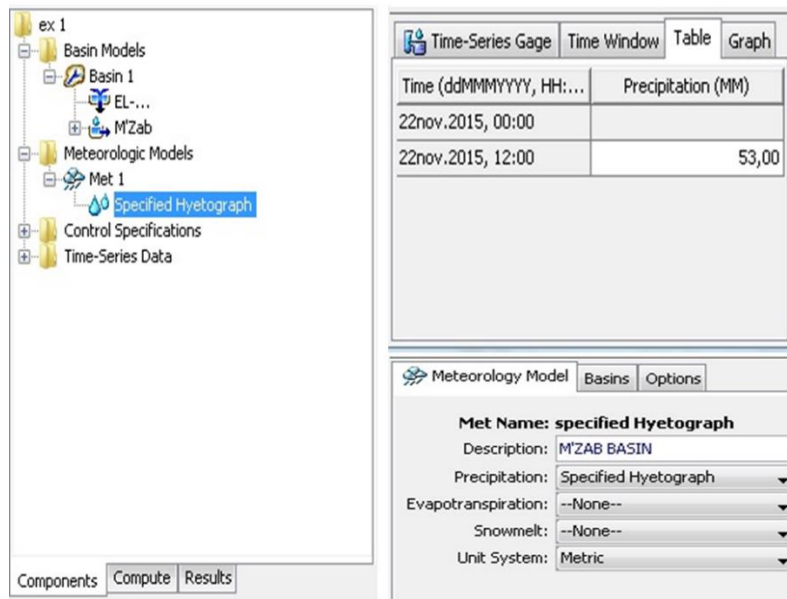


Fig.5.9. La méthode de l'hyétogramme spécifiée

Les données de précipitations sont le résultat d'un complexe calcul statistique extérieur au programme HEC-HMS.

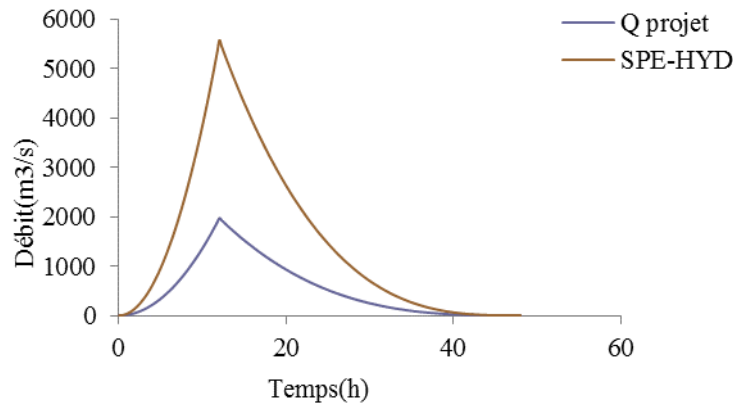


Fig.5.10. Hydrogrammes de crue selon la méthode SPE-HYD

Le débit est simulé à l'aide de HEC HMS. La valeur de débit est de $5583\text{m}^3/\text{s}$, la méthode de l'hyétogramme spécifiée donne des résultats mieux que la méthode SCS.

a) La méthode des averses fréquentielles

La méthode des averses fréquentielles est conçue pour produire une tempête synthétique à partir de données de précipitations statistiques. Cette méthode est conçue pour utiliser les données pour calculer un hyétogramme pour chaque sous-bassin. Cette méthode utilise les mêmes données de paramètres pour tout le sous-bassin dans le modèle météorologique. Chaque tempête a une seule probabilité de dépassement qui doit être choisi dans la liste des choix disponibles. Les choix vont de **0,2** à **50** pour cent et correspond généralement les cartes de précipitation qui sont couramment disponibles. La méthode de la fréquence des tempêtes est conçue pour accepter des données de précipitation de durée partielle comme cela est le type le plus commun. Cependant, le procédé est capable de calculer la production annuelle ou partielle durée. La durée de l'intensité spécifie la période de temps la plus courte de la tempête. Habituellement, la durée doit être égale au pas de temps de la simulation (24heurs). La durée de la tempête détermine combien de temps la précipitation va conserver. Si la durée de simulation est plus longue que la durée de la tempête, tout délai après la durée de la tempête n'aura nul.

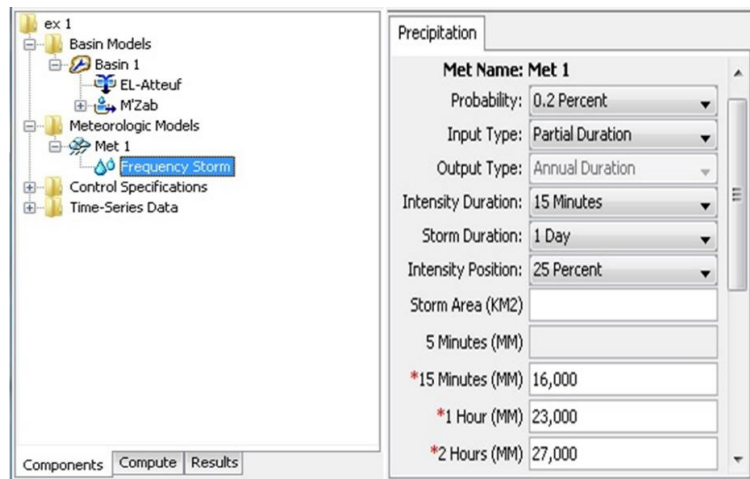


Fig.5.11. La méthode de la fréquence des tempêtes, les données sont les pluies de courtes durées. La probabilité de dépassement est de 0,2%.

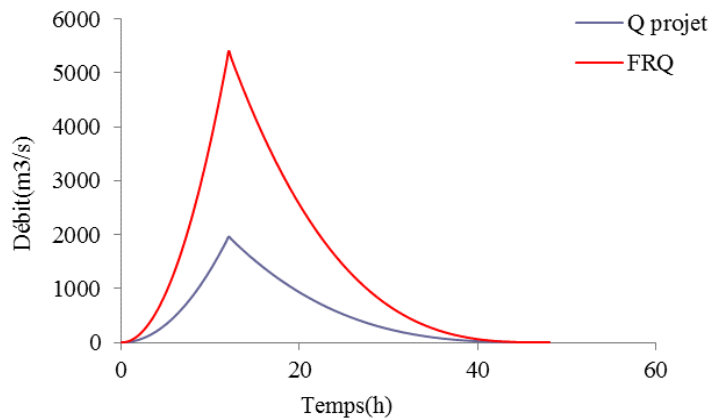


Fig.5.12. Hydrogrammes de crue selon la méthode FRQ

Le débit est simulé à l'aide de HEC HMS. La valeur de débit est de 5400m³/s, La méthode de la fréquence des tempêtes donne des meilleurs résultats par rapport la méthode SCS et la méthode de la fréquence des tempêtes. Le position de l'intensité détermine où dans la tempête de la période d'intensité maximale se produira. La modification du position ne change pas la profondeur totale de la tempête, il ne changer la façon dont la profondeur totale est répartie dans le temps lors de la tempête. Les positions de l'intensité sont : 25%, 33%, 50%, 67%, et 75% par rapport à la liste des choix. Si la durée de la tempête est sélectionnée à 6 heures et la position de 25% est sélectionné (le cas d'une averse comme le cas de la région de l'Algérie), l'intensité du pic se produira 1,5 heures après le début de la tempête. La sélection par défaut est de 50% (le cas de la France).

5.5) Couple AG-HEC HMS

L'objectif principal de l'utilisation des Algorithmes Génétiques est l'optimisation. Ces algorithmes donnent des résultats très satisfaisants dans les différents domaines de recherche d'optimisation. Pour la modélisation du comportement hydrologique du bassin du MZAB, les Algorithmes Génétiques donnent des valeurs acceptables des débits de crues calculées par les différents modèles empiriques. Ce point traite un couplage entre les algorithmes génétiques et le modèle hydrologique HEC-HMS.

On utilise dans cette étape, les valeurs de précipitations simulées par algorithmes génétiques, ces valeurs sont utilisées dans les différentes méthodes de l'HEC-HMS. On utilise dans ce point les valeurs de précipitations simulées par algorithmes génétiques, ces valeurs sont utilisées pour les différentes méthodes de l'HEC-HMS. On englobe les résultats obtenus par les différentes méthodes par le tableau cité au-dessous :

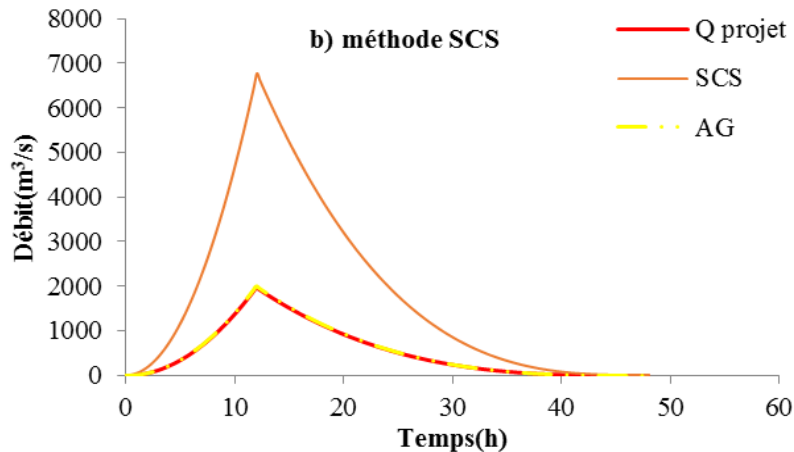
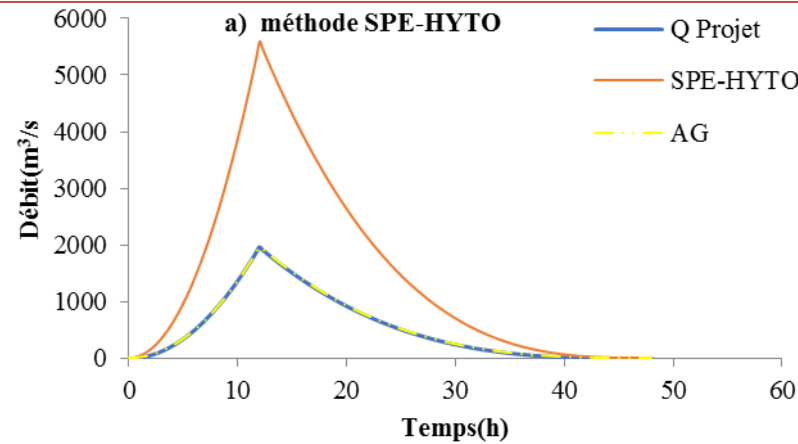
Tableau V.8: les valeurs de débits obtenus par l'utilisation du modèle hydrologique HEC-HMS, les résultats ne sont pas suffisants.

Méthode	SCS STORM	FRQ STORM	SPSF HYTO	Q PROJET
Q (m ³ /s)	6778	5400	5583	1967

Les résultats obtenus par l'utilisation des précipitations simulées par les Algorithmes Génétiques donnent des valeurs de débits acceptables. Ces valeurs sont citées dans le tableau au-dessous :

Tableau V.9: les valeurs de débits obtenus par le couplage AG- HEC-HMS, les résultats sont acceptables.

Méthode	SCS STORM	FRQ STORM	SPSF HYTO	Q PROJET
Q (m ³ /s)	1984,8	1388	1978,3	1967



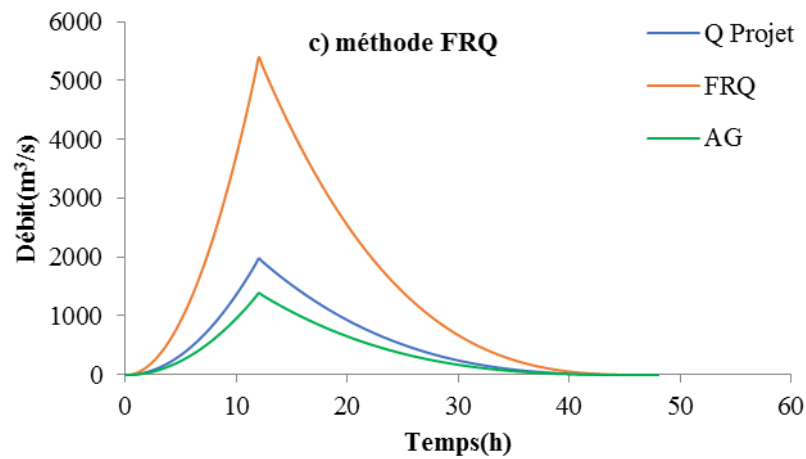


Fig.5.13. Hydrogrammes de crue, différents débits ont été calculés à l'aide de différentes méthodes : SCS, FRQ, SPE-HYTO.

5.6) La performance du couple AG-HEC HMS

La performance des modèles hydrologiques est validée par des paramètres statistiques. Les résultats obtenus par ces différentes méthodes sont résumés dans le tableau (V.10)

Tableau V.10 : les indicateurs de performances pour différents modèles

		Gumbel	Lognormale	Lognormale (3P)
MES	Ma-Gau	0.468	0.468	0.468
	Sokolovsky	2.235	1.120	2.312
	Possenti	0.014	0.294	0.025
	Turraza	1.376	0.408	1.448
	Giandotti	2.096	2.793	2.839
	Moy	0.967	0.493	1.103
RMES	Ma-Gau	0.126	0.126	0.126
	Sokolovsky	0.472	0.334	0.48
	Possenti	0.037	0.171	0.049
	Turraza	0.037	0.201	0.380
	Giandotti	0.457	0.528	0.532
	Moy	0.311	0.222	0.332
MAPE	Ma-Gau	38.39	38.39	38.39
	Sokolovsky	153.74	75.13	160.64
	Possenti	4.99	18.03	6.83
	Turraza	90.63	34.93	95.21
	Giandotti	141.98	209.94	215.38
	Moy	66.28	39.77	74.12
NSC	Ma-Gau	0.865	0.99998	0.99998
	Sokolovsky	0.479	0.99998	0.99998
	Possenti	0.996	0.99998	0.99998
	Turraza	0.646	0.99998	0.99998
	Giandotti	0.674	0.99998	0.99998
	Moy	0.738	0.99998	0.99998

Les indicateurs de performances utilisés dans cette thèse sont : L'erreur moyenne des carrés **MSE** (Mean Square Error), le coefficient d'efficacité de Nash–Sutcliffe **NSC** (Nash–Sutcliffe coefficient of efficiency), l'erreur root- moyenne-carrée- **RMSE** (Root-Mean-Square Error) et Erreur de pourcentage absolue moyenne **MAPE** (Mean Absolute Percentage Error) (NASH.J & SUTCLIFFE.J,1970 ; MOUSSOULIS.E et al, 2016).

Les résultats cités dans le tableau (V.10) montrent la bonne performance du couplage entre les algorithmes génétiques et le modèle HEC-HMS. Cette performance s'explique par le fait que l'algorithme génétique donne une valeur minimale de l'erreur lors de la génération et ses opérateurs (mutation et croisement). Cesont des outils puissants pour représenter son évolution en fonction du temps et, par conséquent, une meilleure estimation des débits.

Plusieurs études ont été publiées pour différents domaines, ces études utilisent Les indicateurs de performances pour tester la performance du modèle (ZAKHROUF.M et al, 2014 ; SENTAS.A, 2016 ; MOUSSOULIS.E et al, 2016), toutes ces recherches montrent la validité des résultats obtenus par l'utilisation de ces indicateurs de performances.

5.7) Conclusion

En conclusion le couplage entre les algorithmes génétiques et le système de modélisation hydrologique HEC HMS est efficace pour modéliser le comportement hydrologique du bassin du MZAB. La précision de la valeur des débits maximums dépend de la qualité des données observées sur les différentes stations installées le long du bassin. La qualité des résultats dépend fortement du bon choix des paramètres de l'Algorithme Génétique (nombre de génération, nombre de tests, croisement, mutation, mode de sélection, ...etc.).

La cause principale de l'utilisation des modèles empiriques, c'est l'absence des données hydrométriques, ces modèles nous donnent des valeurs acceptables des débits de projet afin de les utilisés dans le domaine de dimensionnement des ouvrages hydrauliques et dans les grands aménagements (déviation des cours d'eau principales, enherbement, ...etc.) qui nécessite une valeur de débit plus ou moins précise.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le couplage entre les algorithmes génétiques et le système de modélisation hydrologique HEC HMS est un nouveau modèle proposé et qui par son application, on peut dire qu'il est efficace pour modéliser le comportement hydrologique du bassin du MZAB. La précision de la valeur des débits maximums dépend de la qualité des données observées sur la station météorologique installée. La qualité des résultats dépend fortement du bon choix des paramètres de l'Algorithme Génétique (nombre de génération, nombre de tests, croisement, mutation, mode de sélection, ...etc.).

L'utilisation de certains modèles empiriques, avec l'absence des données hydrométriques, donne des valeurs moyennes acceptables des débits de projet, nécessaires pour le dimensionnement et aménagement des ouvrages hydrauliques (déviation des cours d'eau principales, enherbement, ...etc.). Cependant, il existe d'autres modèles empiriques qui peuvent être utilisés. Les modèles appliqués (la formule de Mallet-Gauthier, la formule de Sokolovsky, la formule Giandotti, et la formule de Possenti) sont appliqués et testés dans la région du MZAB sous la condition d'optimisation des données météorologiques à l'aide des algorithmes génétiques.

Ce travail, repose sur une technique d'optimisation pour l'étude du comportement hydrologique d'un bassin versant. Cette technique est un couplage entre les Algorithmes Génétiques et le système de modélisation hydrologique. Cette étude sur la modélisation hydrologique des bassins versants non jaugés est d'une importance capitale vu que plusieurs difficultés sont rencontrées le long de cette recherche. Le problème majeur est la récolte des données hydrométriques, ces données sont fournies par les différents services d'eau (l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, l'Office Nationale Météorologique, ...etc.). L'intérêt principal de l'utilisation de ces données observées est le calage des modèles hydrologiques utilisés.

L'étude de l'optimisation des précipitations et de leurs impacts hydrologiques correspondants à l'aide d'un couplage entre les algorithmes génétiques et le système de modélisation hydrologique HEC-HMS est validée et étalonnée dans la zone d'étude du MZAB. L'évaluation du couplage a montré qu'il pourrait être utilisé comme un outil pour étudier le comportement hydrologique de la zone d'étude. Le couplage AG-HEC-HMS est recommandé pour l'aide à la décision, pour la planification et la gestion des ressources en eau, car il est capable de générer des données quantitatives qui pourraient fournir des informations utiles aux gestionnaires et décideurs afin de développer scientifiquement les projets de protection des agglomérations contre les risques naturels et de minimiser les impacts environnementaux négatifs.

L'analyse hydrologique par le couplage AG-HEC-HMS est importante pour comprendre la variation réelle des précipitations et le facteur de contrôle de l'inondation dans une région aride.

Dans cette thèse, l'efficacité du couplage AG-HEC-HMS garantit des solutions acceptables. Cette méthode est évaluée dans l'estimation des débits d'un bassin versant pour les données météorologiques de durée fixe. Dans ce travail et pour le bassin MZAB, des codes informatiques ont été développés pour optimiser trois types de précipitations (précipitations moyennes annuelles, précipitations journalières maximales et précipitations à court terme) dans un régime hydrologique particulier (zone aride) à l'aide du couplage AG-HEC-HMS.

L'applicabilité, l'adéquation et la robustesse des codes développés ont été testées à l'aide d'une série de données plus ou moins longue. Les débits de projet ont été comparés à ceux obtenus par

le couplage AG-HEC-HMS. Sur la base des résultats de cette étude, on peut dire que le couplage AG-HEC-HMS est une technique efficace et fiable pour estimer les débits inondables des bassins versants, en particulier dans le cas de son premier test au bassin du MZAB. L'analyse de sensibilité suggère qu'une valeur de taux d'inondation a été obtenue par la technique de couplage AG-HEC-HMS, qui a donné une valeur minimale de la fonction objective. Le programme en MATLAB développé dans cette étude, peut servir d'outil d'enseignement, de recherche et de décision. Ce programme devrait également être utile pour la pratique des hydrologues.

La région du MZAB est une région inondable, pour cela l'installation des stations hydrométriques et la maîtrise de l'urbanisation de la vallée du MZAB sont indispensables pour éviter la vulnérabilité de cette région au risque d'inondation.

En plus, une seule station météorologique installée pour un bassin versant de superficie importante est insuffisante, on recommande donc l'augmentation de nombre de stations météorologiques et l'installation des stations hydrométriques pour mieux comprendre la variation des précipitations.

En conclusion, on peut dire que le couplage AG-HEC-HMS est fiable, robuste et efficace pour estimer les débits de crues à partir de données météorologiques. Avec la disponibilité des ordinateurs de haute vitesse et de haute capacité, l'inconvénient d'un temps de calcul plus long est résolu. L'utilisation du couplage AG-HEC-HMS est recommandée pour déterminer les débits d'inondation d'un bassin hydrographique à partir de données météorologiques à la place des logiciels complexes et difficiles, encombrants et subjectifs.

Enfin, le couplage entre les Algorithmes Génétiques et le système de modélisation hydrologique restent un bon moyen et une technique efficace pour l'optimisation. A ce titre, nous tenons à rappeler que cette technique exige des données précises et fiables. On pense que l'application de couplage entre les Algorithmes Génétiques et le système de modélisation hydrologique dans le domaine de l'hydrologie doit être appliquée et testée sur d'autres cas forts différents.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- ABDELHAMID.K,2016, Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de Tadjnant –Chelghoum Laid et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines, Thèse de doctorat, Université BATNA 2.
- AMANI, A. & Lebel, T, 1998, Relationships between point rainfall, average sampled rainfall and ground truth at the event scale in the Sahel. *Stochastic Hydrol. Hydraul.* 12 (1998) 141–154.
- AYADI.I, BOUILLAUT.L, AKNIN.P, SIARRY.P, 2010, Optimisation par algorithme génétique de la maintenance préventive dans un contexte de modélisation par modèles graphiques probabilistes. Institut Pour la Maitrise des Risques. *Lambda Mu 17*, 17ème Congrès de Maitrise des Risques et de Sureté de Fonctionnement, Oct 2010, La Rochelle, France. 10p- hal-00615219.
- BADR.L & al, 2012, détermination des crues de projet par les aspects du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue au niveau de la commune ain boukellal, bassin versant de l'oued larbaa, maroc, *European Scientific Journal*,8(29) (2012) 209-220.
- BEIRLANT.J, GOEGEBEUR.Y, TEUGELS.J, SEGERS.J, 2004. *Statistics of extremes. Theory and applications.* Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley.
- BENTEKHICI.N,2006, Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie) conférence francophone ESRI, 11-12 october -issy moulineau.
- BERCHTOLD.A,2014, Données longitudinales et modèles de survie, Modèles paramétriques, Cours de Master, Université de Genève.
- BOURGIN.F, 2014, Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants, Thèse de Doctorat, université AgroParisTech.
- CHAPONNIER.A, 2005, fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain), Thèse de doctorat,Ecole Doctorale ABIES.
- CHARLES.P ,2000, Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse de Doctorat, institut national polytechnique de grenoble.
- CHKIR.N, 1994, Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- COLES.S., 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values.* Springer Series in Statistics, ed. Springer-Verlag. London: Springer-Verlag. 210 p.

- CRACKEN.M & PERRY.J, Hydrologic Cycle, The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change 1(2002) 450–464.
- CREUTIN.J, OBLED.C,1982, Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparaison. Water Resour. Res. 18(2) (1982) 413–431.
- FURUSHO.C, 2011, Modélisation hydrologique des bassins versants periurbains, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- DANIEL.E, CAMP.J, LEBOEUF.E, PENROD.J, DOBBINS.J, ABKOWITZ.M, Watershed modeling and its applications: a state-of-the-art review, Open Hydrol. J., 5 (2011) 26–50.
- DELHOMME.J, Application de la théorie des variables régionalisées dans le domaine des sciences de l'eau. Bull. du BRGM (2ème série) Session III, 4 (1978) 341–375.
- DENIS.M, 2011, Du drain potentiel au drain réel : Utilisation de données satellitales à très haute résolution pour l'étude de l'origine géomorphologique des chemins de l'eau sur des bassins versants méditerranéens soumis aux crues éclair, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Saint-Etienne
- DIDIER & al, Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG, Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 26 (1) (2013) 65-78.
- DJERBOUA.A,2001, prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les alpes franco-italiennes prévision quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues, Thèse de Doctorat, institut national polytechnique de grenoble.
- DUBREUIL.P,1974, initiation à l'analyse hydrologique, O.R.S.T.O.M,France.
- EMBRECHTS.P, KLÜPPELBERG.C, MIKOSCH.T, 1997. Modelling extremal events for insurance and finance. Stochastic modelling and applied probability. Springer. 648.
- FAYE.C, Méthode d'analyse statistique de données morphométriques : corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l'écoulement des sous-bassins du fleuve Sénégal. Cinq Continents 4 (10) (2014) 80-108.
- FERNANDEZ.W, VOGEL.R & SANKARASUBRAMANIAN.A, Regional calibration of a watershed model, Hydrological Sciences Journal, 45(5) (2000) 689-707.
- FOUCHIER.C, 2010, Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues, Thèse de Doctorat, l'université montpellier II.

- GARNIER.H, GILSON, M, BASTOGNE.T, ALAIN.R, Identification de modèles paramétriques à temps continu à partir de données expérimentales. *Techniques de l'Ingenieur, Techniques de l'ingénieur*, 2007, pp.S7 140. hal-00151330.
- GRAHAM.D & BUTTS.M, 2005, Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE. In *Watershed Models*, Eds. V.P. Singh & D.K. Frevert Pages 245-272, CRC Press. ISBN: 0849336090.
- HAFNAOUI.M et al, vulnérabilité aux inondations dans les régions sahariennes - cas de DOUCEN, *Journal Algérien des Régions Arides*, N° Spécial (2013) 148-155.
- HALWATURA.D, NAJIM.M, 2013, Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment *Environmental Modelling & Software* 46 (2013) 155-162.
- HOSSAM.A & Ali El-Hadi.H,2009, parameter estimation of pumping test data using genetic algorithm, Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC 13 2009, Hurghada, Egypt.
- IONAC N et al,2015, évaluation des phénomènes de dessèchement et de sécheresse dans la zone continentale du plateau de la dobroudja du sud, XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège.
- JENIFFER.K, 2011, Planning of system innvations in watersheds : spatial mapping of environmental and hydrological determinants in the pangani and upper ewaso Ng'iro North river basins,Africa, Thèse de doctorat , université de Twente.
- LANNI.C, 2012, Hydrological controls on the triggering of shallow landslides: from local to landscape scale, Thèse de doctorat, Doctoral School in Environmental Engineering Trento.
- LOUISE MUL.M,2009, Understanding Hydrological Processes in an Ungauged Catchment in sub-Saharan Africa, Thèse de doctorat, Delft University of Technology.
- LOUKAS.A & VASILIADES.L,Streamflow simulation methods for engaging and poorly gauged watersheds, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14 (2014) 1641–1661.
- MATHEVET.T, 2005, quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants, Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts Centre de : Paris Centre de : Paris.
- MEDEJERAB.A, les inondations catastrophiques du mois d'octobre 2008 à Ghardaïa- Algérie, *Géographia Technica*. Numéro spécial, 4(2009) 311-316.

- MORADKHANI.H, HSU.K, GUPTA.H, SOROOSHIAN.S, Improved streamflow forecasting using self-organizing radial basis function artificial neural networks, *J. Hydrol.*, 295 (2004) 246–262.
- MORIASI.D, ARNOLD.D, VAN LIEW.M, BINGNER.R, HARMEL.R, VEITH.T, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 50 (2007) 885–900.
- MORIN.S et al, An 18-yr long (1993–2011) snow and meteorological dataset from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m alt.) for driving and evaluating snowpack models, *Earth Syst. Sci.*4 (2012) 13–21.
- MOURET.C,1979, contribution à l'étude hydrologique d'un bassin versant en milieu volcanique tropical , Rivier CAPOT (Martinique) , Thèse de Doctorat, Université du Langudoc.
- MOUSSOULIS.E, ZACHARIAS.I, NIKOLAIDIS.N, Combined hydrological, rainfall–runoff, hydraulic and sediment transport modeling in Upper Acheloos River catchment, *Desal. Wat. Treat.*, 57 (2016) 11540–11549.
- MUSY.A,2005, Cours "Hydrologie générale", Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM), Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE), Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL).
- NASH.J & SUTCLIFFE.J, River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10 (1970) 282–290.
- OUACHANI.R, ZOUBEIDA BARGAOUL.Z, TAHA OUARDA.T, Intégration d'un filtre de Kalman dans le modèle hydrologique HBV pour la prévision des débits, *Hydrological Sciences Journal*52(2) (2007) 318-337.
- OVEREEM.A,2009, Climatology of extreme rainfall from rain gauges and weather radar, Thèse de Doctorat, Wageningen University, Wageningen, NL.
- PUSHPALATHA.R,2013, Low-flow simulation and forecasting on French river basins: A hydrological modelling approach. Earth Sciences. Thèse de doctorat, AgroParisTech.
- RANDRIANASOLO.A, 2012, Generalization of the Overall Approach to Hydrological Forecasting in Ungauged Catchments, Thèse de doctorat, université AgroParisTech.
- RICHARD.H et al, 2002, Highway Hydrology Hydraulic Design Series Number 2, Second Edition, National Highway Institute, Virginia USA.
- ROCHE.M, 1996, Crue de projet de l'oued M'Zab à Ghardaia Sahara algérien, Rapport d'étude, Bureau d'études BG, suisse pp.7-15.

- SAMUEL.M & MADAN K, 2003, Estimation of Aquifer Parameters from Pumping Test Data by Genetic Algorithm Optimization Technique, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(2003) 348-359.
- SCHARFFENBERG.A, MATTEW.J, 2005, Hydrologic modeling system, HEC-HMS, User's manual, CPD-74A.
- SCHARFFENBERG.W et al, 2010, hydrologic modeling system (hec-hms): physically-based simulation components, 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010.
- SENTAS.A, PSILOVIKOS.A, PSILOVIKOS.T, MATZAFLERI.N, Comparison of the performance of stochastic models in forecasting daily dissolved oxygen data in dam-Lake Thesaurus, *Desal. Wat. Treat.*, 57 (2016) 11660–11674.
- SIVAPALAN et al, 2003, Downward approach to hydrological prediction, *Hydrol. Process.* 17(2003) 2101– 2111.
- ST-HILAIRE.A, 2005, Analyse fréquentielle des précipitations des stations de Montréal et Shawinigan. Rapport de recherche, R832, Institut national de la recherche scientifique (INRS) Centre Eau, Terre et Environnement, Québec, Canada.
- TRIEU et al, 2013, Optimizing Parameters for Two Conceptual Hydrological Models Using a Genetic Algorithm: A Case Study in the Dau Tieng River Watershed, Vietnam, *JARQ*47(1), pp.85-96.
- UJJWAL.M & SANGHA.M, Genetic algorithm-based clustering technique. *Pattern Recognit.*, 33 (2000) 1455–1465.
- VANNIER.O, 2013, Contribution of Regional Hydrological Modeling to the Understanding of Flood Processes in the Mediterranean Area, Thèse de doctorat, University of Grenoble.
- VERSINI.P, 2007, Monitoring of Diffuse Hydrological Risk Along Road Routes, Thèse de doctorat, National School of Bridges and Highways.
- WANDERS, 2015, Hydrological extremes: Improving simulations of flood and drought in large river basins, Thèse de doctorat, Utrecht University.
- WEICHENG.W, 2003, Application de la géomatique au suivi de la dynamique environnementale en zones arides, Thèse de doctorat, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.
- YAHIAOUI.A, 2012, Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérables en Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès), Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique.

YAMANI.K & al, Mapping of vulnerability of flooded area in arid region. Case study: area of Ghardaïa, Model. Earth Syst. Environ. (2016) 2-147

YEVJEVIEH.V,1987, Stochastic models in hydrology, Stochastic Hydrol. Hydraul. 1 (1987) 17-36.

ZAKHROUF.M, CHETTIH.M, MESBAH.M, Adaptive neural fuzzy inference systems for the daily flow forecast in Algerian coastal basins, Desal. Wat. Treat. 52 (2014) 2131–2138.

<http://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/10/cartegeographiqueGHARDAIA.html>

http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/B.23 - Mod%C3%A8les_hydrologiques_empiriques

<http://www.syndicat-gartempe.fr/la-gartempe-et-ses-affluents/le-bassin-versant/>

<http://www.aquaveo.com/software/wms-hec-hms>