

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté d'Architecture et de Génie Civil

Département d'Hydraulique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité: Hydraulique

Par

MOKHTARI EI Hadj

Thème :

***Impact de l'érosion hydrique sur l'envasement
du barrage Ghrib***

Soutenu publiquement le : 16 / 03 / 2017

EZZIANE Karim

Professeur à l'Université de Chlef

Président

REMAOUN Mohamed

Professeur à l'Université de Chlef

Examineur

HABI Mohamed

Professeur à l'Université de Tlemcen

Examineur

MERZOUK Belkacem

Professeur à l'Université de M'sila

Examineur

REMINI Boualem

Professeur à l'Université de Blida

Rapporteur

HAMOUDI Saaed Abdelamir

Professeur à l'Université de Chlef

Co-Rapporteur

Résumé

Le bassin versant de l'oued Cheliff- Ghrib est caractérisé par un climat semi-aride. Les sols sont de plus en plus dégradés et les sédiments issus de l'érosion contribuent à l'envasement de la retenue du Barrage Ghrib.

L'analyse d'érosion hydrique et de transport de sédiment ont été réalisés pour développer un ensemble d'éléments et d'outils de prise de décisions pour une gestion durable du barrage Ghrib. Une description de l'ensemble des paramètres géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et climatiques du bassin versant a été réalisée. L'analyse quantitative et qualitative des débits liquides et des débits solides mesurés au niveau de la station hydrométrique à l'amont du barrage Ghrib a permis d'observer des relations entre le transport solide et leurs débits liquides. Le modèle pluies - débits par HEC HMS a été élaboré pour prédire la réponse hydrologique du bassin à des scénarios de changement de climat et d'occupation du sol.

L'intégration des cartes thématiques des différents facteurs de l'Equation universelle de pertes en sol USEL dans le système d'information géographique (ARC GIS) avec leurs bases de données, a permis d'une manière rapide et efficace d'éclaircir la complexité et l'interdépendance des facteurs dans l'analyse des risques d'érosion. Les techniques de SIG et les données provenant de la télédétection ont été utilisées avec succès pour déterminer les facteurs d'érosion des sols.

La carte de pertes en sols résultante, avec un taux d'érosion moyen de 18,31 t/ha/an montre une faible érosion (<7.41t/ha/an) qui couvre 28.24% de la superficie totale du bassin, et une érosion moyen (7.41 à 19.77t/ha/an) qui représente 35,64% de la superficie. Les zones à taux d'érosion forte dépassant les 30 t/ha/an couvrent plus de 16% de superficie du bassin.

Mots clés : Erosion - Transport solide, Modélisation- USEL-SIG- Oued Cheliff-Ghrib

Abstract

The watershed of wadi Chelif-Ghrib is characterised by a semi-arid climate. Soils are more and more degraded and sediments derived from erosion contribute to the withholding sloughing of the Ghrib's dam.

Water erosion analysis and sediment transport have been carried out to develop a set of elements and decision- making tools for sustainable management of the Ghrib's dam. Description of the whole parameters: geomorphologic, geological, hydrological and climatic of the watershed was carried out. Quantitative and qualitative analysis of liquid flows and solid flows measured at level of the hydrometric stations upstream of the Ghrib's dam allowed observing relationship between solid transport and their liquid flows. The rain- flow model by HEC HMS has been developed to predict the basin's hydrological answer to the climate changes and land use.

Thematic maps integration of different factors of the Universal Soil Loss Equation in geographic information system (ARC GIS) with their database, allowed with a rapid and efficient manner to illuminate complexity and factors interdependence in the erosion risks analyses. The SIG techniques and remote sensing data have been used successfully to determine soil erosion factors.

The resulting map for soils losses, with an average erosion rate of 18.31 t /ha/year shows a weak erosion (<7.41t/ha/year) which covers 28.24% of the total area of the basin, and a medium erosion (7.41 to 19.77t/ha/year), which represents 35.64% of the area. Areas with high erosion rates exceeding 30 t/ha/year cover more than 16% of the basin area.

Key Words: Erosion – Solid transport – Modeling – USEL – SIG – Wadi Cheliff Ghrib

ملخص

يتميز الحوض المائي لشلف غريب بمناخ شبه جاف حيث التربة متدهورة على نحو متزايد والرواسب الناتجة عن التعرية تساهم في تراكم الطمي في خزان سد غريب.

تحاليل التآكل المياه ونقل الرواسب تم انجازها من أجل التطرق الى مجموعة من العناصر والادوات و من أجل اتخاذ قرارات لتسيير مستدام لسد غريب. تم إجراء وصف لجميع المعطيات الجيومورفولوجية والجيولوجية والهيدرولوجية والمناخية للحوض المائي. التحليل الكمي والنوعي للتدفقات السائلة والتدفقات الصلبة المأخوذة من المحطة الهيدرومترية أمام سد غريب يسمح لنا بملاحظة العلاقات الموجودة بين نقل الرواسب والتدفقات السائلة . النموذج تساقط - تدفق ب HEC HMS أنجز من أجل التنبؤ بالاستجابة الهيدرولوجية للحوض عن طريق سيناريوهات تغير المناخ ومكونات التربة.

تم دمج خرائط موضوعية لمختلف عوامل المعادلة العالمية لفقدان التربة USEL في نظام المعلومات الجغرافية (ARC GIS) مع قواعد البيانات الخاصة بهم، بطريقة سريعة وفعالة لتوضيح التعقيد والترابط بين العوامل في تحليل مخاطر الانجراف . تقنيات نظم المعلومات الجغرافية وبيانات الاستشعار عن بعد استخدمت بنجاح لتحديد عوامل انجراف التربة. خريطة انجراف التربة المتحصل عليها، حيث متوسط معدل التعرية 18.31 طن/هكتار/سنة يظهر تعرية ضعيف (<7.41 طن/هكتار/سنة) والتي تغطي 28.24% من المساحة الكلية للحوض، وتعرية متوسط (7.41 - 19.77 طن/ هكتار/ سنة)، وهو ما يمثل 35.64% من المساحة. المناطق التي تشهد معدلات تعرية عالية تزيد عن 30 طن/ هكتار/ سنة تغطية أكثر من 16% من مساحة الحوض.

كلمات مفتاحية : تعرية، نقل الرواسب، النمذجة، USEL، SIG، واد شلف غريب

Dédicaces

A mes parents

A ma femme qui, avec son dévouement et ses sacrifices, ce travail a pu voir le jour.

*A mes enfants **HANANE, ABDERAHMANE et YUCEF.***

A toute ma famille et ma belle famille

A mes amis

Je dédie cette Thèse.

MOKHTARI ELHADJ

Remerciements

Avant tous, je remercie الله tout puissant qui m'a guidé tout au long de ma vie, qui m'a permis de m'instruire et d'arriver aussi loin dans mes études, qui m'a donné courage et patience pour passer tous les moments difficiles, et qui m'a permis d'achever ce travail.

Je remercie tout particulièrement mes encadreurs :

Professeur **REMINI Boualem** et **HAMOUDI Saaed Abdelamir**. Je tiens à leur exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien avec lequel ils m'ont guidé et encouragé, et pour m'avoir permis de terminer ce travail dans les meilleures conditions.

Le professeur **REMINI** est remercié pour son engagement et son soutien fidèle. Il a tiré la ligne du chemin que j'ai suivi au cours de ce travail. Il m'a aidé et m'a fourni de précieux conseils, pour bien finaliser cette thèse.

Le professeur **HAMOUDI** est remercié pour son engagement et son soutien fidèle.

Mes remerciements vont également à **Mr EZZIANE Karim** pour m'avoir fait l'honneur et l'immense plaisir d'accepter de présider le jury.

Je remercie chaleureusement **Mr REMAOUN Mohamed** qui a accepté de faire partie du jury.

Je tiens également à remercier **Mr HABI Mohamed** qui a bien voulu être membre de ce jury.

Je remercie également **Mr MERZOUK Balkacem** qui a accepté d'examiner ce travail.

Mon profond respect va à mes enseignants de la graduation de département d'hydraulique de Chlef, en particulier, Monsieur Hamoudi S, Monsieur Ezziane K, Monsieur Remaoun M, Monsieur Benaouda H. Pour leurs conseils, orientations et aides.

Mes sincères remerciements vont à mes confrères Messieurs Hemmaz, Berghout A, Merzouk B, Nebbar M, Marouf N., Sekiou F., Lakhel M., Kchida S, Pour leurs services et encouragements.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui m'ont facilité le long travail nécessité par cette étude à savoir :

Mme ABDA, chef de service de l'ANRH d'Alger et monsieur BOUCHOUL, ANRH d'Alger
Monsieur BENMASSOUD, ANRH de Blida pour avoir mis à ma disposition la documentation technique,

Mme Mokhtari, ainsi que tous les membres de ma famille pour le soutien moral même lors des moments difficiles.

MOKHTARI El Hadj

Sommaire

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
ملخص.....	iii
Dédicace.....	iv
Remerciements.....	v
Sommaire.....	vi
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des photos.....	xvi
Liste des abréviations.....	xvii
Introduction générale.....	1

Chapitre 1. Recherche bibliographique sur l'érosion

1.1. Introduction.....	6
1.2. Effets visibles de l'érosion hydrique.....	7
1.3. Les processus de l'érosion hydrique.....	7
1.3.1. Détachement des particules de sol.....	8
1.3.2. Transport des particules.....	9
1.3.3. Dépôt.....	12
1.4. Conséquences de l'érosion hydrique.....	12
1.4.1. Conséquences d'érosion hydrique en zones érodées.....	12
1.4.2. Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts.....	13
1.5. Les différents types d'érosion.....	13
1.5.1. L'érosion éolienne.....	13
1.5.2. L'érosion aratoire ou mécanique sèche.....	14
1.5.3. L'érosion hydrique.....	14
1.6. Causes d'érosion et facteurs de résistance du milieu.....	17
1.7. L'impact de l'érosion dans différentes régions.....	17
1.8. Evaluation de l'érosion hydrique.....	19
1.8.1. Formule de Henin 1950.....	19
1.8.2. Formule de Grivilovic 1960.....	20
1.8.3. Formule de l'A.N.R.H 1970.....	21
1.8.4. Formule de Tixeront 1960.....	21
1.8.5. Formule de Fournier 1960.....	22
1.8.6. Mesures de débits liquides et solides à l'exutoire des bassins versants.....	22
1.8.7. Utilisation des systèmes d'information géographiques SIG.....	23
1.8.8. Utilisation de l'imagerie satellitale.....	23
1.8.9. Modélisation d'érosion hydrique.....	24
1.9. Rappel bibliographique des travaux sur l'érosion en Algérie.....	31
1.10. Envasement des barrages.....	34
1.10.1. Définition.....	34
1.10.2. Problématique de l'envasement.....	35
1.10.3. Les moyens de lutte contre l'envasement des barrages.....	39
1.11. Conclusion.....	41

Chapitre 2. Description de la zone d'étude

2.1. Introduction	42
2.2. Présentation générale.....	42
2.3. Situation Géographique.....	42
2.4. Morphologie du bassin.....	44
2.4.1. Caractéristiques climatiques.....	44
2.4.1.1. Température de l'air	45
2.4.1.2. La gelée blanche.....	46
2.4.1.3. L'humidité.....	46
2.4.1.4. Le Sirocco	47
2.4.1.5. Le vent.....	47
2.4.2. Caractéristiques physiques	47
2.4.2.1. Géologie du bassin	47
2.4.2.2. Impact de la géologie sur l'hydrologie.....	49
2.4.2.3. Végétation du bassin versant.....	49
2.4.3. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant.....	50
2.4.3.1. Les Caractéristiques morphométriques	50
2.4.3.2. Caractéristiques du relief.....	51
2.5. Paramètres du réseau hydrographique.....	56
2.5.1. Densité de drainage D_d	56
2.5.2. Coefficient de torrencialité (C_t)	57
2.6. Conclusion.....	59

Chapitre 3. Analyse des précipitations et des écoulements

3.1. Introduction	60
3.1.1 Aperçu sur le climat de l'Afrique du Nord	60
3.1.2 Aperçu sur le climat de l'Algérie	61
3.2. Etude des précipitations	61
3.2.1. Analyse des pluies sur l'ensemble du bassin versant.....	63
3.2.2. Analyse en composantes principales (A.C.P)	65
3.2.3. Ajustement des précipitations à une loi de probabilité	71
3.3. Analyse des écoulements	77
3.3.1. Débits Moyens Annuels	77
3.3.2. Etude statistique des modules	80
3.4. Conclusion.....	82

Chapitre 4. Modélisation pluies-débits par le modèle HEC-HMS

4.1. Introduction	83
4.2. Présentation du modèle HEC-HMS	84
4.2.1. Module de gestion du modèle de bassin (Basin Model Manager).....	85
4.2.2. L'organisation du modèle.....	86
4.2.2.1. Le module structural du bassin.....	86
4.2.2.2. Le module météorologique.....	86
4.2.2.3. Le module de la fonction de production.....	87

4.2.2.4. Le module de la fonction de transfert.....	88
4.2.2.5. Le module du débit de base.....	90
4.2.2.6. Le module de routage.....	91
4.2.2.7. La fonction objective.....	91
4.2.2.8. La fonction d'optimisation automatique.....	92
4.3. La modélisation du bassin avec HEC-HMS.....	93
4.3.1. Les données d'entrée du modèle.....	93
4.3.1.1. Le modèle numérique du terrain.....	93
4.3.1.2. Occupation du sol.....	93
4.3.1.3. La donnée pluie.....	96
4.3.2. L'élaboration du modèle.....	97
4.3.3. Résultats de simulation.....	98
4.3.4. La calibration du modèle.....	102
4.3.5. Résultats détaillés du premier essai de validation.....	107
4.3.6. La validation du modèle.....	110
4.4. La prédiction du comportement futur du Cheliff-Ghrib.....	113
4.4.1. Introduction.....	113
4.4.2. Scénario 1 : Les averses quantiles.....	113
4.4.2.1. Les données d'entrée.....	113
4.4.2.2. Les résultats de la simulation.....	114
4.4.3. Scénario 2 : Changement dans l'occupation du sol dans un sens négatif.....	117
4.4.3.1. Les données d'entrée.....	117
4.4.3.2. Les résultats de la simulation.....	118
4.4.4. Scénario 3 : Changement dans l'occupation du sol dans un sens positif.....	119
4.4.4.1. Les données d'entrée.....	119
4.4.4.2. Les résultats de la simulation.....	119
4.5. Conclusion.....	120

Chapitre 5. Modélisation et quantification du transport solide en suspension

5.1 Introduction.....	121
5.2. Evolution des débits solides en fonction des débits liquides.....	121
5.2.1. Approche et méthodologie.....	122
5.2.2. Relation débit liquide instantané- débit solide instantané.....	122
5.2.2.1. Ensemble des données (Relation interannuelle).....	122
5.2.2.2. Relation mensuelle.....	123
5.2.2.3. Relation saisonnière.....	127
5.2.2.4. Relation saison sèche – saison humide.....	129
5.2.3. Interprétation des résultats.....	131
5.3. Quantification des apports solides et l'érosion spécifique.....	131
5.3.1. Généralité.....	131
5.3.2. Quantification des apports solides et l'érosion spécifique.....	132
5.3.3. Recherche de relations entre le taux d'érosion spécifique annuel et quelques paramètres hydro-climatologique.....	143
5.3.3.1. Corrélation entre l'érosion spécifique et la lame d'eau ruisselée.....	143
5.3.3.2. Corrélation entre l'érosion spécifique et le débit moyen annuel :.....	144
5.3.3.3. Comparaison des résultats d'étude avec le levé bathymétrique du barrage Ghrib.....	145
5.4. Conclusion.....	146

Chapitre 6. Cartographie de l'érosion hydrique par télédétection et SIG

6.1 Introduction.....	147
6.2. Méthode d'évaluation de l'érosion utilisée	147
6.2.1. L'équation universelle de perte en sol USLE.....	149
6.2.2. Traitement des images satellitaires	151
6.2.3. Transformation des images et production d'images non spectrales.....	153
6.3. Résultats et discussion.....	155
6.3.1. Calcul du facteur d'agressivité des précipitations : R.....	155
6.3.2. Détermination du Facteur topographique (LS)	157
6.3.3. Détermination du facteur d'érodibilité des sols K	162
6.3.4. Pratique anti-érosive (P).....	165
6.3.5. Occupation des sols (C).....	167
6.3.6. Risque érosif.....	171
6.4. Analyse statistique de différents facteurs.....	174
6.5. Les étapes de répartition du bassin en sous bassin par HEC-GEO-HMS	175
6.6. Comparaison avec les études réalisées sur le bassin versant de Cheliff	184
6.7. Conclusion.....	185

Chapitre 7. Envasement du barrage Ghrib et les moyens de lutte contre l'érosion hydrique

7.1. Introduction	186
7.2. Description de la zone d'étude	186
7.2.1. Situation géographique de barrage Ghrib.....	186
7.2.2. Bref historique sur le déroulement des travaux du barrage.....	187
7.2.3. Caractéristiques techniques du barrage	188
7.3. Evolution dans le temps de l'envasement du barrage Ghrib	188
7.4. Comparaison de l'envasement annuel mesuré et calculé	190
7.5. Les moyens de lutte contre l'envasement du barrage Ghrib	191
7.5.1. Réalisation de barrage de décantation.....	191
7.5.2. L'augmentation de stockage du barrage Ghrib	191
7.6. Moyens de lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages en Algérie	192
7.6.1. Actions palliatives	193
7.6.2. Actions Curatives	193
7.6.3. Actions préventives.....	193
7.7. Conclusion.....	194
Conclusion générale.....	195
Références bibliographiques.....	198
Annexes.....	210

Liste des figures

Chapitre 1. Recherche bibliographique sur l'érosion

Figure 1.1. Processus de l'érosion hydrique (Cheggour.A, 2008)	8
Figure 1.2. Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies.....	9
Figure 1.3. Diagramme de Hjulstrom.....	11
Figure 1.4. Mode de transport des particules dans les cours d'eau	12
Figure 1.5. Abaque d'Erodabilité de sol K.....	26
Figure 1.6. Facteur topographique en fonction de la longueur de la pente et de son inclinaison	28
Figure 1.7. Couvert végétal (Roose, 1994)	29
Figure 1.8. Processus d'envasement (Remini, 2009).....	35
Figure 1.9. Dépôt de vase (Remini, 2003).....	36
Figure 1.10. Envasement moyen au Maghreb (Remini, 2003).....	37
Figure 1.11. Sensibilité à l'envasement des barrages (Remini,2005).....	38
Figure 1.12. Répartition du taux de comblement annuel des grands barrages dans les bassins hydrographiques (Remini et Hallouche, 2003).....	38

Chapitre 2. Description de la zone d'étude

Figure 2.1. Situation du bassin versant Cheliff-Ghrib	43
Figure 2.2. Carte du bassin versant Cheliff-Ghrib	44
Figure 2.3. Carte lithologie du bassin versant Cheliff-Ghrib	49
Figure 2.4. Carte d'occupation du sol dans la région d'étude.....	50
Figure 2.5. Carte d'altitude du bassin versant.....	52
Figure 2.6. La Courbe hypsométrique du bassin versant	53
Figure 2.7. Carte des pentes du bassin versant Cheliff-Ghrib.....	54
Figure 2.8. La répartition des classes de pentes en fonction de surface.....	54
Figure 2.9. Réseau hydrographique du bassin versant Cheliff-Ghrib.....	58

Chapitre 3. Analyse des précipitations et des écoulements

Figure 3.1. Le polygone de Thiessen du bassin versant du Cheliff-Ghrib.....	64
Figure 3.2. Ajustement du vecteur régional C1 à une loi Normale.....	69
Figure 3.3. Projection des variables sur le plan 1-2	70
Figure 3.4. Projection des variables sur le plan 1-3	70
Figure 3.5. Ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normale : station Ghrib amont 011407.....	72
Figure 3.6. Ajustement des précipitations maximales journalières à la loi log-normale (Station Ghrib-amont 011407)	76
Figure 3.7. Variations interannuelles de module d'oued cheliff (Station Ghrib-Amont)	78
Figure 3.8. Ajustement des débits moyens journaliers à la loi log-normale	81

Chapitre 4. Modélisation Pluies-Débits par le modèle HEC-HMS

Figure 4.1. Interface du logiciel HEC-HMS	86
Figure 4.2. Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin versant Cheliff-Ghrib.....	93
Figure 4.3. Carte de groupe hydrologique des sols du bassin versant Cheliff-Ghrib.....	95
Figure 4.4. La carte de Curve Number CN du bassin versant Cheliff- Ghrib.....	95
Figure 4.5. Nombre de fichiers de simulation préparés pour chaque événement	97
Figure 4.6. Hydrogrammes des crues de l'évènement de 23-25/09/1993 avec la fonction de transfert NRCS.....	100
Figure 4.7. Hydrogrammes des crues de l'évènement de 23-25/09/1993 avec la fonction de transfert de Clark.....	101
Figure 4.8. Hydrogrammes de crues de l'évènement de 18-21/04/1982 après calibration par la fonction de transfert NRCS	104
Figure 4.9 Hydrogrammes de crues de l'évènement de 18-21/04/1982 après calibration par la fonction de transfert Clark	105
Figure 4.10. Hydrogrammes des crues des évènements après validation du modèle pour les évènements 1980 et 1982.	110
Figure 4.11. Hydrogrammes des crues des évènements après validation du modèle pour les évènements 1986, 1993 et 1994.	111
Figure 4.12. Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour 10 et 25 ans.....	115
Figure 4.13. Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 50, 100, 200 et 1000 ans.....	116

Chapitre 5. Modélisation et quantification de transport solide en suspension

Figure 5.1. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont..... (Echelle interannuel)	123
Figure 5.2. Relation entre les débits liquides et les débits solides pour échelle temporelle mensuelle.....	124
Figure 5.2. Relation entre les débits liquides et les débits solides pour échelle temporelle mensuelle (suite)	125
Figure 5.3. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont..... (Echelle Saisonnière).....	128
Figure 5.4. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont..... (Echelle saison humide et sèche)	129
Figure 5.5. Variation annuelle de l'érosion spécifique (Modèle mensuel)	140
Figure 5.6. Variation annuelle du transport solide (modèle mensuel)	141
Figure 5.7. Variation mensuelle du transport solide (modèle mensuel).....	141
Figure 5.8. Variation Mensuelle du transport solide (modèle saisonnier)	142
Figure 5.9. Variation Mensuelle d'érosion spécifique (modèle saisonnier)	142
Figure 5.10. Variation du taux d'érosion spécifique en fonction de la lame d'eau ruisselée .	144
Figure 5.11. Variation du taux d'érosion spécifique en fonction de débit moyen annuel	144

Chapitre 6. Cartographie de l'érosion hydrique par télédétection et SIG

Figure 6.1. Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Cheliff- Ghrib.	148
Figure 6.2. Préparation des images satellitaires. a) scène qui couvre le bassin versant. b) Extrait d'images Landsat en composition colorée RVB 321 représentant la zone d'étude. .	152
Figure 6.3. Carte du facteur d'érosivité de pluie R	156
Figure 6.4 Distribution des classes du facteur R dans le bassin versant Cheliff-Ghrib	156
Figure 6.5. Illustration sur le concept de longueur du terrain (U.H.A.S.L.S, 2016)	157
Figure 6.6.a. Carte de facteur S	159
Figure 6.6. Carte de facteur L	160
Figure 6.7. Carte du facteur LS	161
Figure 6.8. Distribution des classes du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib	161
Figure 6.9. Carte de l'érodabilité des sols (K)	164
Figure 6.10. Fréquence des classes du facteur érodabilité K dans le bassin versant	165
Figure 6.11. Carte du facteur anti-érosive P	166
Figure 6.12. Fréquence des classes du facteur P dans le bassin versant	166
Figure 6.13. Image satellite Landsat-TM5 de 24 avril 1985 du bassin versant Cheliff-Ghrib	167
Figure 6.14. Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'imagette Landsat du 24 Avril 1985	168
Figure 6.15. Cartes de la classification de l'occupation du sol dans la région d'étude	169
Figure 6.16. (a) Diagramme expérimental d'estimation du facteur C de Gitas <i>et al.</i> , (2009), b) relation entre le facteur « C » et le NDVI.	170
Figure 6.17. Carte du facteur C	170
Figure 6.18. Fréquence des classes du facteur C	171
Figure 6.19. Carte d'érosion hydrique du bassin versant	172
Figure 6.20. Répartition des pertes en sols dans le bassin versant Cheliff-Ghrib	173
Figure 6.21. Répartition du bassin en sous bassin par HEC-GEO HMS	176
Figure 6.22. Les valeurs moyenne du facteur C par sous bassin versant	178
Figure 6.23. Les valeurs moyenne du facteur K en t.h/ha/ ha.MJ.mm par sous bassin versant.	179
Figure 6.24. Les valeurs moyennes du facteur LS par sous bassin versant.	180
Figure 6.25. Les valeurs moyenne du facteur P par sous bassin versant.	181
Figure 6.26. Les valeurs moyenne du facteur R en MJ.mm/ha.h.an par sous bassin versant.	182
Figure 6.27. Les valeurs moyenne du risque érosif en t/ha/an par sous bassin versant.	183

Chapitre 7. Envasement du barrage Ghrib et les moyens de lutte contre l'érosion hydrique

Figure 7.1. Situation géographique de barrage Ghrib	187
Figure 7.2. L'évolution dans le temps de l'envasement du barrage Ghrib	189
Figure 7.3. Comparaison de l'envasement annuel mesuré et calculé	189

Liste des tableaux

Chapitre 1. Recherche bibliographique sur l'érosion

Tableau 1.1. Formes d'érosion hydrique.....	16
Tableau 1.2. Formes de dégradation et d'érosion, causes, facteurs de résistance du milieu (Roose, 1994).....	17
Tableau 1.3. L'état d'envasement de quelques barrages algériens (Remini et <i>al</i> , 2003).....	37

Chapitre 2. Description de la zone d'étude

Tableau 2.1. La température de l'air de la station d'ELKhmis.....	46
Tableau 2.2. Les fréquences de la gelée blanche (sur une période de deux ans).....	46
Tableau 2.3. Les fréquences d'humidité.....	46
Tableau 2.4. Les fréquences de Sirocco.....	47
Tableau 2.5. Les fréquences des vents.....	47
Tableau 2.6. Hypsométrie du bassin versant.....	53
Tableau 2.7. Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global I_g	56
Tableau 2.8. Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.....	57
Tableau 2.9. Caractéristiques géométriques et hydromorphométriques du bassin.....	59

Chapitre 3. Analyse des précipitations et des écoulements

Tableau 3.1. Précipitations annuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques.....	62
Tableau 3.2. Pluie annuelle et la surface d'influence pour chaque station.....	63
Tableau 3.3. Moyenne, écart type des variables initiales.....	65
Tableau 3.4. Matrice des coefficients de corrélation entre les variables.....	66
Tableau 3.5. Valeur propre, variances expliquées et variances cumulées.....	66
Tableau 3.6. Projection des variables actives.....	66
Tableau 3.7. Projections des observations :.....	67
Tableau 3.8. Ajustement à la loi normale du vecteur régional (C1).....	68
Tableau 3.9. Code des stations représentatives.....	69
Tableau 3.10. Précipitations annuelles et leurs fréquences expérimentales : Station Ghrib amont(011407).....	71
Tableau 3.11. Equations d'ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normale des différentes stations.....	72
Tableau 3.12. Précipitations annuelles (mm) pour différentes périodes de retour.....	72
Tableau 3.13. Equation d'ajustement des précipitations mensuelles à la loi log-normale.....	73
Tableau 3.14. Précipitations maximales journalières en mm aux stations représentatives.....	74
Tableau 3.15. Précipitations maximales journalières et leurs fréquences expérimentales :	75
Tableau 3.16. Equation de la droite de Galton : Précipitation maximales journalières.....	76
Tableau 3.17. Précipitations maximales pour différentes périodes de retour.....	76
Tableau 3.18. Débits moyens annuels de l'oued Cheliff (station Ghrib-Amont) :.....	77
Tableau 3.19. Valeurs caractéristiques de module au niveau du bassin versant.....	78
Tableau 3.20. Débit spécifique et lame d'eau écoulée :.....	78
Tableau 3.21. Hydraulicité d'oued cheliff-Ghrib.....	79

Tableau 3.22. Débit moyen journalier et leurs fréquences expérimentales :	81
Tableau 3.23. Ajustement à une loi log-normale des modules annuels	82
Tableau 3.24. Modules caractéristiques en m ³ /s pour des périodes de récurrence données	82

Chapitre 4. Modélisation pluies-débits par le modèle HEC-HMS

Tableau 4.1. Classification de groupe hydrologique des sols.....	94
Tableau 4.2. Détermination de CN moyen pour le bassin versant.....	96
Tableau 4.3: Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation.....	98
Tableau 4.4. Résultats de simulation : Formalisme lag.....	98
Tableau 4.5. Résultats de simulation : formalisme de Clark.....	99
Tableau 4.6. Résultats détaillés de la calibration en utilisant le formalisme de l'hydrogramme Lag comme fonction de transfert :	102
Tableau 4.7 Résultats détaillés de la calibration en utilisant le formalisme Clark comme fonction de transfert :	103
Tableau 4.8. Résultats simplifiés issus de l'utilisation du formalisme de Lag	107
Tableau 4.9. Résultats de simulation (utilisation de la moyenne des valeurs).....	107
Tableau 4.10. Résultats de simulation (utilisation des maximums des valeurs).....	108
Tableau 4.11. Résultats de simulation (utilisation des minimums des valeurs).....	108
Tableau 4.12. Résultats de simulation (utilisation de la moyenne des valeurs).....	108
Tableau 4.13. Résultats de simulation (utilisation des maximums des valeurs).....	108
Tableau 4.14. Résultats de simulation (utilisation des minimums des valeurs).....	109
Tableau 4.15. Le jeu de paramètres optimisé utilisé pour la validation du modèle HEC-HMS sur le bassin du Cheliff-Ghrib	110
Tableau 4.16. Résultats de validation de modèle.....	112
Tableau 4.17. Les hauteurs de précipitations estimées au bassin du Cheliff-Ghrib pour différentes périodes de retour.....	114
Tableau 4.18. Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Ghrib pour le scénario 1	117
Tableau 4.19. Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Ghrib pour le scénario 2	118
Tableau 4.20. La comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 2	118
Tableau 4.21. Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Ghrib pour le scénario 3	119

Chapitre 5. Modélisation et quantification de transport solide en suspension

Tableau.5.1. Quelques modèles utilisés en Algérie (Bouanani .A, 2005).....	121
Tableau.5.2 : Valeurs R ² calculées à l'échelle interannuelle	123
Tableau 5.3. Valeurs de R ² calculées à l'échelle mensuelle	126
Tableau 5.4 Valeurs de R ² calculées à l'échelle saisonnière.....	129
Tableau 5.5. Valeurs de R ² à l'échelle saison Sèche-Humide	130
Tableau 5.6. Modèles retenus pour différentes échelles temporelles.....	130
Tableau 5.7. Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : Station Ghrib – Amont Modèle mensuel.....	134
Tableau 5.8. Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km ² .an) : Station Ghrib – Amont Modèle mensuel.....	135

Tableau 5.9. Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : Station Ghrib – Amont Modèle saisonnier.....	136
Tableau 5.10. Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km ² .an) : Station Ghrib – Amont Modèle saisonnière.....	137
Tableau 5.11. Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : Station Ghrib – Amont Modèle saison humide et sèche.....	138
Tableau 5.12. Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km ² .an) : Station Ghrib – AmontModèle saison humide et sèche.....	139
Tableau 5.13. Apport solide et érosion spécifique pour différents modèles.....	140
Tableau 5.14. Transport solide en suspension, total et l'érosion spécifique.....	143
Tableau 5.15. Apport solide calculé (station Ghrib amont).....	145
Tableau 5.16. Envasement du barrage Ghrib pour différentes compagnes bathymétriques (ANBT).....	145
Tableau 5.17. Comparaison des apports en sédiments obtenus par mesure des turbidités à la station Ghrib –amont et par mesure de l'envasement du barrage Ghrib.....	145

Chapitre 6. Cartographie de l'érosion hydrique par télédétection et SIG

Tableau 6.1. Caractéristiques des bandes spectrales (Toumi, 2012).....	151
Tableau 6.2. L'image satellitaire disponible et couvrant la région d'étude.....	152
Tableau 6.3. Quelques formules des indices utilisés pour l'étude de la végétation (Girard et Girard, 1999, Girard, 1995).....	154
Tableau 6.4. Précipitations moyennes mensuelles (mm), annuelles (mm) et valeur de R moyen pour la période 1976-2004.....	155
Tableau 6.5. Variation de facteur K en fonction du type de sols (R.P. Stone et D. Hilborn, 2000).....	163
Tableau 6.6. Le facteur P en fonction de la pente (Shin, 1999).....	165
Tableau 6.7. La valeur minimale et maximale de chaque facteur ainsi que la moyenne et l'écart-type.....	175
Tableau 6.8. Corrélacion spatiale entre les facteurs.....	175
Tableau 6.9. Les valeurs moyenne du risque érosif et des facteurs R, K, LS et C par sous bassin versant.....	177

Chapitre 7. Envasement du barrage Ghrib et les moyens de lutte contre l'érosion hydrique

Tableau 7.1. Caractéristiques de hausses fusibles.....	192
--	-----

Liste des photos

Chapitre 1. Recherche Bibliographique sur l'érosion

Photo 1.1 : Erosion en nappe (Bassin Cheliff-Ghrib, 2009)	15
Photo 1.2 : Erosion linéaire (Oued Cheliff, 2009)	16

Chapitre 7. Envasement du barrage Ghrib et les moyens de lutte contre l'érosion hydrique

Photo.7.1. Hausses fusibles du barrage Ghrib (Hydrolpus)	192
--	-----

Liste des abréviations

ABH : Agence nationale du Bassin Hydrographique

ACP : Analyse en Composantes Principales

ANBT: Agence Nationale des Barrages et transferts

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

CN: Curve Number

Clark : méthode de transformation par hydrogramme unitaire de Clark

HEC: Hydrologic Engineering Center

HMS: Hydrologic Modeling System

Geo HMS: Geospatial Hydrologic Modeling System

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NRCS : Natural Resource Conservation Service

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

SCS : Soil Conservation Service

SIG : Système d'Information Géographique

RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation

RVB : Rouge, Vert et Bleu

USLE : Universal Soil Loss Equation

Introduction générale

Introduction générale

L'érosion des sols est un processus naturel qui est sans doute largement responsable de la géomorphologie actuelle. Le terme érosion des sols ne peut être utilisé dans un contexte de menace ou de risque que s'il s'agit d'une érosion accélérée, au-delà des taux modérés, suite à des facteurs anthropiques, qui causera la perte d'une ou de plusieurs fonctions du sol.

L'érosion façonne la terre depuis qu'elle est émergée... Et depuis plus de 7000 ans, l'homme s'acharne à lutter contre l'érosion pour protéger ses terres contre l'agressivité des pluies et du ruissellement.

Cependant, les études scientifiques sur l'érosion n'ont commencé qu'au début du 20^{ème} siècle; d'abord en Allemagne. Il fallut encore attendre les années 1940 pour qu'un chercheur, confiné dans son laboratoire alors que les bombes pleuvaient sur l'Europe, découvre que l'énergie cinétique développée par la chute des gouttes de pluie était à l'origine de la dégradation de la surface du sol, du ruissellement et d'une bonne partie de l'érosion est observée sur les terres cultivées (effet splash)(*Ellison, 1944*).

Ce n'est que dans les années 1950, après le Congrès de Madison de l'Association Internationale de Science du Sol, que les méthodes américaines de mesure du ruissellement et de l'érosion sur petites parcelles se sont répandues en Afrique francophone (*Fournier, 1960*) et anglophone (*Hudson, 1957*), puis en Amérique latine et plus récemment en Asie et en Europe.

En Algérie, l'inventaire systématique des ressources n'est pas encore achevé malgré les nombreuses études menées au cours du siècle dernier. Toutefois, on en connaît les grandes lignes. Ces ressources ne sont pas réparties équitablement, que ce soit au niveau de leur répartition géographique, de leur quantité ou de leur nature (eaux de surface ou souterraines). La majeure partie du pays (87 %) est un désert où les précipitations sont quasi nulles, mais qui recèle d'importantes ressources fossiles d'eaux souterraines. La partie Nord du pays est caractérisée par son climat méditerranéen ; elle dispose de ressources en eau renouvelables, tant pour les eaux de surface que pour les nappes phréatiques. Les 90 % des eaux de surface sont situées dans la région du Tell qui couvre environ 7 % du territoire. Le pays est également caractérisé par une forte disparité entre l'Est et l'Ouest. La région Ouest bien dotée en plaines est peu arrosée. La partie Est du pays est une zone montagneuse où coulent les principaux Oueds. Les bassins occidentaux reçoivent 10 % seulement des flux, pour une surface représentant le tiers de celle du Nord du pays. Les bassins orientaux drainent 40 % des flux,

alors qu'ils ne représentent que 20 % de la superficie totale et les bassins du centre en drainent 50 % pour une surface totale représentant les 50 % restants. On estime à 1,6 milliards leur volume annuel moyen. Le pays compte 115 barrages, dont 45 ont une capacité supérieure à 10 millions de m³ et 65 sont de capacité inférieure (A.R.C.E, 2001).

L'importance de cette ressource qui est l'eau dans l'activité socio-économique et sa rareté d'une part et le problème de l'envasement d'ouvrages de stockage d'autre part, nous pousse à prendre des dispositions nécessaires afin d'assurer la pérennité de cette ressource et sa bonne gestion.

Dans le bassin versant de l'Oued Cheliff ainsi que dans de nombreux bassins de la zone semi – aride de l'Algérie du Nord, le transport de sédiments est l'un des problèmes économiques et environnementaux graves dus à l'érosion des sols. Ce bassin de 1378 km² appartient à une région très fragile où toutes les conditions se trouvent réunis (Sari, 1977 ; Demmak, 1982 ; Rosse, 1999) à savoir :

- Un climat méditerranéen caractérisé par des fluctuations thermiques très variées, et des pluies fines très irrégulières et torrentielles pouvant atteindre une grande fréquence de 30 mm par 24 heures ;
- Un relief accidenté aux pentes raides ;
- Un couvert végétal présent dans les hautes altitudes ;
- Un régime hydrologique très irrégulier des cours d'eaux où l'on observe des signes de dégradation poussée et généralisée, tels que, la divagation des oueds, le sapement des berges et l'alluvionnement des lits.

Cette problématique a fait l'objet de travaux de recherche de bon nombre d'ingénieurs et chercheurs Algériens et étrangers. En plus des aspects environnementaux de l'érosion, ils ont aussi étudié les conséquences à prévoir sur le coté social et particulièrement la vie des populations vivant à l'amont de ces bassins versants. La protection contre l'érosion en milieux marneux a constitué le problème le plus sensible dans la zone de l'Algérie du Nord.

Le caractère complexe du transport solide a été mis en exergue à travers les nombreuses études effectuées dans divers pays. Plusieurs points restent encore non élucidés à savoir :

- La discontinuité spatio-temporelle du processus érosion – transport solide – sédimentation, implique l'existence d'une relation lointaine et variable entre la quantité de matériel arrachée aux interfluves et celle qui est transportée par le cours d'eau.

- L'irrégularité du phénomène rend difficile la mise au point d'une technique de mesure précise, fiable et opérationnelle. Les méthodes de prélèvements automatiques et d'enregistrement continu se sont avérées inapplicables sur les cours d'eau fortement chargés.
- Les prélèvements sporadiques d'échantillons effectués par un observateur sont insuffisants et correspondent rarement aux périodes convenables.
- Le nombre de variables mises en jeu dans les relations de transport solide n'est pas représentatif de la diversité des variables réelles caractérisant le milieu.

Il faut ajouter à cela le problème de données. Dont l'abondance semble parfois induire une vision globale satisfaisante du bassin versant. Cela paraissait un atout précieux au moment où l'on s'est engagé dans ce travail, en fait, les choses ne sont pas si simples et les mesures dont on dispose, ainsi que les interprétations qui en découlent sont parfois complexes.

La diversité des caractéristiques hydrologiques et sédimentologiques dans les différentes parties du bassin implique des dynamiques différentes mais liées entre elles. A l'exutoire du bassin, le transport solide dépend étroitement de la charge solide provenant de l'amont et des conditions d'entraînement. La mesure effectuée à ce point n'est que la résultante de toute l'hétérogénéité du bassin. La variabilité spatiale du bassin versant exige une discrétisation fine.

Cette complexité et l'insuffisance des méthodes quantitatives employées nécessitent à ce stade des connaissances acquises dans ce domaine la contribution d'une démarche naturaliste, simpliste.

On s'est intéressé aux mécanismes de transport solide dans un cours d'eau. Un des objectifs de ce travail est de donner un sens qualitatif et quantitatif à la dynamique du transport sédimentaire dans un bassin semi – aride.

Les risques d'érosion en prenant tout à la fois en compte les facteurs et les indicateurs de l'érosion (*Tribak et al. 2006 ; Mlaouhi, 2003*). En effet, Les développements récents dans les systèmes d'information géographique (SIG) ont permis de modéliser et de représenter des phénomènes géographiques réels de base de données spatiales informatisées à travers laquelle ils peuvent être stockés, analysés et affichés (*Burrough, 1986; Deursen, 1995*). L'utilisation des SIG comprend entre autres la modélisation spatiale du paysage, l'analyse de l'utilisation des terres, la modélisation de l'érosion, et la planification environnementale (*Janssen, 1994; Suryana, 1997; Droesen, 1999*). Un des buts scientifiques des SIG est d'extraire les

informations significatives d'une interaction infiniment complexe des phénomènes et des processus géographiques de la nature.

La cartographie de l'érosion est un outil fondamental pour connaître la répartition et l'ampleur géographique du phénomène, ainsi que pour sa caractérisation qualitative (*Boardman, 2006*). Grâce à la cartographie de l'érosion, il est possible d'incorporer ce phénomène comme facteur dans le processus d'aménagement du territoire, et plus particulièrement dans le processus de la gestion intégrée (*Desmet et al. 1995*). La capacité d'intégrer les deux méthodologies ; la cartographie de l'érosion et la gestion intégrée dans les systèmes d'informations géographiques (SIG) facilite l'application de ces deux éléments comme outil perfectionné pour orienter les décisions en matière d'aménagement du territoire (*Okoth, 2003*).

L'objectif général de cette thèse est de présenter et développer une méthode qui peut être utilisée pour évaluer le risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib.

L'étude du transport solide en suspension et sa modélisation, permettront d'évaluer les quantités des sédiments transportés par oued Cheliff-Ghrib, et de préciser la dynamique érosive dans notre bassin et par conséquent d'en tirer des conclusions quant à l'envasement des ouvrages et la perte en sol dans l'écosystème.

Ce document comprend les chapitres suivants :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de la problématique et dresse, à partir de l'analyse de la littérature scientifique, un état des données et des méthodes permettant d'estimer l'érosion hydrique. Ainsi, il traite certaines méthodes utilisées en Algérie en générale et à l'échelle du bassin versant de Cheliff-Ghrib en particulier ;
- Le deuxième chapitre présente la zone d'étude, l'accent a été mis particulièrement sur les caractéristiques du bassin versant étudié ;
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des précipitations et des écoulements à l'échelle du bassin versant étudié ;
- Le quatrième chapitre aborde la modélisation pluies –débits par l'utilisation de modèle hydrologique conceptuel HEC HMS ;
- Le cinquième chapitre est dédié à l'établissement de quelques modèles analytiques et descriptifs débits liquides - débits solides, basés sur une approche statistique d'analyse des chroniques de données et de corrélations simples. Ces modèles préciseront l'inter-

relation entre les différents paramètres hydromorphologiques du bassin versant et la quantification de l'érosion et le transport solide en suspension ;

- Le sixième chapitre concerne l'estimation de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib par la télédétection et les SIG et les résultats obtenus seront comparés avec ceux obtenus par la quantification par l'utilisation des modèles statistiques;
- Le septième chapitre est consacré à l'évolution de l'envasement dans le barrage Ghrib et les moyens de lutte contre l'érosion ;

En fin la conclusion générale fait une synthèse des principaux résultats, et propose des perspectives de recherche puisque l'ampleur de la thématique mérite encore bien d'autres développements.

Chapitre 1

Recherche bibliographique sur l'érosion

Chapitre 1. Recherche Bibliographique sur l'érosion

1.1. Introduction

L'érosion du sol est un processus au cours duquel des particules de sol sont détachées et déplacées par un vecteur (eau, vent, travail du sol) (*Poesen et Govers, 1994*). Elle est dite naturelle ou géologique lorsqu'elle correspond plus ou moins à un état d'équilibre entre la formation (pédogenèse) et le transport des particules meubles.

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « Hortonien »), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux (*Cros-Cayot, 1996*). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion de versant diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée de talweg.

Comme le suggèrent ces définitions, les processus érosifs dépendent d'une multitude de facteurs interagissant entre eux et sont de ce fait, complexes à modéliser. Les facteurs de l'érosion devant être pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (*Wischmeier et al, 1978*).

L'érosion hydrique est la principale forme de dégradation dans les zones semi-arides et les régions subhumides sèches, tandis que l'érosion éolienne domine dans les zones arides. En Afrique, on estime que 500 millions d'hectares ont subi une dégradation depuis les années 1950 environ, portant sur 65% des terres agricoles de la région. La dégradation des terres concerne quelque 300 millions d'hectares en Amérique latine. En Europe, 157 millions d'hectares souffrent de l'érosion hydrique et éolienne. En Amérique du Nord, environ 95 millions d'hectares sont touchés (*FEM et FIDA, 2002*).

La Chine a perdu au cours de la période 1957-1990 des terres arables d'une superficie égale à celle de toutes les terres de culture d'Allemagne, du Danemark, de France et des Pays-Bas réunis, principalement suite à la dégradation des terres (*FEM et FIDA, 2002*).

Les problèmes de dégradation de l'environnement sont intimement liés au développement des populations et des civilisations. Ils concernent autant les agronomes, les forestiers, les géographes, les hydrologues, les sédimentologies que les socio-économistes. Mais chacun dans sa discipline a développé un langage propre, si bien que les mêmes mots n'ont pas la même portée selon les professions.

1.2. Effets visibles de l'érosion hydrique

Parmi les signes et effets physiques visibles de l'érosion hydrique (*Touré et al. 2004*), on peut citer:

- Les griffes, fines rigoles formées par l'eau, particulièrement en haut des pentes, sur le bord des pistes ou dans les champs sillonnés par les labours, elles deviennent des ravines par élargissement dû à la concentration de ruissellement excessif.
- Les pavages de cailloux et de pierres laissés en surface, une fois les particules les plus fines du sol emportées par le ruissellement, observés dans un grand nombre de champs labourés et de terrains de pâture.
- Les buttes de sol résiduel, où sont perchées des touffes d'herbes, signes d'érosion, quand elles n'ont pas été créées par l'accumulation de débris foliacés et d'humus, ou par le fouissage des rongeurs.
- Les racines d'arbres et arbustes, exposées à l'air, ou mise à nu dans des cours d'eau, résultats d'une dispersion du sol ou d'un accroissement de ruissellement suite à la dégradation de bassins versants.
- Les dépôts de sols sur les pentes douces, ou de graviers, sables et limons, dans les lits de cours d'eau résultent d'une érosion en amont.
- Les taches nues dans les herbages et les pacages signalent d'une tendance à la dégradation.
- Le déplacement du sol par piétinement résultant du pâturage sur les pistes à bétail au long des courbes de niveau, où les animaux font progressivement glisser la terre en bas de la pente.
- Les atterrissements dans les retenues de barrages, lacs et étangs.

1.3. Les processus de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un phénomène complexe qui résulte de trois phases : détachement, transport et dépôt (fig.1.1), causés par l'action en général combinée de la pluie et du ruissellement, et dont l'expression varie en fonction de la résistance du milieu (sol, couvert végétal, techniques culturales) et de la topographie. Quelle que soit l'échelle d'étude, du mètre carré au bassin versant de centaines de km², on retrouve partout ces trois phases de l'érosion mais avec des intensités différentes. D'où la diversité des facteurs de l'érosion en fonction des phases dominantes.

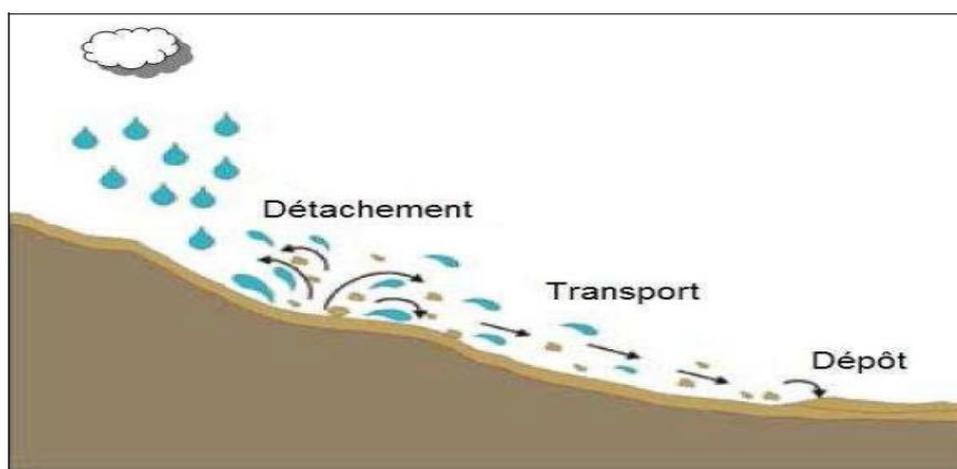


Figure 1. 1: Processus de l'érosion hydrique (Cheggour, 2008)

1.3.1. Détachement des particules de sol

La pluie est reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols (Ellison, 1944; Ekern, 1950). L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface (Boiffin, 1976; Le Bissonnais, 1988), du détachement de fragments de sol et de leur transfert (Free, 1952; Bradford et Huang, 1996).

Le détachement mobilisant les fines particules de la surface du sol peut être assuré de deux manières (Boiffin, 1994): La première correspond au rejaillissement des particules sous l'impact des gouttes de pluie (splash). Dans ce cas, il s'opère sur toute la surface du sol exposée aux pluies. L'importance du flux de détachement est contrôlée essentiellement par l'énergie cinétique des gouttes de pluie, elle-même fortement corrélée par l'intensité pluviale, et variable en fonction du couvert végétal. Les caractéristiques du sol (texture, taux de matière organique, état de surface et d'humidité du sol avant la pluie) influencent aussi directement l'importance du splash.

L'impact des gouttes de pluie brise les agrégats du sol en éléments plus fins qui progressivement entraînent la formation d'une croûte superficielle de quelques millimètres appelée aussi «croûte de battance» (fig.1.2). Celle-ci entraîne une diminution notable de l'infiltration de l'eau dans le sol. Le sol n'étant plus en mesure d'absorber les pluies, l'excès d'eau s'accumule en surface (formation de flaques) puis ruisselle en transportant éventuellement des particules de sol et des nutriments.

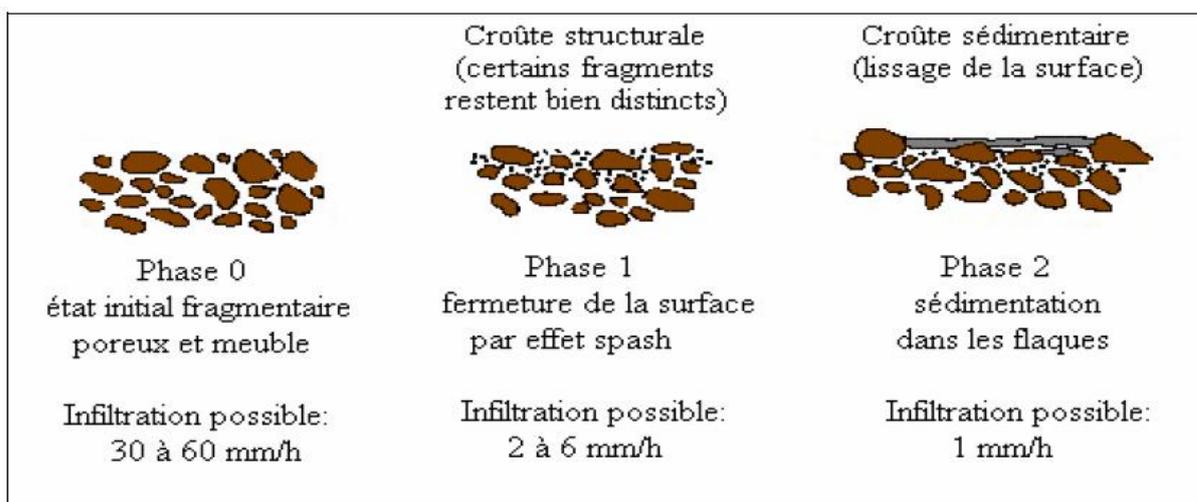


Figure 1. 2: Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies

(Boiffin, 1984)

La surface du sol est composée d'éléments déformables et mobiles: des microagrégats (<250 μm), des macroagrégats constitués de plusieurs microagrégats (<1- 2 cm) et des particules élémentaires. L'impact des gouttes de pluie a pour effet de désagréger les éléments présents à la surface du sol pour donner lieu à des agrégats de plus petite taille et des particules élémentaires. Les particules ainsi décomposées sont détachées et éjectées par l'impact des gouttes de pluie.

Une fois détachées, la distance moyenne de projection des particules peut atteindre de 10 à 20 cm (Leguedois, 2005), c'est-à-dire beaucoup plus que l'observation visuelle du phénomène ne le laisse supposer.

1.3.2. Transport des particules

Le vecteur de transport est ici le ruissellement superficiel. Il est généré soit par saturation de la porosité du sol (mécanisme de Dunne), soit par refus à l'infiltration dû à une pluie dont l'intensité est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol (mécanisme de Horton) (Leguedois, 2003). Ce phénomène est donc dépendant du type de pluie et de sol.

Plusieurs auteurs ont signalé que la génération du ruissellement est influencée par l'état de surface du sol (*Auzet, 1995 ; Le Bissonnais, 2005*). D'autres auteurs ont montré que les variations de ruissellement et d'érosion dépendent des changements du couvert végétal et de la gestion des utilisations de la terre (*Douglas, 1969; Reed, 1971; Williams and Reed, 1972; Patton and Schumm, 1975; Newson, 1985; Bryan and Campbell, 1986, Kosmas and al. 1997, Saber, 2002 ; Saber et Mrabet, 2002*).

Le ruissellement sur les versants prend des formes variées. Il est d'abord diffus, très peu épais et étendu sur de grandes surfaces (ruissellement en nappe), plus à l'aval il s'organise en se concentrant dans des rigoles qui peuvent devenir des ravines pérennes. Les propriétés de l'écoulement, volume ruisselé, hydraulique et distribution spatiale, sont aussi fortement dépendantes de la rugosité de la surface (*Govers et al. 2000*).

Le ruissellement a un rôle déterminant dans le transport du matériel mobilisé mais également dans le détachement des particules. En l'absence de ruissellement, les particules de sol détachées par la pluie ne sont pas transportées très loin. Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement (*Gimenez et Govers, 2002*).

L'écoulement de l'eau sur le sol exerce une action cisailant sur les grains de surface qui est d'autant plus forte que la vitesse du courant est importante. Le sol quant à lui offre une résistance au détachement de ses grains superficiels qui peut être assimilé à une sorte de résistance au cisaillement.

La vitesse à laquelle les grains sont enlevés par l'écoulement dépend de la dimension de ces grains. C'est la vitesse dite critique, qui est relativement élevée pour les grains de très faibles dimensions car leur cohésion est très forte. Si la dimension des grains s'accroît, la vitesse critique décroît, jusqu'à un seuil (estimé par Hjulstrom) de 0,2 mm à partir duquel la vitesse nécessaire à l'arrachage s'accroît à nouveau (fig.1.3).

Une fois arraché, le grain peut être transporté, même avec des vitesses d'écoulement inférieures, à condition toutefois que ces vitesses ne deviennent pas inférieures à la vitesse limite pour la sédimentation des grains qui elle dépend directement de la taille des particules.

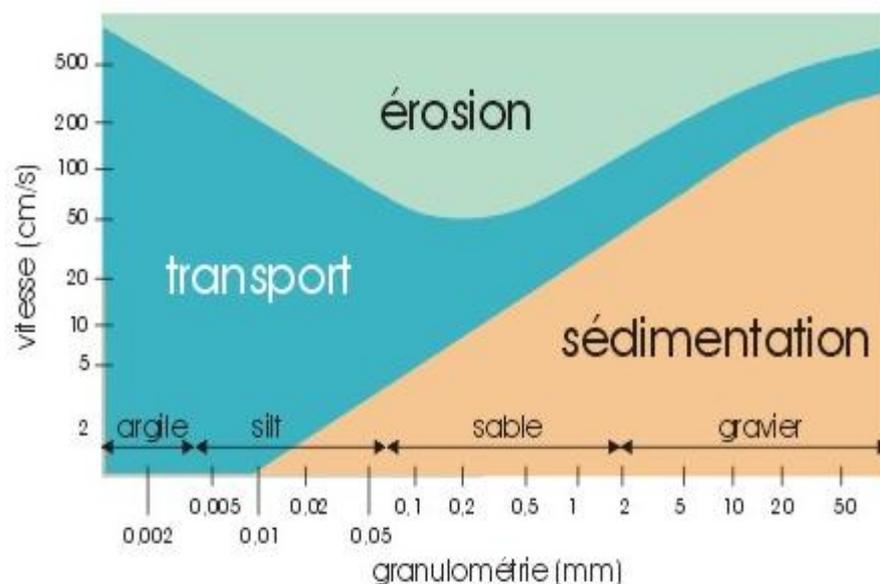


Figure 1. 3: Diagramme de Hjulstrom (*Boiffin, 1984*)

Dès que les particules sont érodées du sol ou arraché au lit de l'oued et transportées dans les cours d'eau, on parle de transport solide. Deux grands modes de transport des particules peuvent être distingués (fig.1.4): le transport de fond et le transport en suspension (*Yalin, 1980*). Pour une taille de grain donnée, le mode de transport est fixé par les conditions hydrauliques de la rivière : lorsque la force de cisaillement à la base de l'écoulement d'eau dépasse le seuil critique de cisaillement, les particules commencent à se déplacer sur le fond de la rivière par roulement, glissement ou petits bonds. Lorsque les conditions hydrauliques deviennent turbulentes et que les fluctuations de vitesse verticale sont importantes, les particules peuvent être maintenues en suspension et passer peu de temps en contact avec le fond (*Julien, 1994; Yalin, 1980*). Les particules se trouvent emportées par l'eau tant que la vitesse d'écoulement reste supérieure à la vitesse limite de maintien en suspension (dépendant de leur granulométrie). Dans le cas contraire, on observe une décantation et une sédimentation des matériaux. Les matières en suspension sont des particules de petites tailles: argiles, limons et sables, qui physiquement peuvent être transportées sur de longues distances.

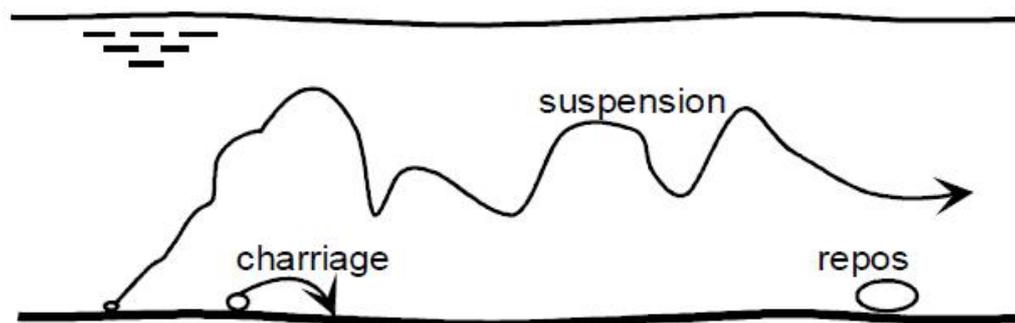


Figure 1. 4: Mode de transport des particules dans les cours d'eau (Degoutte, G., 2006)

1.3.3. Dépôt

Les particules, qu'elles soient arrachées au fond d'une rivière ou qu'elles proviennent du ruissellement et de l'érosion des sols, sont soumises à de nouvelles contraintes une fois qu'elles se trouvent dans un nouvel environnement : la colonne d'eau (Maneux, 1998). Le dépôt des sédiments se produit lorsque le courant n'est plus capable de maintenir les particules en suspension et résulte d'un ralentissement de la vitesse d'écoulement dont les causes peuvent être multiples. Ainsi, le diagramme de Hjulstrom permet de relier la vitesse de sédimentation du courant avec le diamètre des particules.

La granulométrie des particules, la texture des sédiments, la géométrie des dépôts sont d'importants indices sur l'agent de transport, sa vitesse au moment du dépôt, sa direction, etc.

1.4. Conséquences de l'érosion hydrique

Les conséquences de l'érosion hydrique des sols sont nombreuses tant en zones érodées qu'en zones de dépôts :

1.4.1. Conséquences d'érosion hydrique en zones érodées

L'érosion hydrique a des effets sur les zones érodées, parmi lesquels on cite :

- la diminution de la capacité du sol de retenir l'eau et de la mettre à la disposition des végétaux ;
- la diminution du drainage profond induisant une moindre réalimentation des nappes ;
- l'appauvrissement du sol : la teneur en humus et en éléments nutritifs du sol décroît.

La stabilité structurale du sol décroît.

Cet appauvrissement est lié au double effet de décapage des horizons supérieurs, habituellement les plus fertiles, et de sélectivité de l'érosion qui entraîne les éléments les plus fertiles.

- les déchaussements, les plantes emportées ou recouvrement de la culture ;
- la baisse des rendements des cultures, une augmentation des coûts de production des aliments (FAO, 1983) ;
- la dégradation des terres agricoles et une désertification du milieu naturel (FAO, 1980).

1.4.2. Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts

L'érosion et les transports solides sont gênants pour une majorité d'aménagement. Ils se traduisent par :

- une sédimentation des sols érodés dans des endroits non désirables (FAO, 1977) ;
- l'envasement accéléré des barrages, des canaux d'irrigation et des réservoirs ;
- La destruction de routes, chemins et ponts ;
- une réduction de la capacité des lits de rivières et un risque d'inondation des terres voisines ;
- un transfert et répartition spatiale des polluants (pesticides, métaux lourds et nutriments en excès) dans l'environnement ;
- une augmentation du coût de traitement des eaux de consommation.

1.5. Les différents types d'érosion

1. 5.1. L'érosion éolienne

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm), de plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire sub -horizontale. En retombant, ces grains de

sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) ou se dégradent les agrégats limono-argileux en dégageant de la poussière (Heusch, 1988).

L'érosion éolienne prend de l'importance en Afrique de l'Ouest dans les zones tropicales sèches, là où la pluviosité annuelle est inférieure à 600 mm, où la saison sèche s'étend sur plus de six mois et où la végétation de type steppique laisse de larges plaques de sol dénudé. Ailleurs, elle peut aussi se développer dans des conditions de préparation du sol qui amènent une pulvérisation importante des matériaux superficiels secs.

1.5.2. L'érosion aratoire ou mécanique sèche

Ce phénomène d'érosion n'est pas dû à l'intervention de l'eau, c'est le travail du sol qui arrache les particules, les transporte et les dépose soit en bas de parcelle, soit en talus.

Facteurs d'érosion mécanique

Les facteurs influençant la quantité de terre déplacée sont :

- Le type d'outil
- La fréquence des passages
- La pente

Plus la pente est forte, plus les mottes de terres détachées roulent vers le bas. C'est ce qui explique que les sommets des collines sont souvent décapés.

L'orientation du travail du sol

Celui ci peut être orienté soit en courbes de niveaux, soit du haut de la parcelle vers le bas (ce qui est le cas pour les tracteurs travaillant sur des pentes supérieures à 15 %), soit du bas de la parcelle vers le haut (pour le travail manuel notamment). Il est très rare que la terre soit remontée par les outils. Par contre, il arrive qu'en montagne et dans les zones où la terre est rare, que l'on récupère mécaniquement ou dans des petits paniers de la terre dans la plaine pour la remonter dans la montagne, c'est le cas sur les vignes. On constate aussi que l'aller et le retour des outils peuvent réduire considérablement la vitesse du décapage par l'érosion mécanique sèche (Revel, 1989).

1.5.3. L'érosion hydrique

L'élément déclencheur de ce type d'érosion est la pluie, qui provoque le détachement des particules élémentaires du sol.

Erosion en nappe

Elle est caractérisée par une eau de ruissellement sans griffes ou rigoles visibles. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet splash), les particules sont arrachées et transportées. Ce phénomène est observé sur les pentes faibles où l'eau ne peut pas se concentrer.

Dans un premier temps, c'est l'impact des gouttes qui va arracher les particules. La battance des gouttes de pluie va envoyer des gouttelettes dans toutes les directions. Seulement, sous l'effet de la gravité les gouttelettes auront une vitesse plus importante vers l'aval que vers l'amont. Si l'on réalise une moyenne sur l'ensemble des gouttelettes, la vitesse sera dirigée de l'amont vers l'aval. A partir de là, il y aura formation de flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre ce qui entraînera un ruissellement en nappe.

L'érosion en nappe dépend de:

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement
- L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules
- La durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies, c'est à dire l'état du sol.

Les signes qui permettent de caractériser l'érosion en nappe sont l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et la remontée de cailloux à la surface du sol, les conséquences de l'érosion en nappe sont:

- Le nivellement de la surface du sol.
- La squelettisation des horizons superficiels.
- Le décapage entraînant l'apparition de taches claires.



Photo 1.1 : Erosion en nappe de Beni Chougrane, près de Mascara (Algérie). (cliché : B. MORSLI,2006)

Erosion linéaire, en griffes ou en rigoles

Ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement. Dans un premier temps, des flaques se forment. En débordant, les flaques communiquent entre elles et des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent selon la ligne de plus grande pente: selon la profondeur de ces lignes, le vocabulaire employé est différent. Dans le tableau I.1, nous donnons les différentes formes d'érosion hydrique.



Photo 1.2 : Erosion linéaire (Oued Cheliff, 2009)

Tableau 1.1. Formes d'érosion hydrique

Appellation des lignes d'écoulement (d'après <i>Roose, 1994</i>)	
Profondeur	Appellation
Quelques centimètres	Griffes
>10 cm	Rigoles
10 à 20 cm quelques mètres de large	Nappe Ravinante
>50 cm	Ravines

Tout comme l'érosion en nappe, il existe une méthode pour mesurer l'érosion linéaire. Cette méthode est basée sur la méthode des volumes (*Ludwig, 1992*).

1.6. Causes d'érosion et facteurs de résistance du milieu

Le tableau 1.2 présente les processus de dégradation, les causes ainsi que les facteurs de résistance du milieu.

Tableau 1.2. Formes de dégradation et d'érosion, causes, facteurs de résistance du milieu (Roose, 1994)

Les processus de dégradation et d'érosion et leurs formes	Les causes : différentes sources d'énergie	Les facteurs de résistance du milieu
<u>Erosion mécanique sèche</u> Forme : creeping	Gravité et poussée par les outils de travail du sol	- fonction de l'intensité du travail du sol, c'est-à-dire de la fréquence des travaux et du type d'outil - fonction de la pente et de la cohésion du terrain
<u>Erosion en nappe</u> Forme: nappe de sable, pellicule de battance ou de sédimentation, "demoiselle coiffée", micro-falaise	Battance des gouttes de pluie	- le couvert végétal, - la pente, - le sol, - les techniques et structures anti-érosives
<u>Erosion linéaire</u> Formes: griffes, rigoles, ravines	L'énergie du ruissellement dépend du volume du ruissellement et de sa vitesse au carré $1/2MV^2 = 1/2MGH$	- la vitesse du ruissellement est fonction de la pente et de la rugosité, - le volume ruisselé est fonction de la surface du bassin versant et de la capacité d'infiltration, - résistance du profil du sol et des racines

1.7. L'impact de l'érosion dans différentes régions

L'érosion est un problème dont la gravité varie beaucoup d'un site à un autre. Kanwar en 1982 a montré au congrès de l'Association Internationale des Sciences du Sol à New Delhi que sur 13.500 millions d'hectares de surface exondées dans le monde, 22 % sont cultivables et seulement 10 % sont actuellement cultivés (soit 1.500 millions d'ha). Ces dix dernières années, les pertes en terres cultivables ont augmenté jusqu'à atteindre 7 à 10 millions d'ha/an, suite à l'érosion, à la salinisation ou à l'urbanisation. A ce rythme, il faudrait trois siècles pour détruire toutes les terres cultivables. L'érosion est donc un problème sérieux à l'échelle

mondiale mais il est bien plus préoccupant dans certaines régions du monde, comme c'est le cas au Magreb et plus particulièrement en Algérie.

Aux Etats-Unis, vers 1930, 20 % des terres cultivables ont été gravement endommagées par l'érosion suite à la mise en culture inconsidérée des prairies de la Grande Plaine par les colons européens, peu habitués à ces conditions semi-arides. C'est l'époque sombre des "dust bowl", nuages de poussières qui obscurcissaient complètement l'air dans la Grande Plaine. Ces phénomènes, impressionnant l'opinion publique, ont poussé le Gouvernement américain à former un grand service de conservation de l'eau et des sols mettant à la disposition des agriculteurs volontaires un appui technique et financier dans chaque canton. Parallèlement, un réseau de stations de recherche a été mis en place, qui, trente ans plus tard, aboutit à la formulation de l'équation universelle de perte en terre, connue sous le nom de USLE (*Wischmeier, 1978*). En 1986, Lovejoy et al remarquent qu'après cinquante ans d'investissement massif en hommes et en moyens, encore 25 % des terres cultivées perdent plus de 12 t/ha/an, limite reconnue tolérable. Le problème reste donc à l'ordre du jour, même si aujourd'hui on s'intéresse plus à la pollution et à la qualité des eaux qu'à la conservation des sols.

Pour l'ensemble de la Communauté Economique Européenne (CEE), *De Ploey (1990)* estime que 25 millions d'hectares ont été gravement affectés par l'érosion. La France totaliserait 5 millions d'hectares et le coût des nuisances occasionnées par l'érosion s'élèverait à 10 milliards de FF sans compter la valeur intrinsèque des sols perdus, difficilement chiffrables.

Plus sérieux que ces affirmations dramatiques, sont les résultats des mesures de pertes en terre sur parcelle (100 m²) mises en place sous l'impulsion du Professeur Frédéric Fournier depuis les années 1950, par l'ORSTOM et les Instituts du CIRAD (*Roose, 1967*). Ces pertes en terre varient de 1 à 200 t/ha/an (jusqu'à 700 tonnes en montagne, sur des pentes de 30 à 60 %) sous des cultures propres aux régions forestières à pentes moyennes (4 à 25 %), des pertes en terre de 0,5 à 40 t/ha sous mil, sorgho, arachide, coton sur les longs glacis ferrugineux tropicaux des régions soudano-sahéliennes (*Roose, 1984*).

Si on accepte une densité apparente des horizons de surface variant de 1,2 à 1,5, les ablations correspondantes par érosion varient de 0,1 à 7 (et même 15 mm en montagne), en fonction de la topographie, du climat et des cultures. Ceci correspond à 1 à 70 cm (150) cm/siècle ou 0,2 à 14 mètres depuis le début de l'ère chrétienne.

La durée de vie des sols peut aussi être estimée à partir des pertes en terre annuelles moyennes, de l'épaisseur du sol explorable par les racines, de la vitesse de la régénération de la fertilité du sol et de la courbe de rendement du sol en fonction de l'épaisseur de la couche arable (*Elwell, 1984*). En milieu forestier, où les pluies sont agressives et les pentes fortes, les pertes en terre peuvent être importantes et la dégradation des terres est très rapide (quelques années). Cependant, la régénération des sols y est également rapide, car un sol dégradé est rapidement envahi par la végétation.

En milieu semi-aride, la durée de vie peut atteindre quelques dizaines d'années, malgré la modestie des pentes et de l'agressivité des pluies, mais la restauration de la fertilité des sols est d'autant plus lente que la production de biomasse est faible en zone aride et que les sols sont profondément épuisés.

L'analyse des transports solides de centaines de rivières américaines et européennes, montre qu'il existe une zone climatique semi-aride (pluies annuelles moyennes variant de 350 à 700 mm, en fonction de la continentalité des bassins) où la dégradation spécifique des bassins est maximale. En zone plus aride, le transport solide spécifique diminue avec l'énergie des pluies (*Fournier, 1955*). En zone plus humide, le couvert végétal intercepte une part importante de l'énergie des pluies et du ruissellement (*Fournier, 1955 et 1960*). Ce qui est vrai statistiquement sur un grand échantillon de bassins versants, ne l'est plus à l'échelle du terroir et encore moins à l'échelle de la parcelle. Le mode de gestion particulier de chaque parcelle, entraîne des différences locales très importantes et c'est ce qui justifie la mise au point de techniques culturales de lutte antiérosive.

1.8. Evaluation de l'érosion hydrique

D'une manière générale, la quantification de l'érosion est difficile et dépend des échelles d'espace et de temps considérées. Elle est mesurée directement sur le terrain ou elle est estimée suivant des analyses des sols ou des modèles empiriques ou physiques qui tiennent compte de l'impact de toutes les variables de l'érosion hydrique.

Plusieurs formules et méthodes qui impliquent tous les paramètres physiques sont utilisées pour la quantification de l'érosion hydrique.

1.8.1. Formule de Henin "1950"

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La quantification de l'érosion spécifique "Es" est donnée par la formule 1.1

$$E_s = \frac{I_p I_s}{K V_e} \quad (1.1)$$

Avec : **I_p** : Intensité des précipitations;

I : Pente du bassin versant;

Les facteurs "I_p" et "I" favorisent l'érosion

et **S** : Susceptibilité des sols;

K : Perméabilité;

V_e : Végétation.

Les facteurs S, K et V_e limitent l'érosion et en plus, les facteurs S et V_e semblent les plus difficiles à quantifier.

1.8.2. Formule de Gravičovic (1960)

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnelle à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion, l'équation est donnée par l'expression 1.2:

$$E_s = 3,14 \cdot T \cdot P_0 \sqrt{Z^3} \quad (1.2)$$

Où

E_s : érosion spécifique dans le bassin versant (T/km².an)

T : coefficient de température

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1 \quad (1.3)$$

Avec :

t₀ : température moyenne annuelle en °C.

P₀ : pluie annuelle en (mm).

Z : coefficient d'érosion.

Avec

$$Z = y \cdot [x.a] (\delta + \sqrt{I_{moy}}) \quad (1.4)$$

Où

y : valeur du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type du sol et du climat.

[x.a] : Coefficient de régularisation du bassin versant, se rapportant à la protection des sols, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles. Il est aussi tabulé.

δ : équivalent numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant.

I_{moy} : indice de pente moyenne du bassin versant.

1.8.3. Formule de L'A.N.R.H (1970)

$$T_{ss} = 26.62 I_e + 5.071 I_p + 9.77 C_t - 593.59 \quad (1.5)$$

T_{ss} : transport solide spécifique moyen annuel (T/Km².an)

I_e : indice lithologique (%).

I_p : indice des précipitations (%).

C_t : coefficient de torrencialité. $C_t = D_d \cdot F_1$

D_d : Densité de drainage $D_d = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{A}$

L_i : longueur de tous les cours d'eau d'ordre « 1 » (K m).

F_1 = nombre de talweg/ surface fréquence des talwegs élémentaire

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$$I_e > 10\%$$

$$I_p > 300$$

1.8.4. Formule de Tixeront (1960)

$$E_s = [S_1 \cdot Ta_1 + S_2 \cdot Ta_2 + S_3 \cdot Ta_3 + \dots + S_n \cdot Ta_n] \quad (1.6)$$

Avec :

E_s : Erosion spécifique (t/Km².an).

Ta_1, Ta_2, Ta_n : Taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous Bassin (T/Km²).

S : superficie totale du bassin (Km²).

S_1, S_2, S_n : Superficie des sous bassins (Km²).

Maintenant, si on suppose que la totalité du bassin possède une même perméabilité,

$$\text{On a } E_s = K \cdot L_e \quad (1.7)$$

L_e : Lamme d'eau ruisselée moyenne interannuelle (mm).

K : constante

K : coefficient qui tient compte de la perméabilité des terrains.

$K = 8,5$ pour les terrains d'une perméabilité élevée.

$K = 75$ pour les terrains d'une perméabilité moyenne élevée.

$K = 350$ pour les terrains d'une perméabilité faible à moyenne.

$K = 1400$ pour les terrains d'une perméabilité faible.

$K = 3200$ pour les terrains perméables.

1.8.5. Formule de Fournier (1960)

$$Q_s = \frac{1}{36} \cdot \left[\frac{P}{P_a} \right]^{2,65} \cdot \left[\frac{H_{\text{moy}}}{S} \right]^{0,46} \quad (1.8)$$

Q_s : l'apport solide moyen inter annuel (T/Km².an).

P : la pluviométrie du mois le plus arrosé (mm).

H_{moy} : l'altitude moyenne (mm).

P_a : la pluviométrie moyenne inter annuelle (mm).

S : la superficie du bassin versant (Km²).

1.8.6. Mesures de débits liquides et solides à l'exutoire des bassins versants

L'évaluation des volumes de matériaux fins érodés et exportés d'un bassin versant se fait par des mesures conjointes de débits et de concentration en sédiments ou matières en suspension (MES). Ces mesures hydrométriques et de qualité de l'eau (MES) à l'exutoire de petits bassins hydrographiques doivent porter sur plusieurs années pour avoir une représentativité temporelle (sur 10-15 ans pour tenir compte des variabilités climatiques interannuelles).

(Mabit, 2002). Les mesures des exportations de matières grossières par charriage au fond de la rivière sont nettement plus complexes à mettre en œuvre et sont souvent ignorées par les expérimentateurs.

De manière générale, on ne peut pas se contenter seulement de la mesure des exportations à l'exutoire, car la seule connaissance de cette donnée ne permet ni de localiser les zones sources de sédiment, ni d'évaluer les pertes en terre que subissent les parcelles constituant ces zones sources (Boiffin, 1994).

1.8.7. Utilisation des systèmes d'information géographiques (S.I.G)

Durant ces dernières années, plusieurs études ont mis en évidence l'intérêt tout particulier d'un Système d'Information Géographique (S.I.G) en tant qu'outil informatisé dédié à la gestion de l'information géographique dans le suivi et la quantification de l'érosion hydrique.

Un Système d'information géographique est, comme son nom l'indique, un outil informatisé dédié à la gestion de l'information géographique. Ce type de système permet d'apporter à chacun l'information dont il a besoin pour décider et agir au mieux. C'est un outil de représentation d'une réalité, de compréhension des phénomènes et des conditions dans lesquelles ils se réalisent, de simulation d'alternatives et de leurs effets. C'est aussi un outil de dialogue et de communication entre disciplines par un constant aller-retour entre observation, interprétation, hypothèse et validation. L'utilisation de ce genre de système offre un moyen simple, rapide et efficace à l'utilisateur, pour les études d'aménagement et de prise de décision.

1.8.8. Utilisation de l'imagerie satellitale

L'intérêt grandissant des études à échelle plurikilométrique et les problématiques environnementales associées ont stimulé l'utilisation de la télédétection en pédologie (*Bonn et Escadafal, 1996*). Sur la base de la connaissance des états de surface et de leur comportement vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion par expérimentation, la cartographie des risques érosifs est possible à grande échelle (parcelle, petit bassin versant élémentaire) mais aussi sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de km² grâce à des modèles spatiaux (*King et Le Bissonnais, 1992*).

Les données satellitaires, facilement accessibles aujourd'hui, peuvent aider à la cartographie des risques érosifs. Cette approche ne peut toutefois en aucun cas dispenser des études de terrain pour établir une compréhension du phénomène et établir des relations entre l'information spectrale et la réalité terrain. Par son caractère spatial et temporel, la télédétection reste une source d'information privilégiée pour la régionalisation de l'érosion.

Actuellement, à partir des images classiques de résolution décimétrique (SPOT, Landsat), on peut atteindre une précision cartographique compatible avec des échelles de l'ordre du 1/25 000^e et de 1/50 000^e (*Blanchard et al, 1999*). Toutefois la contrainte majeure à l'utilisation de ces techniques est la précarité de la relation entre le signal satellitaire et l'information thématique recherchée. Si la cartographie directe des traces d'érosion est rarement possible, on peut en revanche étudier des critères indirects révélant, en surface, la présence de phénomènes érosifs (*King et Delpont, 1993*).

L'imagerie satellitale est ainsi utilisée aussi comme source de donnée d'entrée pour des modèles empirique ou physiques, typiquement couplés à des SIG. La spatialisation des modèles de pertes des sols dans un SIG avec l'aide de la télédétection nécessite de faire de nombreuses hypothèses (continuité du paysage, propagation des erreurs, distribution spatiale des pluies intenses, précision des cartes pédologiques, effet des interventions humaines) et la validation sur le terrain n'est vraiment pas aisée (Bonn, 1998).

1.8.9. Modélisation d'érosion hydrique

Les phénomènes d'érosion hydrique sont le résultat d'interactions complexes, variables dans le temps et l'espace. Dans une optique d'évaluation des risques de ruissellement et d'érosion, le recours à la modélisation peut constituer un outil approprié.

Le choix d'un modèle particulier dépend largement du but recherché, des données et du temps disponibles. La disponibilité des données sources est un critère de sélection important quand on évalue le risque d'érosion à l'échelle régionale. Même si une grande variété de modèles est disponible pour l'estimation du risque d'érosion, la plupart demande beaucoup de données pour leurs paramètres d'entrée si bien que leur application à l'échelle régionale devient difficile.

- **L'équation "Universal Soil Loss Equation" (USLE)**

Vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelles dans une bonne dizaine d'Etats d'Amérique du Nord, il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse. En 1958, Wischmeier, statisticien du Service de Conservation des Sols fut chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10.000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine. L'objectif de *Wischmeier et Smith (1978 ;1960)* était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type d'aménagement nécessaire pour garder l'érosion en-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production.

- **Analyse des principes du modèle**

Selon ce modèle, l'érosion est une fonction multiplicative de **l'érosivité des pluies** (le facteur **R**, qui est égal à l'énergie potentielle) que multiplie **la résistance du milieu K** (l'érodibilité du sol), **SL** (le facteur topographique), **C** (le couvert végétal et les pratiques culturales) et **P** (les pratiques antiérosives). C'est une fonction multiplicative, de telle sorte que si un facteur tend vers zéro, l'érosion tend vers 0.

Ce modèle de prévision de l'érosion est le suivant:

$$E = R \times K \times SL \times C \times P \quad (1.9)$$

1° l'indice d'érosivité des pluies R

Il est égal à E. l'énergie cinétique des pluies, que multiplie I_{30} (l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimée en cm par heure). Cet indice correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9 % de pente.

$$R = \sum EI_{30} / 100 \quad (1.10)$$

$$E = 200 + 89 \log I \quad (1.11)$$

E = énergie cinétique de la pluie exprimée en tonne métrique x mètre/ha/cm de pluie.

$$E = 11,9 + 8,73 \log(I) \quad (1.12)$$

E en $J/m^2/mm$ de pluie

I l'intensité moyenne de la pluie (mm/h).

R peut-être déterminé pour des périodes variables (1 averse à 1 année).

Lorsqu'il est utilisé comme paramètre du modèle de Wischmeier ,l'indice R est généralement calculé comme la moyenne de plusieurs années .

2° Erodibilité du sol, K

Fonction de la quantité de matières organiques, de la texture, de la structure, et de la perméabilité du sol, l'érodibilité du sol est déterminée pour une parcelle de 22.2 m de long, travaillée dans le sens de la pente (9 %), sans apport de matières organiques depuis trois ans (*Roose, 1994*).

La formule de Wischmeier et Smith (1978) permet de déterminer K.

$$100 \cdot K = 2.1 \times 10^{-4} \times M^{1.14} (12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \quad (1.13)$$

M : produit du pourcentage de limon compris entre 0.1 et 0.002 mm par le pourcentage de tout ce qui n'est pas de l'argile.

a : pourcentage de matière organique

b : code de structure du sol utilisé dans la classification

c : classe de perméabilité du profil

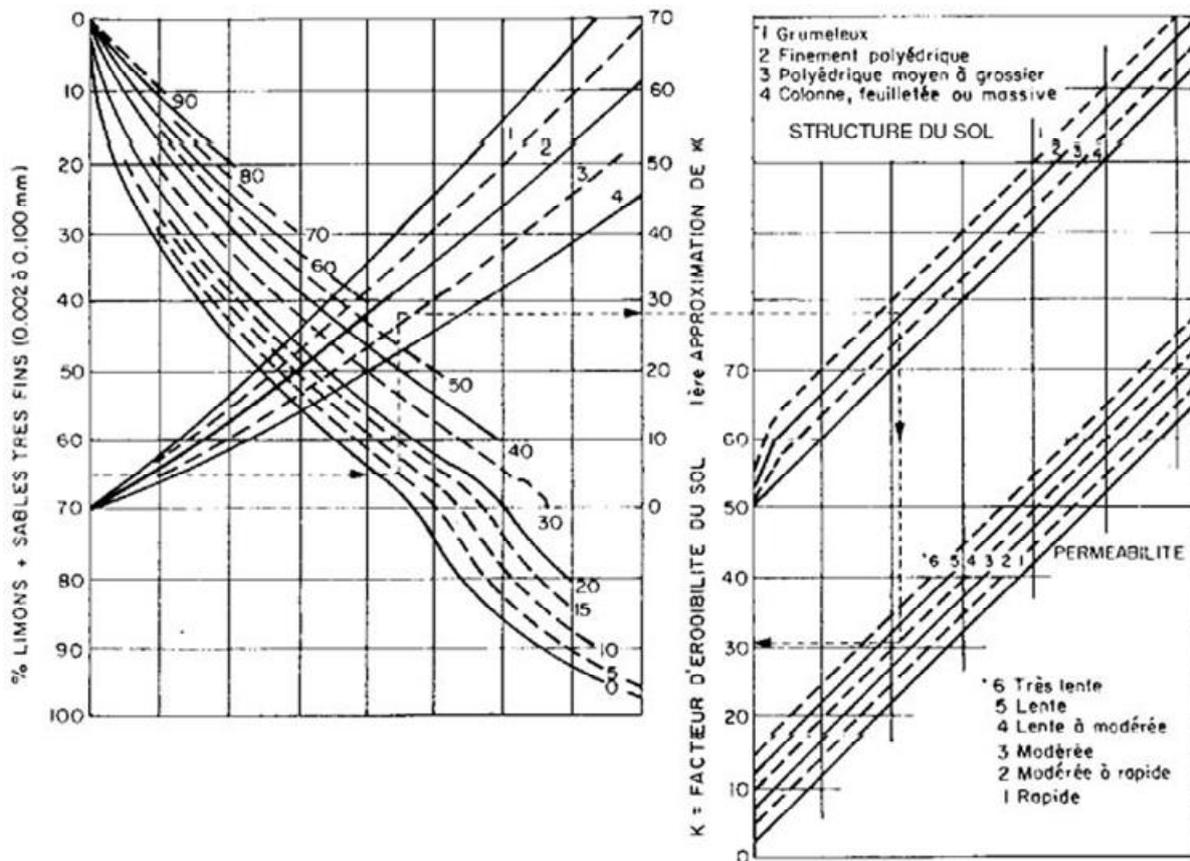


Figure 1.5 Abaque d'Erodabilité de sol K (D'après Wischmeier et al)

Limon et sable fin=65%; sable=5%; matière organique=2.8%; structure du sol=2 ; perméabilité=4
 $K = 31\%$

3° Facteur topographique

L'influence de la pente sur l'évolution des versants est bien connue des géomorphologues, au point que certains d'entre eux, caractérisent l'âge du paysage par l'inclinaison et la forme des pentes. De fortes pentes et des vallées encaissées se rencontrent dans un relief jeune comme celui des Alpes, tandis que dans un relief adulte ou sénile comme on en trouve sur le vieux continent africain, ce sont des plateaux, des glacis à pentes douces et de vastes pénéplaines qui offrent des paysages dégradés.

La pente intervient dans les phénomènes d'érosion du fait de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur.

-La forme du versant

D'après *Wischmeier (1974)*, une pente concave diminue les transports solides (par sédimentation localisée) tandis qu'une pente convexe l'augmente en fonction de l'inclinaison du segment le plus pentu. La présence de pentes concaves dans le paysage indique qu'il doit y avoir des piègeages, des colluvions et d'alluvions dans la vallée.

L'inclinaison de la pente

Lorsque la pente augmente, c'est l'énergie cinétique du ruissellement qui augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies lorsque les pentes sont supérieures à 15 %. De plus, ce sont les particules fines qui sont les plus sensibles et qui seront arrachées les premières avec la matière organique.

Les formes d'érosion changent selon l'inclinaison de la pente. Ainsi, pour des pentes inférieures à 4 %, ce sont les particules fines qui migrent. Pour des pentes supérieures à 7 %, des rigoles apparaissent. Des particules plus importantes sont transportées à l'intérieur de griffes. Enfin, au delà de 20 %, les rigoles se creusent et deviennent de plus en plus profondes (5 à 20 cm), ce qui se traduit par une surface très accidentée. (*Roose, 1994*).

Aux Etats-Unis, *Wischmeier et Smith (1960)* ont montré que l'on pouvait exprimer l'érosion de parcelles soumises à des pluies naturelles pendant 17 ans, et dont la pente est comprise entre 3 et 18 %, sous la forme d'une équation du second degré :

$$E = \frac{\sqrt{L}}{100} (0.76 + 0.53S + 0.076S^2) \quad (1.14)$$

E : Erosion en T/ha

S : Pente exprimée en pourcentage

L : longueur exprimée en pieds.

-Longueur de la pente

La vitesse étant proportionnelle à la distance parcourue, plus la longueur de la parcelle est grande, plus la vitesse augmente. Les particules d'eau qui ruissellent emmagasinent donc une énergie plus importante qui se traduit par la création et le creusement de rigoles. Cependant, il est très difficile de connaître précisément l'exposant qui relie l'érosion et la longueur de la pente.

Cependant, le facteur topographique de Wischmeier & Smith donné sur le graphe ci-dessous permet de donner des résultats satisfaisant :

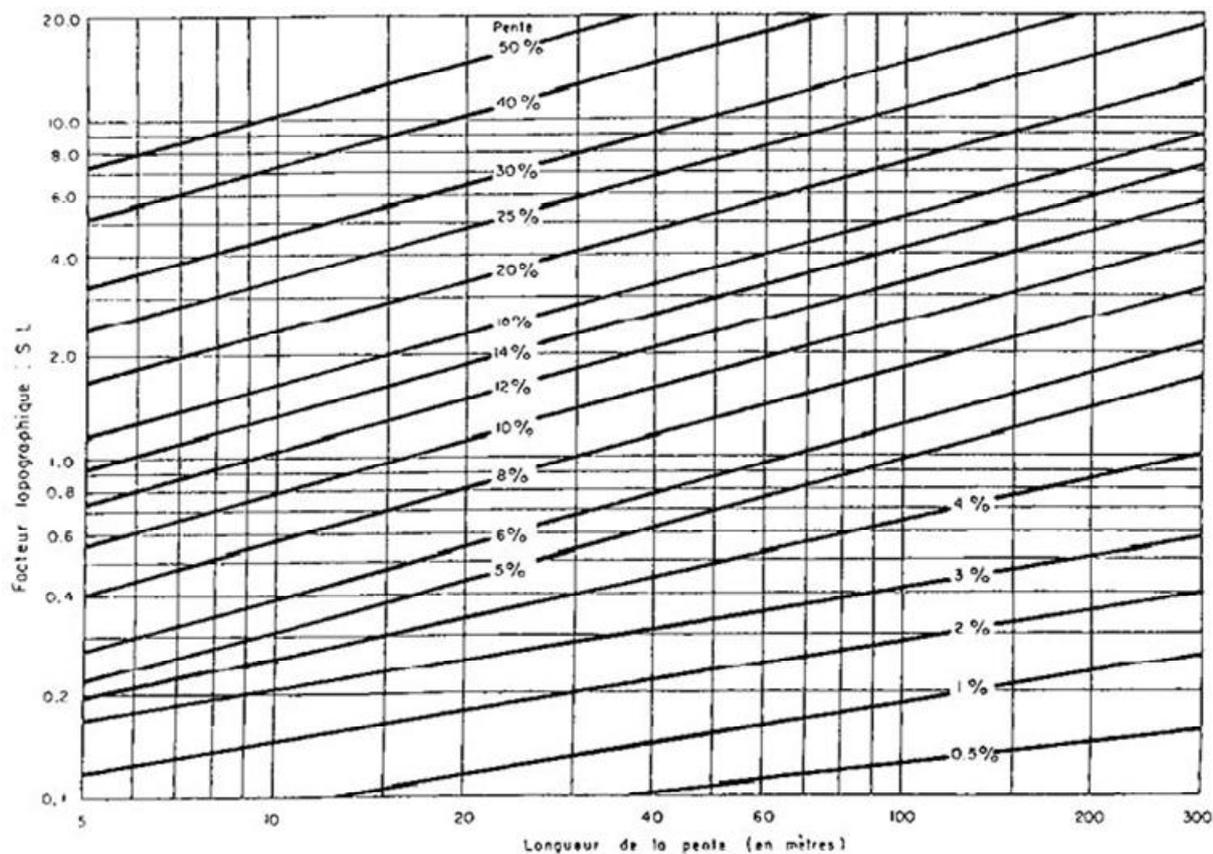


Figure 1.6. Facteur topographique en fonction de la longueur de la pente et de son inclinaison (D'après wichsmeier et Smith)

4° Couvert végétal

Le type de couvert végétal est absolument à prendre en compte puisque c'est de lui que va dépendre l'amortissement des gouttes de pluies, le ralentissement du ruissellement, et l'infiltration. Le facteur C tenant compte de la couverture dépend de:

- Le pourcentage de sol à nu : l'érosion intervient majoritairement sur des sols à nus lors d'épisodes pluvieux agressifs.
- La hauteur du couvert végétal : si celui-ci est trop élevé, l'amortissement des gouttes de pluies n'interviendra plus. En effet, après une première interception, les gouttes seront de nouveau rejetées vers le sol.
- l'architecture des plantes : des plantes en forme d'entonnoir (ananas) auront tendance à drainer l'écoulement et à provoquer des ravinements. A l'inverse, les plantes dites "parapluie" vont disperser les gouttes d'eau et donc diminuer leur énergie. (*babanier*).

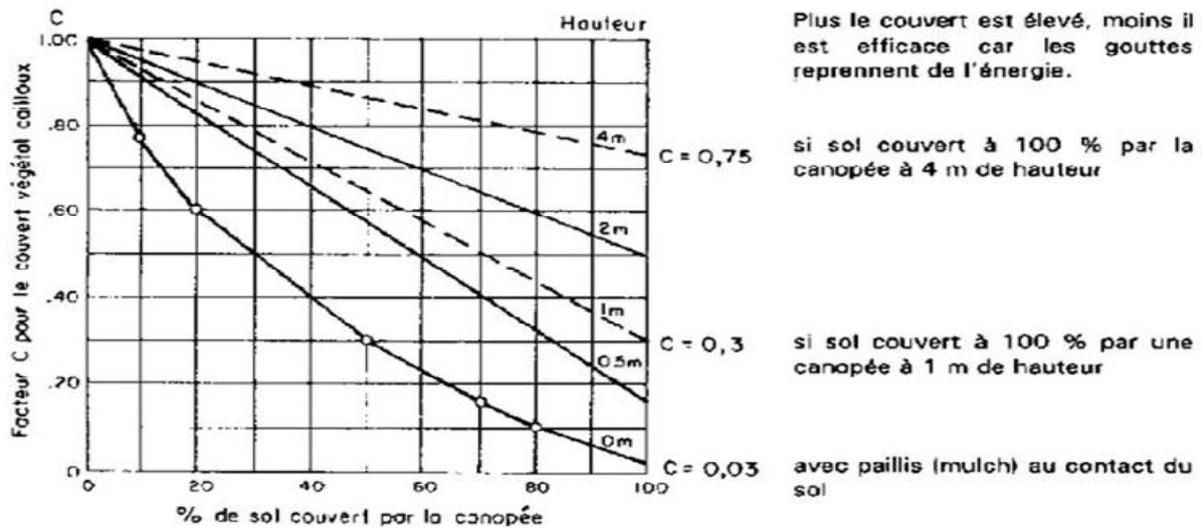


Figure 1.7. Couvert végétal (Roose, 1994)

Par exemple, lorsque le couvert végétal est de 100 % mais qu'il se trouve à 4 m de hauteur, l'érosion sera de l'ordre de 75 % d'une parcelle nue. Si le couvert est à deux mètres, l'érosion sera de l'ordre de 50 %. S'il est à 50 cm, l'érosion sera encore de l'ordre de 18 %. Par contre, au cas où l'on a une litière, l'érosion sera réduite à 3 %. Si on regarde la baisse de l'érosion en fonction du pourcentage du sol couvert par le mulch, on observe une baisse très rapide de l'érosion pour une surface couverte relativement réduite. Par exemple, pour 10 % de sol couvert, l'érosion n'est plus que de 78 %, pour 20 %, l'érosion n'est plus que de 60 %, pour 50 % de sol couvert, l'érosion est réduite à 30 % de celle mesurée sur la parcelle nue témoin.

- **Les modèles conceptuels globaux**

Les modèles conceptuels globaux constituent des modèles peu complexes. Ils permettent de prédire les flux en sortie d'un bassin versant en fonction de la pluviométrie (flux en entrée) et de caractéristiques simples du bassin versant comme la surface, la topographie, la dominante géologique, etc... (Da Ouyang, 1997). Dans ce cas l'effet des grandeurs variables dans le temps et dans l'espace est paramétrisé de façon globale. Les principaux inconvénients de ces modèles qu'ils ne nous permettent pas d'apprécier l'importance relative des différents phénomènes à l'intérieur du bassin, de plus leur emploi répété suppose une stationnarité du milieu (Wassenaar, 2001). L'intérêt de ce type de modèle est sa facilité de mise en oeuvre, puisque le volume des données à collecter est limité, et la possibilité de les utiliser en opérationnel sur un grand nombre de bassins.

- **Les modèles physiques**

La modélisation à base physique décrit l'érosion au travers de représentations mathématiques des processus hydrologiques et érosifs fondamentaux. Les processus pris en compte sont le détachement par les gouttes de pluie et/ou par le ruissellement, le transport par les gouttes de pluie, le transport par le ruissellement, et le dépôt par le ruissellement (*Foster, 1990*). Ces approches à base physique constituent une tentative pour décrire de manière aussi réaliste que possible la dépendance de la réponse d'un bassin à un événement de pluie. Elles sont en général distribuées, c'est-à-dire qu'elles prennent en compte explicitement la variation des paramètres et variables d'entrée dans l'espace géographique. Ces modèles font appel à des variables d'état, reliées entre elles en tout point par des relations d'état, des relations dynamiques et des relations de conservation. Ces relations font intervenir des paramètres mesurables en principe et caractérisant les propriétés physiques du milieu. Ces modèles physiques distribués (e.g. SHE, API, CREAMS, ANSWERS, NWSFS, STORM,

STANFORD, SSARR, NWSRFS, etc.) Sont donc très complexes et nécessitent beaucoup de données en entrée (*Ambroise, 1991*).

- **Les modèles physico conceptuels spatialisés (ou spatialisés)**

Pour diminuer la complexité des modèles physiques, et ainsi améliorer leur potentiel d'utilisation, un nouveau type de modélisation est en plein développement depuis une quinzaine d'années (TOPMODEL, SWAT). On préserve à la fois l'aspect "fonctionnel", mais en simplifiant les modèles en retenant uniquement les variables et paramètres pertinents, et l'aspect "spatialisé", en découpant l'espace en unités de fonctionnement relativement homogènes (*Wassenaar, 2001*). De tels modèles sont déterministes dans leur représentation (simplifiée) des processus en jeu, mais stochastiques dans leur para-métrisation et leur application (*Ambroise, 1991*).

Les différentes voies de modélisation présentées, qui ont chacune leurs domaines d'applications et leurs limites, apparaissent complémentaires. Le choix de l'une d'entre elles et/ou leur couplage doit être fait en fonction de la problématique, la zone d'étude, les objectifs de recherche, et le temps et les moyens disponibles.

1.9. Rappel bibliographiques des travaux sur l'érosion en Algérie

Le phénomène d'érosion et l'envasement sont une véritable calamité en Algérie. La nature et la morphologie des terrains en pente, la fragilité du couvert végétal, le manque de boisement et l'urbanisation en amont des barrages engendrent une forte érosion qui réduit la capacité de stockage des barrages de 2 à 3% chaque année, suite à l'envasement dû au transport et au dépôt de sédiments par les eaux de ruissellement.

En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus élevées d'Afrique du Nord. Les éléments de quantification concernant les taux et les concentrations d'érosion spécifique, issus des travaux de *Demmak (1982)*, donnent des chiffres allant de 20 à 500 tonnes/km²/an, avec une turbidité comprise entre 16 et 28 g/l. Le taux d'érosion spécifique atteint les 5.000 tonnes/km²/an dans le bassin de l'Agrioun qui alimente le barrage d'Ighil Emda (Bejaia). 120 millions de tonnes de sédiments sont rejetées chaque année dans la mer. L'irrégularité du climat influence directement les flux, qui sont caractérisés par :

- L'irrégularité saisonnière et interannuelle des flux d'eau ;
- La violence et la soudaineté des inondations : le débit du Cheliff peut dépasser les 4200 m³/s ;
- La sévérité et la durée des périodes basses eaux.

En Algérie, un effort louable a été entrepris depuis les années 1945 pour reforester les vallées (50.000 ha), les "bad-lands" ; fixer les ravines et corriger les oueds ; aménager 300.000 ha de terres cultivées en banquettes d'absorption ou de diversion (construites par les services de DRS) puis par la Direction générale des Forêts. Depuis 1978, la construction de banquettes a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans, et surtout, aux difficultés économiques. La lutte antiérosive a été restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, à la végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages.

Pour les paysans, les seules actions de l'Etat concernent aujourd'hui l'amélioration foncière (c'est-à-dire, sous-solage des sols à croûte calcaire, qui augmente la productivité des céréales) et la création de petites retenues collinaires, fournissant de l'eau en tête de vallée pour le bétail, l'habitat et quelques hectares d'irrigation. Même cette politique est remise en cause par des hydrologues qui font remarquer que l'envasement des barrages n'a pas diminué depuis l'effort consenti par l'aménagement des hautes vallées.

Heusch (1970) et *Demmak (1982)* : montrent que la majorité des sédiments piégés dans les réservoirs proviennent du ravinement, des glissements de terrain, des éboulements des berges

et de la divagation des oueds. En fonction des objectifs des projets de lutte antiérosive en vue de réduire les nuisances à l'aval ou de préserver le capital foncier des versants, on cherchera un compromis permettant d'intervenir dans les vallées pour piéger les sédiments et stabiliser les berges tout en aménageant les versants pour réduire et retarder le ruissellement (améliorations foncières, talus enherbés.). Des méthodes de calcul économique existent, qui permettent de choisir les interventions de lutte antiérosive les plus efficaces, en se basant sur les coûts des traitements antiérosifs, des nuisances auxquelles on peut s'attendre en l'absence d'intervention.

Touaïbia et Achite (2003) : la couverture végétale, le coefficient d'écoulement, la surface et la densité de drainage sont autant d'éléments qui influent directement sur l'érosion hydrique sur les bassins versants, un modèle a été établi dans ce sens dans le cas du bassin versant de l'oued Mina dont la formulation est donnée par la formule I.24

$$E_s = 34,12 * S^{0,164} . Dd^{-0,284} . Ce^{0,573} . Cv^{-0,329} \quad (1.15)$$

Avec un coefficient de corrélation multiple de 0,95

F.A.O (1980) ; Demmak (1982) : les divers types de roches et leurs structures donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupées par des roches et par les sols , en conséquence sur la quantité du sol susceptible d'être érodée. Une faible infiltration des roches affleurant indique qu'une grande quantité de sédiment d'eau ruisselée par conséquent une grande quantité de terre peut être emportée.

Chebbani (1999) : Les sols marneux lorsqu'ils sont secs restent non érodables, mais dès qu'ils atteignent une certaine humidité leur sensibilité à la détectabilité et au ruissellement augmente.

Roose (1994) : Les argiles, les marnes, les schistes, les basaltes, les gneiss sont très vulnérables au ravinement, les transports solides dans un bassin versant dépendent de la surface en roche de différents types (argileuses, marneuses, schisteuses..).

Tixeront (1960) : Ses travaux sont basés sur les données de 32 bassins d'Algérie et 6 bassins de Tunisie, dont la superficie varie de 90 à 22300 km².

L'auteur a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie. Après avoir regroupé les bassins en trois classes, suivant un critère régional, il a essayé de mettre en évidence le rôle des facteurs suivants : précipitations, écoulement annuel, répartition saisonnière des pluies, le couvert végétal et les facteurs géomorphologiques dans la dégradation du sol.

Il a trouvé que :

- Les teneurs en suspension des trois groupes de bassins augmentent d'une façon générale lorsque le débit liquide diminue,
- Le substratum joue un rôle considérable,
- Le crétacé inférieur, Jurassique, les terrains primaires, cristallins et cristallophylliens manifestent un taux d'abrasion négligeable,
- Les bassins à plus forte abrasion se situent dans les régions sismiquement actives,
- La répartition régulière des pluies avec un maximum en saison végétative est favorable aux faibles teneurs.
- Une zone de 300 à 700 mm où l'érosion est très active ($1200 \text{ Tonnes.km}^{-2} .\text{an}^{-1}$).

Capolini (1965-1969) :L'auteur a entrepris une étude géomorphologique régionale sur le bassin de Cheliff, afin de mettre en clair le processus d'érosion qui conditionne les transports solides des principaux affluents de l'Oued Cheliff.

Il a basé son étude sur l'analyse morphométrique des réseaux (densité de drainage, coefficient de torrentialité) mise au point par les géographes Américains Schumm et Horton. L'application a permis de trouver des résultats encourageants sur les bassins du Rhiou et du Fodda. A partir de ces résultats, l'auteur a généralisé la méthode à l'ensemble du bassin de l'Oued Cheliff.

Les résultats ont permis à Capolini de :

- Proposer une quantification des débits solides en associant à chaque formation lithologique un débit spécifique,
- D'établir une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins et le coefficient de torrentialité,
- De suggérer la cartographie des zones susceptibles à l'érosion à partir de la carte du coefficient de torrentialité.

Sogreah (1969) :L'étude est basée sur les données d'observations recueillies au niveau de 9 barrages et 18 stations hydrométriques.

Sur un bassin de nature géomorphologique donné, le transport solide apporté par les crues croît avec le volume ruisselé.

Leurs résultats ont été présentés sous forme d'une relation graphique traduisant des relations de la forme :

$$T = a R^b$$

Où : T est la dégradation spécifique exprimée en $T.km^{-2}.an^{-1}$,

R : la lame d'eau annuelle moyenne écoulee exprimer en mm,

$b = 0,15$

a : est un paramètre empirique variant avec le degré de perméabilité des bassins de 3,3 (perméabilité élevée) à 3200 (bassins imperméables).

1.10. Envasement des barrages

1.10.1. Définition

L'envasement est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues et barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage.

La construction d'un barrage change les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement et la capacité de transport des sédiments (*Chow, 1964*), transportée par l'écoulement, la matière solide tend à se déposer à l'approche des plans d'eau, car en réduisant sa vitesse, l'écoulement perd petit à petit sa capacité de transport quand le cour d'eau s'approche et se jette dans le lac du réservoir, les particules grossières se déposent en premier ensuite les plus fines jusqu'à atteindre la digue, n' ayant pas où s'échapper le dépôt se tasse et se consolide en réduisant ainsi la capacité de stockage du réservoir, sachant qu'en moyenne 90% des sédiments transportés par le cour d'eau sont piégés (*Chow, 1964*).

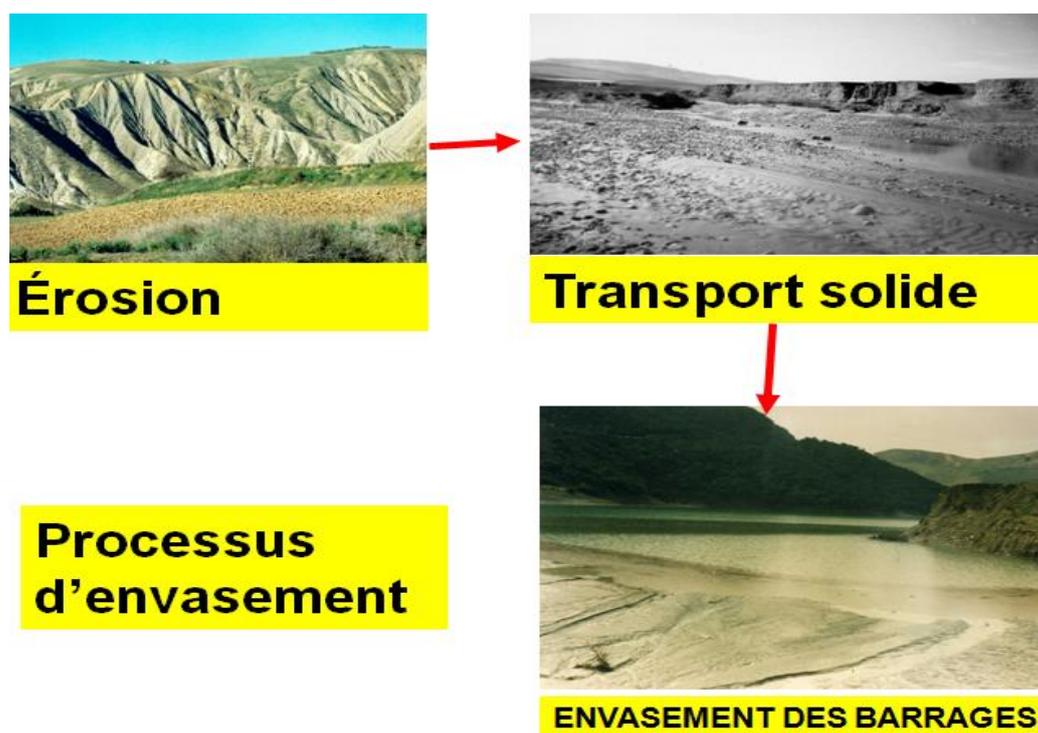


Figure 1.8. Processus d'envasement (Remini, 2009)

1.10.2. Problématique de l'envasement

Le problème d'envasement des barrages n'est pas un problème propre à l'Algérie, beaucoup de pays dans le monde souffrent du problème surtout dans les zones arides et semi-arides, où le manque de ressources hydrique est accentué par l'érosion des sols qui peut atteindre les 5000 t/km²/an contre 30 à 50 t/km²/an en Europe (Abdeli, 2007).

L'envasement est la conséquence directe de l'érosion et la sédimentation, qui sont aussi la cause de la dégradation des sols agricoles ; 45% des sols agricoles du Nord Algérien sont directement menacés par l'érosion, soit 12 Millions d'hectares (Chebbani et al, 1999).

La maîtrise de ce phénomène ne peut passer qu'à travers des modèles qui nous permettent de décrire et de quantifier dans la mesure du possible les taux de dégradation des sols et ainsi les conséquences qui se suivent. La validité de ces modèles est tributaire de la qualité et la quantité de donnée disponible. Le manque de données conduit souvent l'ingénieur à utiliser les méthodes empiriques disponibles afin d'évaluer les quantités de sédiments transportés annuellement par les cours d'eau (Meddi et al, 1998), sans qu'on ait de dispositifs de contrôle de ces résultats.

En Australie Chanson (1998) a cité quelques exemples de petits barrages, comme celui de Moore Creek, où deux averses ont pu transporter 85000 m³ de vase, et le barrage été

complètement envasé au bout de 26 ans de service, même chose pour le Korrumbyn Creek Dam, qui a été complètement envasé au bout de 20 ans de service.

En Afrique du Sud la moyenne d'envasement pour 170 barrages d'un volume allant de 0,5 à 5000 Hm³ est de 0,35%, ce qui engendre une perte de capacité de 105 Hm³ par an ce qui correspond à une perte économique de 21,2 Millions de Dollars (Braune, 1989).

Pour les USA, vu l'immensité du pays elle diffère d'une région à une autre avec une moyenne de 0,23%, sauf qu'elle varie de 0,07 à Pratts ville jusqu'à 5% à Bennington qui enregistre une érosion record de 5311 tonnes/mil²/an (Chow, 1964).

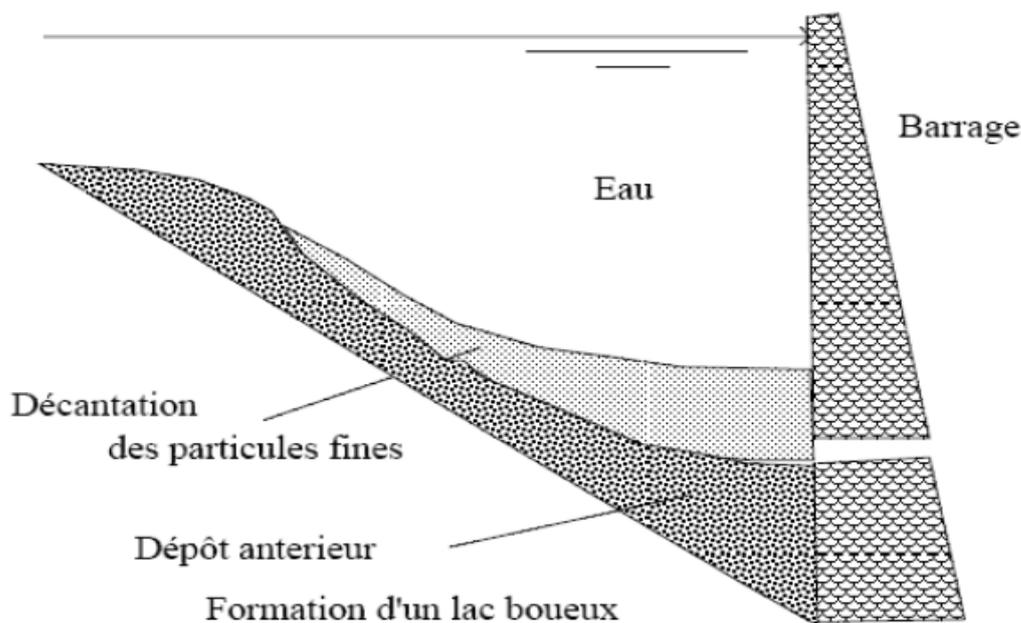


Figure 1.9. Dépôt de vase (Remini, 2003)

Le Maghreb est considéré comme le plus touché par le problème d'érosion et d'envasement en Afrique, surtout si on se réfère aux travaux de Walling (1984) qui a lancé une fourchette de l'érosion spécifique de 1000 à 5000 t/km²/an. Les trois pays du Maghreb dispose de 230 barrages d'une capacité totale de 23 Milliards de m³ Dont 61% reviennent au Maroc, 23 % à l'Algérie et 16% à la Tunisie (Remini, 2003), ces barrages enregistre une perte annuelle de capacité de 125 Hm³.

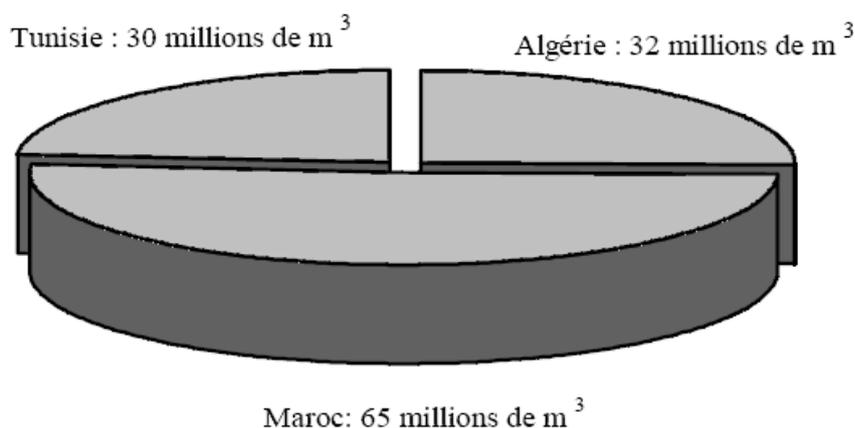


Figure 1.10. Envasement moyen au Maghreb (*Remini, 2003*).

Le tableau suivant résume l'état d'envasement de quelques barrages Algériens d'après plusieurs auteurs ainsi que les données de l'ANBT pour les six barrages du bassin des Côtiers Algérois.

Tableau 1. 3. L'état d'envasement de quelques barrages algériens (*Remini et al, 2003*)

Barrage	Mise en eau	Capacité Initiale (10 ⁶ m ³)	Envasement moyen annuel (10 ⁶ m ³ /an)
	Année	Mm ³	Mm ³
OUED FODDA	1932	228	2.66
GHRIB	1939	280	3.2
DJORF EL TORBA	1934	350	1.3
S.B.M.A	1978	235	1
LACHEFFIA	1965	175.68	0.17
EGHIL EMDA	1953	154.8	1.6
BOUHANIFIA	1944	73	0.78
BENI BAHDELS	1940	63	0.2
BAKHADA	1936	37.6	0.27
FOUM EL GHERZA	1950	47	0.8
ZERDEZAS	1936	14.9	0.25
HAMIZII	1935	21	0.35
MEFROUCH	1936	16	0.12
K'SOB	1940	11.6	0.3
FOUM EL GUEISS	1939	3	0.03

Remini (2005) a développé un modèle prévisionnel de l'envasement en se basant sur les données de près de 90 barrages, ce qui a donné la carte de sensibilité à l'envasement suivante.

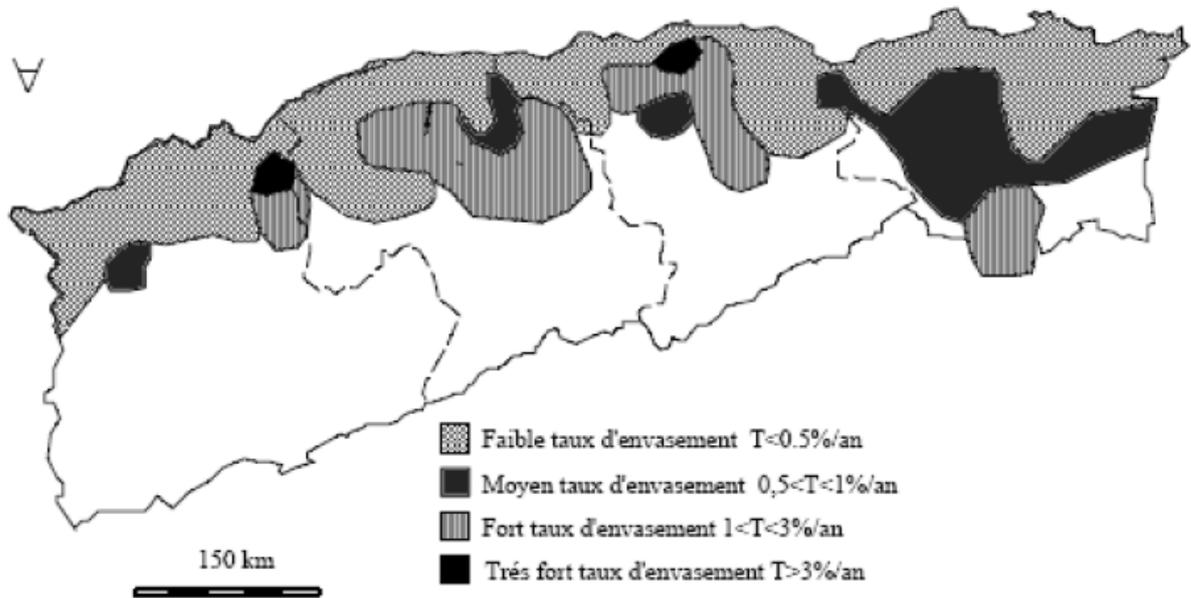


Figure 1.11. Sensibilité à l'envasement des barrages (Remini, 2005).

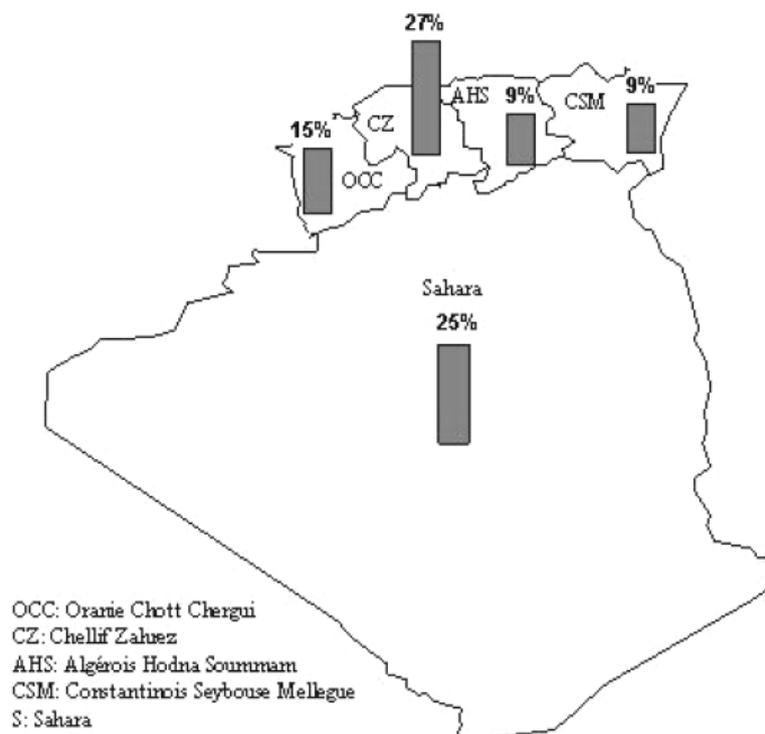


Figure 1.12. Répartition du taux de comblement annuel des grands barrages dans les bassins hydrographiques (Remini et Hallouche, 2003).

1.10.3. Les moyens de lutte contre l'envasement des barrages

1.10.3.1. Réalisation des barrages de décantations

La meilleure façon d'éviter l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage, cela peut se faire par la création de retenues pour la décantation des apports solides, ce qui revient à construire un autre barrage en amont. La réalisation du barrage de Boughezoul en amont de celui de Ghrib, bien qu'édifié essentiellement pour amortir les crues de oued Chellif, a permis de retenir depuis sa création un volume de près de $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase qui, sans elle, seraient venus s'ajouter aux $150 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ qui se sont déposés dans celle de Ghrib (en l'an 2000). Le barrage de Boughezoul a ainsi réduit l'envasement du Ghrib de près de 18 %.

1.10.3.2. Surélévation des barrages

L'un des moyens de lutte utilisés en Algérie est la surélévation de la digue. Cette méthode consiste, lorsque le taux de comblement est avancé, à augmenter la hauteur de la digue d'une taille variable, permettant la constitution d'une réserve complémentaire pour compenser la perte du volume occupé par la vase. Cette technique a été réalisée sur 04 barrages: Bakhada, K'sob, Zardézas et Boughezoul. La surélévation des barrages permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser la valeur envasée. La nouvelle situation ainsi créée ne peut qu'influencer l'évolution des dépôts des sédiments dans la retenue. Nous avons constaté que l'envasement a augmenté plus rapidement après cette surélévation, ce fait étant confirmé par l'examen du tableau 1, pour les quatre barrages cités ci dessus.

1.10.3.3. La technique de chasse

La technique de chasse consiste à évacuer une quantité des sédiments par les pertuis de vidange à l'arrivée des crues. Elle est appliquée souvent au barrage de Beni Amrane. Ce dernier d'une capacité de $15,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ a été doté de six vannes de fond. Environ $2,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase ont été évacués durant la période 1988- 1993. L'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange n'est efficace que pour la zone proche des vannes.

L'efficacité des chasses opérées dans le temps au niveau du barrage n'a pas dépassé les 26 % du total des sédiments entrants (*Remini, 2002*). L'ouverture de la vanne de fond au barrage de Foum El Gherza a permis d'évacuer environ $0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase durant l'année 1989/1990 et une quantité de $0,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase de 1990 à 1993 (*Remini, 2002*).

1.10.3.4. Soutirage des courants de densité

La majorité des retenues en Algérie présentent les conditions favorables à l'apparition des courants de densité (forte concentration en sédiments fins et la forme de la retenue de type canal). En effet, la forte concentration en sédiments dans les cours d'eau surtout en période de crues et la forme géométrique de la cuvette (de type canal) donnent naissance aux courants de densité à l'entrée d'une retenue et peuvent se propager jusqu'au pied du barrage. L'ouverture des vannes de fond au moment opportun peut évacuer une forte quantité en sédiment. Cette technique est utilisée dans les barrages d'Ighil Emda, d'Erraguene et d'Oued El Fodda. Le barrage d'Ighil Emda a été équipé d'un dispositif installé spécialement pour le soutirage des sédiments et constitué de 8 vannettes de dévasement et 3 vannes de dégrèvement. Une quantité importante évaluée à 46.10^6 m^3 a ainsi été évacuée en 46 ans d'exploitation (1954-2000).

Durant la période 1984-1992, le rendement a atteint 55 %. En effet, une quantité de vase de $8,3.10^6 \text{ m}^3$ a été évacuée pour un apport total de $15,3.10^6 \text{ m}^3$ dans la retenue. Pour tenter de résoudre le problème de l'obturation de la vanne de fond du Barrage de Oued El Fodda (obturée en 1948 et se trouve actuellement sous 45 m de vase), cinq vannettes de dévasement ont été installés en 1961. La retenue avait initialement (1932) une capacité de $228 10^6 \text{ m}^3$ qui a été ramenée progressivement à $124 10^6 \text{ m}^3$ en 1994, mais en l'absence de soutirage, cette capacité en 1994 aurait été inférieure puisque réduite à $100,5 10^6 \text{ m}^3$. Durant la période : 1961-1994, une quantité de $57,5.10^6 \text{ m}^3$ de vase est arrivée dans la retenue, alors que seulement $21,5.10^6 \text{ m}^3$ de vase ont été évacués, soit un rendement de 37 %. Malgré le faible taux d'envasement dans la retenue, le barrage d'Erraguene a été équipé d'un système de soutirage, composé de 4 vannettes de dévasement et de deux vannes de dégrèvement. Une quantité de vase évaluée à 10.10^6 m^3 a été évacuée en 38 années d'exploitation (1962-2000), alors que 19.10^6 m^3 se décantaient dans la retenue, soit un rendement moyen de 32 % (*Remini et Hallouche, 2004*).

1.10.3.5. Dragage des barrages

Malgré le coût onéreux de l'opération de dragage qui revient environ à celui de la réalisation d'un nouveau barrage, la technique de dragage devient indispensable pour les barrages dont la stabilité est en danger ou bien dans le cas où les sites pour la réalisation de nouveaux ouvrages deviennent rares. Suite à l'accélération de l'envasement du barrage de Fergoug III (actuel), l'Algérie a acquit en 1989 une nouvelle drague suceuse refouleuse baptisée « REZOUG Youcef ». La drague d'un poids total de 300 tonnes, est conçue pour

refouler à une hauteur de 28 mètres, dans une conduite de 700 mm avec un débit maximum de mixture de 1600 l/s pour une profondeur de dragage de 3 à 16 m.

1.11. Conclusion

Le terme générique *Erosion* recouvre une série d'événements naturels dont chacun est la conséquence de l'évènement précédent et qui affecte tous les paramètres à retenir pour la gestion des bassins versants.

Chaque région doit mettre au point son propre modèle prévisionnel adapté à ses conditions spécifiques, et s'appuyant sur sa propre base de données. Dans ce contexte, nous allons essayer de chercher le modèle le plus fiable de l'érosion en fonction des caractéristiques climatiques, morphométriques et morphologiques de notre région d'étude en quantifiant le transport solide au droit de station hydrométrique, et la cartographie d'érosion hydrique en utilisant l'équation universelle USEL dans un système d'information géographique (SIG), et des levés bathymétriques au niveau du barrage.

Chapitre 2

Description de la zone d'étude

Chapitre 2. Description de la zone d'étude

2.1. Introduction

Le bassin versant de Cheliff- Ghrib a été choisi comme bassin d'application de notre travail pour la diversité des données qui y sont disponibles, et malgré l'absence quasi-totale d'études sur ce bassin.

L'abondance des données semble parfois induire une vision globale satisfaisante du bassin versant. En fait, les choses ne sont pas si simples et les mesures dont on dispose, ainsi que les interprétations qui en découlent sont parfois complexes.

Nous présentons ici les principales caractéristiques du bassin, les données du milieu physique dont nous disposons, et l'interprétation que nous pouvons en faire quant au fonctionnement hydrologique de notre site d'étude.

2.2. Présentation générale

Le bassin versant d'oued Cheliff est de forme allongée dans l'axe du cours d'eau principale. L'exutoire se trouve à environ de 20 Km au Sud-ouest de la wilaya de Médéa.

2.3. Situation géographique

Le bassin versant de l'oued Cheliff fait partie du bassin de Cheliff-Ghrib (Figure 2.1). Il se situe à 100 km au Nord-Ouest d'Alger, entre 2°25' et 3°45' de longitude Est et entre 35°45' et 36°00' de l'altitude Nord. D'une altitude moyenne de 789 mètres, il draine une superficie de 1378.63 km². L'oued Cheliff-Ghrib parcourt une distance de 79.91 km suivant une orientation Sud-est à l'Ouest du bassin versant, le relief atteint une altitude de 1615 mètres, tandis que le point le plus bas est à l'exutoire avec une altitude de 375 mètres.

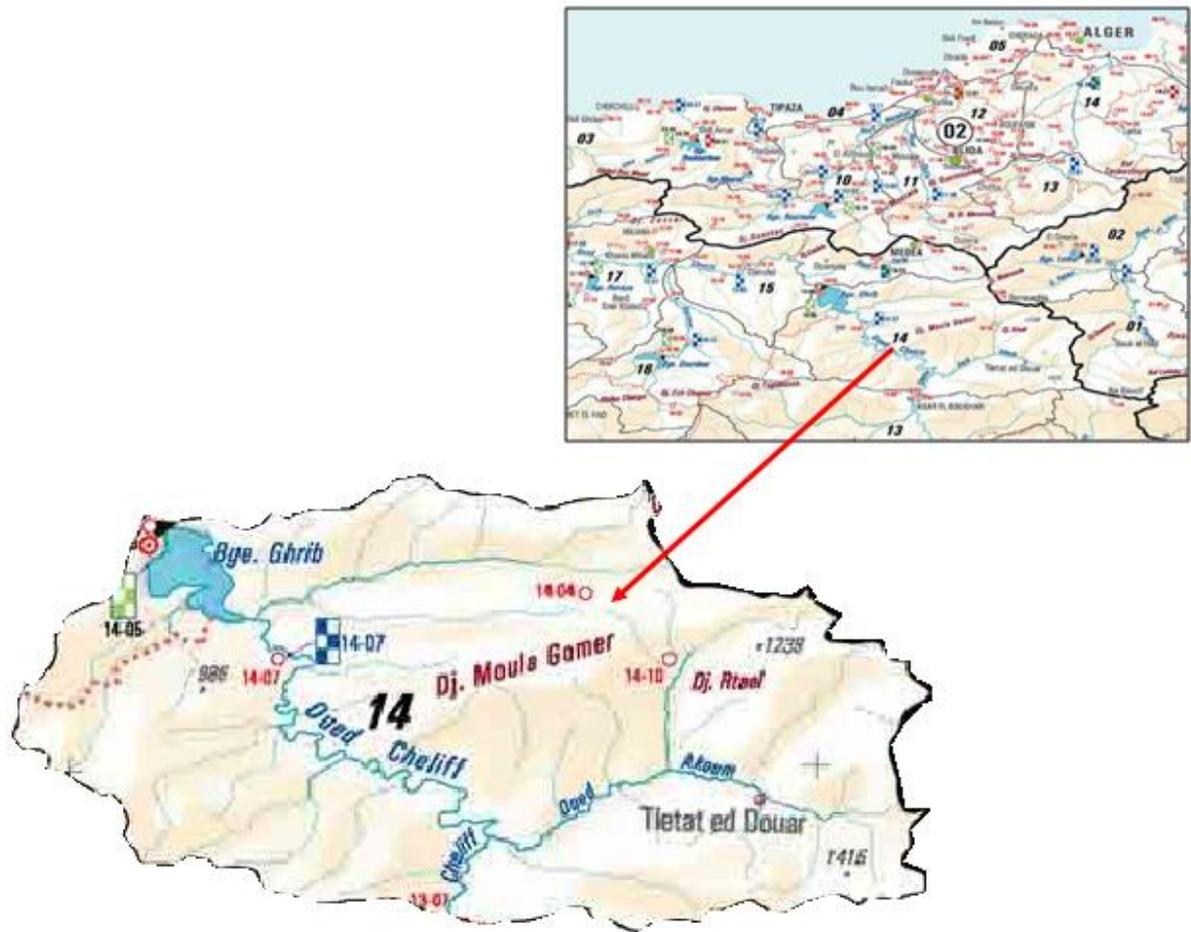


Figure 2.1. Situation du bassin versant Cheliff-Ghrib (ANRH).

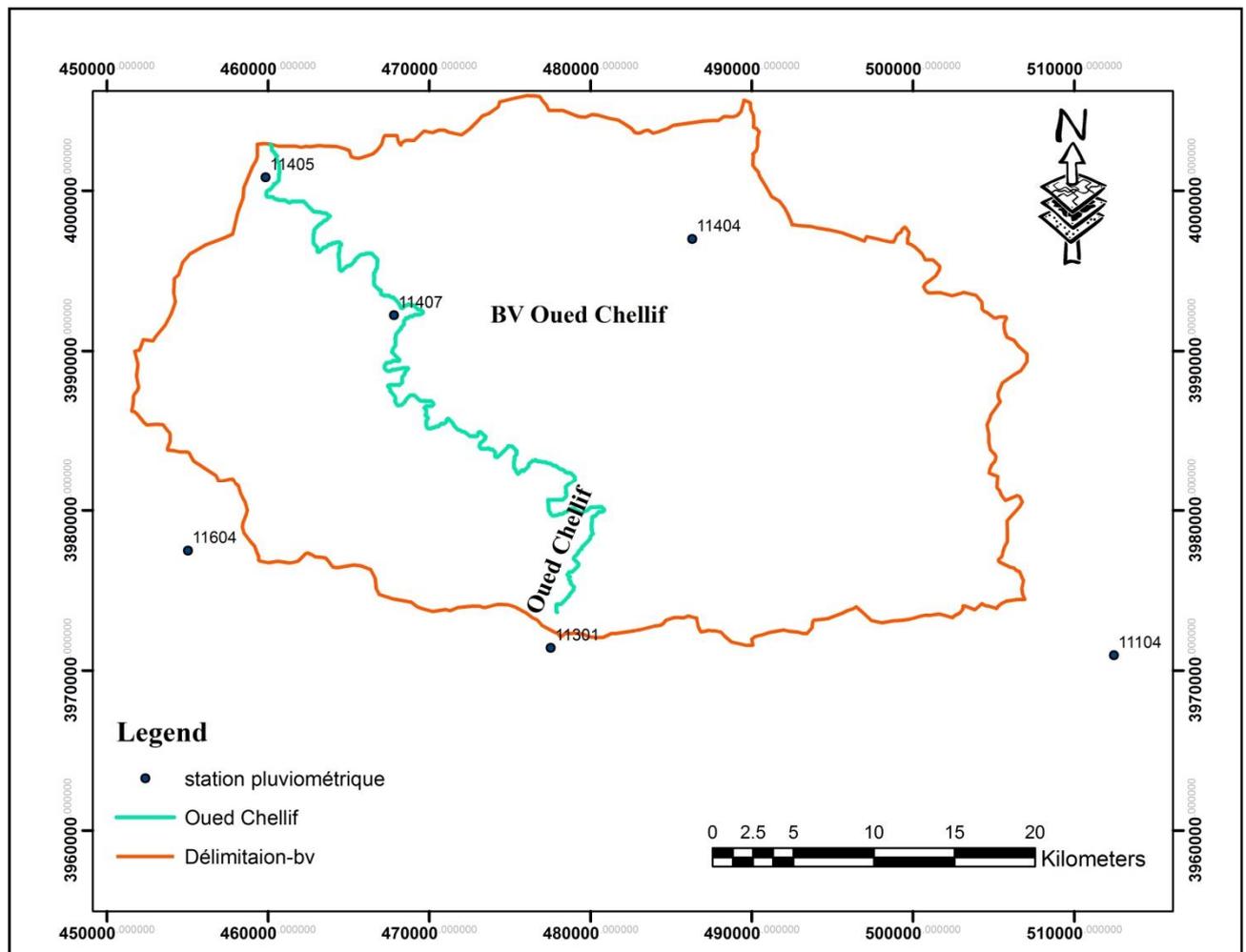


Figure 2.2. Carte du bassin versant Cheliff-Ghrib

2.4. Morphologie du bassin

2.4.1. Caractéristiques climatique

Le climat d'une région est influencé par de nombreux paramètres climatologiques qui sont :

- la température ;
- les précipitations ;
- les vents ;
- le sirocco ;
- l'humidité ;

La climatologie a essentiellement pour but :

- L'analyse complète des éléments météorologiques qui déterminent le climat
- La recherche des causes qui expliquent les différents climats et les fluctuations qui les accompagnent.

2.4.1.1. Température de l'air

C'est l'un des éléments les plus importants de la radiation solaire. Un certain nombre de phénomènes physiques tels-que l'évaporation, le dégel de l'eau, la gelée blanche. La dilatation et la concentration de certains matériaux : phénomène physiologique ou pathologique tel que la transpiration sont liées à la température de l'air. La température dont il s'agit est la température de l'air mesuré à l'ombre dans un abri météorologique.

Le tableau 2.1 donne les valeurs de la température de l'air de station d'ELKhemis sur une période de trois ans.

Les différents paramètres sont présentés par :

- m : la moyenne de tous les minimums
- M : la moyenne de tous maximums
- $(M+m)/2$: c'est la moyenne mensuelle
- $M-m$: c'est la différence de la température

D'après les observations recueillies auprès de la région d'Elkhemis, On remarque que la température moyenne mensuelle varie de $10,9^{\circ}\text{C}$ en janvier jusqu'à 29°C en Aout

- La température moyenne mensuelle de la région d'ELKhemis est de $18,5^{\circ}\text{C}$
- La température maximale correspondant au mois d'Aout est de $37,9^{\circ}\text{C}$ alors que le minimum est de $6,02^{\circ}\text{C}$ en janvier

D'autre part, les moyennes annuelles des températures minimales sont de $10,6^{\circ}\text{C}$ et maximale de $28,9^{\circ}\text{C}$; l'écart le plus faible pour la station d'ELKhemis est de $9,4^{\circ}\text{C}$.

Tableau 2.1. La température de l'air de la station d'ELKhemis. (ANRH).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	T moy ann
M	15,6	19	20,15	23,5	25,86	31,13	34,11	37,9	32,91	25,64	18,04	17,36	28,9
m	6,2	4,9	3,8	6,7	10,6	14,5	19,98	19,8	18,09	15,56	8,05	6,02	10,6
(M+m)/2	10,9	11,95	11,97	15,1	18,23	22,81	27,04	28,85	25,5	25,6	13,04	11,69	19,7
M-m	9,4	14,1	16,35	16,8	15,26	16,63	14,13	18,1	14,82	20,08	9,99	11,34	18,3

2.4.1.2. La gelée blanche

La gelée blanche est nuisible pour les cultures, donc il faut qu'on fasse une étude sur les fréquences pour avoir une bonne idée sur le genre de culture qu'on devrait pratiquer.

Les fréquences les plus élevées sont remarquées en juin, juillet pour El Khemis et pour Djendel.

Tableau 2.2. Les fréquences de la gelée blanche (sur une période de deux ans). (ANRH).

Mois/st	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
El Khemis	0	0,1	0,3	1,1	2,0	3,3	6,6	4,7	1,4	0,2	0,1	0,1	19,8
Djendel	0	0,1	0,4	0,2	0,6	3,3	6,2	4,6	1,6	0,1	0	0,1	19

2.4.1.3. L'humidité

Les mois les plus humides de l'année s'étalent de juin jusqu'à septembre avec des fréquences maximales de 10,3 ; 11 ; 11,3 ; 11,9.

Tableau 2.3. Les fréquences d'humidité. (ANRH).

Mois/ St	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
Médéa	5,8	5,4	6,6	6,9	8,9	10,3	11	11,3	11,9	8,9	6,8	5,9	8,2

2.4.1.4. Le Sirocco

C'est un vent sec, chaud chargé de poussières, il influe sur la nature du climat.

Dans la région on remarque que les fréquences les plus élevées sont de Juillet et Aout.

Tableau 2.4. Les fréquences de Sirocco. . (ANRH).

Mois/ St	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
El Khemis	0	0,1	0,3	1,1	2,0	3,3	6,6	4,7	1,4	0,2	0,1	0	19,8

2.4.1.5. Le vent

Le vent est un air en mouvement qui se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression.

Dans la région, en général est faible puisque sa force est comprise entre 1,4 et 2.

(Pour $1 < F < 2$ donc le vent faible avec F est la force de vent)

Tableau 2.5. Les fréquences des vents. (ANRH).

Mois/ Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
El Khemis	1,5	1,8	2	1,8	1,9	1,4	1,5	1,6	1,5	1,4	1,6	1,5	19,5

2.4.2. Caractéristiques physiques

2.4.2.1. Géologie du bassin

La structure tectonique joue un rôle prépondérant dans la morphologie de cette région. A l'allochtone correspond des sommets élevés mais au relief assez mou et à architecture anarchique. Par contre, à l'autochtone crétacé correspond des reliefs orientés généralement Est-ouest, parallèles aux axes et replis tectoniques, cet ensemble est dominé par la terminaison occidentale des Bibans dont la masse de flysch culmine à 1249 m. Seule la vallée de l'Oued Seghouane est orientée Nord-Sud, constituant une excellente voie de passage pour la grande route Alger-Laghouat. A l'Est de Berrouaghia, une dépression topographique correspondant aux marnes du Crétacé supérieur sépare les Bibans de la zone sud –tellienne, et facilite les communications en direction de l'Est.

Le quaternaire est assez réduit. Outre quelques placages d'éboulis sur les pentes, il est constitué essentiellement de remplissage d'alluvions plus ou moins fins dans les lits des oueds,

avec localement des restes de terrasses plus anciennes témoignant d'une reprise d'érosion actuelle.

Le Miocène affleurant dans la partie Nord de la feuille constitue la bordure méridionale du grand bassin de Médéa, qui prolonge à l'Ouest par le bassin du Chéloff et à l'Est vers Bouira.

Une série oligocène de même faciès que celle connue plus à l'Est sur la feuille Souagui au Draâ el Mensdjel, où l'on observe sur plusieurs centaines de mètres des grès grossiers à huitres, des marnes sableuses grises et des calcaires détritiques, attribués à l'Oligocène.

Des marnes à concrétions rouges, affleurant dans le coin Sud-est de la feuille, non datées, ont été rattachées au Crétacé, par analogie au sénonien inférieur affleurant près du champ Sénonien autochtone – on distingue du bas en haut :

- Épaisse série (460m) de marnes grés –bleuté, à petites intercalations calcaires (calcaires su lithographique brun-clair et calcaire argileux gris) avec au milieu de la série, une passée (70m) de marnes grises à boudins et miches calcaires abondants ; les marnes sont ferrugineuses au-dessus de cette passée.
- Cuesta de calcaire bien lités, gris calcaires dont l'épaisseur varie du 8 à 15 m du sud au Nord. Au niveau de calcaires organogènes à Bryozoaires.

Gros bancs massifs de calcaires gris-clair à pate fine, et avec à la base, rares niveaux marneux à débit schisteux.

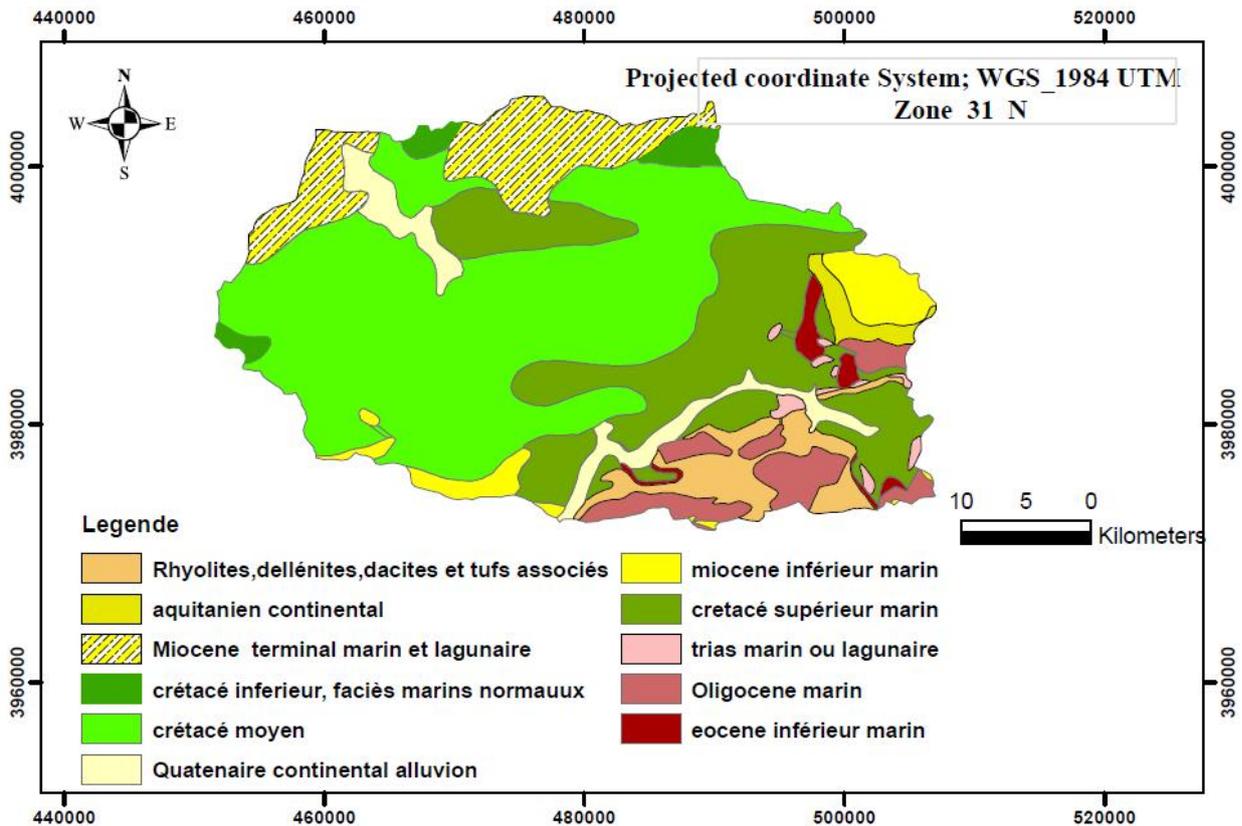


Figure 2.3. Carte géologique du bassin versant Cheliff-Ghrib

2.4.2.2. Impact de la géologie sur l'hydrologie

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en général une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration.

2.4.2.3. Végétation du bassin versant

Aux nappes telliennes, généralement dépourvues de toute végétation, s'oppose le Crétacé des Biban. Celui-ci est inégalement recouvert d'espèces différentes :

- au flysch Albien correspond une végétation où dominent les épineux et les chênes verts, accompagnés de rares chêne-liège ;
- sur les marnes cénomaniennes, formant la dépression de Berrouaghia, se cultivent la vigne et un peu de céréales ;

- sur les séries marneuses du Sénonien pousse, là où elle n'a pas été détruite par les chèvres et les moutons ou par le feu pendant la guerre, une maigre forêt de pins.
- Les pins d'Alep et les genévriers couvrent la majeure partie de la zone crétacée où ne se rencontrent que de maigres cultures de céréales dans les clairières ou dans l'étroite vallée du Cheliff.
- Par contre, dans le reste du pays, si les massifs gréseux ne supportent que des broussailles éparses, les dépressions marneuses et les grandes vallées alluviales sont couvertes par de riches cultures de céréales (blé et orge).

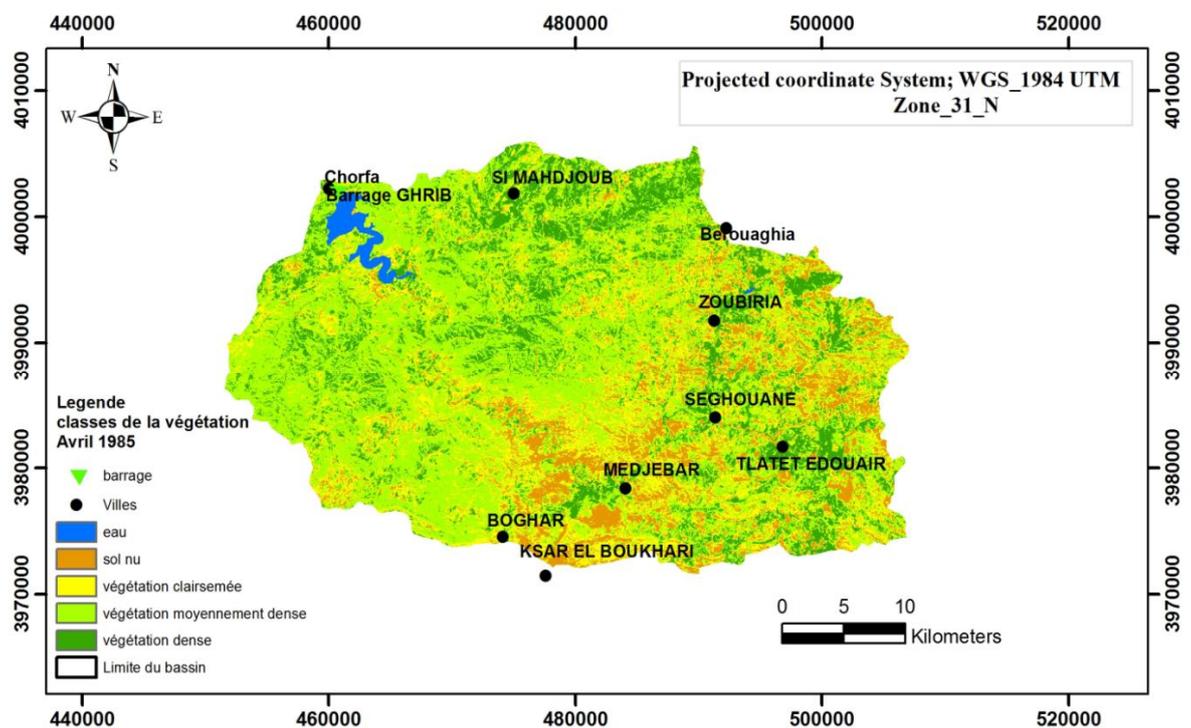


Figure 2.4. Carte d'occupation du sol dans la région d'étude.

2.4.3. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant

2.4.3.1. Les caractéristiques morphométriques

La forme du bassin versant est la configuration géométrique telle qu'elle est projetée sur un plan horizontal. Elle influence directement le temps de réponse du bassin, c'est à dire sur le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent sur l'hydrogramme de crue.

* *Indice de compacité ou indice de Gravélius*

C'est la relation entre le périmètre du bassin et celui d'un cercle de la même surface. Il est déterminé par la relation suivante :

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Avec :

P : Périmètre du bassin en Km

S : Surface du bassin en Km²

Si, *Kc* tend vers 1 : Le bassin est ramassé

Si, *Kc* > 1 le bassin est allongé

Plus ce coefficient s'approche de 1, plus la forme de bassin versant sera ramassée et plus le temps de concentration des eaux seront court. Elle sera allongée dans le cas contraire.

* *Rectangle équivalent*

Il est défini par sa longueur "L" et sa largeur "l" et par la même surface du bassin versant "S".

Les dimensions de ce rectangle sont données par les formules suivantes :

$$\text{La longueur} : L = \frac{Kc\sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right] \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\text{La largeur: } l = \frac{Kc\sqrt{S}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right] \dots\dots\dots(2.3)$$

* *Coefficient d'allongement Ca :*

Ce coefficient est obtenu par la relation

$$Ca = L_{cp}^2 / S \dots\dots\dots(2.4)$$

Avec :

L : la Longueur du cours d'eau principal (km).

S : la surface du bassin versant (km²).

2.4.3.2. *Caractéristiques du relief*

* *Hypsométrie des bassins*

La variation d'altitude à l'intérieur d'un bassin ainsi que l'altitude moyenne sont des données essentielles aux études de la température et des précipitations.

La description détaillée de l'élévation d'un bassin est donnée par les courbes hypsométriques, et à partir de celles –ci, nous pouvons déterminer les caractéristiques de relief, à savoir :

- L'altitude maximale (H_{\max}).
- L'altitude minimale (H_{\min}).
- L'altitude médiane correspond à 50% de la surface ($H_{50\%}$).
- L'altitude moyenne (H_{moy}) déterminée par l'expression 2.6.
- L'altitude correspond à 5% de la surface ($H_5\%$).
- L'altitude correspond à 95% de la surface ($H_{95\%}$).
- La dénivelée ($D= H_5\% - H_{95\%}$).

La carte d'altitudes est obtenue suite au traitement effectué en utilisant la carte MNT téléchargées gratuitement à partir du site <http://glovis.usgs.gov/> de l'USGS.

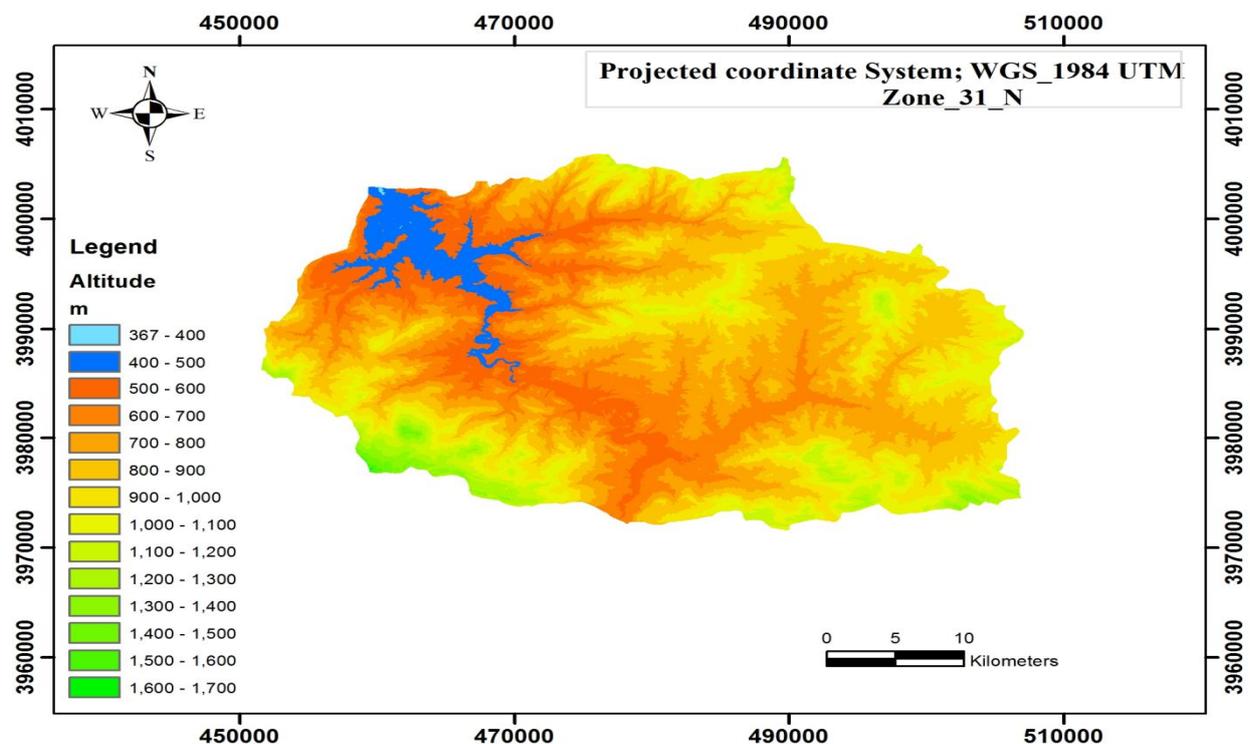
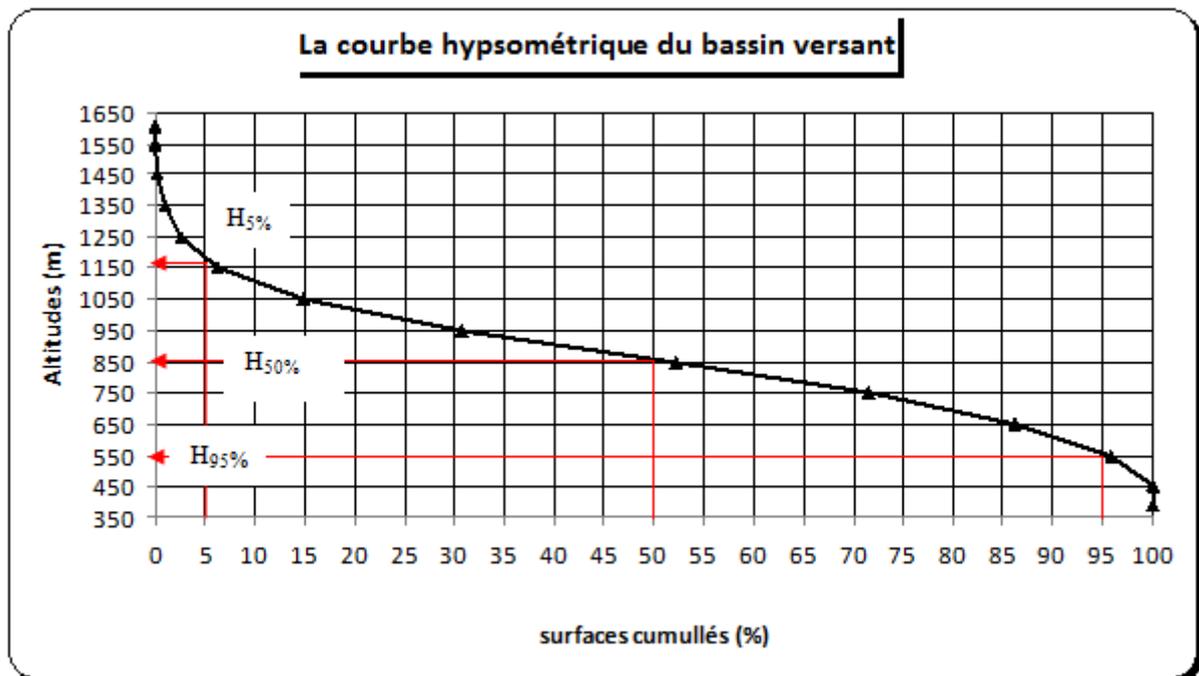


Figure 2.4. Carte d'altitude du bassin versant.

Pour estimer ces paramètres on doit présenter la répartition hypsométrique après planimétrie des aires partielles comprises entre les courbes de niveau maîtresses et les différentes cotes.

Tableau 2.6. Hypsométrie du bassin versant

Altitude	Si (Km2)	S cum(Km2)	S cum%	Dénivelée di	Hi (Km)
1615-1600	0.33	0.3300	0.0239	15	1609.5
1600-1500	0.91	1.2400	0.0899	100	1550
1500-1400	2.7	3.9400	0.2858	100	1450
1400-1300	9	12.9400	0.9386	100	1350
1300-1200	24.27	37.2100	2.6991	100	1250
1200-1100	47.35	84.5600	6.1336	100	1150
1100-1000	119.35	203.9100	14.7908	100	1050
1000-900	220.65	424.5600	30.7958	100	950
900-800	294.18	718.7400	52.1344	100	850
800-700	266.1	984.8400	71.4361	100	750
700-600	203.63	1188.4700	86.2066	100	650
600-500	132.46	1320.9300	95.8147	100	550
500-400	57.19	1378.1200	99.9630	100	450
400-375	0.51	1378.6300	100.0000	25	387.5

**Figure 2.6.** La Courbe hypsométrique du bassin versant

Carte des pentes

A partir du modèle numérique de terrain on a déduit la carte des pentes (figure 2.7). En tenant compte de l'effet de la pente, le bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib montre une forte

susceptibilité à l'érosion. En effet, est assez contrasté avec des pentes fortes et moyennes qui occupent 95% de la surface du bassin versant.

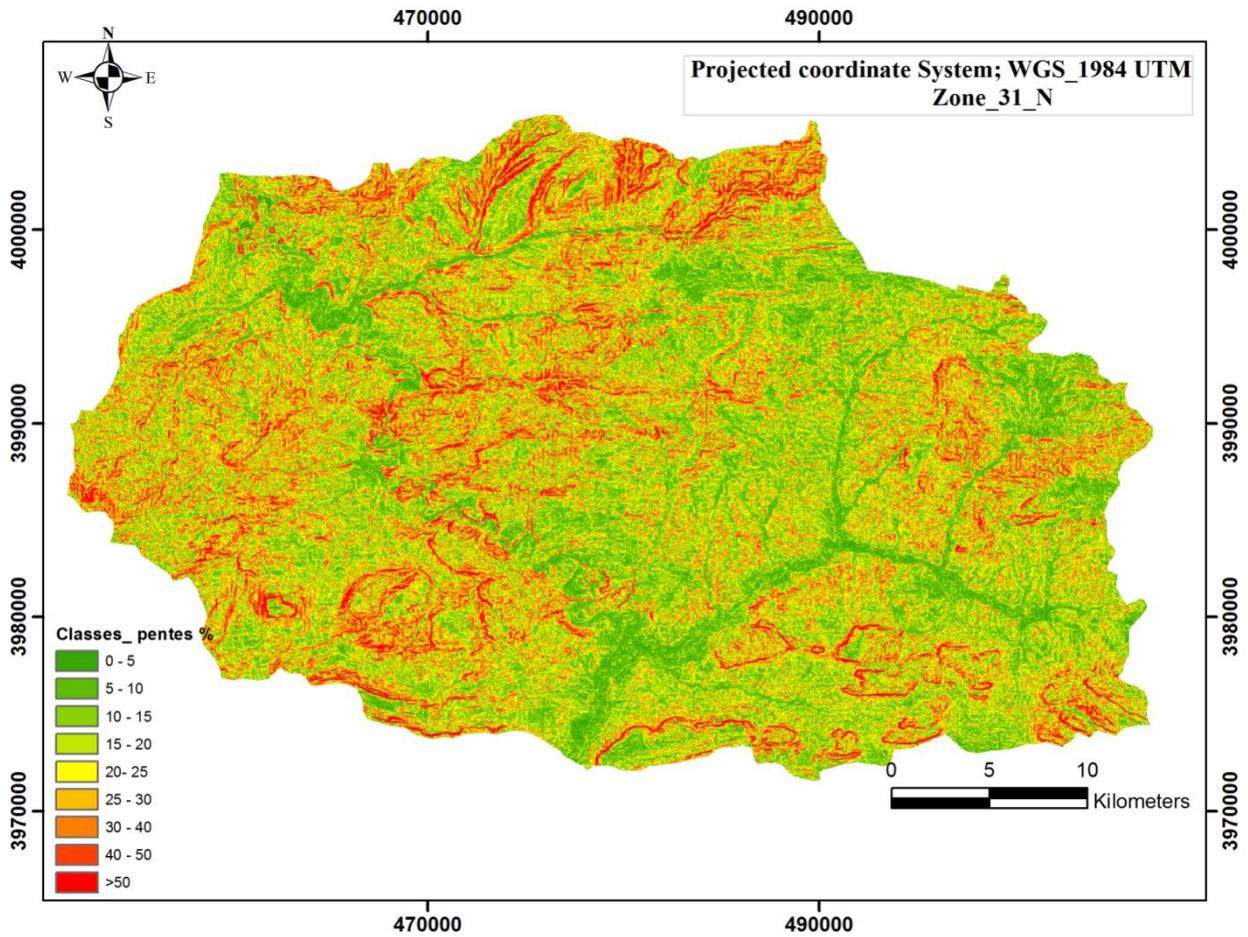


Figure 2.7. Carte des pentes du bassin versant Cheliff-Ghrib

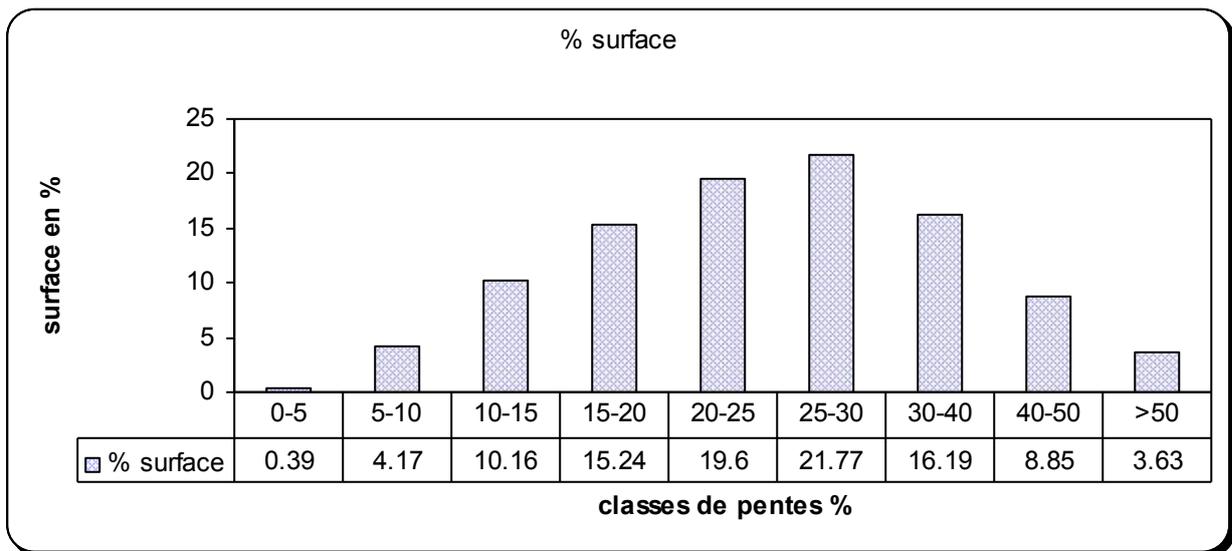


Figure 2.8. La répartition des classes de pentes en fonction de surface

*** Dénivelée simple**

On définit comme étant la différence de cote entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \dots \dots \dots (2.5)$$

*** Altitude moyenne de BV**

$$H_{Moy} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i H_i}{A} \dots \dots \dots (2.6)$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin (m).

S_i : Surface comprise entre deux courbes de niveaux i et i+1 (Km²).

H_i : Altitude entre ces deux courbes de niveaux (m).

A : Surface totale du bassin versant en Km².

*** Indice de pente**

Selon [Dubreuil \(1974\)](#), le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant pour permettre des comparaisons et des classifications entre bassins. Ils sont déterminés à partir de la connaissance des courbes hypsométriques.

*** Indice de pente de roche I_p**

Il permet de déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant, il est calculé par l'expression 2.8 :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i (H_i - H_{i-1})} \dots \dots \dots (2.7)$$

Avec :

I_p : indice de pente de roche en %.

H_i : fraction de surface comprise entre l'altitude a_i et a_{i+1} (a_i, a_{i+1}) altitude des courbes de niveau du bassin (m).

L : longueur du rectangle équivalent en Km.

H_{i+1}, H_i : Côtes de ligne de niveaux du bassin en m.

*** Dénivelée brute**

On définit comme étant la différence de cote entre H_{max} et H_{min}

$$D_b = H_{max} - H_{min}$$

* Indice de pente globale I_g

Il est utilisé pour la classification des bassins versants, cet indice est déterminé par la formule :

$$I_g = \frac{D}{L} \text{ en } \% \dots\dots\dots(2.8)$$

Avec :

D : Dénivelée en m.

L : Longueur du rectangle équivalent en Km.

Tableau 2.7. Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global I_g .

	Relief	Valeur de I_g
1	Très faible	$I_g < 0.002$
2	Faible	$0.002 > I_g > 0.005$
3	Assez faible	$0.005 > I_g > 0.01$
4	Modéré	$0.01 > I_g > 0.02$
5	Assez Modéré	$0.02 > I_g > 0.05$
6	Fort	$0.05 > I_g > 0.1$
7	Très fort	$0.1 < I_g$

* Pente moyenne d'un bassin versant I_m

La pente moyenne d'un bassin versant peut se calculer par l'expression 2.9 :

$$I_m = \frac{H(0,5L_1 + L_2 + L_3 + \dots + 0,5L_n)}{S} \dots\dots\dots(2.9)$$

Avec :

I_m : pente moyenne du bassin en (%).

H : hauteur entre deux courbes de niveaux consécutives (m).

L_i : longueur de la courbe de niveau en (Km).

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

L : longueur du rectangle équivalent en (Km).

2.5. Paramètres du réseau hydrographique

2.5.1. Densité de drainage D_d

C'est le rapport de la longueur totale des talwegs à la surface du bassin versant, elle est exprimée en Km/Km^2 , soit :

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{S} \dots\dots\dots (2.10)$$

Avec : $\sum_{i=1}^n l_i$: Longueur totale cumulée des talwegs (km).

S : Surface du bassin versant (Km²).

2.5.2. Coefficient de torrentialité (C_t)

$$C_t = Ft \cdot Dd \dots\dots\dots (2.11)$$

Avec :

Ft: Fréquence des talwegs élémentaires : $Ft = \frac{N}{S}$

N: Nombre des talwegs d'ordre 1.

2.5.2.1. Dénivelée spécifique D_s

L'indice « I_g » décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique « D_s » permet d'utiliser la classification de l'O.R.S.T.O.M. (tableau 2.8) qui permet définir les différents types de relief des bassins versants quelque soient leurs superficies. La dénivelée spécifique est donnée par la formule suivante :

$$D_s = I_g * \sqrt{S_{bs}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Tableau 2.8. Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.

R1	D _s < 10 m	Relief très faible
R2	10 m < D _s < 25 m	Relief faible
R3	25 m < D _s < 50 m	Relief assez faible
R4	50 m < D _s < 100 m	Relief modéré
R5	100 m < D _s < 250 m	Relief assez faible
R6	250 m < D _s < 500 m	Relief fort
R7	500 m < D _s	Relief très fort

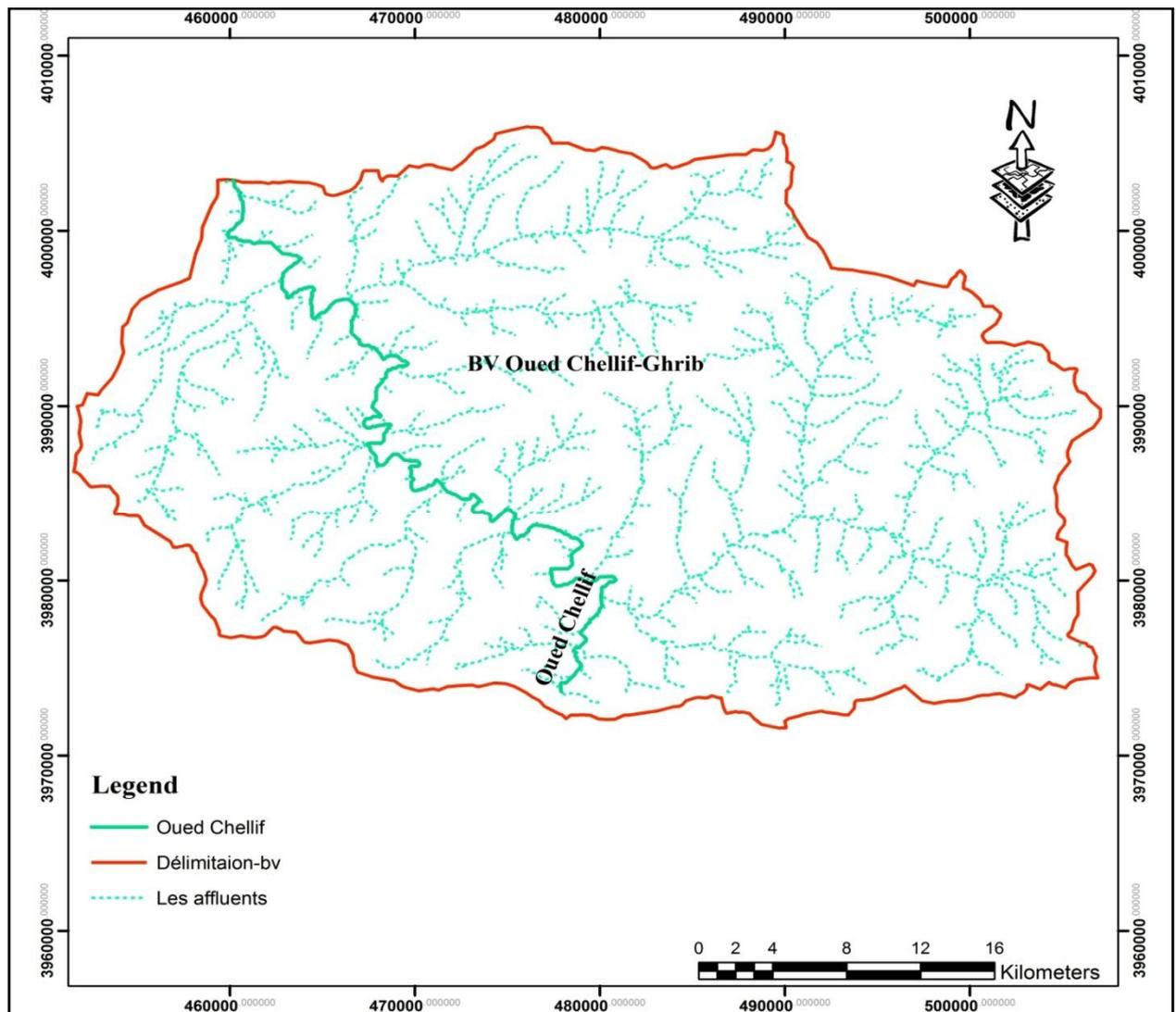


Figure 2.9. Réseau hydrographique du bassin versant Cheliff-Ghrib.

Tableau 2.9. Caractéristiques géométriques et hydromorphométriques du bassin

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur
Superficie	A	Km ²	1378,63
Périmètre	P	Km	175,67
Indice de compacité	K _c	/	1,32
Longueur du rectangle équivalent	L _R	m	66.92
Largeur du rectangle équivalent	l _R	m	20.60
Indice de pente de Roche	I _p	%	8.27
Indice de pente global	I _g	%	1.40
Dénivelée spécifique	D _s	m	344
Type de relief	/	/	fort
Altitude moyenne	H _{moy}	m	811
Altitude maximale	H _{max}	m	1619
Altitude minimale	H _{min}	m	375
Altitude à 5%	H _{5%}	m	1152
Altitude à 95%	H _{95%}	m	550
Longueur des thalwegs retenus	L _{pt}	Km	1246,18
Longueurs des thalwegs permanents	L _p	Km	79,91
Longueurs des thalwegs temporaires	L _t	Km	1166,27
Densité de drainage totale	D _d	Km/Km ²	0,90
Densité de drainage permanente	D _d	m/Km ²	56
Densité de drainage temporaire	D _d	Km/Km ²	0,84
Pente moyenne de l'oued cheliff-Ghrib	I _{c moy}	m/m	0.033
Coefficient de torrencialité	C _t	/	0,13
Temps de concentration	T _c	Heures	13.22
Vitesse de propagation de crue	Ve	Km/h	6.04
Classification de Horton	Ordre	/	05

2.6. Conclusion

Le bassin versant de l'oued Cheliff- Ghrib a une superficie de l'ordre 1379 Km² et un périmètre de 175.67 km. Il est caractérisé par un relief fort, une pente moyenne de 3.3 %. Le temps de concentration du bassin versant est de 13.22 heures.

Chapitre 3

Analyse des précipitations et des écoulements

Chapitre 3. Analyse des précipitations et des écoulements

3.1. Introduction

Plus encore que les facteurs morphologiques, lithologiques et biogéographiques, les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau (*Roche 1963, Cosandey C. et Robinson M., 2000*). Ce sont les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance fluviale,
- leur répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques,
- leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

Ces différents aspects des précipitations sont plus ou moins modifiés selon l'effet combiné des autres paramètres physiques cités plus haut et climatiques (températures et évapotranspiration). Mais, contrairement aux paramètres proprement physiques permettent une interprétation seulement qualitative du comportement hydrologique des bassins, les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble, variables aléatoires dans le temps et dans l'espace, permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large.

L'équipement climatologique du bassin est cependant loin d'être satisfaisant. Le manque de documentation est flagrant, les longues séries d'observation sont rares. Toutefois, nous allons tenter de faire ressortir les caractères généraux du climat méditerranéen du bassin, ses nuances spatiales et ses irrégularités temporelles à partir de la documentation disponible. Les séries pluviométriques qui présentaient des lacunes ont été largement homogénéisées avant leur utilisation ; cela est essentiel pour arriver à une série longue et continue. Il reste qu'en dépit de données limitées, il est possible de saisir l'importance et la variabilité des précipitations sur l'alimentation de l'oued.

3.1.1 Aperçu sur le climat de l'Afrique du Nord

Par sa position en Afrique du Nord, donc en latitude, l'Algérie correspond à la zone de contact entre les masses d'air d'origine ou d'affinités polaires et arctiques d'une part et les masses tropicales d'autre part (*Seltzer, 1946*).

L'avancée des masses d'air froides vers le Sud peut être enregistrée à tout moment de l'année. Mais l'observation a montré qu'elles n'influencent avec l'efficacité sur l'évolution du temps qu'entre le début de l'automne et la fin du printemps.

Les masses d'air tropical, peuvent provenir de l'Atlantique ou du continent Africain par des courants dirigés vers le Nord, le Nord-Ouest ou le Nord-Est.

Les différentes situations météorologiques perturbées qui sont susceptibles d'affecter l'Afrique du Nord correspondent à une circulation des masses d'air orientées d'une manière zonale (approximativement d'Ouest en Est) suivant le flux de Westerlies.

Le climat du méditerranéen eurafricain est étroitement bloqué entre un domaine tempéré plus frais au Nord et le désert au Sud. Excepté en bordure même de la mer où l'on n'observe pas un véritable climat maritime, mais plutôt un climat contrasté traduisant plus d'influences continentales qu'océaniques et reflétant avant tout leur double appartenance aux franges de la zone tempérée et de la zone tropicale.

3.1.2 Aperçu sur le climat de l'Algérie

Selon *Seltzer (1946)*, le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé.

L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer et une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles.

Le climat de l'Atlas tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques.

3.2. Etude des précipitations

La pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs, (*Seltzer, 1946, Bouanani, A., 2005*). La plupart des stations du bassin ont été arrêtées pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreurs et le nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle. D'autre part bon nombre de stations ont été installées lors de la restructuration du réseau pluviométrique algérien et leurs données sont très utiles pour l'établissement d'une série pluviométrique récente (1970-1998). L'intérêt et le but de cette série est de permettre la confrontation avec l'écoulement

correspondant afin de dégager une étude hydro pluviométrique et d'estimer la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin (Bouanani, A., 2005).

Tableau 3.1. Précipitations annuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques (n= 29ans)

Nom et codes stations	Ghrib Amont (011407)	Ghrib Barrage (011405)	Mongorno (011404)	Ain Boucif (011104)	Harbil (011501)	Médéa (011509)	Ksar El Boukhari (011301)	Kherbat helale (011604)
1976/77	394,10	409,20	510,70	409,30	463,40	491,50	271,50	152,00
77/78	353,50	432,00	474,60	407,60	452,50	566,40	249,55	314,50
78/79	453,30	457,70	573,00	350,40	471,45	749,80	288,90	314,70
79/80	531,60	604,40	641,00	274,10	629,28	874,10	355,60	109,30
80/81	394,20	429,20	530,90	403,40	383,40	608,00	249,90	429,60
81/82	458,70	422,00	536,00	419,60	238,40	536,90	335,30	614,20
82/83	353,70	405,20	439,30	355,60	176,90	600,80	198,30	231,60
83/84	260,70	430,50	353,10	238,20	458,10	459,20	188,30	303,90
84/85	460,80	595,10	598,40	91,34	359,60	718,48	403,48	277,50
85/86	369,80	498,50	526,90	107,70	370,50	611,40	328,34	165,00
86/87	448,50	544,80	617,10	131,10	406,80	685,20	348,90	86,50
87/88	211,50	330,60	355,50	137,10	342,30	485,50	253,60	51,00
88/89	343,60	467,60	522,70	45,20	425,60	625,02	292,50	280,50
89/90	423,60	316,70	532,30	36,90	309,20	412,30	332,70	413,50
90/91	271,60	390,70	475,30	68,50	287,90	612,70	346,16	350,50
91/92	376,10	508,40	486,00	336,00	491,60	705,70	333,45	497,00
92/93	228,30	305,00	260,30	252,45	273,11	444,20	180,83	207,50
93/94	215,40	251,10	240,20	174,10	296,90	450,80	184,22	217,50
94/95	582,70	483,50	453,60	463,10	441,60	713,50	278,92	380,50
95/96	888,10	676,90	609,00	557,10	664,10	751,40	355,36	501,50
96/97	528,90	331,50	359,10	458,80	225,40	372,00	192,11	314,10
97/98	678,90	457,30	604,70	471,50	498,86	780,20	333,59	428,00
98/99	492,60	433,80	348,20	543,55	434,23	590,70	201,48	349,50
99/00	322,10	237,50	345,80	236,40	216,65	377,10	272,00	247,00
00/01	505,40	494,00	529,60	399,90	459,51	626,30	237,10	348,00
2001/2002	335,00	246,00	311,10	198,20	236,87	370,50	178,90	207,00
2002/2003	739,20	555,70	665,70	540,30	612,79	865,00	391,20	351,00
2003/2004	651,00	524,10	718,40	223,90	359,13	730,90	509,40	676,00
2004/2005	313,40	367,60	238,40	229,70	281,38	479,10	290,50	258,00
moyenne	434,01	434,71	477,82	295,21	388,53	596,37	289,04	313,00
max	888,10	676,90	718,40	557,10	664,10	874,10	509,40	676,00
min	211,50	237,50	238,40	36,90	176,90	370,50	178,90	51,00
Ecart-type	160,61	109,23	131,39	158,14	125,41	144,86	79,13	145,89
variance	25794,37	11931,38	17262,77	25007,68	15726,53	20985,41	6262,35	21283,12
Coef assy	0,986	0,030	-0,282	-0,014	0,386	0,115	0,561	0,530

3.2.1. Analyse des pluies sur l'ensemble du bassin versant

- Méthode de Thiessen

C'est une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence définie géométriquement. Cette méthode ne tient compte que de la distribution spatiale au plan des stations pluviométriques. Elle ne tient compte ni de la topographie, ni d'autres facteurs qui pourraient influencer la distribution spatiale de la pluie.

Tableau 3.2. Pluie annuelle et la surface d'influence pour chaque station

Stations	Mongorno (011404)	Ghrib Barrage (011405)	Ghrib Amont (011407)	Harbil (011501)	Médéa (011509)	Kherbat helale 011604	Ksar El Boukhari (011301)	Ain Boucif (011104)
Pan (mm)	477.82	434.71	434.01	388.53	596.37	313.00	289.04	295.21
S (Km ²)	435.6	94.96	287.8	53.88	27.4	97.09	253.5	128.4

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} p_i \times S_i}{S_{bv}} \quad (3.1)$$

$$P_{moy} = 401 \text{ mm}$$

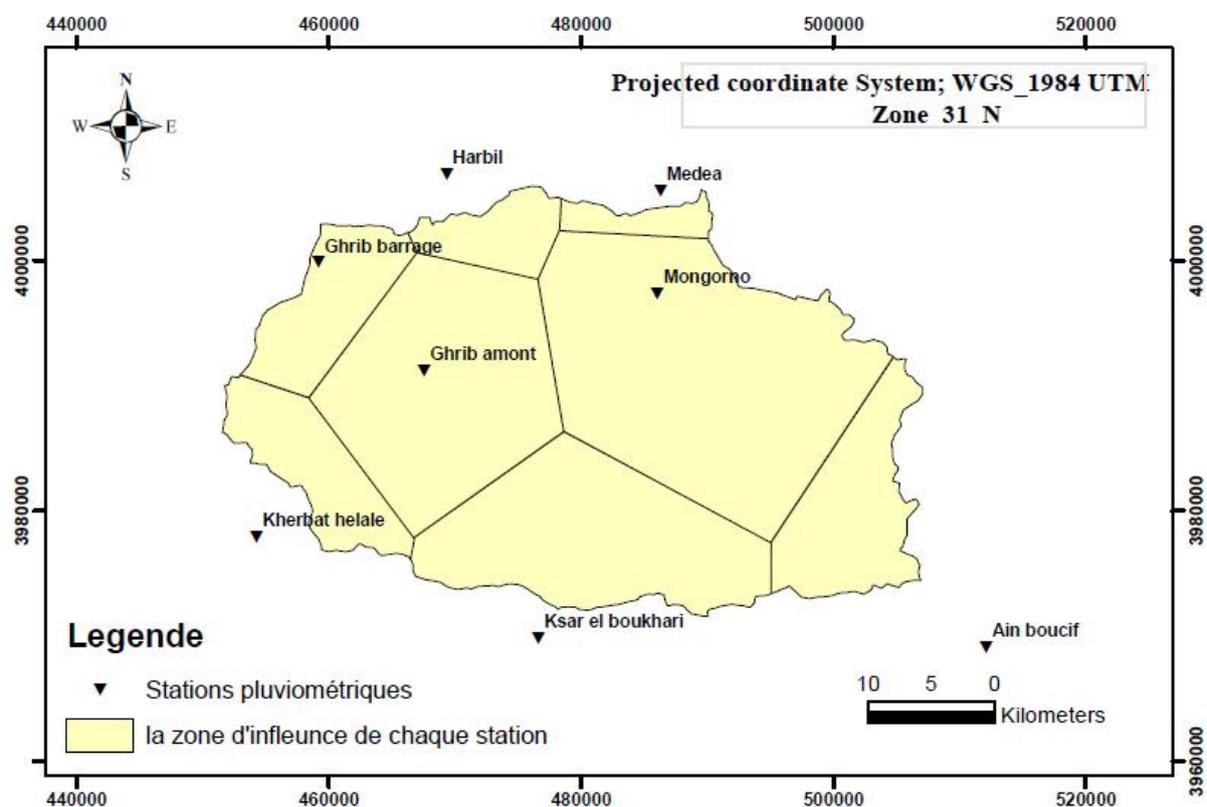


Figure 3.1. Le polygone de Thiessen du bassin versant du Chelif-Ghrib

3.2.2. Analyse en composantes principales (A.C.P)

L'analyse en composantes principales permet de visualiser l'information contenue dans un tableau de données quantitatives et de concentrer l'information dans un nombre réduit de nouvelles variables (*Laborde, 2003*).

Cette méthode est appliquée sur des données des précipitations annuelles dont nous avons à notre disposition en formant une matrice initiale rectangulaire avec en ligne les valeurs des précipitations annuelles de huites stations (08) et en colonne les 29 années d'observations.

Les étapes de l'analyse en composantes principales sont :

- Création de la matrice des données brutes ;
- Calcul des paramètres statistiques ;
- Transformation des données brute en données centrées réduites ;
- Détermination de la matrice de corrélation des données centrées-réduites ;
- Détermination des valeurs propres et des vecteurs propres à partir de la matrice de corrélation des données centrées-réduites ;
- Détermination des composantes principales (C.P) ;
- Détermination des composantes principales réduites (CP') ;
- Détermination du coefficient de régression.

Analyse des résultats de l'A.C.P :

Les résultats obtenus par l'analyse en composantes principales sont résumés dans les tableaux 3.3 ; 3.4 ; 3.5 ; 3.6 ; 3.7 et 3.8

Tableau 3.3. Moyenne, écart type des variables initiales

Station	Ghrib amont 011407	Ghrib Barrage 011405	Mongorno 011404	Ain boucif 011104	Harbil 011501	Médéa 011509	Ksar El Boukhari 011301	Kherbat helale 011604
Moyenne	434,01	434,71	477,82	295,21	388,53	596,37	289,04	313,00
Ecart type	160,61	109,23	131,39	158,14	125,41	144,86	79,13	145,89

Tableau 3.4. Matrice des coefficients de corrélation entre les variables

Stations	Ghrib amont 011407	Ghrib Barrage 011405	Mongorno 011404	Ain boucif 011104	Harbil 011501	Médéa 011509	Ksar El Boukhari 011301	Kherbat helale 011604
011407	1,00	0,69	0,68	0,61	0,61	0,65	0,54	0,51
011405	0,69	1,00	0,78	0,27	0,76	0,87	0,64	0,25
011404	0,68	0,78	1,00	0,13	0,57	0,79	0,80	0,37
011104	0,61	0,27	0,13	1,00	0,41	0,29	-0,13	0,37
011501	0,61	0,76	0,57	0,41	1,00	0,74	0,36	0,10
011509	0,65	0,87	0,79	0,29	0,74	1,00	0,65	0,24
011301	0,54	0,64	0,80	-0,13	0,36	0,65	1,00	0,42
011604	0,51	0,25	0,37	0,37	0,10	0,24	0,42	1,00

Tableau 3.5. Valeur propre, variances expliquées et variances cumulées

Axes	C1	C2	C3
Valeurs propres	4,70	1,35	1,07
Variances expliquées	59%	17%	13%
Variances cumulées	59%	76%	89%

Tableau 3.6. Projection des variables actives

Stations	C1	C2	C3
Ghrib amont 011407	0,86	0,32	0,10
Ghrib Barrage 011405	0,91	-0,13	-0,21
Mongorno 011404	0,88	-0,29	0,10
Ain boucif 011104	0,42	0,88	-0,10
Harbil 011501	0,77	0,11	-0,49
Médéa 011509	0,90	-0,14	-0,21
Ksar El Boukhari 011301	0,75	-0,50	0,35
Kherbat helale 011604	0,47	0,32	0,76

Tableau 3.7. Projections des observations

Année	C1	C2	C3
1976/77	-0,17	0,32	-1,01
77/78	-0,07	0,60	-0,46
78/79	0,54	0,02	-0,50
79/80	1,31	-1,05	-2,11
80/81	0,09	0,66	0,38
81/82	0,18	0,69	2,31
82/83	-0,68	0,37	-0,07
83/84	-0,71	0,31	-0,68
84/85	0,70	-1,83	0,16
85/86	-0,02	-1,45	-0,53
86/87	0,42	-1,68	-1,05
87/88	-1,16	-0,89	-1,06
88/89	-0,05	-1,33	-0,26
89/90	-0,48	-1,01	1,62
90/91	-0,36	-1,40	0,88
91/92	0,59	0,08	0,37
92/93	-1,44	0,36	-0,36
93/94	-1,57	0,11	-0,27
94/95	0,56	1,01	-0,18
95/96	2,11	1,37	-0,24
96/97	-0,86	1,61	0,58
97/98	1,15	0,77	0,19
98/99	-0,08	1,82	-0,54
99/00	-1,29	0,01	0,77
00/01	0,37	0,72	-0,43
01/02	-1,53	0,30	0,11
02/03	1,85	0,57	-0,62
03/04	1,54	-0,99	2,80
04/05	-0,97	-0,07	0,20

Tableau 3.8. Ajustement à la loi normale du vecteur régional (C1)

Taille n = 29, Moyenne = -1,8793E-07, Ecart-type = 0,99982759, I.C. à(en %) = 95 et

u Gauss = 1,9604

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
-0,17	-1,57	1	0,0172	-2,115	-1,57	-2,11	-2,97	-1,56
-0,07	-1,53	2	0,0517	-1,629	-1,53	-1,63	-2,34	-1,15
0,54	-1,44	3	0,0862	-1,365	-1,44	-1,36	-2,00	-0,92
1,31	-1,29	4	0,1207	-1,172	-1,29	-1,17	-1,76	-0,75
0,09	-1,16	5	0,1552	-1,014	-1,16	-1,01	-1,57	-0,61
0,18	-0,97	6	0,1897	-0,879	-0,97	-0,88	-1,40	-0,48
-0,68	-0,86	7	0,2241	-0,758	-0,86	-0,76	-1,25	-0,37
-0,71	-0,71	8	0,2586	-0,647	-0,71	-0,65	-1,12	-0,26
0,70	-0,68	9	0,2931	-0,544	-0,68	-0,54	-1,00	-0,16
-0,02	-0,48	10	0,3276	-0,446	-0,48	-0,45	-0,89	-0,07
0,42	-0,36	11	0,3621	-0,352	-0,36	-0,35	-0,78	0,02
-1,16	-0,17	12	0,3966	-0,262	-0,17	-0,26	-0,68	0,12
-0,05	-0,08	13	0,4310	-0,173	-0,08	-0,17	-0,58	0,21
-0,48	-0,07	14	0,4655	-0,086	-0,07	-0,09	-0,48	0,30
-0,36	-0,05	15	0,5000	0,000	-0,05	0,00	-0,39	0,39
0,59	-0,02	16	0,5345	0,086	-0,02	0,09	-0,30	0,48
-1,44	0,09	17	0,5690	0,173	0,09	0,17	-0,21	0,58
-1,57	0,18	18	0,6034	0,262	0,18	0,26	-0,12	0,68
0,56	0,37	19	0,6379	0,352	0,37	0,35	-0,02	0,78
2,11	0,42	20	0,6724	0,446	0,42	0,45	0,07	0,89
-0,86	0,54	21	0,7069	0,544	0,54	0,54	0,16	1,00
1,15	0,56	22	0,7414	0,647	0,56	0,65	0,26	1,12
-0,08	0,59	23	0,7759	0,758	0,59	0,76	0,37	1,25
-1,29	0,70	24	0,8103	0,879	0,70	0,88	0,48	1,40
0,37	1,15	25	0,8448	1,014	1,15	1,01	0,61	1,57
-1,53	1,31	26	0,8793	1,172	1,31	1,17	0,75	1,76
1,85	1,54	27	0,9138	1,365	1,54	1,36	0,92	2,00
1,54	1,85	28	0,9483	1,629	1,85	1,63	1,15	2,34
-0,97	2,11	29	0,9828	2,115	2,11	2,11	1,56	2,97

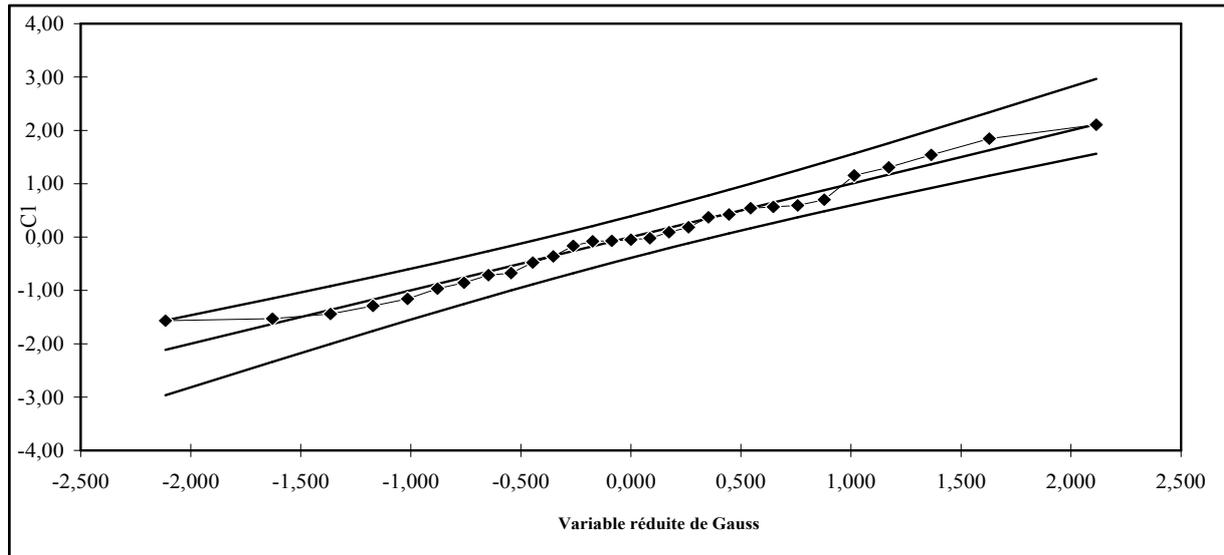


Figure 3.2. Ajustement du vecteur régional C1 à une loi Normale

L'analyse de corrélation montre une régionalisation des précipitations au niveau du bassin versant. Au vu des figures 3.3 et 3.4, les stations pluviométriques s'organisent en deux (02) groupes.

- Le premier groupe est composé des stations (011405, 011407, 011404, et 011509), ce regroupement met en exergue l'influence de sa position géographique, à savoir son altitude et la distance entre eux.
- Le deuxième groupe composé des stations (011104, 011604, 011301, 011501), se situe autour du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib avec une pluviométrie moyenne comprise entre 250 et 350mm.
- **Stations représentatives du bassin versant :**

L'analyse en composantes principales a permis de dégager les stations représentatives du bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib, les noms et les codes des stations représentatives sont donnés dans le tableau 3.9

Tableau 3.9. Code des stations représentatives

Stations	Code de station	X (Km)	Y (Km)	Z (m)
Ghrib Amont	011407	495.45	308.8	435
Ghrib Barrage	011405	487.25	318.4	460
Mongorno	011404	513.5	312.6	932
Médéa	011509	504.85	329.8	935

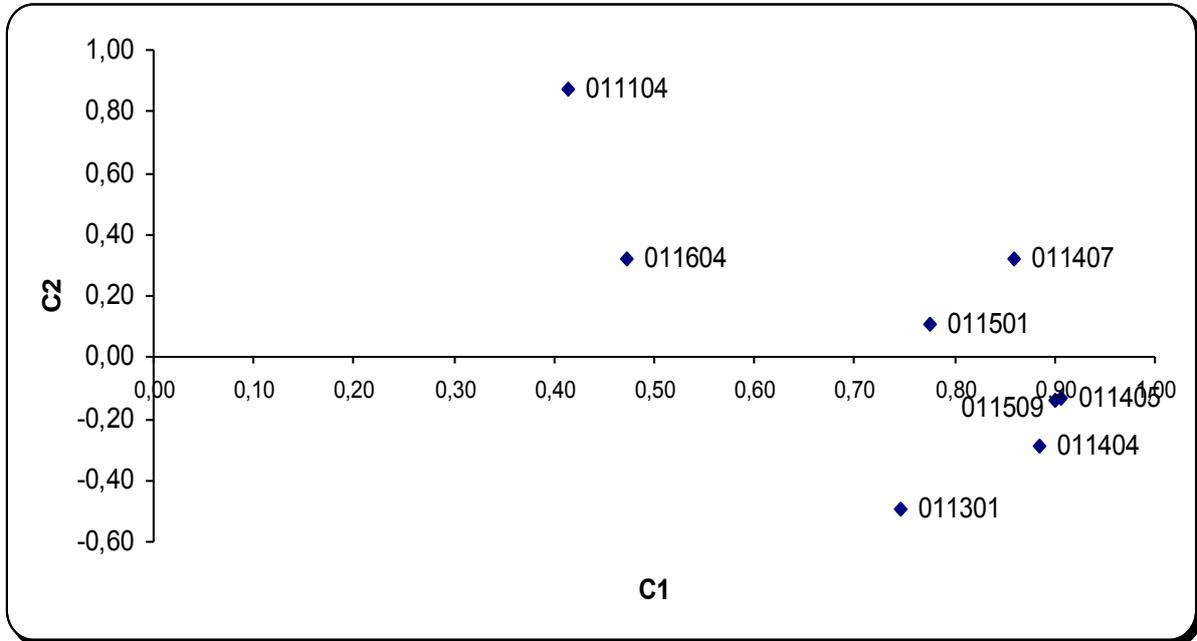


Figure 3.3. Projection des variables sur le plan 1-2

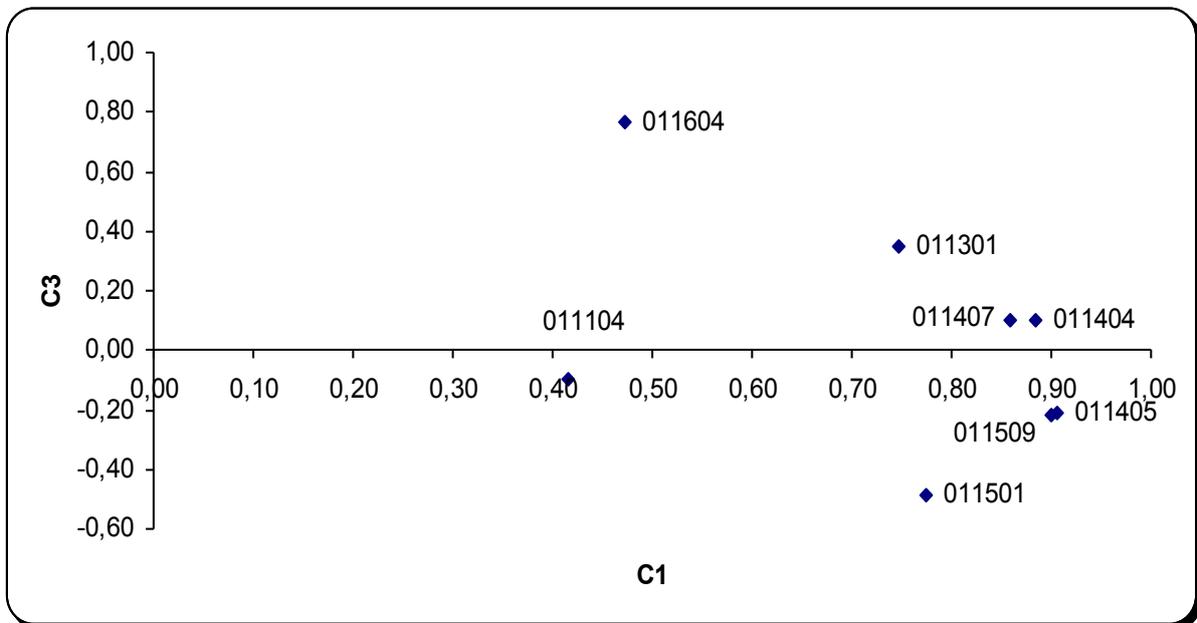


Figure 3.4. Projection des variables sur le plan 1-3

3.2.3. Ajustement des précipitations à une loi de probabilité

L'analyse statistique des précipitations est réalisée à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière, elle est portée uniquement sur les stations représentatives du bassin versant.

-A l'échelle annuelle :

L'analyse statistique des précipitations annuelles a permis d'ajuster les séries d'observations des stations représentatives à la loi log normale.

Tableau 3.10. Précipitations annuelles et leurs fréquences expérimentales : Station Ghrib amont(011407)

Taille $n = 29$, Moy $\log(x-x_0) = 2,61$ et E.T $\log(x-x_0) = 0,156$, I.C à (en %)=95 u Gauss=1,96

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
394,10	211,50	1	0,017	-2,115	211,50	190,39	140,13	232,18
353,50	215,40	2	0,052	-1,629	215,40	226,80	175,63	269,48
453,30	228,30	3	0,086	-1,365	228,30	249,40	198,18	292,73
531,60	260,70	4	0,121	-1,172	260,70	267,35	216,24	311,34
394,20	271,60	5	0,155	-1,014	271,60	282,92	231,95	327,65
458,70	313,40	6	0,190	-0,879	313,40	297,05	246,22	342,64
353,70	322,10	7	0,224	-0,758	322,10	310,27	259,53	356,85
260,70	335,00	8	0,259	-0,647	335,00	322,89	272,18	370,60
460,80	343,60	9	0,293	-0,544	343,60	335,13	284,37	384,13
369,80	353,50	10	0,328	-0,446	353,50	347,14	296,24	397,61
448,50	353,70	11	0,362	-0,352	353,70	359,04	307,91	411,19
211,50	369,80	12	0,397	-0,262	369,80	370,95	319,46	425,00
343,60	376,10	13	0,431	-0,173	376,10	382,95	330,99	439,16
423,60	394,10	14	0,466	-0,086	394,10	395,14	342,56	453,79
271,60	394,20	15	0,500	0,000	394,20	407,61	354,24	469,03
376,10	423,60	16	0,534	0,086	423,60	420,48	366,14	485,03
228,30	448,50	17	0,569	0,173	448,50	433,87	378,33	501,98
215,40	453,30	18	0,603	0,262	453,30	447,91	390,94	520,09
582,70	458,70	19	0,638	0,352	458,70	462,76	404,07	539,61
888,10	460,80	20	0,672	0,446	460,80	478,63	417,87	560,86
528,90	492,60	21	0,707	0,544	492,60	495,78	432,53	584,28
678,90	505,40	22	0,741	0,647	505,40	514,56	448,32	610,45
492,60	528,90	23	0,776	0,758	528,90	535,50	465,60	640,20
322,10	531,60	24	0,810	0,879	531,60	559,33	484,91	674,81
505,40	582,70	25	0,845	1,014	582,70	587,28	507,09	716,31
335,00	651,00	26	0,879	1,172	651,00	621,46	533,66	768,35
739,20	678,90	27	0,914	1,365	678,90	666,18	567,59	838,36
651,00	739,20	28	0,948	1,629	739,20	732,60	616,56	946,00
313,40	888,10	29	0,983	2,115	888,10	872,69	715,61	1185,66

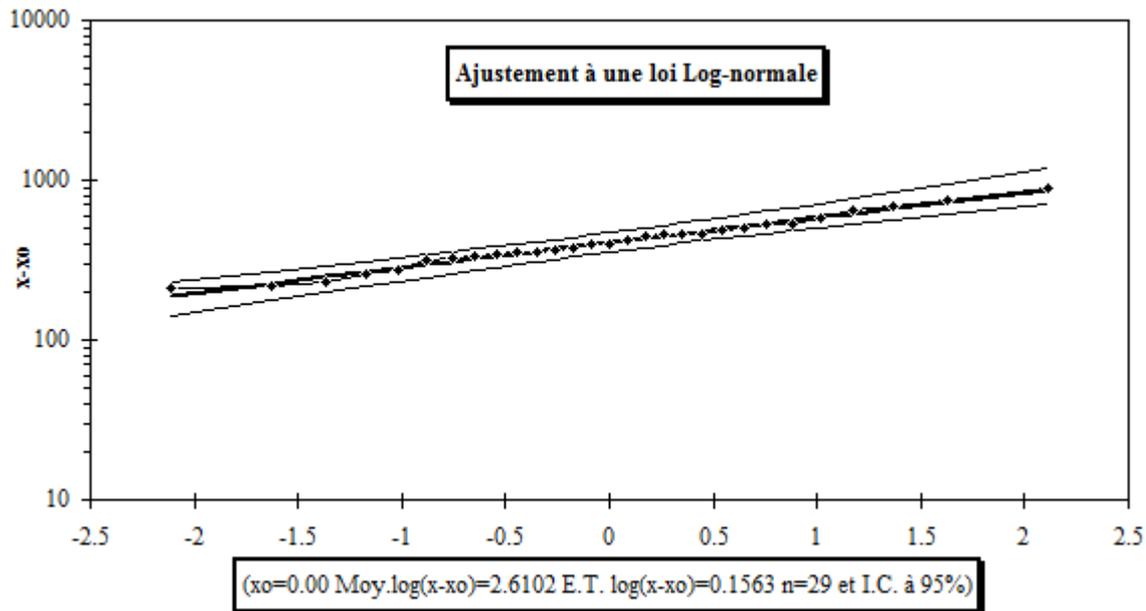


Figure 3.5. Ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normale : station Ghib amont 011407

Tableau 3.11. Equations d'ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normale des différentes stations

Stations	Droite de Galton
011407	$\text{Log } X_{p\%} = 2,61 + 0,156 \text{ up}\%$
011405	$\text{Log } X_{p\%} = 2,62 + 0,116 \text{ up}\%$
011404	$\text{Log } X_{p\%} = 2,66 + 0,133 \text{ up}\%$
011509	$\text{Log } X_{p\%} = 2,76 + 0,110 \text{ up}\%$

Tableau 3.12. Précipitations annuelles (mm) pour différentes périodes de retour

Période de retour	10	25	50	100	250	500
011407	646,58	765,59	853,84	941,88	1059,03	1148,80
011405	593,14	672,70	729,67	785,02	856,67	910,20
011404	678,60	783,55	859,80	934,70	1032,78	1106,84
011509	799,00	899,07	970,25	1039,07	1127,73	1193,67

-A l'échelle mensuelle

Dans le but de mettre en exergue la variation de précipitations à l'échelle mensuelle, nous avons dès le départ, déterminer les paramètres statistiques des stations représentatives du bassin versant et l'ajustement des données mensuelles à une loi de probabilité. Il est à noter que les précipitations mensuelles s'ajustent beaucoup mieux à la loi log-normale. Le tableau 3.13 donne les équations de Galton pour la station de Ghib Amont (011407)

Tableau 3.13. Equation d'ajustement des précipitations mensuelles à la loi log-normale
Station Ghrib-Amont (011407)

Mois	Equation de la droite de Galton
Septembre	$\text{Log } X_p\% = 1,11 + 0,55 \text{ up}\%$
Octobre	$\text{Log } X_p\% = 1,38 + 0,52 \text{ up}\%$
Novembre	$\text{Log } X_p\% = 1,51 + 0,48 \text{ up}\%$
Décembre	$\text{Log } X_p\% = 1,68 + 0,38 \text{ up}\%$
Janvier	$\text{Log } X_p\% = 1,53 + 0,64 \text{ up}\%$
Février	$\text{Log } X_p\% = 1,45 + 0,60 \text{ up}\%$
Mars	$\text{Log } X_p\% = 1,35 + 0,64 \text{ up}\%$
Avril	$\text{Log } X_p\% = 1,52 + 0,44 \text{ up}\%$
Mai	$\text{Log } X_p\% = 1,18 + 0,67 \text{ up}\%$
Juin	$\text{Log } X_p\% = 0,50 + 0,67 \text{ up}\%$
Juillet	$\text{Log } X_p\% = 0,47 + 0,85 \text{ up}\%$
Août	$\text{Log } X_p\% = 0,34 + 0,56 \text{ up}\%$

-A l'échelle journalière

L'étude des précipitations journalières s'avère nécessaire pour pouvoir mettre en exergue l'irrégularité des précipitations. Le tableau 3.14 donne les pluies maximales des stations représentatives.

L'ajustement des précipitations maximales a donné les résultats présentés dans le tableau

(3.15) pour les stations représentatives du bassin versant.

Tableau 3.14. Précipitations maximales journalières en mm aux stations représentatives

stations	Ghrib Amont	Mongorno	Ghrib Barrage	Médéa
1976/77	27,1	30,1	34	32,5
77/78	19,8	31,2	28	51,7
78/79	35,4	57,9	40	75,6
79/80	54	67	44	100,5
80/81	39,6	44,1	64	71,6
81/82	44,1	56,8	72	37,9
82/83	52,8	40,4	32,3	55,2
83/84	35,6	34,1	30	33
84/85	67,8	84,8	72,3	101,4
85/86	41,1	39,3	43	39,1
86/87	31,6	44,7	48	66,4
87/88	17,5	28,4	26	42,1
88/89	40,8	38,2	37	71
89/90	62,5	47,3	29	43,4
90/91	29,2	27,8	32	56,5
91/92	48	75,3	35	147
92/93	27,5	29,2	27,5	30
93/94	22,3	24,8	24	77,5
94/95	58	45,8	24	67
95/96	37,8	57,9	37	45,4
96/97	42,3	26,2	23	25,5
97/98	63,8	30,6	20	41,5
98/99	51,6	31	17	42,3
99/00	38,3	21,5	36	43,5
00/01	33,7	60,5	44	63,9
01/02	34,1	14,5	20	20,6
02/03	56,1	33,1	91,5	60,2
03/04	27,7	33	40	47,5
04/05	26,2	52	20	66,5
La moyenne	40,22	41,64	37,61	57,11
Le maximum	67,80	84,80	91,50	147,00
Le minimum	17,50	14,50	17,00	20,60
Ecart-type	13,64	16,70	17,63	26,51
La variance	186,14	278,99	310,71	703,02
Coef Asymétrie	0,36	0,86	1,55	1,56

Tableau 3.15. Précipitations maximales journalières et leurs fréquences expérimentales :
Station Ghrib-Amont (011407)

Taille $n = 29$, Moy $\log(x-x_0) = 1,58$, E.T $\log(x-x_0) = 0,153$, I.C (en %) = 95%
 $u_{\text{Gauss}}=1,96$ $x_0=0$

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement t	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
27,10	17,50	1	0,017	-2,115	17,50	17,94	13,26	21,80
19,80	19,80	2	0,052	-1,629	19,80	21,31	16,57	25,25
35,40	22,30	3	0,086	-1,365	22,30	23,39	18,66	27,39
54,00	26,20	4	0,121	-1,172	26,20	25,05	20,33	29,10
39,60	27,10	5	0,155	-1,014	27,10	26,49	21,78	30,60
44,10	27,50	6	0,190	-0,879	27,50	27,79	23,10	31,98
52,80	27,70	7	0,224	-0,758	27,70	29,00	24,33	33,28
35,60	29,20	8	0,259	-0,647	29,20	30,17	25,50	34,55
67,80	31,60	9	0,293	-0,544	31,60	31,29	26,62	35,79
41,10	33,70	10	0,328	-0,446	33,70	32,39	27,71	37,02
31,60	34,10	11	0,362	-0,352	34,10	33,49	28,79	38,27
17,50	35,40	12	0,397	-0,262	35,40	34,58	29,85	39,53
40,80	35,60	13	0,431	-0,173	35,60	35,68	30,91	40,83
62,50	37,80	14	0,466	-0,086	37,80	36,80	31,97	42,17
29,20	38,30	15	0,500	0,000	38,30	37,94	33,05	43,56
48,00	39,60	16	0,534	0,086	39,60	39,12	34,14	45,02
27,50	40,80	17	0,569	0,173	40,80	40,34	35,26	46,57
22,30	41,10	18	0,603	0,262	41,10	41,63	36,41	48,22
58,00	42,30	19	0,638	0,352	42,30	42,99	37,62	50,00
37,80	44,10	20	0,672	0,446	44,10	44,44	38,88	51,94
42,30	48,00	21	0,707	0,544	48,00	46,00	40,22	54,08
63,80	51,60	22	0,741	0,647	51,60	47,72	41,67	56,46
51,60	52,80	23	0,776	0,758	52,80	49,63	43,25	59,17
38,30	54,00	24	0,810	0,879	54,00	51,80	45,01	62,31
33,70	56,10	25	0,845	1,014	56,10	54,35	47,04	66,08
34,10	58,00	26	0,879	1,172	58,00	57,46	49,46	70,81
56,10	62,50	27	0,914	1,365	62,50	61,53	52,56	77,15
27,70	63,80	28	0,948	1,629	63,80	67,56	57,01	86,89
26,20	67,80	29	0,983	2,115	67,80	80,26	66,02	108,52

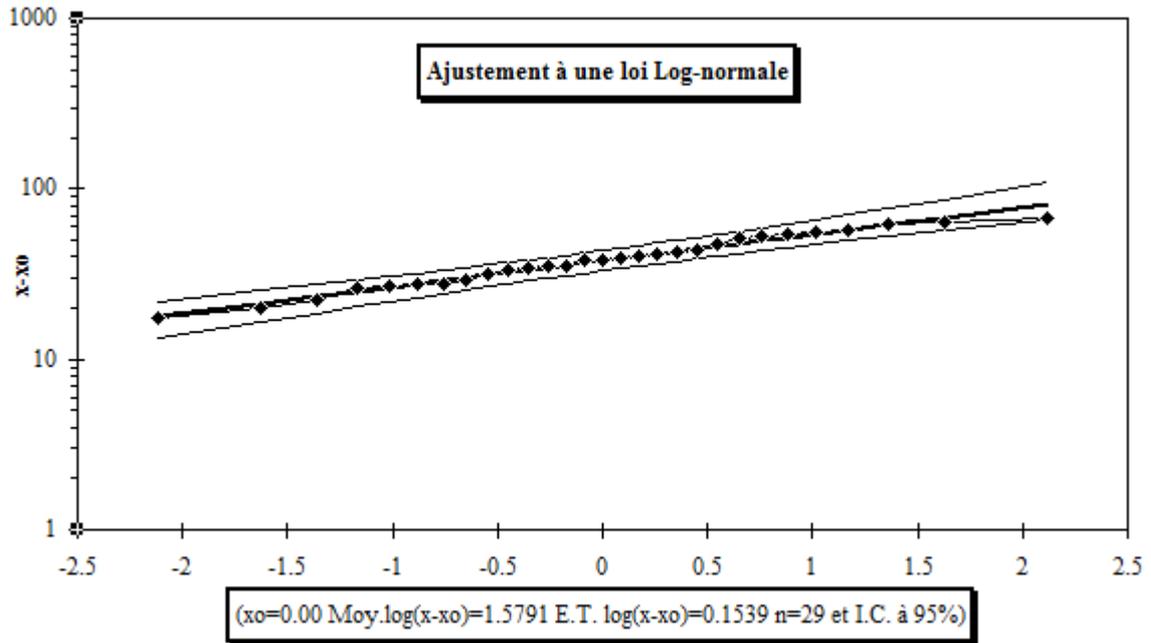


Figure 3.6. Ajustement des précipitations maximales journalières à la loi log-normale (Station Ghrib-amont 011407)

Les équations de la droite de Galton sont données dans le tableau (3.16)

Tableau 3.16. Equation de la droite de Galton : Précipitation maximales journalières

Stations	Equation de la droite de Galton
Ghrib-amont 011407	$\text{Log } X_{p\%} = 1,58 + 0,15 \text{ up}\%$
Ghrib-barrage 011405	$\text{Log } X_{p\%} = 1,59 + 0,17 \text{ up}\%$
Mongorno 011404	$\text{Log } X_{p\%} = 1,54 + 0,18 \text{ up}\%$
Médéa 011509	$\text{Log } X_{p\%} = 1,72 + 0,19 \text{ up}\%$

Les quantiles sont résumés dans le tableau (3.17)

Tableau 3.17. Précipitations maximales pour différentes périodes de retour

Période de retour	10	25	50	100	250	500
011407	59,75	70,55	78,55	86,52	97,10	105,20
011405	64,35	77,59	87,56	97,61	111,15	121,63
011404	58,55	71,12	80,64	90,29	103,33	113,48
011509	90,64	111,01	126,54	142,35	163,85	180,65

3.3. Analyse des écoulements

3.3.1. Débits moyens annuels

L'écoulement moyen annuel est une notion fondamentale en hydrologie. C'est le volume d'eau écoulé en 365 jours à la sortie d'un bassin. Le module brut ou absolu est généralement exprimé en m^3/s et le module spécifique se traduit en $l/s/km^2$.

Nous disposons de série de données hydrométriques (maximisation intrinsèque de l'information au sens de *(Dubreuil, 1974)*, car il semble préférable de baser notre analyse sur des données réellement observées et non théoriquement extrapolées, d'autant plus que l'étendue des échantillons et la forte irrégularité du régime hydrologique des bassins justifient guère une telle opération.

3.3.1.1. Variations des débits annuels moyens bruts (m^3/s)

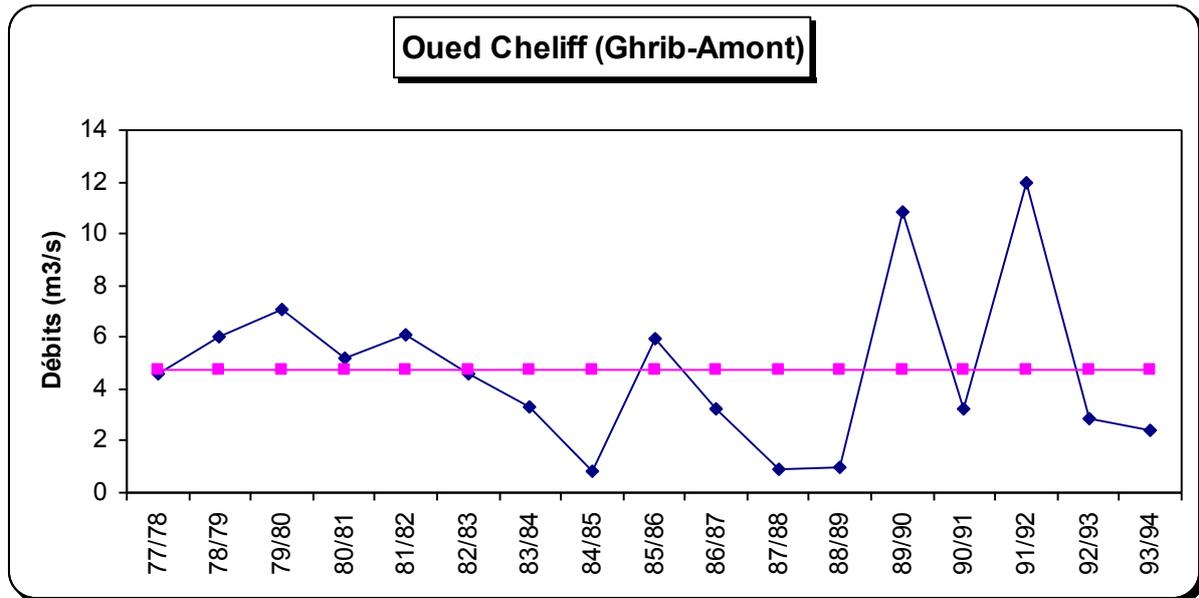
La variation annuelle des modules (Tableau 3.18) au niveau de station est illustrée par la figure 3.7. Le tableau, montre que l'oued cheliff débite $4,707 m^3/s$ avec une aire de réception de $1378,67 km^2$.

Tableau 3.18. Débits moyens annuels de l'Oued Cheliff (station Ghrib-Amont) :

Année	Débit moyen Annuel Q (m^3/s)	Module spécifique Q ($L/s/km^2$)
1977/78	4,587	3,327
1978/79	5,984	4,341
1979/80	7,081	5,136
1980/81	5,157	3,741
1981/82	6,060	4,396
1982/83	4,590	3,329
1983/84	3,288	2,385
1984/85	0,830	0,602
1985/86	5,931	4,302
1986/87	3,239	2,349
1987/88	0,920	0,667
1988/89	1,015	0,736
1989/90	10,820	7,848
1990/91	3,252	2,359
1991/92	11,940	8,661
1992/93	2,894	2,099
1993/94	2,432	1,764
Moyenne	4,707	3,414
Ecart-type	3,145	2,281
Cv	0,668	0,668

Tableau 3.19. Valeurs caractéristiques de module au niveau du bassin versant

Station	Q_{Moy} (m^3/s)	Q_{Max} (m^3/s) (année)	Q_{Min} (m^3/s) (année)	Nbre d'années $> Q_{moy}$	Coef .Immodération $R=Q_{Max}/Q_{Min}$	Coef Variation Cv
Ghrib- Amont	4,707	11,940 (91/92)	0,830 (84/85)	07 sur 17	14,380	0,668

**Figure 3.7.** Variations interannuelles de module d'oued cheliff (Station Ghrib-Amont)

3.3.1.2. Variations des débits annuels moyens spécifiques ($l/s/km^2$)

A fin de mieux cerner la variation de l'écoulement dans le bassin, nous utiliserons le module spécifique, car ce dernier permet de le comparer avec les autres sous bassin en ramenant le débit à l'unité de surface. L'abondance spécifique de bassin varie d'une part en fonction de la distribution des précipitations et d'autre part en fonction des caractéristiques physiographiques de chaque bassin, à savoir la lithologie, le couvert végétal. C'est donc un élément purement géographique.

Tableau 3.20. Débit spécifique et lame d'eau écoulée :

Bassin	Cours d'eau	Q (m^3/s)	q ($l/s/km^2$)	E (mm)
Ghrib-Amont	oued cheliff	4,707	3,414	107,673

Q : module annuel (m^3/s) ; **q** : débit spécifique ($l/s/km^2$) ; **E** : lame d'eau écoulée (mm)

Le bassin versant d'Oued cheliff-Ghrib, s'étend sur 1378,63 km². Son débit spécifique est de 3,414 l/s/km² correspondant à une lame d'eau écoulée de 107,673 mm. Cette valeur relativement importante de débit spécifique au niveau de bassin, est due à la taille et à lithologie de bassin ; le karst très développé permet aux circulations d'eaux souterraines de soutenir l'écoulement en période d'étiage.

3.3.1.3. L'irrégularité inter annuelle de module et leur répartition statistique

L'irrégularité inter annuelle de l'écoulement peut être mesurée par les variations de l'hydraulicité, c'est-à-dire le rapport du débit d'une année particulière Q_i au débit moyen d'une longue série d'observation (Q_{moy}). Elle peut être complétée par d'autres critères statistiques simples, tels que le coefficient de variation, ainsi que le coefficient d'immodération (R) donné par le rapport des modules extrêmes ($R=Q_{Max}/Q_{Min}$).

1. L'hydraulicité

Tableau 3.21. Hydraulicité d'oued cheliff-Ghrib

Bassin	Cheliff-Ghrib
Station	Ghrib-Amont
Année	Q_i/Q_{moy}
77/78	0,975
78/79	1,269
79/80	1,502
80/81	1,094
81/82	1,285
82/83	0,973
83/84	0,697
84/85	0,176
85/86	1,258
86/87	0,687
87/88	0,195
88/89	0,215
89/90	2,295
90/91	0,690
91/92	2,532
92/93	0,614
93/94	0,516
Max	2,532
Min	0,176

La série hydrométrique permet de cerner l'évolution des débits sur des années successives. La courbe de variation inter annuelle des modules (fig 3.7), montre des fortes fluctuations de débits d'une année à l'autre, en témoigne les valeurs de l'hydraulicité qui sont en majorité inférieures à la moyenne annuelle. Tableau (3.21)

En effet, plus de 50% des années hydrologiques sont déficitaires. Certaines valeurs des modules annuels sont élevées, conséquence aux fortes crues de saison qu'avait connue ce bassin.

2. Coefficient d'immodération

Le coefficient d'immodération (Tableau 3.19) est élevé (14,38), cette valeur montre l'irrégularité accentuée des débits inter annuels.

3. Coefficient de variation

La variation inter annuelle peut être aussi précisée par le coefficient de variation (Cv) (tableau 3.18). La valeur de coefficient de variation est élevée.

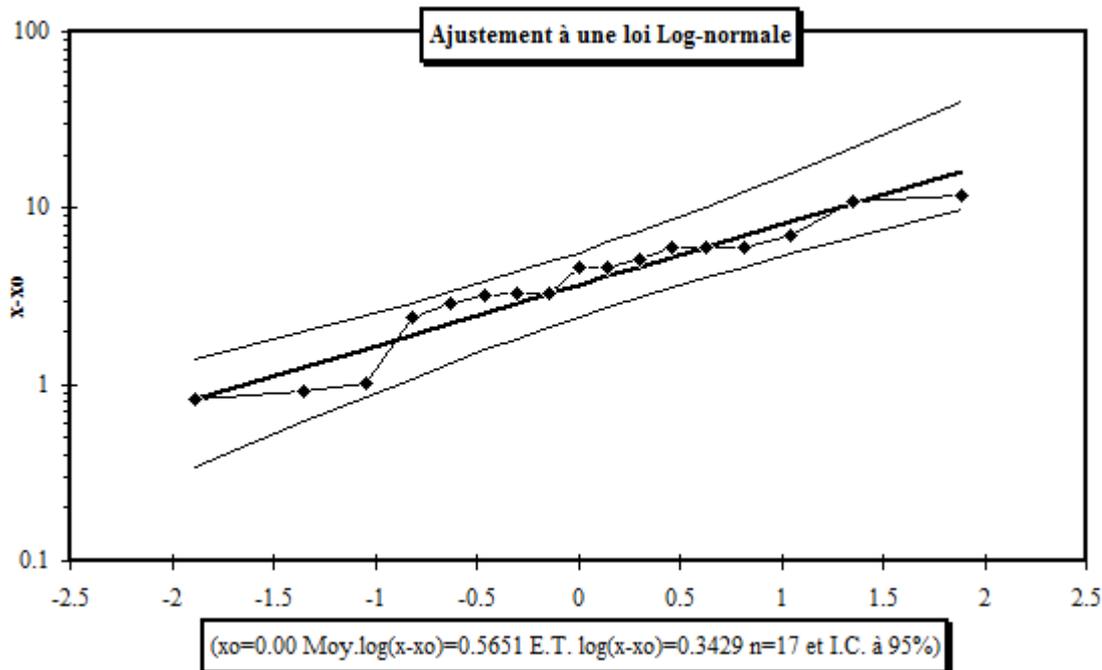
3.3.2. Etude statistique des modules

L'étude statistique des modules présente un intérêt indéniable dans le cadre des projets d'aménagements hydrauliques et permet de compléter la connaissance du phénomène d'irrégularité de l'écoulement annuel. Le choix de la période de retour du débit dépend de la taille de l'échantillon et de projet à réaliser.

La forte dispersion des débits annuels mise en évidence par la valeur de coefficient de variation (Cv), Laisse supposer une distribution dissymétrique de l'échantillon, cette dissymétrie apparaît nettement en portant les points représentatifs des Log de Q en face de leurs fréquences expérimentales sur un papier Gausso-arithmétique (Figure 3.8).

Tableau 3.22. Débit moyen journalier et leurs fréquences expérimentales :Station Ghrib-Amont **011407**Taille n= 17, Moy $\log(x-x_0)=0,56$, E.T $\log(x-x_0)=0,34$, I.C (en %)=95% u Gauss=1,96
 $x_0=0$

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement t	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
4,587	0,830	1	0,029	-1,890	0,8301	0,82616	0,33706	1,384402
5,984	0,920	2	0,088	-1,352	0,9201	1,26337	0,61403	1,980279
7,081	1,015	3	0,147	-1,049	1,015	1,60452	0,85242	2,445419
5,157	2,432	4	0,206	-0,821	2,432	1,92176	1,08479	2,886298
6,060	2,894	5	0,265	-0,629	2,894	2,23637	1,32113	3,335891
4,590	3,239	6	0,324	-0,457	3,239	2,55991	1,56699	3,814243
3,288	3,252	7	0,382	-0,299	3,252	2,90126	1,82672	4,338930
0,830	3,288	8	0,441	-0,148	3,28792	3,26909	2,10464	4,929125
5,931	4,587	9	0,500	0,000	4,587	3,67332	2,40582	5,608613
3,239	4,590	10	0,559	0,148	4,58992	4,12754	2,73747	6,411206
0,920	5,157	11	0,618	0,299	5,15692	4,65085	3,10982	7,386647
1,015	5,931	12	0,676	0,457	5,931	5,27102	3,53761	8,610986
10,820	5,984	13	0,735	0,629	5,98432	6,03357	4,04489	10,21345
3,252	6,060	14	0,794	0,821	6,05992	7,02132	4,67495	12,43861
11,940	7,081	15	0,853	1,049	7,08052	8,40957	5,51779	15,82943
2,894	10,820	16	0,912	1,352	10,82	10,6804	6,81384	21,97487
2,432	11,940	17	0,971	1,890	11,94	16,3325	9,74667	40,03202

**Figure 3.8.** Ajustement des débits moyens journaliers à la loi log-normale

(Station Ghrib-amont 011407)

L'ajustement à une distribution de type Galton ou Log normale à notre bassin versant donne les résultats du tableau (3.23) suivant :

Tableau 3.23. Ajustement à une loi log-normale des modules annuels

Bassin	Paramètres statistiques		Droite d'Henry
	Moy log Q	E.T logQ	
Cheliff-Ghrib	0,565	0,342	Log Q =0,565+0,342 u

Tableau 3.24. Modules caractéristiques en m³/s pour des périodes de récurrence données

Période	02 ans	05 ans	10 ans	20 ans	100 ans	1000 ans
Cheliff-Ghrib	3,673	7,137	10,104	13,463	23,058	42,140

3.4. Conclusion

L'étude pluviométrique a montré que la variation des précipitations est de direction de Nord-est au Sud-ouest du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib.

L'analyse en composantes principales a permis de dégager les stations représentatives du bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib.

L'ajustement graphique d'une droite de distribution moyenne et le calcul de l'intervalle de confiance à 95% permet de faire des estimations correctes des précipitations annuelles et maximales pour différentes fréquences sur le bassin versant.

L'étude des écoulements montre que le plus grand débit enregistré est observé durant l'année 91/92 avec un débit moyen de 11,94 m³/s et le plus faible débit enregistré en 83/84 avec 0,83 m³/s.

Chapitre 4

Modélisation pluies – débits par HEC HMS

Chapitre 4. Modélisation pluies-débits par le modèle HEC-HMS

4.1. Introduction

Les deux ressources naturelles essentielles exigées pour la production agricole de n'importe quel pays sont sol et eau. La productivité nette des récoltes dépend de la gestion et de l'utilisation appropriée de ces deux ressources. La satisfaction des besoins industriels et d'urbanisation, rend l'eau une ressource rare, et la satisfaction des besoins agricole est délicate dans presque tous les endroits à travers le monde.

De nombreux chercheurs ont employé beaucoup de méthodes pour simuler, évaluer, et prévoir les effets de l'urbanisation sur la réponse hydrologique des bassins versants. La gestion du bassin versant implique l'utilisation judicieuse de toutes les ressources en terre et en eau. Les outils d'aide à la décision peuvent aider dans de meilleures options de développement pour que les personnes contrôlent l'eau, la terre et les potentiels. Une réponse et approche fiables à ce défi est l'utilisation des modèles hydrologiques appropriés pour la gestion efficace des bassins versant et les écosystèmes (*Yener et al, 2012*). La modélisation hydrologique est un outil utilisé généralement pour estimer la réponse hydrologique du bassin due à la précipitation. Elle prévoit la réponse hydrologique à de diverses pratiques de gestion de bassin versant et avoir un meilleur arrangement des impacts de ces pratiques (*Kadam, 2011*). Il est évident de l'examen étendu de la littérature que les études sur l'évaluation comparative des modèles du bassin versant pour des simulations hydrologiques sont beaucoup limitées dans les pays en voie de développement comprenant l'Inde (*Kumar et Bhattacharya, 2011*), cela explique la nécessité pour entreprendre l'étude de simulation hydrologique par le développement d'un modèle approprié du bassin. Le système de modélisation hydrologique de centres hydrologiques de technologie (HEC-HMS) est un modèle très utilisé pour simuler le processus d'écoulement et de précipitations.

Plusieurs études ont été utilisées le modèle HEC-HMS dans différentes régions (sols et les conditions climatiques différents). (*Chu et Stenman, 2009*) ont employé le modèle de HEC-HMS pour l'événement et la modélisation hydrologique continue dans le bassin versant de Monalack au Michigan occidental.

Le modèle de HEC-HMS a été également employé pour simuler le processus de précipitation-écoulement avec la geo-informatique et les modèles atmosphériques pour des prévisions d'inondation et des détections précoces dans différentes régions du monde (*Argile et al, 2005 ; La HU et al, 2006 ; Knebl et al, 2005 ; ; McColl et Aggett, 2006 ; Yusop et al,*

2007 ; Yener et al, 2012 ; Arekhi, 2012 ; Majidi et Shahedi, 2012 ; Halwatura et Najjim, 2013 ; Majidi et Vagharfard, 2013 ; Dzubakova, 2010 ; Arekhi, S et al, 2011). Il a été également employé pour la gestion des bassins versants dans différentes régions de l'Inde (Kumar et Bhattacharya, 2011 ; Bhatt et al, 2012 ; Kadam, 2011 ; Kishor Choudhari et al, 2014). Le modèle a été trouvé précis dans la réponse du bassin durant le temps et dans l'espace à l'échelle d'un événement et pour une période longue continue, aussi bien que simuler de divers scénarios dans des prévisions d'inondation et des détections précoces. (Al-ahmadi en 2002) a étudié la modélisation précipitation-écoulement par HEC-HMS, GIS et RS dans trois sous-bassins en Arabie Saoudite du sud-ouest. Il a exécuté le modèle avec la méthode automatique de calibrage et a obtenu les résultats acceptables. Shaghaeghi fallah en 2001 a appliqué le modèle de HEC-HMS pour simuler l'écoulement de fleuve dans le bassin versant de Mohammadabad (située dans le nord de l'Iran). Les résultats de simulation étaient fiables et validés en les comparant aux données d'observations.

L'objectif de la présente étude est de simuler le processus de pluie-débit par le modèle hydrologique de HEC-HMS dans le bassin versant de Cheliff-Ghrib, afin de vérifier son applicabilité dans ce milieu montagneux connu par son hétérogénéité spatio-temporelle. En outre, nous allons essayer de prédire la réponse hydrologique future de ce bassin, suite à des scénarios de changement climatique par des averses quantiles, et d'autres, suite à des changements dans l'occupation du sol, dans le but de sensibiliser les décideurs de l'impact des actions anthropiques, notamment le développement urbain et la déforestation excessive au niveau du Cheliff-Ghrib sur le régime hydrologique.

4.2. Présentation du modèle HEC-HMS

Le modèle HEC-HMS, est un modèle hydrologique déterministe et conceptuel *HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)*. Ce modèle hydrologique a été développé par « *Hydrologic Engineering Center (HEC)* » de l'*U.S. Army Corps of Engineers (USACE)*.

Plusieurs versions sont disponibles, nous nous intéressons dans notre travail à la dernière version publique à savoir *HEC-HMS 3.1*. Le modèle peut être utilisé soit sur une base événementielle, soit pour exécuter des simulations en continu sur une longue période grâce à des modules de calculs d'évapotranspiration, d'humidité du sol et d'accumulation/fonte de neige.

Le modèle *HEC-HMS* est conçu pour simuler les processus de précipitations et des ruissellements des bassins versants avec un réseau hydrographique dendritique. Il est conçu

pour être applicable pour des régions géographiques variées, pour résoudre un large éventail de problèmes. Les hydrogrammes produits par le modèle *HEC-HMS* peuvent être utilisés directement, ou en collaboration avec d'autres logiciels pour le drainage urbain, la prévision des débits, l'impact de l'urbanisation, la conception des déversoirs de réservoir, la réduction de l'impact des inondations, la régulation des plaines inondables, l'hydrologie des zones humides et l'exploitation des systèmes de ressources en eau.

Le modèle HEC HMS comprend trois modules : module de calcul des précipitations nettes, module de calcul du ruissèlement et module de calcul des débits de base (écoulement souterrain).

Notons que les données nécessaires requises pour HEC-HMS sont :

- La configuration des éléments physiques du bassin (sous-bassin, canaux, réservoirs, jonctions, diversions, sources et exutoire) et leurs caractéristiques ;
- Les précipitations : ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événement pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements théoriques basés sur une étude statistique ;
- Paramètres de contrôle de la simulation.

Chacun des trois modules, composant HEC-HMS nécessite un certain nombre de données à saisir et un certain nombre de fonctionnalités. Cette configuration permet de faciliter le travail et autorise la réalisation d'un nombre multiple de scénarios dans une optique de confrontations des résultats de ces scénarios.

Dans ce qui suit nous présenterons les trois modules composant le modèle.

4.2.1. Module de gestion du modèle de bassin (Basin Model Manager)

Ce module représente le cadre qui permet de situer le bassin versant géographiquement, et de connaître la disposition des différents éléments du bassin ainsi que la définition de leurs caractéristiques. Un module de gestion du modèle de bassin peut comporter plusieurs modèles de bassin, représentant différentes configurations du bassin (Figure 4.1).

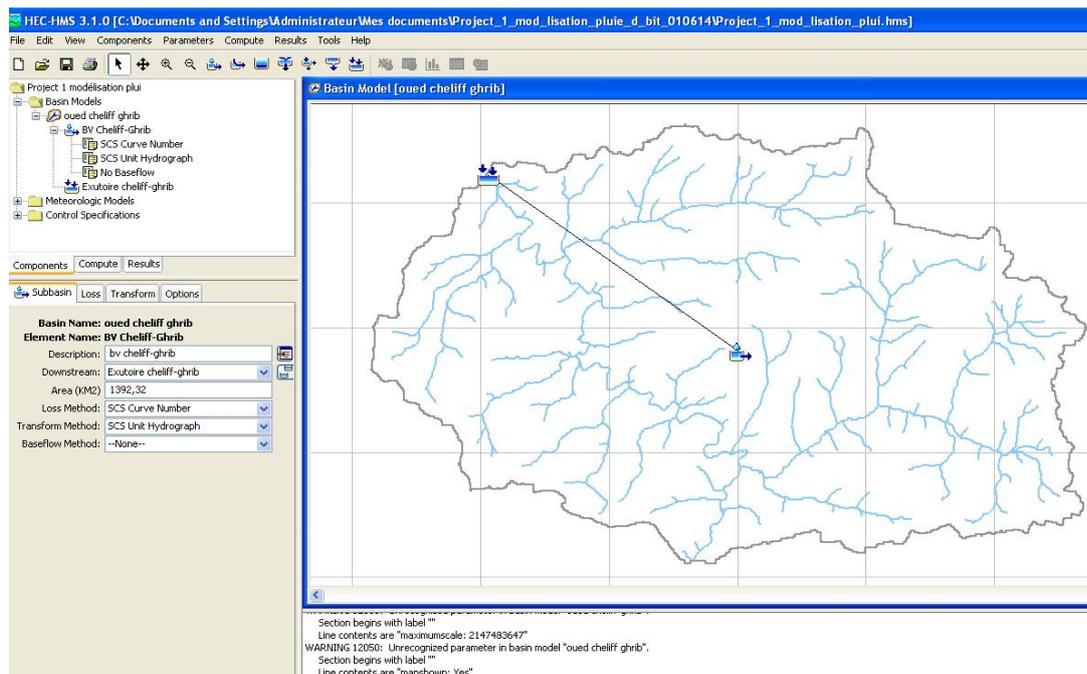


Figure 4.1. Interface du logiciel HEC-HMS

Le module de bassin comprend les éléments suivants :

- sous bassin (*Subbasin*) ;
- canaux (*Reach*) ;
- réservoir (*Reservoir*) ;
- jonction (*Junction*)
- diversion (*Diversion*) ;
- source (*Source*) ;
- exutoire (*Outlet*).

Ce module comprend par ailleurs une série de données nécessaires à l'application du modèle.

4.2.2. L'organisation du modèle

Pour faciliter la construction d'un modèle complet qui répond aux circonstances spécifiques de chaque étude de cas, il est strictement nécessaire que le modèle se compose d'au moins quatre modules et deux fonctions essentielles à la modélisation par HEC-HMS, deux autres modules de plus si on veut affiner nos résultats et nos analyses. Ces constituants sont classés, ci-après, par ordre de priorité de conception.

4.2.2.1. Le module structural du bassin

Il consiste à schématiser le bassin versant étudié en éléments fondamentaux connectés entre eux sous forme d'un arbre ramifié.

Le HEC-HMS offre l'opportunité de représenter toutes les entités naturelles ou artificielles installées dans un bassin et qui influencent le processus de transformation pluie-débit, allant depuis les sous bassins, les exutoires jusqu'aux canaux de rivières et les canaux de diversion d'eau, en passant par les réservoirs, les retenues de barrages,...etc.

Dans ce qui suit, on cite ces éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant :

- L'élément 'Subbassin' : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- L'élément 'Reach' : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- L'élément 'Reservoir' : décrit les réservoirs, les retenues de barrage,...etc. ses caractéristiques attribués permettent de définir les conditions stockage-déstockage.
- L'élément 'Source' : permet d'ajouter des stations de mesure de débit ou de représenter les conditions aux limites.
- L'élément 'Jonction' : utilisé pour combiner aux moins deux débits véhiculés par deux éléments, comme dans le cas d'une confluence entre deux rivières.
- L'élément 'Diversion' : représente des endroits où se produit des prélèvements d'eau, c'est le cas par exemple des seguias et des canaux de diversion.
- L'élément 'Sink' : simule l'exutoire des sous bassins versants (*Ahbari, 2013*).

4.2.2.2. Le module météorologique

Il a comme objectif de répartir les précipitations saisies sur toute la surface étudiée. Pour se faire, le HEC HMS dispose de huit méthodes différentes, à choisir entre elles en fonction des objectifs et de la disponibilité des données, mais elles ont presque toutes la spécificité de distribuer la hauteur de pluie de manière homogène dans le temps et dans l'espace. Ces méthodes sont :

- 'Specified Hyetograph' : hyétogramme spécifié, c'est l'utilisateur qui se charge de saisir son hyétogramme dont il dispose.
- 'Frequency Storm' : averse de fréquence, utilisé pour développer un événement de précipitation où les hauteurs pour différentes durées dans l'averse ont une probabilité cohérente.

- ‘Gages weights’ : stations pondérées, utilise un coefficient de pondération à chaque station de mesure de précipitations.
- ‘Inverse distance’ : l’inverse de distance, calcule la moyenne de pluie par l’application de la méthode d’inverse carré des distances pour attribuer à chaque station un coefficient de pondération.
- ‘Gridded precipitations’ : précipitations en maille, permet d’introduire les précipitations sous forme de grille de mesure.
- ‘Standard Project Storm’ : averse de projet standard, répartie une hauteur de précipitations donnée sur un intervalle de temps spécifié.
- ‘SCS Storm’ : averse SCS, applique à la hauteur de précipitations journalière une des distributions d’averse de projet définies par le SCS.

Le choix de telle ou telle méthode est imposé par l’objectif de la modélisation (détermination du débit de projet, étude de fonctionnement hydrologique du bassin versant,...), la quantité (nombre de stations, période de mesure,...), la qualité (pluviomètres, pluviographes, lacune de mesure,...) des données de précipitations et le type de modélisation envisagé (distribuée, globale) (*Ahbari, 2013*).

4.2.2.3. Le module de la fonction de production

La fonction de production assure la transformation de la pluie brute en pluie nette en y retranchant toutes les pertes éventuelles causées par l’interception (obstacles, végétation, cuvettes). L’infiltration et l’évapotranspiration (en cas de modélisation continue).

La fonction de production du modèle HEC-HMS distingue entre une surface perméable et imperméable. La première est considérée comme le champ d’intervention de la fonction, afin de ne pas surestimer les pluies qui participent réellement dans le ruissellement appelées pluies nettes.

La deuxième quant à elle, est supposée non affectée par les pertes en pluie surtout si elle est connectée au réseau hydrographique, elle est reconnue dans le modèle par le pourcentage d’imperméabilité du bassin. Il existe six formalismes pour représenter cette fonction à savoir:

- ‘Initial and Constant Loss’ : pertes initiales, à taux constant. Ce formalisme considère un taux maximum de pertes constant, et une perte initiale à saturer avant que le ruissellement commence.

- ‘Deficit and Constant Loss’ : à déficit et à taux de perte constant. Une variante du premier formalisme avec une possibilité de régénération des pertes initiales durant une période sans pluie au cours de l’événement modélisé.
- ‘Green and Ampt Loss’ : formalisme qui s’intéresse plutôt aux pertes par infiltration, cette méthode repose sur l’équation de Darcy et la conservation de masse.
- ‘Soil Moisture Accounting Loss’ : formalisme très poussé qui calcule les ‘’pertes’’ par évapotranspiration, infiltration et percolation profonde selon le principe de couche de stockage.
- ‘SCS Curve Number Loss’ : formalisme qui relie les pertes en pluie à l’occupation du sol et le type desol et l’humidité antécédente. Cette méthode sera détaillée davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- ‘Gridded SCS Curve Number Loss’ : format maillé du formalisme précédent.

La sélection de l’un de ces formalismes est une étape délicate qui va influencer sans doute les sorties du modèle.

Une toute première contrainte est que le choix peut être dicté par les formalismes utilisés pour les autres modules (module météorologique, fonction de transfert, ...), la deuxième étant la nature de données disponibles (sous forme de maille, détaillées, plusieurs variables,...) (*Ahbari, 2013*).

4.2.2.4. Le module de la fonction de transfert

Une fois la pluie participante au ruissellement calculée, c’est le rôle de la fonction de transfert qui débute. Elle permet de déterminer l’hydrogramme résultant de la pluie nette. Le modèle offre six formalismes pour y converger :

- ‘User-Specified Unit Hydrograph’ : Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur. Ce formalisme consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de données complètes d'un événement pluvieux (*Bouziane, 2009*) :
- ‘Snyder Unit Hydrograph’ : Hydrogramme unitaire de Snyder.
- ‘KinematicWave’ : onde cinétique. Reconnaît les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à la pluie nette.
- ‘SCS Unit Hydrograph’ : Hydrogramme unitaire de la SCS. Résultat de la combinaison des hydrogrammes de plusieurs bassins versants. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.

- ‘Clark Unit Hydrograph’ : Hydrogramme unitaire de Clark. Prend en compte les deux phénomènes de translation et d’atténuation. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- ‘ModClark’ : forme maillée du dernier formalisme.

L’USACE fournit quelques recommandations pour faciliter le choix du formalisme le mieux adapté :

- Disponibilité de données pour la calibration des paramètres ou l’estimation de leurs valeurs : connaissant que la source optimale des paramètres de ces formalismes est la calibration, la possibilité d’exécuter cette opération s’avère fructueuse pour les hydrogrammes unitaires. Cependant, si cette possibilité n’est valide, la méthode de l’onde cinétique semble être la plus appropriée mais à condition d’avoir les données mesurées et observées nécessaires.
- La validation des hypothèses du formalisme sélectionné : vérifier que les hypothèses fixées pour la méthode ne sont pas violées, si non le risque d’aboutir à des résultats aberrants est potentiellement présent (*Ahbari., 2013*).

4.2.2.5. Le module du débit de base

Celui-ci est l’un des deux modules complémentaires du modèle, à défaut duquel le HEC-HMS peut tourner, mais sa présence améliore la compréhension des mécanismes qui contrôlent le ruissellement dans le bassin sujet d’étude.

Le débit de base est la contribution du réservoir souterrain dans l’écoulement, sa connaissance est importante pour modéliser la récession de l’hydrogramme avant et après la pointe de débit et pour mieux estimer le volume de crue. 3 formalismes sont proposés par le modèle :

- ‘Constant Monthly’ : Constante mensuelle. Il considère l’écoulement souterrain comme fixe pendant des durées d’un mois. Ce débit de base mensuel est donc ajouté au ruissellement direct issu des précipitations nettes. Cette méthode est très simple, mais non adaptée au contexte semi-aride où la variation des conditions de saturation des bassins versants se fait en moins d’un mois.
- ‘LinearReservoir’ : Réservoir linéaire. Il simule le stocke souterrain à un réservoir, ainsi il est toujours associé à la fonction de production type SMA.

- ‘Recession’ : utilise une récession exponentielle du débit de base. Elle est utilisée pour les bassins ou les volumes de crue sont influencés par les événements pluvieux. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie (*Chang, 2009*).

4.2.2.6. *Le module de routage*

C'est le deuxième des deux modules complémentaires, il permet de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces formalismes utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement pour la simulation.

- « Lag » ;
- « Muskingum » ;
- « Modified Puls » ;
- « Kinematic-wave » ;
- « Muskingum Cunge ».

4.2.2.7. *La fonction objective*

Elle mesure la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé à l'hydrogramme observé que ce soit en termes de débit, de volume ou du temps. Le HEC-HMS en compte 7 fonctions objectives à savoir :

- ‘Peakweighted RMS error’ : modification de la fonction objective largement utilisée qui est l'erreur sur la racine moyenne des carrés de débit. Cette méthode donne plus de poids aux débits en dessus de la moyenne et moins de poids aux débits en dessous.
- ‘Sum of squared residuals’ : la somme des résidus au carré, attribue plus de poids aux larges erreurs et moins aux petits erreurs.
- ‘Sum of Absolute Residuals’ : la somme des résidus absolus, qui ne différencie pas entre les erreurs larges et celles restreintes. « Percent Error in Peak Flow » : le pourcentage d'erreur sur le débit de pointe, qui se focalise sur l'ajustement des débits de pointe.
- ‘Percent Error in Volume’ : le pourcentage d'erreur sur le volume, qui se focalise sur l'ajustement des volumes de ruissellement.

- ‘RMS Log Error’ : utilise l’erreur sur la moyenne de la racine carrée des log des débits pour mettre en phase les débits faibles et forts.
- ‘Time weighted’ : donne du poids aux erreurs proches de la fin de l’événement et moins aux erreurs du début.

Le choix de telle ou telle fonction est dicté par la problématique étudiée et/ou les objectifs de la modélisation. Par exemple, si on est amené à faire une délimitation des zones inondables, la fonction objective sur le volume est appréciée, si par contre l’objectif étant de déterminer le débit de projet d’un ouvrage quelconque, la fonction objective conseillée est celle jouant sur le débit de pointe (*Ahbari., 2013*).

De l’autre côté si on est en présence d’une modélisation continue pour comprendre le fonctionnement hydrologique d’un bassin, il sera préférable d’opter par exemple à la première fonction qui va s’intéresser plutôt aux grands pics de débits. Ainsi, on choisit la fonction qui nous aidera à résoudre notre problématique et atteindre nos objectifs.

4.2.2.8. La fonction d’optimisation automatique

Elle sert à rechercher, sans intervention de l’utilisateur, le jeu de paramètres optimal donnant à la fonction objective sa valeur la meilleure possible. Pour exécuter cette tâche, le HEC-HMS propose deux méthodes :

- ‘Univariate Gradient’ : le gradient uni-varié, ajuste un seul paramètre à la fois en gardant les autres constants.
- ‘Nelder et Mead’ : utilise une approche qui consiste à optimiser tous les paramètres simultanément.

Chacune a les paramètres suivants :

- La tolérance : détermine la valeur de changement de la fonction objective en dessous de laquelle l’optimisation des paramètres s’arrête.
- Maximum d’itérations : détermine le nombre maximal de jeux de paramètres à essayer avant d’arrêter l’optimisation.

La fonction d’optimisation s’arrête une fois l’une de ces conditions est remplie :

- La valeur de la fonction objective est nulle ;
- Le nombre d’itérations est atteint et ceci quelque soit la valeur de la fonction objective;
- La valeur de variation de la fonction objective est en inférieure à la tolérance.

En conclusion, on peut dire que la diversité des formalismes dont dispose HEC-HMS, le positionne en tête des modèles les plus robustes dans la simulation des ruissellements au sein du bassin, les plus complets dans l'intégration des différentes composantes d'écoulement et les moins exigeants de point de vue données d'entrée.

4.3. La modélisation du bassin avec HEC-HMS

4.3.1. Les données d'entrée du modèle

4.3.1.1. Le modèle numérique du terrain (MNT)

Avant de procéder à n'importe quelle opération de préparation d'un fichier de simulation HMS, il est primordial d'avoir à sa possession le MNT de la zone d'étude, dont le rôle est fondamental dans la caractérisation physique du bassin et le calcul des paramètres.

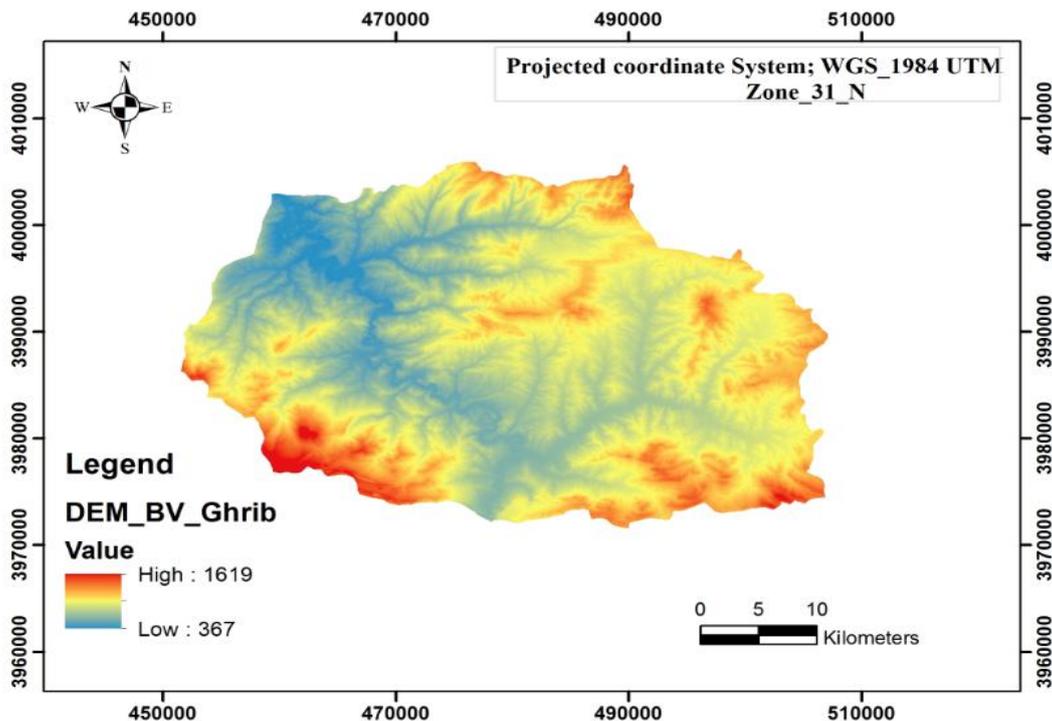


Figure 4.2. Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin versant Cheliff-Ghrib

4.3.1.2. Occupation du sol

Vu les exigences particulières de la combinaison modulaire choisie, plus précisément la méthode de service de conservation de ressource naturel (NRCS CN) comme fonction de production, l'établissement d'une carte d'occupation du sol sur l'ensemble de la zone d'étude était une voie incontournable. Toutefois, l'information supposée contenue dans cette carte devrait être authentique à la classification reconnue par le NRCS, par conséquent nous étions

mené à faire des correspondances entre les classes de la NRCS et les informations recueillies de toutes les données bibliographiques répertoriées qui traitent ce volet.

Afin d'estimer la valeur du CN il faut donc d'abord établir une classification hydrologique des sols, ainsi qu'une classification de l'occupation du sol.

Selon la méthode du CN, on distingue quatre groupes de sols (Hydrologic Soil Group) nommés de A à D.

Le Service de Conservation des Sols (SCS) des Etats-Unis a établi, à partir de certaines classes de l'USGS, les "Curve Numbers"(CN) qui sont des coefficients de ruissellement fonction du type de sol, de son utilisation, des conditions d'humidité antérieures et de leurs variations dans le temps. Ils représentent la corrélation entre des groupes de sols hydrologiques (A à D) et des classes d'utilisation du sol (Annexe 1). Ils ont servi à calculer un index de ruissellement (Taillon, 1991).

Tableau 4.1. Classification de groupe hydrologique des sols (Bastian, 2011).

Groupe hydrologique des sols	Caractéristiques des sols	Précisions
A	Capacité d'infiltration élevée Conductivité hydraulique élevée	Sols développés dans les sables, les loess profonds et les limons agrégés
B	Capacité d'infiltration modérée Conductivité hydraulique modérée	Sols dérivés de loess et développés dans les limons sableux peu profonds
C	Capacité d'infiltration faible Conductivité hydraulique faible	Sols développés dans les limons argileux, les limons sableux, les sols à faibles teneurs en matière organique et les sols à haute teneur en argile
D	Capacité d'infiltration très faible Conductivité hydraulique très faible	Sols à forte teneur en argiles gonflantes, aux sols riches en argile lourde et à certains sols salins.

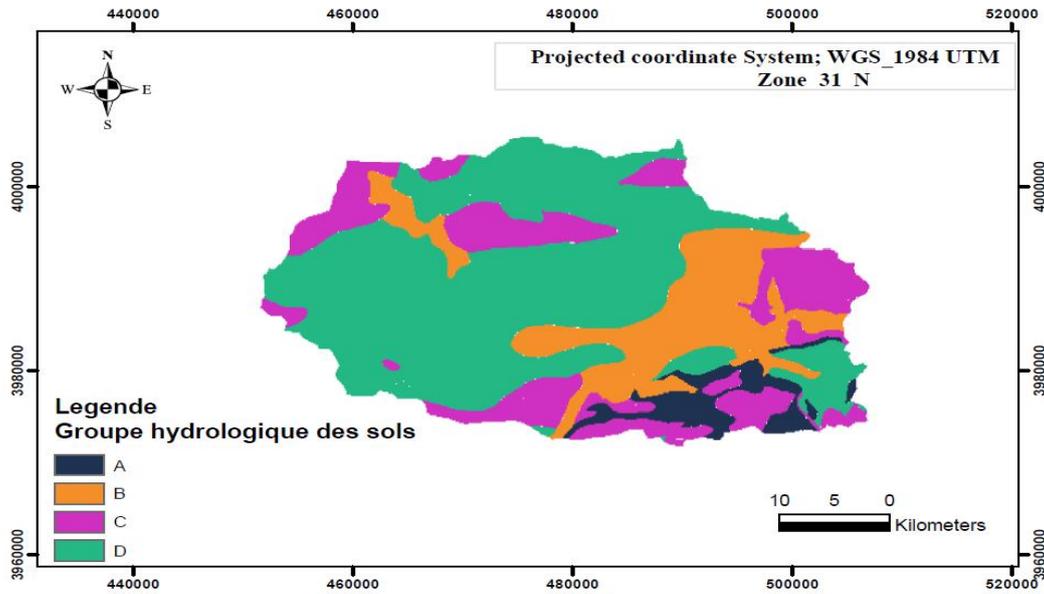


Figure 4.3. Carte de groupe hydrologique des sols du bassin versant Cheliff-Ghrib

Il existe de nombreuses tables qui permettent d'estimer les CN associés aux catégories d'occupation du sol et aux groupes hydrologiques de sol. Elles ont été établies sur base de nombreuses mesures de pluies et débits réalisées dans des bassins versants agricoles aux États-Unis Voir l'annexe 1

CN: sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration. Il est déterminé pour un composé hydrologique de sol à partir de tables NRCS (annexe 1) où on combine la nature de l'utilisation du sol, son traitement, les conditions hydrologiques avec le type de sol pour trouver la valeur de CN.

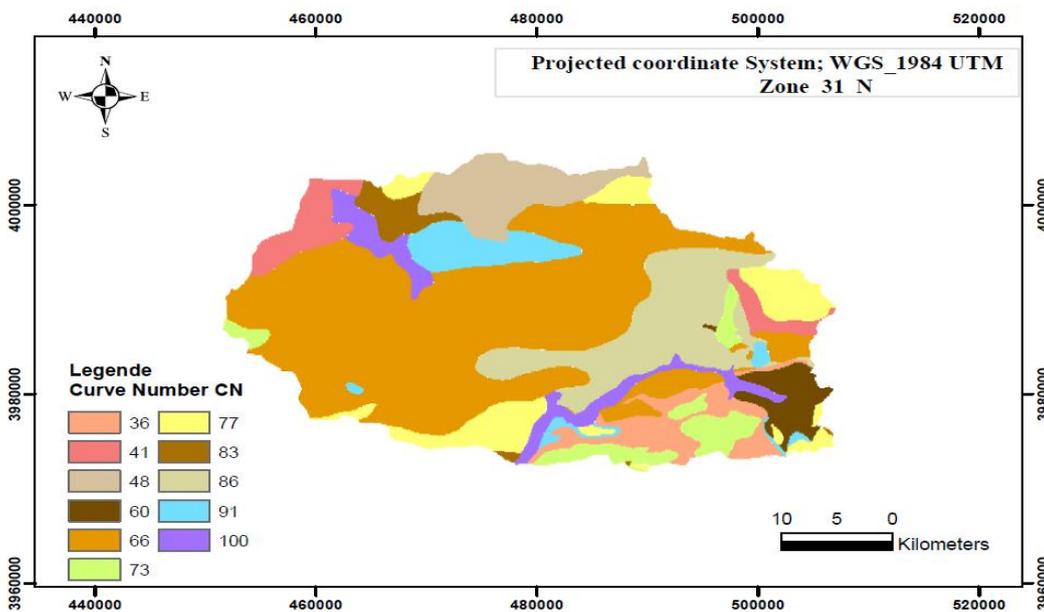


Figure 4.4. La carte de Curve Number CN du bassin versant Cheliff- Ghrib

Pour un bassin versant composé de plusieurs classes d'occupation du sol et de type de sols, un CN composite doit être calculé par la formule :

$$CN_{\text{composite}} = \frac{\sum S_i \cdot CN_i}{\sum S_i} \quad (4.1)$$

CN composite : le CN utilisé pour l'ensemble du bassin versant par la fonction de production ;

CN_i : le CN d'un composé hydrologique du sol (classe d'occupation du sol + classe de sol) ;

S_i : surface de drainage du composé hydrologique du sol.

Tableau 4.2. Détermination de CN moyen pour le bassin versant

CN _i	surface S _i (km ²)	CN _i * S _i
36	1	36
41	43.82	1796.62
45	66.78	3005.1
48	110	5280
60	32.43	1945.8
66	178	11748
73	64.14	4682.22
77	159.04	12246.08
79	570	45030
83	59.15	4909.45
86	41.66	3582.76
91	24.14	2196.74
100	28.47	2847
somme	1378.63	99305.77
CN composite		72

4.3.1.3. La donnée pluie

Pour chaque événement, la pluie devrait être saisie sous forme de la hauteur de pluie tombée sur le bassin pendant le jour où cet événement est survenu, au quelle nous associons chaque fois une des quatre distributions NRCS. Lors de la modélisation, et puisque il n'y a pas de choix de préférence, nous allons utiliser les quatre types (I, IA, 2 et 3) pour chaque événement, et essayer d'en déduire, en comparant les résultats de chaque type, l'averse la mieux appropriée à notre contexte.

Dans notre cas, nous nous étions limités à la période (06-09/03/1980) - (18-21/04/1982) - (08-12/03/1986) - (23-25/09/1993) et (23-26/09/1994) voir l'annexe 1.

4.3.2. L'élaboration du modèle

Avant de débiter la calibration, nous avons préparé tous les fichiers de simulations des cinq événements préalablement présélectionnés, en prenant en compte les quatre types d'averses NRCS et les deux formalismes de la fonction de transfert pour analyser la sensibilité du modèle successivement aux types d'averse et aux formalismes. Ainsi, nous avons 40 fichiers de simulation.

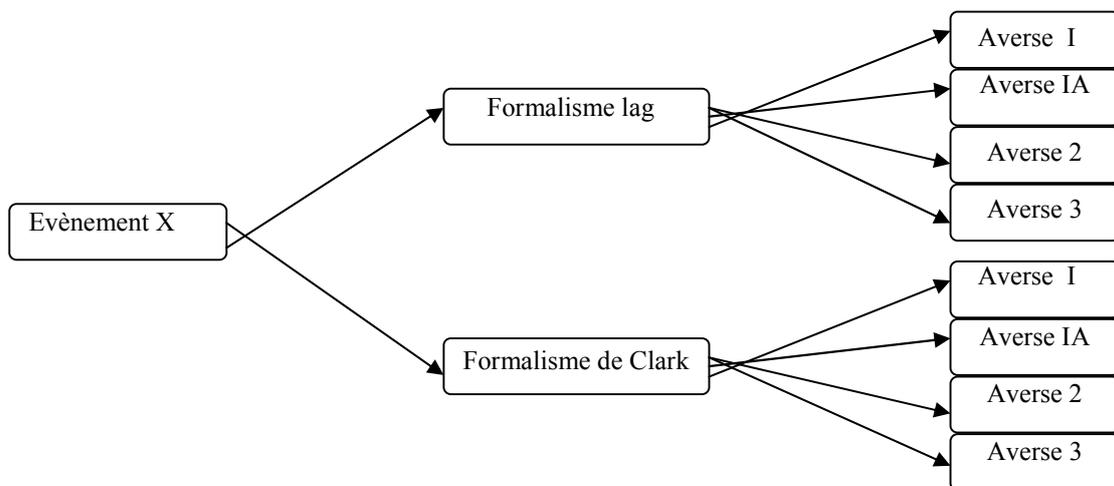


Figure 4.5. Nombre de fichiers de simulation préparés pour chaque événement

Le temps de concentration T_c : résume le processus de translation de la pluie nette le long du réseau hydrographique.

Le coefficient de stockage S_t : représente le phénomène de stockage provisoire de la pluie nette dans le bassin versant.

$$S_t = 1.632 * T_c \quad (4.2)$$

Le temps de réponse T_{lag} : Durée séparant le centre de gravité du hétérogramme moyen de l'averse ayant donné lieu au ruissellement à la pointe de l'hydrogramme.

$$T_{lag} = 0.6 * T_c \quad (4.3)$$

Pour chacun des fichiers de simulation, on aura les données suivantes :

Tableau 4.3. Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation

Module du modèle		Entrée	valeur	Unité
Le bassin		La surface	1378.63	km ²
Module météorologique		Pluie	Fonction de l'événement	mm
		Le type d'averse	-	-
Module de la fonction De production	NRCS CN	Abstraction initiale « Ia »	1	mm
		Curve Number « CN »	72	-
		Le pourcentage d'imperméable	10	-
Module de la fonction de transfert	NRCS	Temps Lag « TLag »	476	Min
	Clark	Temps de concentration « TC »	13.22	heures
		Coefficient destockage « ST »	21.57	heures

4.3.3. Résultats de simulation

Les résultats de simulation pour les deux fonctions de transfert lag et clark sont dans les tableaux (4.4) et (4.5).

Tableau 4.4. Résultats de simulation : Formalisme lag

Evènement	Averse	Paramètres de modèle			Résultats de simulation					
		NRCS CN			Qp (m ³ /s)			V (mm)		
		Ia	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Diff %	Obs.	Sim.	Diff %
06-09/03/1980	1	1	72	476	197.14	276.4	28.67	8.56	11.73	27.02
	1A					228.9	13.87		11.73	27.02
	2					333.4	40.8		11.75	27.15
	3					337.3	41.55		11.75	27.15
18-21/04/1982	1	1	72	476	159.34	225.8	29.43	7.26	10.02	27.54
	1A					189.3	15.83		10.02	27.54
	2					274.3	41.9		10.02	27.54
	3					274.3	41.9		10.02	27.54
08-12/03/1986	1	1	72	476	351.0	186.5	46.87	45.03	8.29	81.59
	1A					85.8	75.55		8.25	81.59
	2					97.0	72.36		8.25	81.59
	3					98.50	71.94		8.25	81.59
23-25/09/1993	1	1	72	476	126.5	127.7	0.9	4.67	5.51	15.24
	1A					105.8	16.5		5.51	15.24
	2					154.2	17.96		5.51	15.24
	3					156	18.91		5.51	15.24
23-26/09/1994	1	1	72	476	126.5	131.6	3.9	5.63	5.87	4
	1A					110.3	12.81		5.87	4
	2					150.4	15.89		5.87	4
	3					159.9	20.9		5.87	4

NRCS CN : Natural Resource Conservation Service, Curve Number

Clark : module de la fonction de transfert de Clark

Sim. : Simulé Obs. : observé

Qp : le débit de pointe (m³/s)

Ia : perte initiale (mm)

CN : Nombre de courbe

Fct obj : la fonction objective

V : le volume en mm

Lag : temps de réponse lag (min)

Tableau 4.5. Résultats de simulation : formalisme de Clark

Evènement	Averse	Résultats de simulation									
		NRCS CN		Clark		Qp (m ³ /s)			V (mm)		
		Ia	CN	tc	St	Obs.	Sim.	Diff %	Obs.	Sim.	Diff %
06-09/03/ 1980	1	1	72	13.22	21.52	197.14	128.9	34.61	8.56	11.28	24.11
	1A						122.9	37.65		11.48	25.44
	2						139.9	29.03		11.47	25.37
	3						141.3	28.32		11.47	25.37
18-21/04/ 1982	1	1	72	13.22	21.52	159.34	108.7	31.78	7.36	9.17	19.74
	1A						103.7	34.92		9.17	19.74
	2						117.3	26.38		9.16	19.65
	3						119.1	25.25		9.15	19.56
08-12/03/ 1986	1	1	72	13.22	21.52	351.0	89.8	74.42	45.03	8.25	81.62
	1A						85.8	75.56		8.25	81.62
	2						97.0	72.36		8.25	81.62
	3						98.5	71.94		8.25	81.62
23-25/09/ 1993	1	1	72	13.22	21.52	126.5	63.5	71.15	4.67	5.72	18.36
	1A						60.6	52.09		5.72	18.36
	2						68.6	45.77		5.72	18.36
	3						69.6	44.98		5.72	18.36
23-26/09/ 1994	1	1	72	13.22	21.52	126.5	59.8	52.72	5.63	4.03	28.42
	1A						57	54.94		4.04	28.42
	2						65	48.62		4.01	28.77
	3						63.5	49.80		5.72	1.6

Tc : temps de concentration (h) St : temps de stockage (h)

Les graphes des évènements (1980, 1982, 1986 et 1994) pour la méthode de fonction de transfert NRCS formalisme lag et formalisme de Clark sont dans l'annexe 2.

Les graphes d'évènement de 23-25/09/1993 pour la méthode de fonction de transfert NRCS formalisme lag et formalisme de Clark sont les suivants :

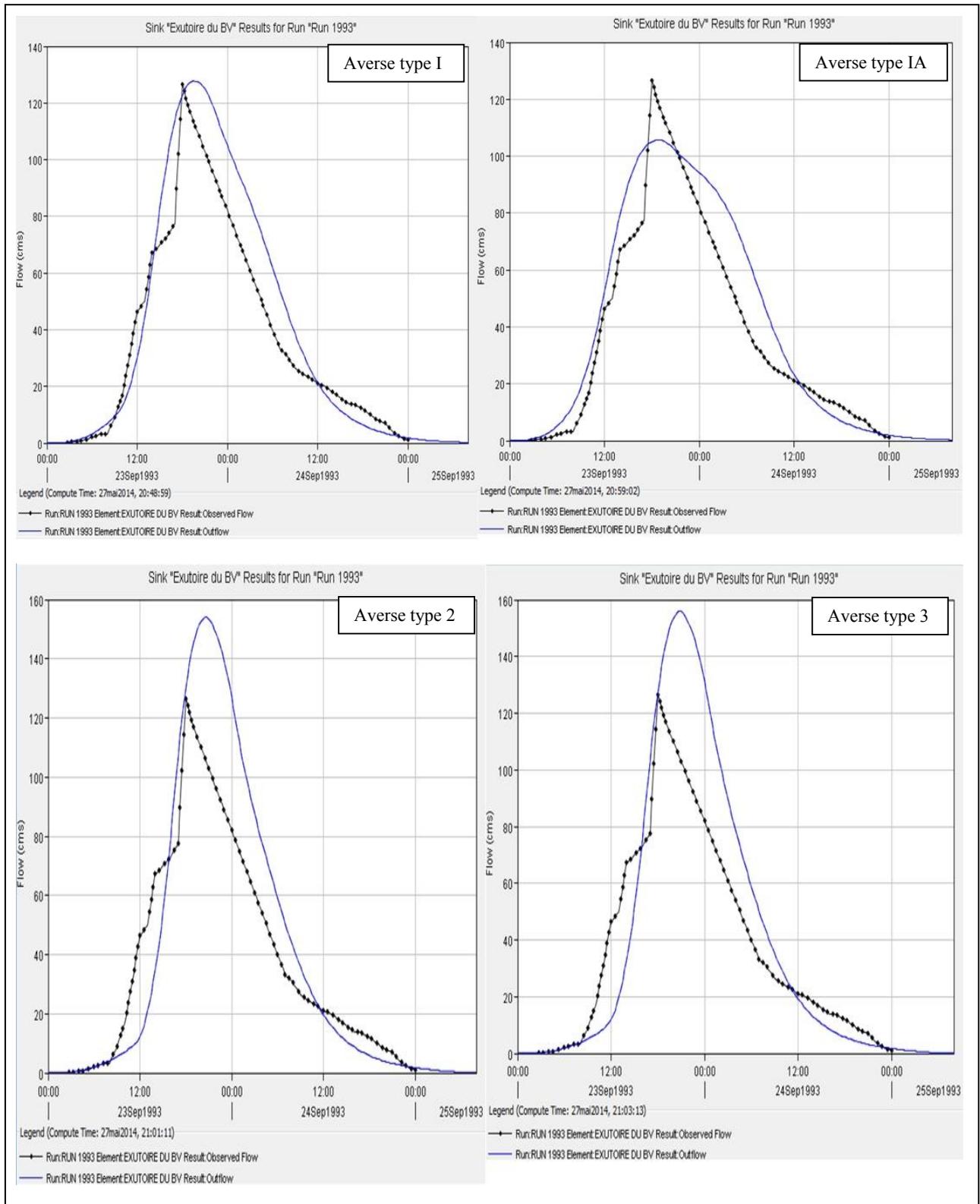


Figure 4.6. Hydrogrammes des crues de l'évènement de 23-25/09/1993 avec la fonction de transfert NRCS

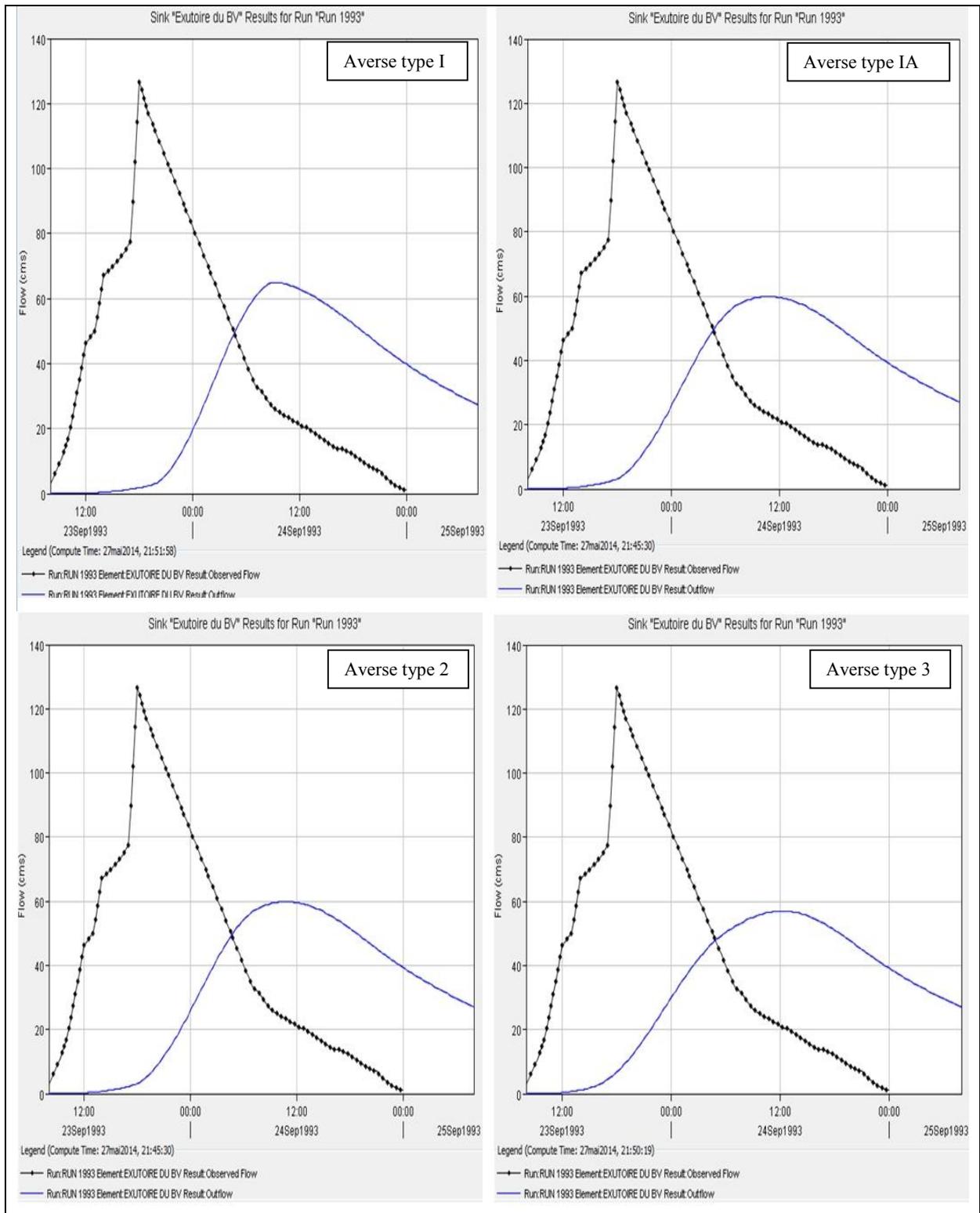


Figure 4.7. Hydrogrammes des crues de l'évènement de 23-25/09/1993 avec la fonction de transfert de Clark

4.3.4. La calibration du modèle

Afin d'aboutir aux valeurs optimisées des paramètres du modèle, la calibration a été effectuée pour les 40 fichiers de simulation en utilisant la fonction objective sur le débit de pointe.

À partir des résultats de la calibration, nous pouvons constater d'une manière générale que la valeur de la fonction objective, les valeurs optimisées des paramètres, les débits de pointe et le volume simulés varient tous en fonction de l'événement, du type de l'averse sélectionné et du formalisme choisi pour la fonction de transfert. Les résultats de calibration de modèle sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 4.6. Résultats détaillés de la calibration en utilisant le formalisme de l'hydrogramme Lag comme fonction de transfert

Evènement	Averse	Paramètres calibrés			Résultats de calibration				Fonction Obj %
		NRCS CN			Qp (m ³ /s)		V (mm)		
		Ia	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	
06-09/03/1980	1	1	85.77	399.68	197.1	197.1	8.56	7.58	0
	1A	1	87.32	402.56		169.1		8.09	14.2
	2	1	80.10	403.21		197.2		6.18	0
	3	1	80.10	407.24		197.5		6.18	0
18-21/04/1982	1	1	60.03	547.4	159.3	158.8	7.26	7.64	0
	1A	1	66.75	533.62		159.3		8.82	0
	2	1	47.106	481.38		158.7		6.02	0
	3	1	51.52	547.4		159.6		6.50	0
08-12/03/1986	1	1	89.74	457.15	351.0	354.2	45.03	14.97	0
	1A	1	99	547.40		492.8		25.60	11.9
	2	1	84.05	422.69		350.5		11.91	0
	3	1	85.32	466.48		350.8		12.49	0
23-25/09/1993	1	1	71.56	476.0	126.5	126.4	4.67	5.45	0
	1A	1	78.495	478.04		126.5		6.58	0
	2	1	68.036	547.07		126.5		5.02	0
	3	1	67.63	547.40		126.8		4.98	0
23-26/09/1994	1	1	70.56	478.18	126.5	126.7	5.63	5.67	0
	1A	1	78.49	540.86		126.5		7.01	0
	2	1	62.98	483.91		126.5		4.81	0
	3	1	66.40	547.4		127.0		5.16	0

Tableau 4.7 Résultats détaillés de la calibration en utilisant le formalisme Clark comme fonction de transfert

Evènement	Averse	Paramètres calibrés				Résultats de calibration				Fonction Obj %
		NRCS CN		Clark		Qp (m3/s)		V (mm)		
		Ia	CN	Tc	st	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	
06-09/03/ 1980	1	1.50	78.28	14.90	14.48	159.3	159.3	7.36	11.37	0
	1A	1.46	80.10	12.70	14.35		159.4		12.04	0
	2	0.98	80.10	12.71	19.46		159.4		11.78	0
	3	1.46	80.10	12.67	19.36		159.3		11.55	0
18-21/04/ 1982	1	1.47	98.85	14.82	14.33	351.0	351.0	45.03	24.88	0
	1A	1.19	99	12.44	12.65		351.0		25.43	0
	2	1.47	99	12.69	17.56		350.9		25.18	0
	3	1.69	99	12.70	17.51		351.1		24.98	0
08-12/03/ 1986	1	0.62	85.77	5.68	13.73	126.5	126.5	4.53	7.84	0
	1A	0.96	87.94	5.78	13.63		126.5		8.44	0
	2	0.62	80.10	8.29	12.63		126.5		6.44	0
	3	0.75	80.10	8.49	12.64		126.5		6.38	0
23-25/09/ 1993	1	0.67	85.77	14.89	14.34	126.5	126.5	5.63	9.19	0
	1A	0.64	85.77	12.18	12.55		126.5		9.21	0
	2	0.55	80.10	12.44	12.65		126.5		7.55	0
	3	0.74	80.10	8.29	13.80		126.5		7.47	0

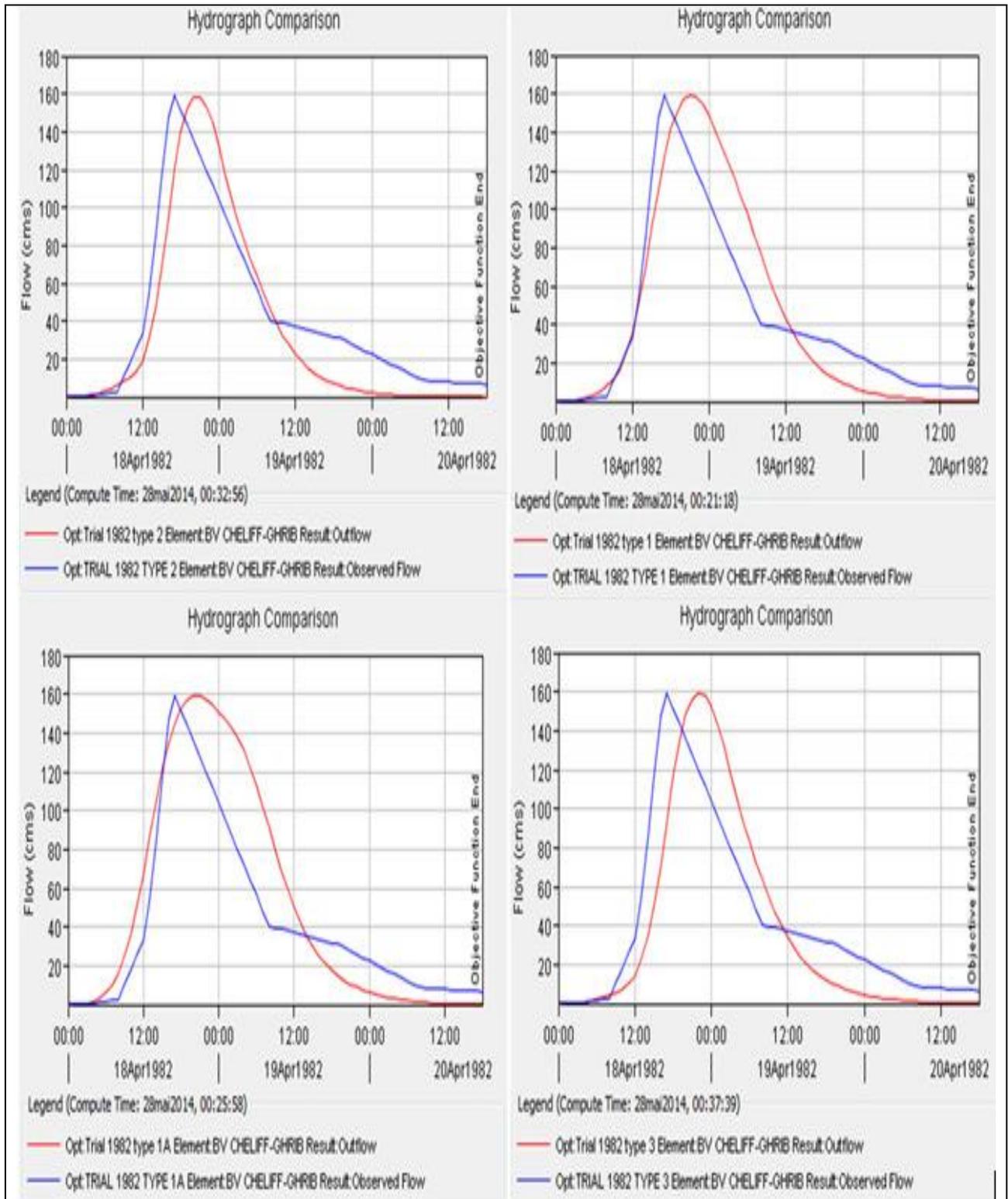


Figure 4.8. Hydrgrammes de crues de l'évènement de 18-21/04/1982 après calibration par la fonction de transfert NRCS

En effet, en fouillant les résultats minutieusement nous pouvons clairement remarquer que :

Dans le cas du choix du formalisme NRCS: la fonction objective est nulle pour les quatre types d'averses des événements (18-21/04/1982), (23-25/09/1993) et (23-26/09/1994). Pour les autres événements (06-09/03/1980) et (08-12/03/1986) la fonction objective prend les valeurs nulle pour les averses 1,2 et 3 et des valeurs 14.2 et 11.9 pour les averses de type 1A. Ce constat est valide pour les débits de pointe, où ils sont mieux restitués lors de l'utilisation des averses 1, 2 et 3. Pour les volumes simulés, ils sont bien estimés pour l'événement (06-09/03/1980), (18-21/04/1982), (23-25/09/1993) et (23-26/09/1994) et sous-estimés pour l'événement (08-12/03/1986) et quel que soit le type d'averse. En ce qui concerne les valeurs optimisées des paramètres, nous remarquons que ces paramètres changent en passant d'un événement à l'autre, et sont moins variables au sein du même événement. Ces jeux de paramètres peuvent servir pour valider le modèle puisque ils sont proches pour événement (23-25/09/1993) et (23-26/09/1994).

Dans le cas du choix du formalisme Clark : la fonction objective est nulle pour les quatre types d'averses de tous événements. Pour les volumes de crue, nous constatons que le problème de surestimation excessive persiste toujours, chose qui est bien comprise car la fonction de transfert n'a pas d'effet sur le volume de la crue, mais c'est plutôt sur le mouvement de ce volume qu'elle intervienne.

D'après cette première calibration, nous avons pu ressortir quelques conclusions, qui vont nous permettre de restreindre le nombre de simulations à partir desquelles nous en déduirons le jeu de paramètre optimal, ces conclusions sont :

- Le formalisme de l'hydrogramme unitaire de NRCS s'avère plus adapté à notre contexte d'étude que celui du Clark, donc la recherche des valeurs des paramètres optimales va être concentré dans ses résultats détaillés dans le tableau (4.6).
- Les averses types 1 et 2 ont été les mieux classés dans la restitution des caractéristiques de l'hydrogramme (débit de pointe et volume).
- La fonction objective sur le débit de pointe a permis sans doute de reproduire les pics des hydrogrammes avec excellence.

Pour tous les événements, l'hydrogramme simulé était comme prévu, donc leur comparaison va reposer plus sur ces trois caractéristiques : débit de pointe, volume simulé et l'allure de l'hydrogramme.

En utilisant les résultats simplifiés présentés dans le tableau 4.8, nous avons procédé à plusieurs approches pour aboutir au jeu de paramètres optimal, en l'occurrence :

- Méthode 1 : Utilisation de la moyenne des valeurs des paramètres des 5 événements ;
- Méthode 2 : Utilisation des maximums des valeurs des paramètres des 5 événements ;
- Méthode 3 : Utilisation des minimums des valeurs des paramètres des 5 événements ;

Tableau 4.8. Résultats simplifiés issus de l'utilisation du formalisme de Lag

Averse	Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de calibration				Fonction Obj %
		NRCS CN			Qp (m ³ /s)		V (mm)		
		Ia	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	
1	1980	1	85.77	399.68	197.1	197.1	8.56	7.58	0
	1982	1	60.03	547.4	159.3	158.8	7.26	7.64	0
	1986	1	89.74	457.15	351.0	354.2	45.03	14.97	0
	1993	1	71.56	476.0	126.5	126.4	4.67	5.45	0
	1994	1	70.56	478.18	126.5	126.7	5.63	5.67	0
2	1980	1	80.10	403.21	197.1	197.2	8.56	6.18	0
	1982	1	47.106	481.38	159.3	158.7	7.26	6.02	0
	1986	1	84.05	422.69	351.0	350.5	45.03	11.91	0
	1993	1	68.036	547.07	126.5	126.5	4.67	5.02	0
	1994	1	62.98	483.91	126.5	126.5	5.63	4.81	0

4.3.5. Résultats détaillés du premier essai de validation

Partie 1 : Averse 1

Tableau 4.9 : Résultats de simulation (utilisation de la moyenne des valeurs)

Averse	Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de simulation					
		NRCS CN			Qp (m ³ /s)			V (mm)		
		Ia	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Dif (%)	Obs.	Sim.	Dif (%)
1	1980	1	75.53	471.68	197.14	126.1	36.03	8.56	5.37	37.26
	1982				159.34	249.9	56.83	7.26	11	51.51
	1986				351.0	206.3	41.22	45.03	9.10	79.79
	1993				126.50	141.0	11.46	4.67	6.07	30
	1994				126.50	145.20	14.78	5.63	6.43	14.2

Tableau 4.10 : Résultats de simulation (utilisation des maximums des valeurs)

Averse	Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de simulation					
		NRCS CN			Qp (m ³ /s)			V (mm)		
		Ia	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Dif (%)	Obs.	Sim.	Dif (%)
1	1980	1	89.74	547.40	197.14	198.60	0.74	8.56	8.93	4.14
	1982				159.34	382.8	41.62	7.26	17.86	59.35
	1986				351.0	319.9	8.86	45.03	14.97	66.75
	1993				126.50	221.50	42.88	4.67	10.12	53.85
	1994				126.5	228.7	44.68	5.63	10.76	47.67

Tableau 4.11: Résultats de simulation (utilisation des minimums des valeurs)

Averse	Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de simulation					
		NRCS CN			Qp (m ³ /s)			V (mm)		
		Ia	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Dif (%)	Obs.	Sim.	Dif (%)
1	1980	1	60.03	399.68	197.14	99.0	49.78	8.56	3.85	55.02
	1982				159.34	188.2	15.33	7.26	7.64	4.97
	1986				351.0	156.4	55.44	45.03	6.53	85.50
	1993				126.50	109.9	13.12	4.67	4.29	8.13
	1994				126.50	112.0	11.46	5.63	4.55	19.18

Partie 2 : Averse 2**Tableau 4.12** : Résultats de simulation (utilisation de la moyenne des valeurs)

Averse	Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de simulation					
		NRCS CN			Qp (m ³ /s)			V (mm)		
		Ia	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Dif (%)	Obs.	Sim.	Dif (%)
2	1980	1	68.45	467.65	197.14	128.9	34.61	8.56	4.52	47.19
	1982				159.34	249.5	36.13	7.26	9.18	20.9
	1986				351.0	206.3	41.22	45.03	7.06	84.32
	1993				126.50	143.7	11.97	4.67	5.07	7.90
	1994				126.5	146.1	13.41	5.63	5.40	4.08

Tableau 4.13 : Résultats de simulation (utilisation des maximums des valeurs)

Averse	Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de simulation					
		NRCS CN			Qp (m ³ /s)			V (mm)		
		Ia	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Dif (%)	Obs.	Sim.	Dif (%)
2	1980	1	84.05	547.07	197.14	180.05	8.67	8.56	6.98	18.45
	1982				159.34	352.80	54.83	7.26	14.33	49.33
	1986				351.0	292.6	16.63	45.03	11.91	73.55
	1993				126.50	201.8	37.31	4.67	7.93	41.11
	1994				126.5	206.8	38.83	5.63	8.45	33.37

Tableau 4.14: Résultats de simulation (utilisation des minimums des valeurs)

Averse	Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de simulation					
		NRCS CN			Qp (m ³ /s)			V (mm)		
		Ia	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Dif (%)	Obs.	Sim.	Dif (%)
2	1980	1	47.10	422.69	197.14	96.4	51.10	8.56	3.16	58.41
	1982				159.34	174.3	8.58	7.26	6.02	17.08
	1986				351.0	146.3	58.31	45.03	5.05	88.78
	1993				126.5	106.03	16.21	4.67	3.50	25.05
	1994				126.5	107.0	15.41	5.63	3.70	34.28

Ces approches ont été exécutées sur les deux types d'averse 1 et 2 afin de déceler celle qui permet, avec son jeu de paramètres, de converger vers une validation du modèle. Les résultats d'essai de validation des trois méthodes sont reportés dans le tableau 4.15, et montrent que :

L'averse type 1 : les pourcentages de différence entre le débit de pointe observé et simulé varie de 0.74 (méthode 2, événement 1980) jusqu'à 56.83 (méthode 1, événement 1982).

Pour l'efficacité sur volume, il apparaît qu'elle a un comportement différent en fonction de la méthode et de l'événement, par exemple elle a chuté pour l'événement 86 quelque soit la méthode, elle a augmenté pour l'événement 93 et 94. En général, le problème de surestimation des volumes persiste encore, ce qui nous oblige à vérifier les hypothèses posées auparavant.

L'averse type 2 : les résultats de validation pour les différentes méthodes sont quasiment pareils à ceux de l'averse 1.

Ce premier essai de validation a permis de qualifier la méthode de la moyenne des valeurs comme étant celle qui donne les meilleurs résultats, ceci est justifiable en partie du fait que le modèle est étroitement lié à l'état du surface du bassin, c'est-à-dire que si considère que l'occupation du sol du Cheliff-Ghrib varie intensément sur des périodes de temps courtes, donc les jeux de paramètres optimaux des événements ne seront jamais stables puisque chacun d'eux a survécu pendant un état de surface différent. Néanmoins, nous ne pouvons pas parler d'une validation du modèle en reposant sur ce premier essai, d'une part parce que nous n'avons pas assez d'événements dans chaque année, et d'autre part, car la mauvaise efficacité pendant la validation ne peut pas être liée seulement au changement dans l'occupation du sol, mais il faut aussi vérifier les hypothèses susmentionnées au début de cette partie, notamment :

- Le choix de la fonction objective.
- L'estimation du pourcentage d'imperméable.

· La distribution journalière de la pluie.

4.3.6. La validation du modèle

En appliquant le jeu de paramètre défini dans le tableau 4.15 aux événements nous arrivons aux résultats suivants :

Tableau 4.15. Le jeu de paramètres optimisé utilisé pour la validation du modèle HEC-HMS sur le bassin du Cheliff-Ghrib

Paramètres	Ia (mm)	CN	T _{lag}	imperméabilité%	Type d'averse
Valeurs optimisés	1	71.56	476	10	I

Ce jeu de paramètre optimisé est composé de valeurs de paramètres acceptées et réalistes comme c'est le cas du temps de concentration égale à ce qu'on a calculé par la méthode de Giandothi, et la valeur de CN très proche de celle estimée par la carte d'occupation du sol et de type de sol. Les graphes de l'hydrogramme de crues pour les différents évènements sont les suivants :

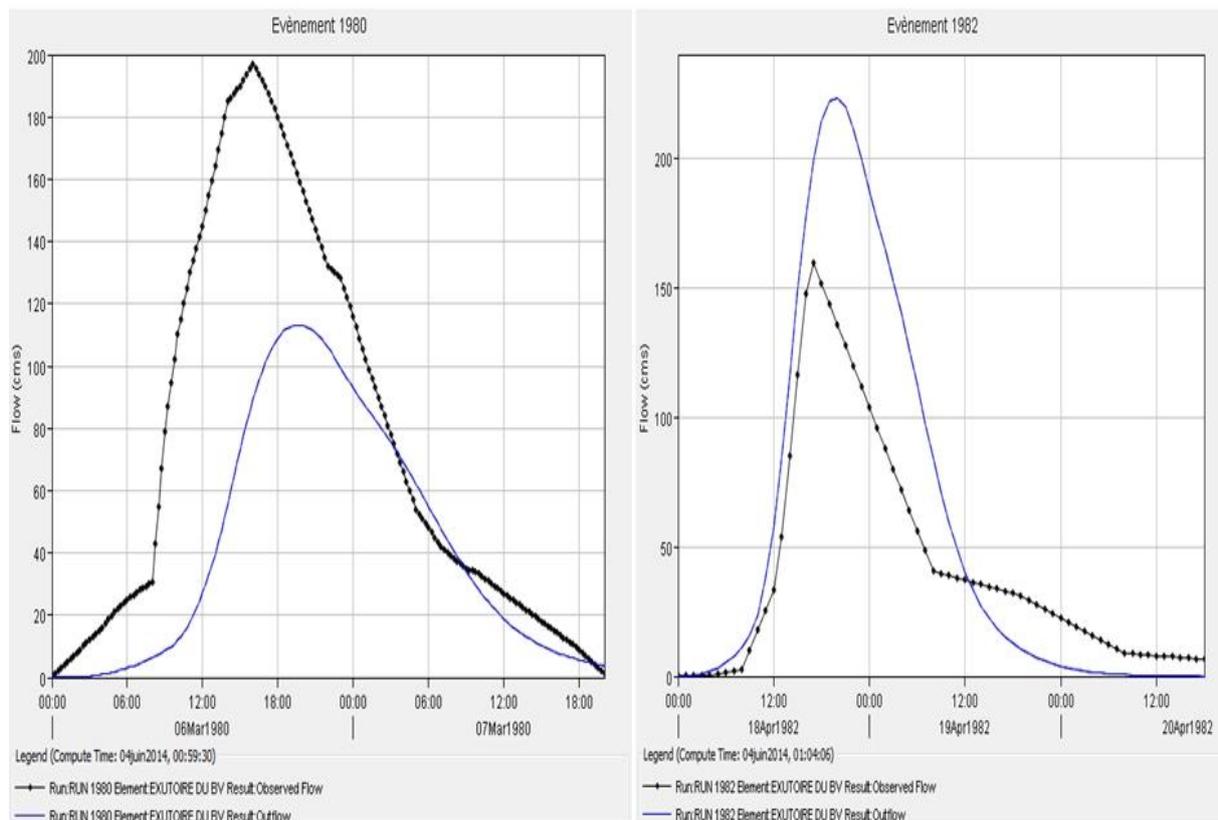


Figure 4.10 Hydrogrammes des crues des évènements après validation du modèle pour les évènements 1980 et 1982.

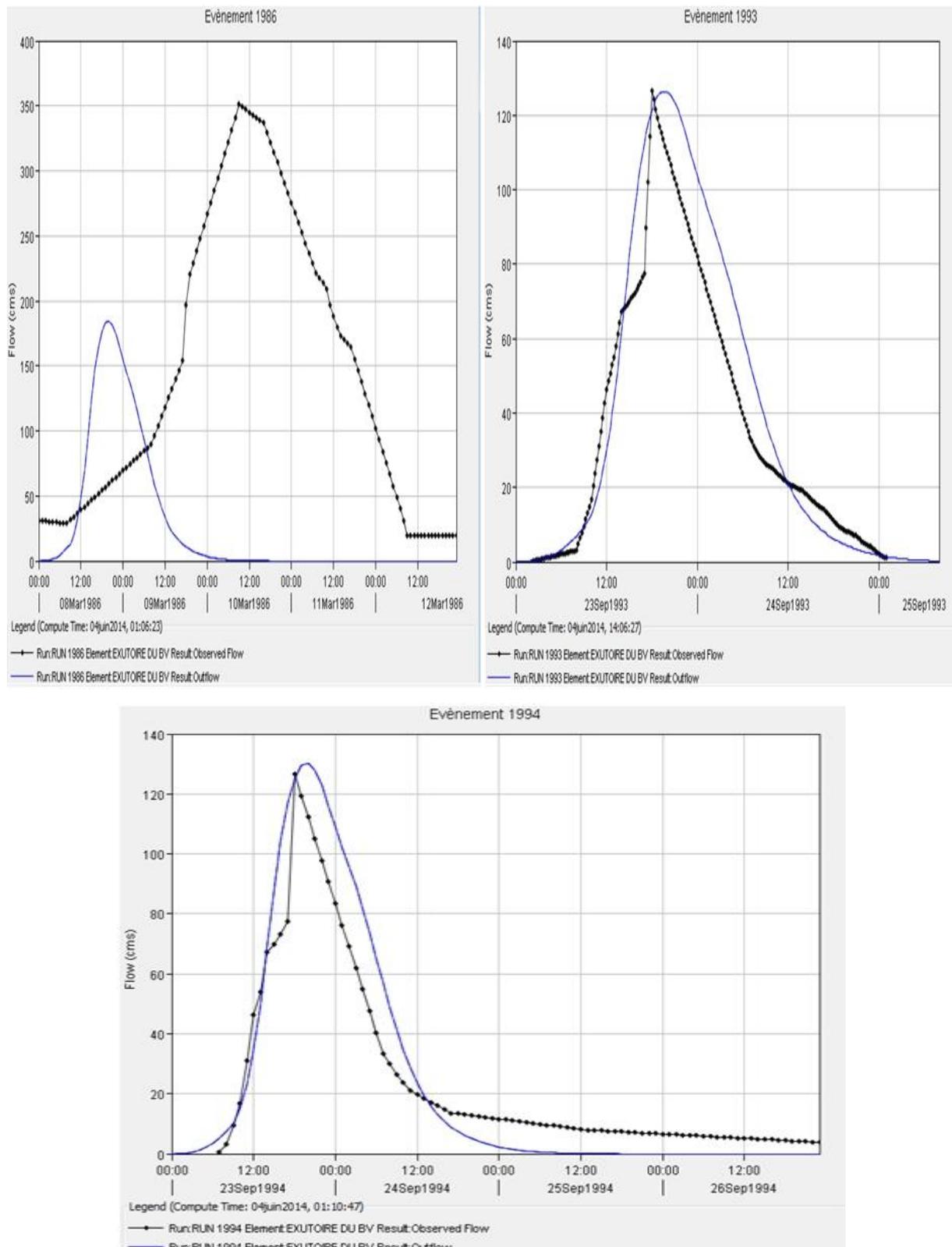


Figure 4.11 Hydrogrammes des crues des évènements après validation du modèle pour les évènements 1986, 1993 et 1994

Tableau 4.16. Résultats de validation du modèle

Evènement	Q _{pobs.} (m ³ /s)	Q _{psim.} (m ³ /s)	Diff (%)	V _{obs.} (mm)	V _{sim.} (mm)	Diff (%)
06-09/03/1980	197.14	113.2	42.58	8.56	4.85	43.34
18-21/04/1982	159.34	223.3	28.64	7.26	9.91	26.74
08-12/03/1986	351.0	184.4	47.46	45.03	8.20	81.79
23-25/09/1993	126.5	126.4	0	4.67	5.45	14.31
23-26/09/1994	126.5	130.1	2.76	5.63	5.80	2.93

Ce tableau montre qu'avec le nouveau jeu de paramètres optimisés, le modèle a pu reproduire le débit de pointe de manière juste pour l'évènement de 23-26/09/1994, pour le reste nous apercevons une sous-estimation du débit pour l'évènement de 06-09/03/1980 et de 08-12/03/1986 et surestimation pour l'évènement 18-21/04/1982. Les volumes simulés quant à eux, ils varient entre 26.74 % pour l'évènement 18-21/04/1982 et 81.79 % pour 08-12/03/1986.

Les volumes surestimés sont provoqués essentiellement par l'utilisation des averses de projet NRCS au lieu des distributions temporelles acquises à partir des pluviographes comme nous l'avons démontré dans la partie calibration.

Afin de quantifier le degré d'accomplissement de ces différents objectifs, le critère de performance retenu est le critère de NASH. Ce dernier donne une appréciation globale de la reconstitution de la crue.

La formulation du critère de Nash est la suivante :

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Ce critère vaut 100% pour une reconstitution parfaite de la crue et s'annule pour le modèle dit à toute heure, le débit calculé est égal au débit moyen de la crue. Ainsi, il indique si la simulation issue du modèle est meilleure qu'une estimation qui donnerait le débit moyen sur toute la période de calage.

Comme il utilise les carrés d'écart, il est sensible à la reconstitution des forts débits. Nous considérons comme mauvais un Nash inférieur à 80%.

Le critère de validation de modèle NASH= 88%. Statistiquement, le critère de Nash montre que le modèle est validé.

4.4. Prédiction du comportement futur du Cheliff-Ghrib

4.4.1. Introduction

Nul ne peut nier l'effet des changements climatiques et d'occupation du sol sur les processus hydrologiques et la perturbation de l'équilibre naturel des écoulements. Par conséquent, les planificateurs et les décideurs sont censés connaître quelles seront les répercussions en aval de leurs actions anthropiques entreprises en amont du bassin versant, telle que le développement urbain, la déforestation, les reboisements,...

À la lumière de ceci, la présente partie essaie de réutiliser le modèle HEC-HMS ajusté au bassin versant du Cheliff-Ghrib pour prédire sa réponse à des scénarios positifs et négatifs prenant en considération des modifications au niveau climatique par l'exploitation des averses quantiles prédéterminées, et d'autres touchant l'occupation du sol.

Tous ces scénarios vont être exécutés sur l'événement de 23-26/09/1994 auquel le modèle a pu restituer le débit de pointe.

Pour le volume de crue, il sera comparé à celui simulé par le modèle et ensuite à celui réellement observé à la station de l'exutoire.

4.4.2. Scénario 1 : Les averses quantiles

Ce premier scénario simule l'effet d'averses de périodes de retour différentes sur l'hydrogramme du débit à la station de Ghrib. Ainsi, nous avons remplacé la hauteur de pluie moyenne de l'événement par les hauteurs estimées par des lois statistiques.

4.4.2.1. Les données d'entrée

Le tableau suivant résume les valeurs estimées de la pluie pour des périodes de retour qui seront utilisées dans les simulations.

Tableau 4.17. Les hauteurs de précipitations estimées au bassin du Cheliff-Ghrib pour différentes périodes de retour

Période de retour (ans)	Valeur estimé (mm)
10	63.43
25	75.79
50	84.95
100	94.05
200	103.11
1000	124.11

Chaque hauteur de pluie sera additionnée au jeu de paramètres optimisés définis dans le tableau 4.15 pour configurer un fichier de simulation distinct. Par conséquent, nous aurons à comparer six fichiers de simulation, en plus des résultats simulés et observés pour l'événement de 23-26/09/1994.

4.4.2.2. Les résultats de la simulation

Les résultats résumés dans le tableau 4.18 et les graphes portés sur les figures 4.12 et 4.13 présentent les hydrogrammes des crues pour différentes périodes de retour.

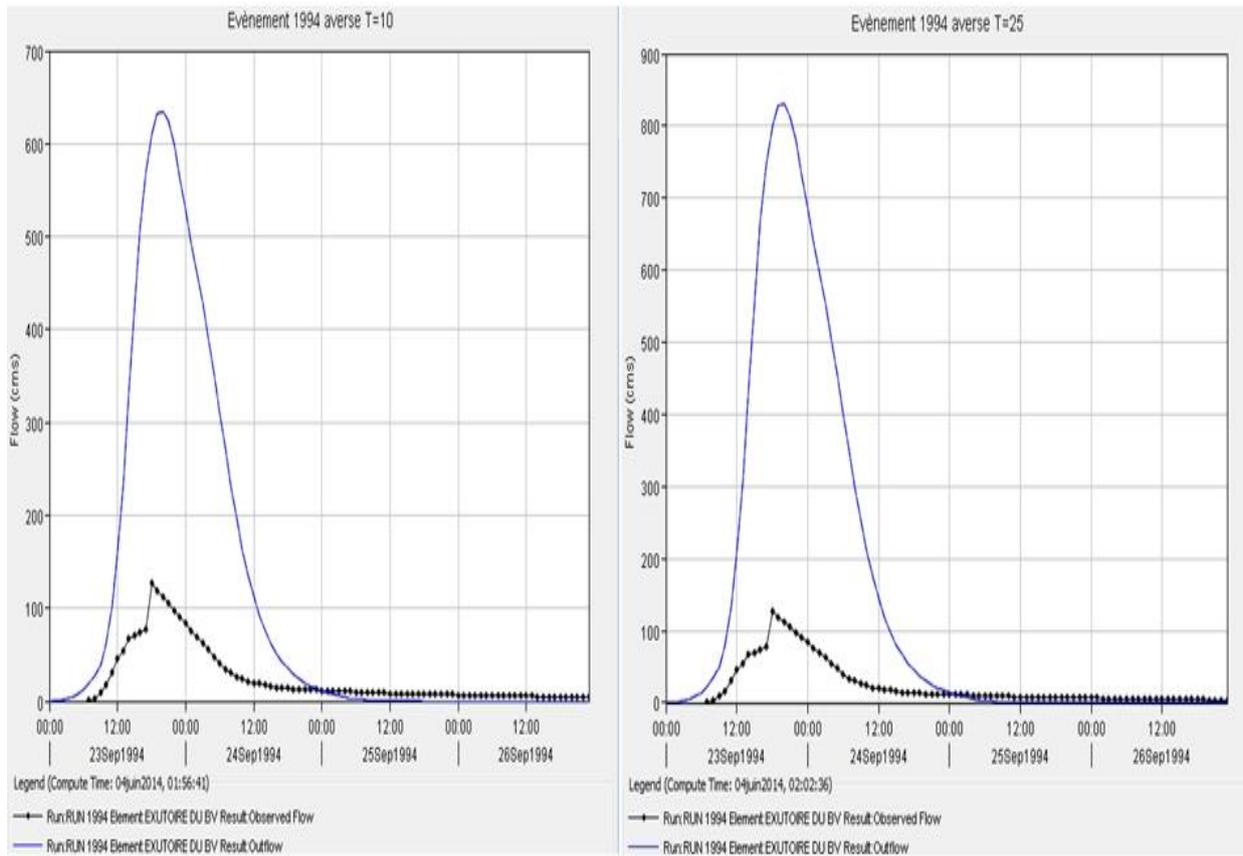


Figure 4.12. Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 10 et 25 ans.

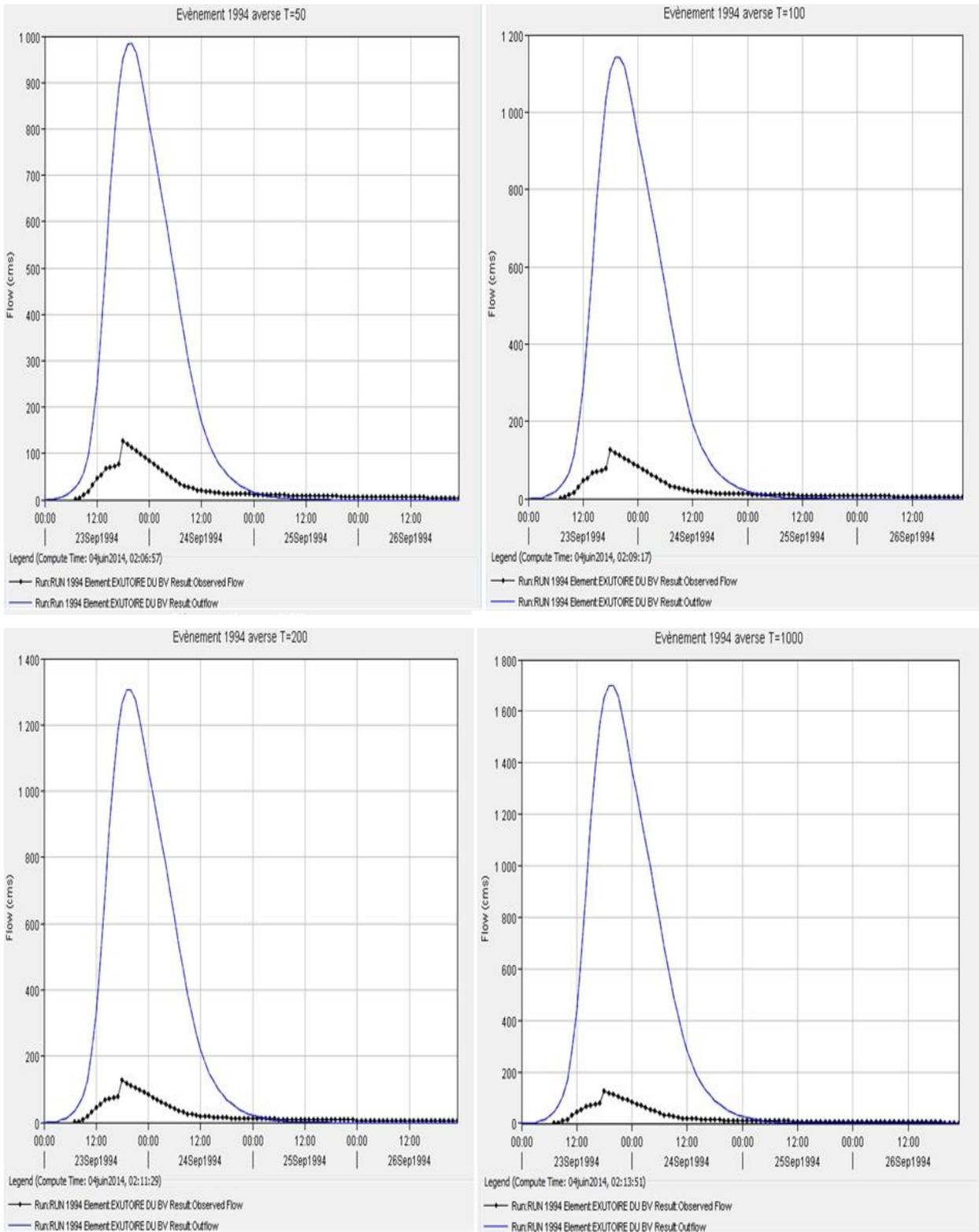


Figure 4.13. Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 50, 100, 200 et 1000 ans.

Tableau 4.18. Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Ghrib pour le scénario 1

	Observé	simulé	T=10	T=25	T=50	T=100	T=200	T=1000
Qp (m³/s)	126.5	130.10	635.20	830.50	983.8	1142.0	1304.70	1700.5
V(1000) m³	7827.50	8063.85	38669.40	50364.6	59505.4	68922.40	78586.0	101897.2

Ces résultats imposent aux responsables de renforcer la protection de l'équipement de mesure du débit à l'exutoire pour qu'il ne soit pas entraîné par les crues prévues, et de mettre en œuvre des mesures structurelles qui peuvent encaisser les énormes volumes simulés.

4.4.3. Scénario 2 : Changement dans l'occupation du sol dans un sens négatif

4.4.3.1. Les données d'entrée

Dans ce scénario, nous essayons de simuler l'effet de la déforestation et de l'urbanisation sur les débits et les volumes de crue à la station de Ghrib. Mais pour des raisons liées essentiellement à l'absence d'informations et au caractère global du modèle, nous avons opté pour des modifications d'ordre général sur l'occupation du sol et le type de sol. Ces changements apportés à la carte touchent essentiellement :

- L'augmentation de la surface de la zone urbanisée ;
- La disparition de la couverture forestière dont la densité est faible (genévrier clair, chêne clair et forêt claire).
- La croissance de pourcentage des terrains dénudés en faveur des terrains déboisés ;
- L'augmentation du pourcentage d'imperméable suite à l'urbanisation.

À partir de ces modifications, nous avons recalculé le nouveau CN composite du bassin qui passe de 71.56 à 77. Le pourcentage d'imperméable est évalué à 15 %.

Ces valeurs de CN et du pourcentage d'imperméable remplaceront les anciennes dans le jeu de paramètres optimisés, puis on lance la simulation.

4.4.3.2. Les résultats de la simulation

Le tableau ci-joint montre les valeurs du débit de pointe et du volume obtenues pour le scénario étudié, puis les résultats en lui associant les averses quantiles.

Tableau 4.19. Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Ghrib pour le scénario 2

	Observé	simulé	scénario	T=10	T=25	T=50	T=100	T=200	T=1000
Q_p (m^3/s)	126.5	130.10	167.1	750.40	968.3	1137.60	1311.20	1488.6	1914.1
$V(1000)$ m^3	7827.50	8063.85	10326.50	45518.9	58452.8	68451.0	78670.30	89086.0	113975.4

On voit très bien que le débit de pointe a augmenté d'environ 22 %, sachant que nous avons utilisé une hauteur de pluie identique à celle enregistrée pendant l'événement. Si nous comparons les débits de pointe pendant les six périodes de retour avec leurs homologues du premier scénario (tableau 4.18), nous remarquons que plus la période de retour est grande plus ce pourcentage de 22 % diminue, autrement dit pour les averses extrêmes l'influence de l'occupation du sol sur les débits diminue, ce constat a été démontré dans d'autres contextes (*Jenicek, 2007*). Les volumes eux aussi se comportent d'une façon identique, c'est à dire que plus la fréquence d'une averse est petite moins sera l'effet de l'état de surface sur le volume ruisselé.

Tableau 4. 20. La comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 2

Période de retour (ans)	T=10	T=25	T=50	T=100	T=200	T=1000
Q_p scénario 1 (m^3/s)	635.20	830.50	983.8	1142.0	1304.70	1700.5
Q_p scénario 2 (m^3/s)	750.40	968.3	1137.60	1311.20	1488.6	1914.1
Différence (%)	15.36	14.23	13.52	12.90	12.35	11.16
V scénario 1 ($10^3 m^3$)	38669.40	50364.6	59505.4	68922.40	78586.0	101897.2
V scénario 2 ($10^3 m^3$)	45518.9	58452.8	68451.0	78670.30	89086.0	113975.4
Différence (%)	15.05	13.83	13.07	12.39	11.79	10.59

4.4.4. Scénario 3 : changement dans l'occupation du sol dans un sens positif

4.4.4.1. Les données d'entrée

Pour ce troisième scénario, l'action est mise sur l'évaluation de l'impact d'une urbanisation du bassin de même envergure que celle du scénario 2, mais en parallèle on entreprend des actions de reboisements des sols nus et de renforcement de la couverture forestière à densité faible, ainsi :

- Les sols nus deviendront une forêt claire ;
- La densité claire deviendra moyenne;
- La zone urbanisée est identique à celle du scénario 2 ;

À partir de ces modifications, nous avons recalculé le nouveau CN composite du bassin qui est égal à 65. Le pourcentage d'imperméable est évalué à 15 %.

Cette valeur va remplacer celle du jeu de paramètres optimisés, ensuite on lance les simulations.

4.4.4.2. Les résultats de la simulation

Dans ce qui suit sont représentés les résultats obtenus pour ce scénario, à savoir le débit de pointe et le volume issus de la simulation du scénario et ceux résultant en substituant la pluie de l'événement de 23-26/09/1994 par des pluies à périodes de retour distinctes.

Tableau 4. 21. Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station de Ghrib pour le scénario 3

	Observé	simulé	scénario	T=10	T=25	T=50	T=100	T=200	T=1000
Q_p (m^3/s)	126.5	130.10	135.10	592.7	769.7	909.10	1053.8	1203.6	1568.9
$V(1000)$ m^3	7827.50	8063.85	8347.9	36350.6	47051.4	55450.3	64136.5	73084.6	94803.50

Nous nous apercevons que l'ajout de 5 % de surface imperméable par rapport à l'état initiale a engendré une croissance de 4 % pour le débit et 3.4 % en termes de volume, ceci malgré que le CN a baissé de 71.56 à 65. Nous pouvons donc comprendre l'effet négatif de l'imperméabilisation des surfaces des bassins versants, par le biais de l'urbanisation par exemple, sur son régime hydrologique. En outre, nous remarquons que les deux variables débit et volume montrent des valeurs moins fortes que dans le cas du scénario 2, ceci prouve que les reboisements bien que modestes amortissent les effets de l'urbanisation prévue.

Enfin, la diminution de l'influence de l'occupation du sol sur les débits et les volumes pour les averses extrêmes est aussi valide pour ce scénario.

D'après ce qui précède, nous arrivons à reconnaître l'effet positif et négatif de quelques situations susceptibles de se manifester sur le terrain dans les prochaines décennies, et que les responsables sont censés à prendre en considération dans leur plan d'aménagement du bassin du Cheliff-Ghrib. En outre, nous avons pu reconfirmer que la relation cause à effet entre le changement de l'occupation du sol d'une part et les débits et les volumes d'autres parts, est de moins en moins étroite que les averses sont extrêmes.

4.5. Conclusion

La mise en service de la modélisation comme outil pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, et d'aide à la décision est l'une des meilleures méthodes reconnues à la fois simple et fructueuse.

Dans cette optique, la partie s'intéressait premièrement à appliquer une combinaison modulaire appropriée du modèle HEC-HMS à l'un des sous bassins de l'oued Cheliff : le Cheliff-Ghrib. Ensuite, après avoir été validé sur au moins l'un des événements présélectionnés, l'étude se penchait sur l'utilisation de ce modèle pour prédire le comportement hydrologique futur du bassin vis-à-vis des scénarios de changement climatique et de modification d'occupation du sol.

Après avoir validé complètement le modèle HEC-HMS sur le bassin versant du Cheliff-Ghrib, on peut l'utiliser pour la protection contre les inondations, en utilisant ce qu'on appelle la modélisation à temps réel qui repose sur le principe de reconstitution du débit à l'exutoire pour chaque pas de temps pour lequel la donnée pluie est mesurée, par conséquent on peut reconstituer l'hydrogramme d'une crue au fur et à mesure de l'enregistrement de la hauteur de pluie. Ce système d'alarme s'avère plus efficace que celui qui se base sur la mesure de la hauteur d'eau dans la rivière en amont du bassin versant.

Chapitre 5

Modélisation et quantification du transport solide en suspension

Chapitre 5. Modélisation et quantification du transport solide en suspension

5.1 Introduction

La recherche de modèles reliant les paramètres hydroclimatiques (précipitations, écoulements et/ou transport de matériaux solides) a fait l'objet de nombreuses études (*Walling, 1974, Demmak, 198*), *Megnounif et al, 2000, 2003, Katlan et al, 1987, Probst et al, 1992, Terfous et al, 1999, 2001, 2003, Ghenim, 2001, Achit, 2002, Benkhaled et al, 2003*). L'objectif de ces auteurs est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes.

Tous ces paramètres font que les modèles diffèrent d'un auteur à un autre. Chacun tente de caractériser la région ou le bassin étudié par le modèle le plus représentatif et le plus fiable (coefficient de corrélation). Ces modèles ont été testés dans différentes régions du globe et ont donné des résultats plus ou moins satisfaisants, les rendant presque universels (tableau 5.1).

Tableau 5.1. Quelques modèles utilisés en Algérie (*Bouanani, 2005*).

Bassin ou région	modèle	Equation	Auteur
Massif central (France)	Puissance	$Q_I = 16 P^2$	Coutagne
Bassins algériens	Puissance	$Q_I = 11.8 P^{2.82}$	A.N.R.H
Bassins algériens	Linéaire	$Q_I = 0.736(P-404)$	Samie
Oued M'righa (Algérie)	Polynôme	$Q_I = 50.6 P^2 - 3.54 P$	Roeder
Oued Ouergha (maroc)	Puissance	$A_I = 690 A_s^{0.58}$	Lahlou
Medjerda supérieur (Algérie)	Linéaire	$A_{ss} = 1.06 E^{-66.2}$	Bourouba
La Garonne (France)	Puissance	$C = 3.6 \cdot 10^{-3} Q_I^{1.583}$	Probst & Bazerbachi

5.2. Evolution des débits solides en fonction des débits liquides

La mobilisation des matériaux solides sur les versants et leur transport éventuel par les cours d'eau, représentent deux phénomènes distincts, mais liés entre eux. Le débit solide moyen " Q_s " des sédiments en suspension qui transitent sur une section d'écoulement moyen est calculé par le produit de la concentration moyenne des sédiments en suspension " c " et le débit liquide moyen " Q_I " durant une période de temps donné.

$$Q_s = Q_l \times C \quad (5.1)$$

On va essayer dans ce chapitre de corrélérer les débits solides aux débits liquides, et de déterminer une relation qui permettra d'estimer les premiers à partir des seconds

5.2.1. Approche et méthodologie

L'étude est réalisée à partir des données collectées au niveau du bassin versant Chellif-Ghrib (1974-1994), constituées des débits instantanés et des concentrations des sédiments en suspension. La méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau algériens est l'échantillonnage uni ponctuel. Un échantillon est prélevé par l'observateur en un point de la section mouillée au niveau de la station hydrométrique. L'analyse en laboratoire des échantillons prélevés est effectuée selon les procédés classiques à savoir filtrage, séchage à l'étuve et pesée. L'évaluation du transport solide durant une crue est effectuée de la même façon que pour les débits liquides, sur la base d'un dépouillement des enregistrements.

Concernant les débits liquides, les lectures de hauteur d'eau sont transformées en débits liquides grâce aux courbes d'étalonnage établies par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (*ANRH*).

Le nombre des prélèvements, leur échelonnement correct dans le temps conditionne la fiabilité et la précision de la relation de puissance débit solide - débit liquide.

Pour déterminer la relation débit solide – débit liquide, une approche à différentes échelles temporelles, basée sur les modèles de régression, est adoptée, en tenant compte de la donnée hydro pluviométrique du bassin versant.

5.2.2. Relation : Débit liquide instantané – Débit solide instantané

5.2.2.1. Ensemble des données (Relation interannuelle)

Les couples débit liquide Q_l inst – débit solide Q_s inst sont mis en graphe (Figure 5.1) en vue de la recherche d'un modèle de régression le plus adéquat au vu du coefficient de détermination R^2 (Tableau 5.2).

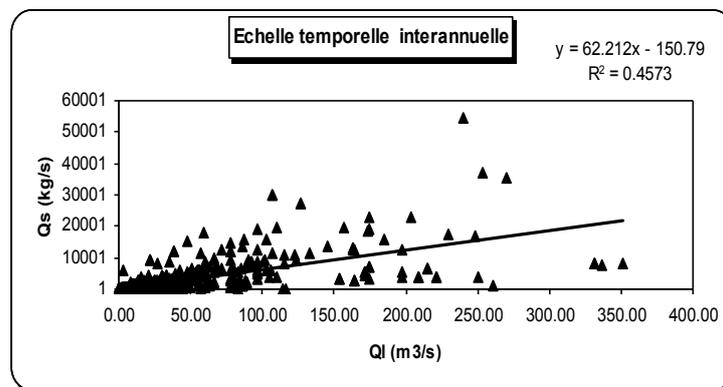


Figure 5.1. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont
(Echelle interannuelle)

Tableau. 5.2 : Valeurs R^2 calculées à l'échelle interannuelle

Echelle Temporelle	Type de modèle	Station Ghrib- Amont R^2
Relation interannuelle	Linéaire	0,46
	Logarithmique	0,21
	Polynomiale	0,47
	Puissance	-
	Exponentielle	-

5.2.2.2. Relation mensuelle

La relation entre Q_l et Q_s à l'échelle temporelle mensuelle est présentée sur la figure (5.2) et dans le tableau (5.3).

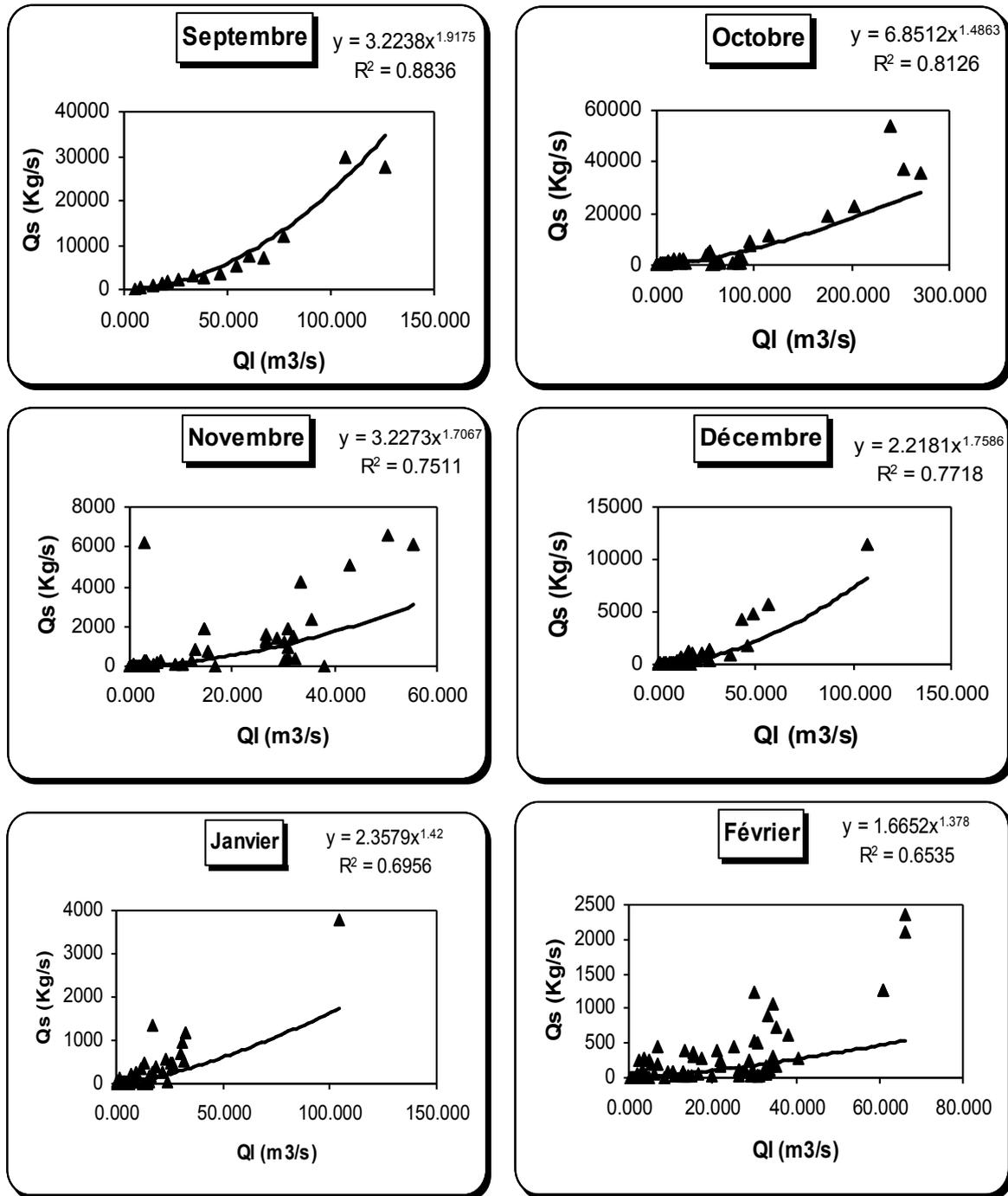


Figure 5.2. Relation entre les débits liquides et les débits solides pour échelle temporelle mensuelle

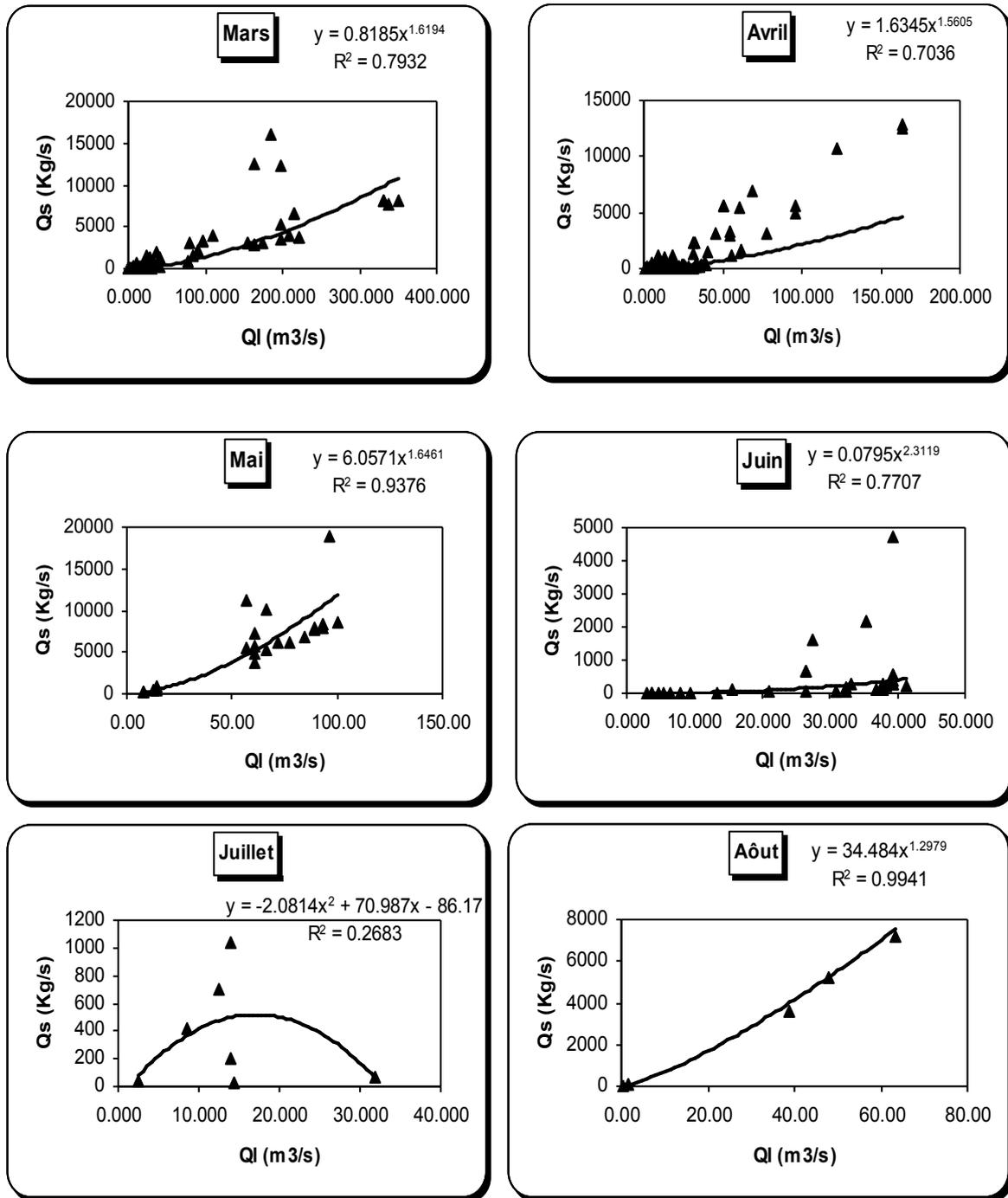


Figure 5.2. Relation entre les débits liquides et les débits solides pour échelle temporelles mensuelle (suite)

Tableau 5.3. Valeurs de R^2 calculées à l'échelle mensuelle

Echelle Temporelle	Type de modèle	Station Ghrib- Amont
Septembre	Linéaire	0,86
	Logarithmique	0,56
	Polynomiale	0,93
	Puissance	0,88
	Exponentielle	0,65
Octobre	Linéaire	0,80
	Logarithmique	0,25
	Polynomiale	0,91
	Puissance	0,81
	Exponentielle	0,40
Novembre	Linéaire	0,57
	Logarithmique	0,33
	Polynomiale	0,66
	Puissance	0,75
	Exponentielle	0,56
Décembre	Linéaire	0,85
	Logarithmique	0,27
	Polynomiale	0,92
	Puissance	0,77
	Exponentielle	0,47
Janvier	Linéaire	0,83
	Logarithmique	0,24
	Polynomiale	0,87
	Puissance	0,69
	Exponentielle	0,44
Février	Linéaire	0,45
	Logarithmique	0,21
	Polynomiale	0,71
	Puissance	0,65
	Exponentielle	0,50
Mars	Linéaire	0,70
	Logarithmique	0,40
	Polynomiale	0,71
	Puissance	0,79
	Exponentielle	0,49
Avril	Linéaire	0,79
	Logarithmique	0,27
	Polynomiale	0,85
	Puissance	0,70
	Exponentielle	0,51
Mai	Linéaire	0,62
	Logarithmique	0,58
	Polynomiale	0,62
	Puissance	0,94
	Exponentielle	0,81

Juin	Linéaire	0,10
	Logarithmique	0,10
	Polynomiale	0,11
	Puissance	0,77
	Exponentielle	0,71
Juillet	Linéaire	0,01
	Logarithmique	0,017
	Polynomiale	0,15
	Puissance	0,26
	Exponentielle	0,06
Août	Linéaire	0,98
	Logarithmique	0,82
	Polynomiale	0,99
	Puissance	0,99
	Exponentielle	0,83

5.2.2.3. Relation saisonnière

Quatre saisons sont prises en considération, à savoir :

- **Automne** : Septembre, octobre, novembre.
- **Hiver** : Décembre, janvier, février.
- **Printemps** : Mars, avril, mai.
- **Été** : Juin, Juillet, août.

Cette approche permet de mettre en exergue l'effet de l'irrégularité du climat sur le transport solide. Les résultats sont récapitulés dans le tableau (5.4). La figure (5.3) illustre les relations débit liquide- débit solide instantanés à la station Ghrib-Amont.

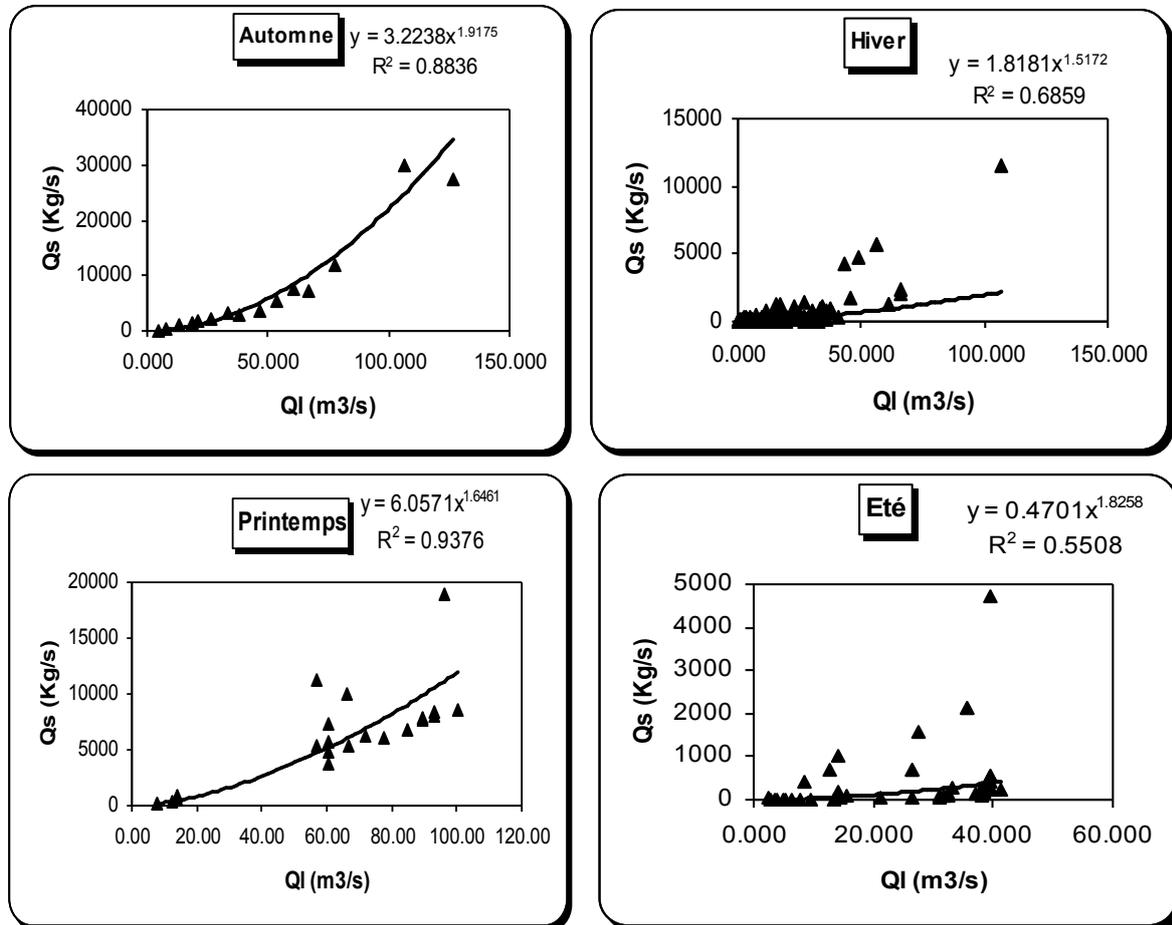


Figure 5.3. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle Saisonnière)

Tableau 5.4 Valeurs de R^2 calculées à l'échelle saisonnière

Echelle Temporelle	Type de modèle	Station Ghrib- Amont
Automne	Linéaire	0,86
	Logarithmique	0,56
	Polynomiale	0,93
	Puissance	0,88
	Exponentielle	0,65
Hiver	Linéaire	0,45
	Logarithmique	0,14
	Polynomiale	0,73
	Puissance	0,68
	Exponentielle	0,47
Printemps	Linéaire	0,62
	Logarithmique	0,58
	Polynomiale	0,62
	Puissance	0,94
	Exponentielle	0,81
Eté	Linéaire	0,008
	Logarithmique	0,008
	Polynomiale	0,09
	Puissance	0,55
	Exponentielle	0,47

5.2.2.4. Relation saison sèche – saison humide

Cette approche permet d'étudier la relation débit liquide- débit solide sur deux grandes saisons : Sèche et Humide. A cet effet, la totalité des observations a été subdivisée en deux parties et, après l'analyse de la régression, les modèles, aussi bien puissance que parabolique sont toujours les meilleurs comme le montre le tableau (5.5). La figure (5.4) met en relief ces relations à la station Ghrib-Amont.

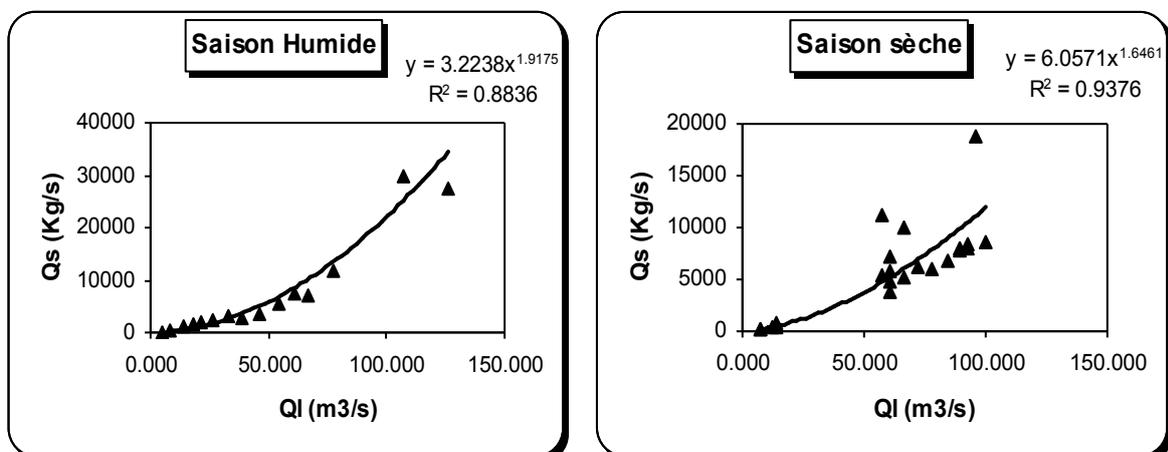


Figure 5.4. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle saison humide et sèche)

Tableau 5. 5. Valeurs de R^2 à l'échelle saison Sèche-Humide

Echelle Temporelle	Type de modèle	Station Ghrib- Amont
Humide	Linéaire	0,86
	Logarithmique	0,56
	Polynomiale	0,93
	Puissance	0,88
	Exponentielle	0,65
Sèche	Linéaire	0,62
	Logarithmique	0,59
	Polynomiale	0,62
	Puissance	0,94
	Exponentielle	0,81

Tableau 5.6. Modèles retenus pour différentes échelles temporelles

Echelle temporelle	Type de modèle	R^2	Modèles retenus
interannuelle	linéaire	0,46	$Q_s = 62,212Q_l - 150,72$
Echelle mensuelle	Type de modèle	R^2	Modèles retenus
Septembre	Puissance	0,88	$Q_s = 3,2238 * Q_l^{1,9175}$
Octobre	Puissance	0,86	$Q_s = 6,8512 * Q_l^{1,4863}$
Novembre	Puissance	0,75	$Q_s = 3,2273 * Q_l^{1,7067}$
Décembre	Puissance	0,77	$Q_s = 2,2181 * Q_l^{1,7586}$
Janvier	Puissance	0,69	$Q_s = 2,3579 * Q_l^{1,42}$
Février	Puissance	0,69	$Q_s = 1,6652 * Q_l^{1,378}$
Mars	Puissance	0,79	$Q_s = 0,8185 * Q_l^{1,6194}$
Avril	Puissance	0,70	$Q_s = 1,6345 * Q_l^{1,5605}$
Mai	Puissance	0,94	$Q_s = 6,0571 * Q_l^{1,6461}$
Juin	Puissance	0,77	$Q_s = 0,0795 * Q_l^{2,3119}$
Juillet	Polynomiale	0,26	$Q_s = -2,081Q_l^2 + 70,98Q_l - 86,17$
Août	Puissance	0,99	$Q_s = 34,484 * Q_l^{1,2979}$
Echelle saisonnière	Type de modèle	R^2	Modèles retenus
Automne	Puissance	0,88	$Q_s = 3,2238 * Q_l^{1,9175}$
Hiver	Puissance	0,68	$Q_s = 1,8181 * Q_l^{1,5172}$
Printemps	Puissance	0,94	$Q_s = 6,0571 * Q_l^{1,6461}$
Été	Puissance	0,55	$Q_s = 0,4701 * Q_l^{1,8258}$
Echelle saison humide et sèche	Type de modèle	R^2	Modèles retenus
Humide	Puissance	0,88	$Q_s = 3,2238 * Q_l^{1,9175}$
Sèche	Puissance	0,94	$Q_s = 6,0571 * Q_l^{1,6461}$

5.2.3. Interprétation des résultats

Comme pour la plupart des cours d'eau, on trouve une bonne relation en puissance liant le débit des matières solides en suspension en kg/s au débit liquide en m³/s. Une première analyse, graphique montre qu'à de faibles débits liquides généralement estivaux peuvent être associés de forts débits solides déclenchés sûrement à la suite d'orages violents. De même, de fortes valeurs des débits liquides n'ont engendré qu'un faible transport solide dû à la vidange des nappes survenue à la suite d'une crue importante.

Les valeurs des paramètres **a** et **b** de la relation $Q_s = a Q_l^b$, (tableau 5.6) varient peu d'une échelle temporelle à une autre.

Pour le paramètre **a**, il varie de 0.08 à 6.85 pour l'échelle temporelle mensuelle, de 0.47 à 6.05 pour l'échelle temporelle saisonnière, et entre 3.22 à 6.05 pour la saison humide et saison sèche.

L'exposant **b** est compris entre 1.38 et 2.31 pour l'échelle temporelle mensuelle, de 1.51 à 1.92 pour l'échelle temporelle saisonnière et entre 1.64 à 1.92 pour la saison humide et saison sèche, ces valeurs sont proches de celles trouvées à Oued Mina (*Achit, 2002*), et à Oued Wahrane (*BenKhaled et al, 2003*).

A travers cette étude, nous avons essayé de voir quelle est la relation qui existe entre le débit liquide et le débit solide et notamment le degré de cette relation. Le but principal étant d'établir les modèles les plus appropriés dans le cadre de l'évaluation du transport solide au niveau du bassin étudié.

Les relations établies nous serviront, par la suite, pour quantifier le transport solide pour différentes échelles temporelles.

5.3. Quantification des apports solides et l'érosion spécifique

5.3.1. Généralité

Sur la base des mesures continues de la charge en suspension réalisées dans le bassin versant Chélif-Ghrib, et les résultats obtenus par la relation débits liquides – débits solides pour différents échelles temporelles, nous allons interpréter le phénomène du transport solide en quantifiant les apports solides et le calcul de l'érosion spécifique à différentes échelles temporelles (interannuelle, mensuelle, saisonnière).

5.3.2. Quantification des apports solides et l'érosion spécifique

Nous utilisons les relations établies $Q_s = f(Q_l)$, à différentes échelles temporelles. Nous déterminons les apports solides de toute la période d'observation. La méthode de la régression est utilisée pour l'homogénéisation des données.

Soit :

$$Q_{smj} = a (Q_{lmj})^b \quad (5.2)$$

Où :

Q_{smj} : Débit solide moyen journalier (kg/s) ;
 Q_{lmj} : Débit liquide moyen journalier (m³/s) ;
a et **b** : coefficient d'ajustement du modèle.

$$A_{sj} = Q_{smj} \cdot T \quad (5.3)$$

Avec :

A_{sj} : Apport solide moyen journalier (Tonne) ;
 Q_{smj} : Débit solide moyen journalier (Kg/s) ;
T : temps (s).

L'apport solide mensuel est :

$$A_{sm} = A_{sj} \cdot N \quad (5.4)$$

Avec :

A_{sm} : Apport solide mensuel (tonne) ;
 A_{sj} : Apport solide journalier (tonne) ;
N : Nombre de jours dans le mois.

La quantité totale transportée annuellement est :

$$A_{sann} = \sum_{i=1}^{12} A_{sm} \quad (5.5)$$

Où :

A_{sann} : Apport solide annuel (tonne) ;
 A_{sm} : Apport solide mensuel (tonne) ;

L'apport solide moyen interannuel est déterminé par la relation suivante :

$$A_{sinter} = \frac{\sum_{i=1}^{12} A_{sann}}{N} \quad (5.6)$$

Avec :

A_{sinter} : Apport solide moyen interannuel (tonne)
N : Nombre d'années d'observations.

L'érosion spécifique moyenne (E_s) d'un bassin versant est définie comme étant le rapport entre l'apport solide « A_s » et la surface « S » du bassin versant.

Soit :

$$E_s = \frac{A_s}{S} \quad (5.7)$$

La quantification de l'apport solide moyen interannuel et de l'érosion spécifique moyenne interannuelle donne une idée sur l'importance du transport solide et l'état de la dégradation du sol du bassin.

Les résultats de calcul pour la station Ghrib-Amont à différentes échelles temporelles sont données dans les tableaux 5.7 à 5.12

Tableau 5.7. Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : Station Ghrib – Amont
Modèle mensuel

Mois	Septe	Octobre	Nove	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	42538,722	475321,853	87626,884	42531,563	29484,430	71438,109	59065,195	32790,752	200098,86	3535,8040	11736,790	106979,01	1163147,98
78/79	68019,974	860527,641	158422,84	67902,404	51206,470	104783,02	95430,753	51868,016	454657,45	7946,0995	28660,380	186655,513	2136080,57
79/80	89248,255	1211124,13	225664,06	91311,504	70530,271	133264,39	128443,00	68931,427	707855,38	12871,253	45393,368	255589,442	3040226,5
80/81	52697,177	623485,921	114420,91	52266,129	37919,608	84618,125	73098,178	40195,790	294125,68	5094,593	17989,356	138252,179	1534163,67
81/82	69459,303	883535,146	162760,93	69427,254	52485,227	106694,57	97595,717	52993,445	470761,99	8244,482	29728,636	191266,498	2194953,21
82/83	42591,223	476066,998	87760,110	42580,525	29527,157	71505,860	59136,046	32828,292	200556,06	3543,172	11767,131	107138,634	1165001,22
83/84	20957,366	192068,256	38181,508	23675,007	12884,042	43884,552	31585,634	18059,796	44256,821	1127,1374	1651,177	43789,8542	472121,154
84/85	10,5932	106801,798	139,32374	1489,3615	6564,7390	2057,1595	16091,844	1125,5106	7017,8333	0,3217675	0,0658	8,69880662	141307,25
85/86	5914,575	1636,18011	132874,85	714,8527	4374,056	250587,94	647143,57	50539,821	58182,097	3810,1942	575,768	18889,1021	1175243,02
86/87	50130,164	1638,65413	132199,20	711,5021	27274,188	261654,66	30202,675	2127,6242	1134,7382	0,0008695	67,901	32,4035191	507173,721
87/88	8798,619	169624,942	18604,594	5121,700	2401,249	1122,976	714,7618	890,53074	5939,6938	86,210050	13,0348	0	213318,314
88/89	1170,727	12617,7166	3032,6491	106525,66	2477,783	2172,9338	625,1273	10762,325	2443,2011	267,19558	714,5889	20104,8827	162914,798
89/90	252619,33	892016,993	413037,35	372839,20	219222,81	91259,116	103558,08	39916,224	2522281,2	8628,7905	196500,05	493715,563	5605594,74
90/91	80684,696	66261,0703	40380,513	55452,495	24509,678	21904,460	31572,636	30357,617	84002,945	4336,1409	6328,3769	154819,801	600610,433
91/92	21696,032	7153819,84	352215,27	61861,777	40672,268	157954,58	56620,693	271817,91	823082,19	111373,96	28482,967	527740,691	9607338,2
92/93	27402,773	105881,51	49543,737	45576,447	35154,649	21850,063	15298,904	29069,954	249345,12	1021,1512	5826,1970	69659,0164	655629,535
93/94	45743,379	121217,22	39382,385	41798,571	22053,917	27366,480	13601,855	17611,466	54512,915	1021,1512	5882,8265	69659,0164	459851,185
Moy	51746,053	785508,581	120955,71	63634,469	39337,797	85536,412	85869,687	44228,618	363544,36	10171,039	23018,742	140252,959	1813804,44

Tableau 5.8. Variation interannuelle de l'érosion spécifique ($t/km^2.an$) : Station Ghrib – Amont
Modèle mensuel

Mois	Septe	Octobre	Nove	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	30,856	344,778	63,561	30,851	21,387	51,818	42,843	23,785	145,143	2,565	8,513	77,598	843,698
78/79	49,339	624,190	114,913	49,254	37,143	76,005	69,221	37,623	329,789	5,764	20,789	135,392	1549,423
79/80	64,737	878,498	163,687	66,234	51,160	96,664	93,167	50,000	513,448	9,336	32,926	185,394	2205,252
80/81	38,224	452,250	82,996	37,912	27,505	61,378	53,022	29,156	213,346	3,695	13,049	100,282	1112,818
81/82	50,383	640,879	118,060	50,360	38,071	77,392	70,792	38,439	341,471	5,980	21,564	138,737	1592,126
82/83	30,894	345,319	63,657	30,886	21,418	51,867	42,895	23,812	145,475	2,570	8,535	77,714	845,043
83/84	15,202	139,318	27,695	17,173	9,346	31,832	22,911	13,100	32,102	0,818	1,198	31,763	342,457
84/85	0,008	77,470	0,101	1,080	4,762	1,492	11,672	0,816	5,090	0,000	0,000	0,006	102,498
85/86	4,290	1,187	96,382	0,519	3,173	181,766	469,411	36,659	42,203	2,764	0,418	13,701	852,472
86/87	36,362	1,189	95,892	0,516	19,784	189,793	21,908	1,543	0,823	0,000	0,049	0,024	367,882
87/88	6,382	123,039	13,495	3,715	1,742	0,815	0,518	0,646	4,308	0,063	0,009	0,000	154,732
88/89	0,849	9,152	2,200	77,269	1,797	1,576	0,453	7,807	1,772	0,194	0,518	14,583	118,172
89/90	183,239	647,031	299,600	270,442	159,015	66,196	75,117	28,954	1829,556	6,259	142,533	358,120	4066,062
90/91	58,525	48,063	29,290	40,223	17,778	15,889	22,901	22,020	60,932	3,145	4,590	112,300	435,657
91/92	15,737	5189,079	255,482	44,872	29,502	114,574	41,070	197,165	597,029	80,786	20,660	382,801	6968,758
92/93	19,877	76,802	35,937	33,059	25,500	15,849	11,097	21,086	180,864	0,741	4,226	50,528	475,566
93/94	33,180	87,926	28,566	30,319	15,997	19,850	9,866	12,775	39,541	0,741	4,267	50,528	333,557
Moy	37,534	569,775	87,736	46,158	28,534	62,045	62,286	32,082	263,700	7,378	16,697	101,734	1315,657

Tableau 5.9. Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : Station Ghrib – Amont
Modèle saisonnier

Mois	Septe	Octobre	Nove	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	113213,932	574965,289	116340,719	26663,021	25342,596	104513,885	463178,107	136981,272	200098,861	11381,852	4526,308	1546,577	1778752,42
78/79	240087,562	1236472,385	225966,751	39937,203	45757,863	159372,046	755028,231	222483,997	454657,454	21541,850	12766,682	3371,403	3417443,42
79/80	370926,854	1921574,197	335960,514	51579,381	64462,739	207696,420	1021820,44	300567,781	707855,388	31500,502	21778,741	5234,963	5040957,92
80/81	159530,744	815940,568	156901,083	31857,565	33175,490	125941,062	575489,346	169899,491	294125,686	15177,050	7432,841	2214,595	2387685,52
81/82	248275,387	1279284,094	232914,830	40710,579	46982,093	162577,366	772477,809	227593,121	470761,994	22176,677	13321,008	3488,574	3520563,53
82/83	113437,791	576128,334	116539,032	26689,528	25381,909	104623,065	463744,002	137147,148	200556,068	11400,537	4539,901	1549,809	1781737,12
83/84	36435,200	178636,094	45843,057	16076,146	10446,980	61106,469	244834,078	72891,711	44256,821	4624,047	463,947	442,870	716057,420
84/85	0,192	83785,247	84,789	1474,702	5076,144	2099,969	123186,844	3870,568	7017,833	7,455	0,004	0,003	226603,749
85/86	4804,342	382,006	185534,281	782,332	3286,874	416386,963	5304813,91	216462,608	58182,097	12072,207	136,474	136,474	6202980,57
86/87	147268,754	382,751	184476,977	779,164	23314,550	436686,208	233920,136	7590,573	1134,738	0,071	11,397	0,018	1035565,33
87/88	9075,674	152177,712	20475,951	4285,198	1729,795	1078,065	5165,051	3021,389	5939,694	610,126	1,676	0,000	203560,330
88/89	358,945	5327,567	2679,668	58922,103	1788,876	2230,508	4506,134	42160,115	2443,201	1487,585	175,389	148,928	122229,019
89/90	1963155,64	1295149,082	661598,844	173841,940	217021,503	136870,247	820571,057	168649,900	2522281,20	22987,188	119439,558	13158,94	8114725,11
90/91	315593,971	45260,175	48813,076	33528,080	20794,294	28424,498	244731,463	126254,177	84002,946	13366,909	2208,898	2594,840	965573,327
91/92	38513,552	18998921,7	553399,832	36849,580	35759,807	250458,586	443661,384	1282861,63	823082,193	172459,922	12674,940	14445,82	22663089
92/93	55979,473	82855,057	61390,989	28303,725	30592,904	28346,757	117007,161	120596,988	249345,129	4277,920	2006,647	848,246	781550,996
93/94	127179,582	98650,979	47462,492	26265,700	18572,198	36323,522	103801,746	70979,178	54512,916	4277,920	2029,318	848,246	590903,797
Moy	231990,447	1608581,96	176257,817	35208,585	35852,154	133219,743	688113,936	194706,568	363544,366	20549,989	11971,396	2942,960	3502939,92

Tableau 5.10. Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km².an) : Station Ghrib – Amont
Modèle saisonnier

Mois	Septe	Octobre	Nove	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	82,121	417,056	84,389	19,340	18,382	75,810	335,970	99,360	145,143	8,256	3,283	1,122	1290,232
78/79	174,149	896,885	163,907	28,969	33,191	115,602	547,666	161,380	329,789	15,626	9,260	2,445	2478,869
79/80	269,055	1393,829	243,692	37,414	46,759	150,654	741,185	218,019	513,448	22,849	15,797	3,797	3656,498
80/81	115,717	591,849	113,809	23,108	24,064	91,352	417,436	123,238	213,346	11,009	5,391	1,606	1731,926
81/82	180,088	927,939	168,947	29,530	34,079	117,927	560,323	165,086	341,471	16,086	9,662	2,530	2553,668
82/83	82,283	417,899	84,532	19,359	18,411	75,889	336,380	99,481	145,475	8,269	3,293	1,124	1292,397
83/84	26,429	129,575	33,253	11,661	7,578	44,324	177,592	52,873	32,102	3,354	0,337	0,321	519,398
84/85	0,000	60,774	0,062	1,070	3,682	1,523	89,355	2,808	5,090	0,005	0,000	0,000	164,369
85/86	3,485	0,277	134,579	0,567	2,384	302,030	3847,888	157,013	42,203	8,757	0,099	0,099	4499,380
86/87	106,823	0,278	133,812	0,565	16,911	316,754	169,676	5,506	0,823	0,000	0,008	0,000	751,155
87/88	6,583	110,383	14,852	3,108	1,255	0,782	3,747	2,192	4,308	0,443	0,001	0,000	147,654
88/89	0,260	3,864	1,944	42,740	1,298	1,618	3,269	30,581	1,772	1,079	0,127	0,108	88,660
89/90	1423,990	939,446	479,896	126,098	157,418	99,280	595,208	122,332	1829,556	16,674	86,636	9,545	5886,079
90/91	228,919	32,830	35,407	24,320	15,083	20,618	177,518	91,579	60,932	9,696	1,602	1,882	700,386
91/92	27,936	13781,016	401,413	26,729	25,939	181,672	321,813	930,534	597,029	125,095	9,194	10,478	16438,848
92/93	40,605	60,100	44,530	20,530	22,191	20,562	84,872	87,476	180,864	3,103	1,456	0,615	566,904
93/94	92,251	71,557	34,427	19,052	13,471	26,348	75,293	51,485	39,541	3,103	1,472	0,615	428,617
Moy	168,276	1166,797	127,850	25,539	26,006	96,632	499,129	141,232	263,700	14,906	8,684	2,135	2540,885

Tableau 5.11. Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : Station Ghrib – Amont
Modèle saison humide et sèche

Mois	Septe	Octobre	Nove	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	42538,722	574965,289	116340,719	73616,840	69049,039	419525,160	463178,107	136981,272	200098,861	118910,780	51699,810	19528,94	2286433,539
78/79	68019,975	1236472,385	225966,751	122539,188	145477,546	714257,952	755028,231	222483,997	454657,454	212036,729	132360,606	39582,69	4328883,509
79/80	89248,255	1921574,197	335960,514	169196,218	224137,451	997499,148	1021820,44	300567,781	707855,388	299247,324	214806,471	58987,23	6340900,422
80/81	52697,177	815940,568	156901,083	92144,787	96978,089	530769,013	575489,346	169899,491	294125,686	154355,533	81054,831	27041,90	3047397,505
81/82	69459,303	1279284,094	232914,830	125539,445	150403,345	732422,573	772477,809	227593,121	470761,994	217693,970	137560,454	40827,87	4456938,813
82/83	42591,223	576128,334	116539,032	73709,151	69184,156	420077,957	463744,002	137147,148	200556,068	119087,738	51840,548	19565,93	2290171,292
83/84	20957,366	178636,094	45843,057	38892,013	22582,802	213202,658	244834,078	72891,711	44256,821	52549,706	6555,685	6285,100	947487,093
84/85	10,593	83785,247	84,789	1911,657	9087,638	3037,929	123186,844	3870,568	7017,833	154,465	0,153	0,126	232147,842
85/86	5914,575	382,006	185534,281	859,388	5252,927	2398148,48	5304813,91	216462,608	58182,097	125431,374	2161,908	2161,908	8305305,473
86/87	50130,164	382,751	184476,977	855,002	62154,477	2546523,64	233920,136	7590,573	1134,738	2,261	227,664	0,668	3087399,055
87/88	8798,619	152177,712	20475,951	7339,635	2337,749	1310,324	5165,051	3021,389	5939,694	8377,765	40,046	0,000	214983,936
88/89	1170,727	5327,567	2679,668	200119,663	2438,894	3278,001	4506,134	42160,115	2443,201	18794,739	2714,028	2340,027	287972,763
89/90	252619,332	1295149,082	661598,844	783231,879	1036103,62	589504,197	820571,057	168649,900	2522281,20	224894,905	1004903,90	136042,3	9495550,273
90/91	80684,697	45260,175	48813,076	98279,774	53803,831	81204,869	244731,463	126254,177	84002,946	137568,121	26978,825	31219,48	1058801,432
91/92	21696,032	18998921,7	553399,832	110714,061	106600,749	1263151,75	443661,384	1282861,63	823082,193	1397758,98	131498,012	148050,7	25281397
92/93	27402,774	82855,057	61390,989	79375,235	87555,650	80924,867	117007,161	120596,988	249345,129	48970,764	24729,422	11329,06	991483,097
93/94	45743,379	98650,979	47462,492	72236,014	46656,609	110634,879	103801,746	70979,178	54512,916	48970,764	24982,583	11329,06	735960,602
Moy	51746,054	1608581,96	176257,817	120621,173	128812,034	653263,142	688113,936	194706,568	363544,366	187341,525	111418,526	32605,47	4317012,57

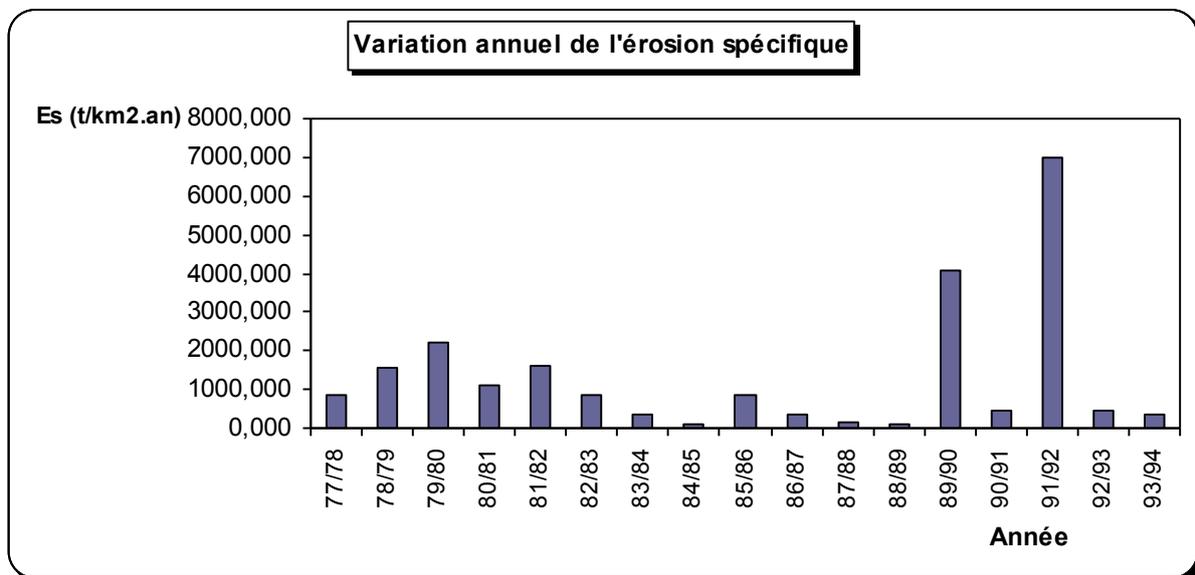
Tableau 5.12. Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km².an) : Station Ghrib – Amont
Modèle saison humide et sèche

Mois	Septe	Octobre	Novo	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	30,856	417,056	84,389	53,399	50,085	304,306	335,970	99,360	145,143	86,253	37,501	14,165	1658,482
78/79	49,339	896,885	163,907	88,885	105,523	518,093	547,666	161,380	329,789	153,802	96,009	28,712	3139,989
79/80	64,737	1393,829	243,692	122,728	162,580	723,544	741,185	218,019	513,448	217,061	155,812	42,787	4599,421
80/81	38,224	591,849	113,809	66,838	70,344	384,997	417,436	123,238	213,346	111,963	58,794	19,615	2210,453
81/82	50,383	927,939	168,947	91,061	109,096	531,268	560,323	165,086	341,471	157,906	99,781	29,615	3232,875
82/83	30,894	417,899	84,532	53,466	50,183	304,707	336,380	99,481	145,475	86,381	37,603	14,192	1661,194
83/84	15,202	129,575	33,253	28,211	16,381	154,648	177,592	52,873	32,102	38,117	4,755	4,559	687,267
84/85	0,008	60,774	0,062	1,387	6,592	2,204	89,355	2,808	5,090	0,112	0,000	0,000	168,390
85/86	4,290	0,277	134,579	0,623	3,810	1739,516	3847,888	157,013	42,203	90,983	1,568	1,568	6024,318
86/87	36,362	0,278	133,812	0,620	45,084	1847,141	169,676	5,506	0,823	0,002	0,165	0,000	2239,469
87/88	6,382	110,383	14,852	5,324	1,696	0,950	3,747	2,192	4,308	6,077	0,029	0,000	155,940
88/89	0,849	3,864	1,944	145,158	1,769	2,378	3,269	30,581	1,772	13,633	1,969	1,697	208,883
89/90	183,239	939,446	479,896	568,123	751,546	427,601	595,208	122,332	1829,556	163,129	728,915	98,679	6887,671
90/91	58,525	32,830	35,407	71,288	39,027	58,903	177,518	91,579	60,932	99,786	19,569	22,645	768,010
91/92	15,737	13781,016	401,413	80,307	77,324	916,237	321,813	930,534	597,029	1013,875	95,383	107,390	18338,058
92/93	19,877	60,100	44,530	57,575	63,509	58,699	84,872	87,476	180,864	35,521	17,938	8,218	719,180
93/94	33,180	71,557	34,427	52,397	33,843	80,250	75,293	51,485	39,541	35,521	18,121	8,218	533,835
Moy	37,534	1166,797	127,850	87,494	93,435	473,850	499,129	141,232	263,700	135,890	80,818	23,651	3131,379

Tableau 5.13. Apport solide et érosion spécifique pour différents modèles

Bassin versant oued cheliff station Ghrib- Amont			
Echelle temporelle	Mensuelle	Saisonnière	Humide et sèche
As (tonne)	1813804,44	3502939,92	4317012,57
Es (t/km².an)	1315,657	2540,885	3131,379

L'analyse des tableaux 5.8, 5.10, 5.12 et la figure 5.5 de la station de Ghrib-Amont montre clairement une variation à l'échelle annuelle de l'érosion spécifique. A titre d'exemple pour l'échelle mensuelle, elle passe d'une valeur de 102,5 t/km².an en 84/85 à 4066,062 t/km².an en 89/90. Cela peut être expliqué par la très grande variation du transport solide à différents modèles temporels.

**Figure 5.5.** Variation annuelle de l'érosion spécifique (Modèle mensuel)

Dans le tableau (5.13), les valeurs de l'érosion spécifique à l'échelle mensuelle et saisonnière (Automne, Hiver, Printemps et Eté), sont légèrement différentes pour les deux modèles, par contre pour les autres modèles (saisonnier et saison humide -sèche), les résultats sont assez proches.

La figure (5.6) représente la variation annuelle du transport solide à l'échelle temporelle mensuelle pour la station hydrométrique Ghrib-Amont. Nous remarquerons une valeur importante du transport solide durant l'année 89/90, alors que dans les autres années (83/84 à 88/89) la quantité du transport solide est faible.

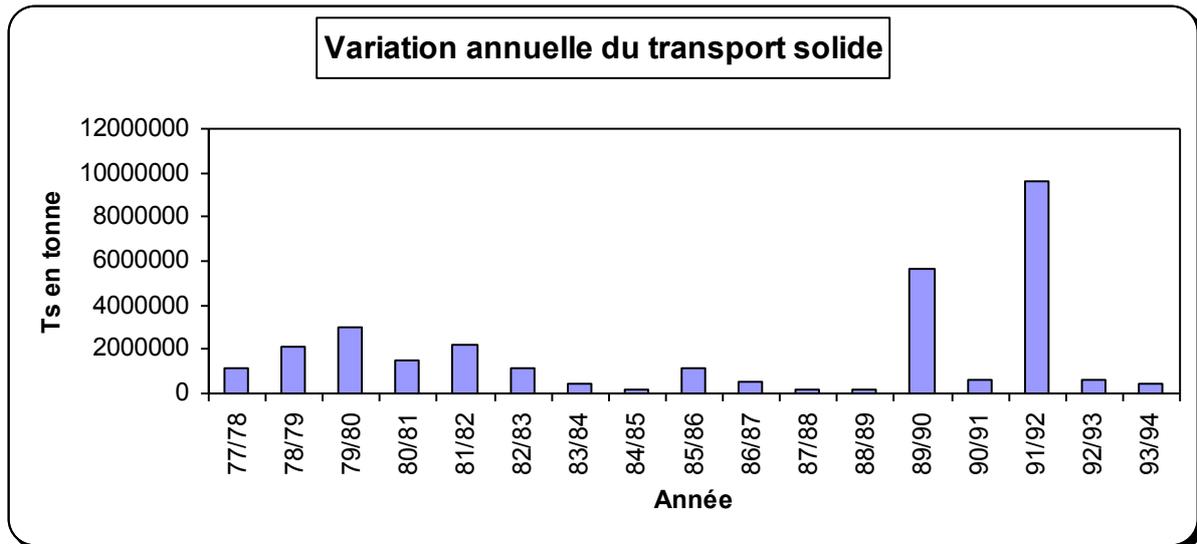


Figure 5.6. Variation annuelle du transport solide (modèle mensuel)

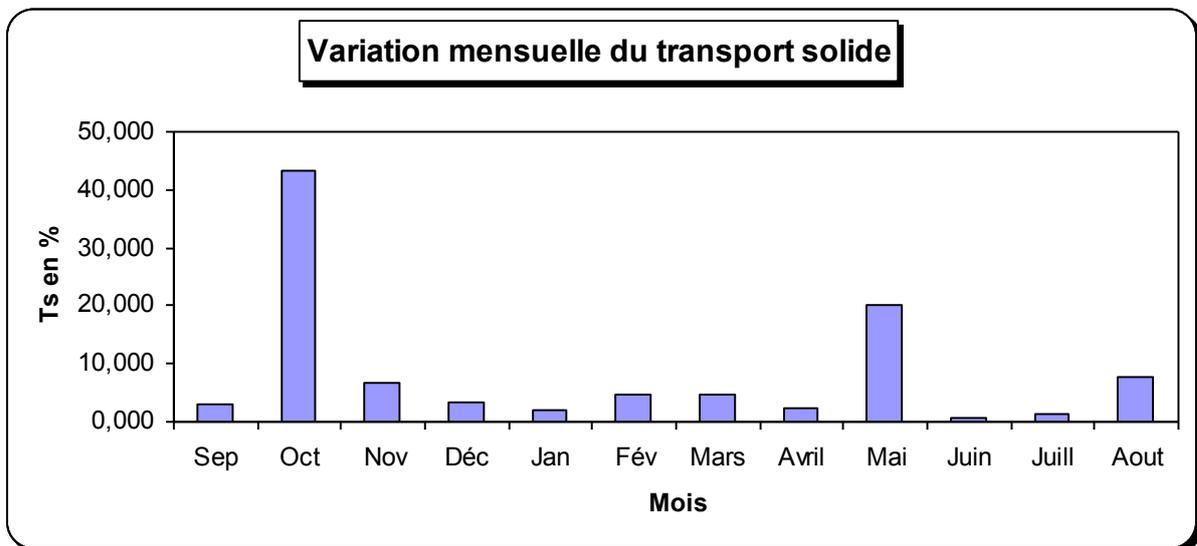


Figure 5.7. Variation mensuelle du transport solide (modèle mensuel)

Dans la figure 5.7, un taux important du transport solide est enregistré au mois d'Octobre (43 % du transport solide annuel) et 20 % du transport solide annuel est enregistré au mois de mai, par contre le pourcentage du transport solide est faible pour les autres mois, il varié entre 0,5 % et 07 %.

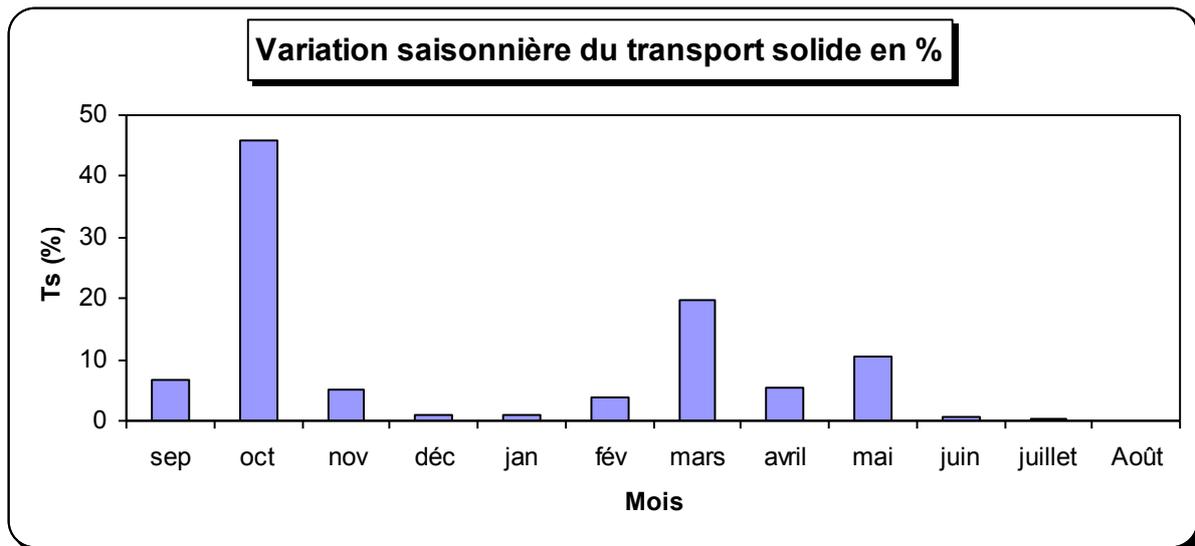


Figure 5.8. Variation mensuelle du transport solide (modèle saisonnier)

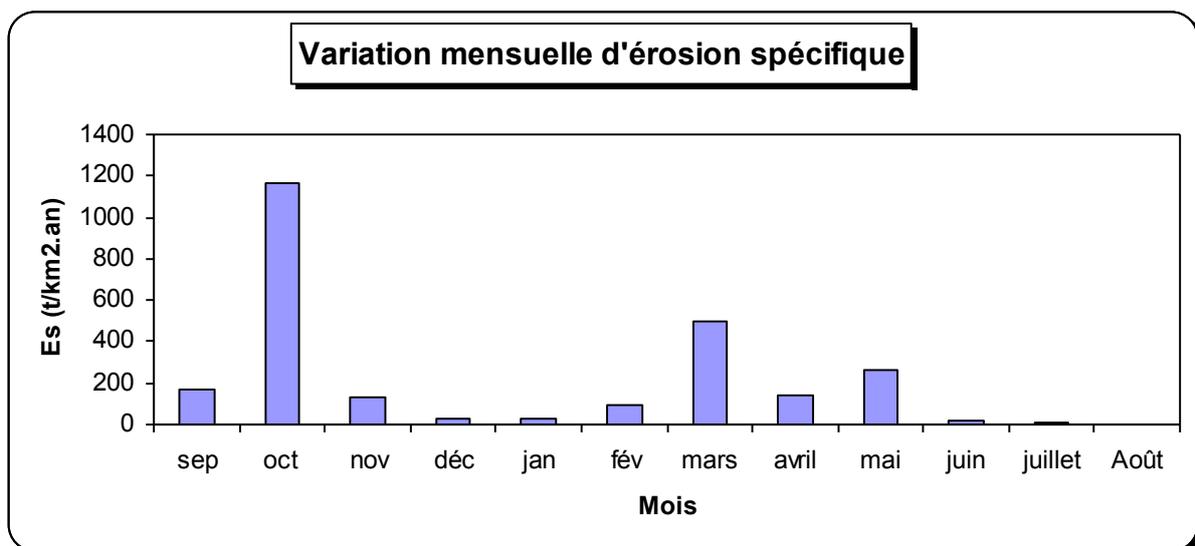


Figure 5.9. Variation mensuelle d'érosion spécifique (modèle saisonnier)

Dans la figure 5.8, un taux important du transport solide est enregistré au mois d'Octobre (45 % du transport solide annuel) et 20% du transport solide annuelle est enregistré au mois de mars, par contre le pourcentage du transport solide est faible pour les autres mois. Il varié entre 0,5 % et 10 %.

Dans la figure 5.9, la variation de l'érosion spécifique est variable d'un mois à l'autre. Nous remarquons que les valeurs d'érosions sont très importantes pour la saison d'automne et le printemps.

Il est à noter que pour le calcul du charriage, nous ne disposons d'aucune mesure, le transport solide par charriage est estimé entre 15 % et 25 % de la suspension, selon plusieurs auteurs (*Larfi et remini, 2006*).

Tableau 5.14. Transport solide en suspension, total et l'érosion spécifique

Bassin versant	Transport solide en suspension (Tonne)	Transport solide total (Tonne)	Erosion spécifique (T/Km ² .an)
Station Ghrib-Amont	3502939,92	4203527,90	2540,885

Nous remarquons une érosion spécifique importante du bassin versant de oued Cheliff au droit de la station Ghrib –Amont, celle-ci peut être expliquée par les caractéristique hydro-morphométrique du bassin versant.

5.3.3. Recherche de relations entre le taux d'érosion spécifique annuel et quelques paramètres hydro-climatologiques

5.3.3.1. Corrélation entre l'érosion spécifique et la lame d'eau ruisselée

La majorité des évènements pluvieux sont entièrement absorbés par le sol et le ruissellement ne débute qu'après un seuil de pluie qui dépend des conditions d'humidité préalable. La lame d'eau ruisselée dépend de la pluviométrie et de la température moyenne annuelle du bassin versant (*Meguenni et Remini, 2008*). La représentation graphique de l'érosion spécifique (Es) en fonction de la lame d'eau ruisselée (Lr) (Figure 5.10) nous a permis de proposer, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,93$, la relation puissance suivante :

$$Es = 0,5488. Lr^{1,7132} \quad (5.8)$$

Où : **Es** : s'exprime en t/km².an et **Lr** en mm

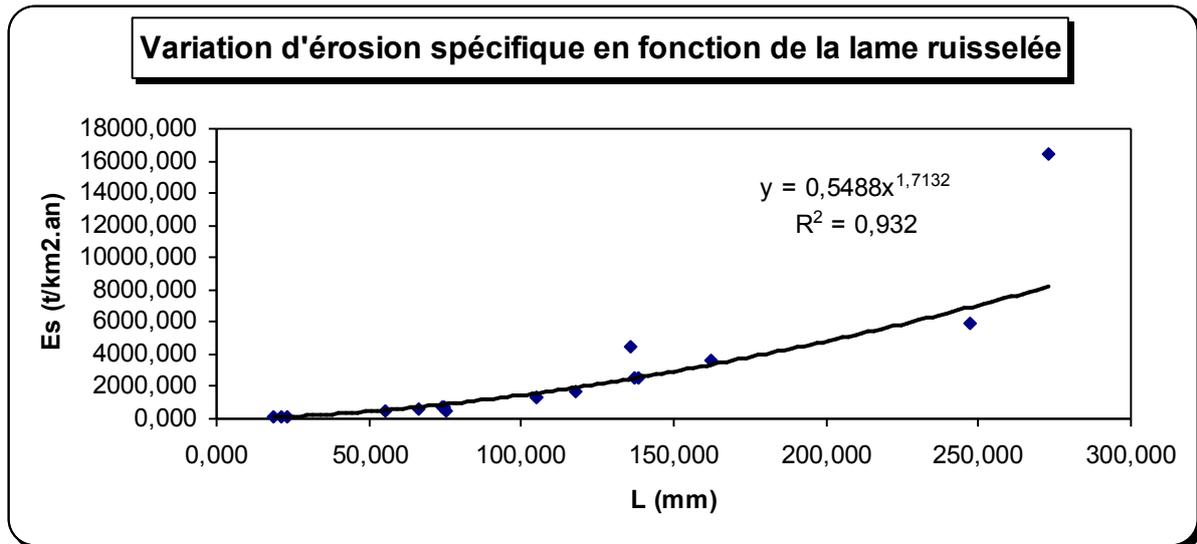


Figure 5.10. Variation du taux d'érosion spécifique en fonction de la lame d'eau ruisselée

5.3.3.2. Corrélation entre l'érosion spécifique et le débit moyen annuel

La représentation graphique de l'érosion spécifique (E_s) en fonction de débit moyen annuel (Figure 5.11) nous a permis de proposer, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,93$, la relation puissance suivante :

$$E_s = 117,04 Q^{1,7132} \quad (5.9)$$

Où : E_s : s'exprime en $t/km^2.an$ et Q en m^3/s

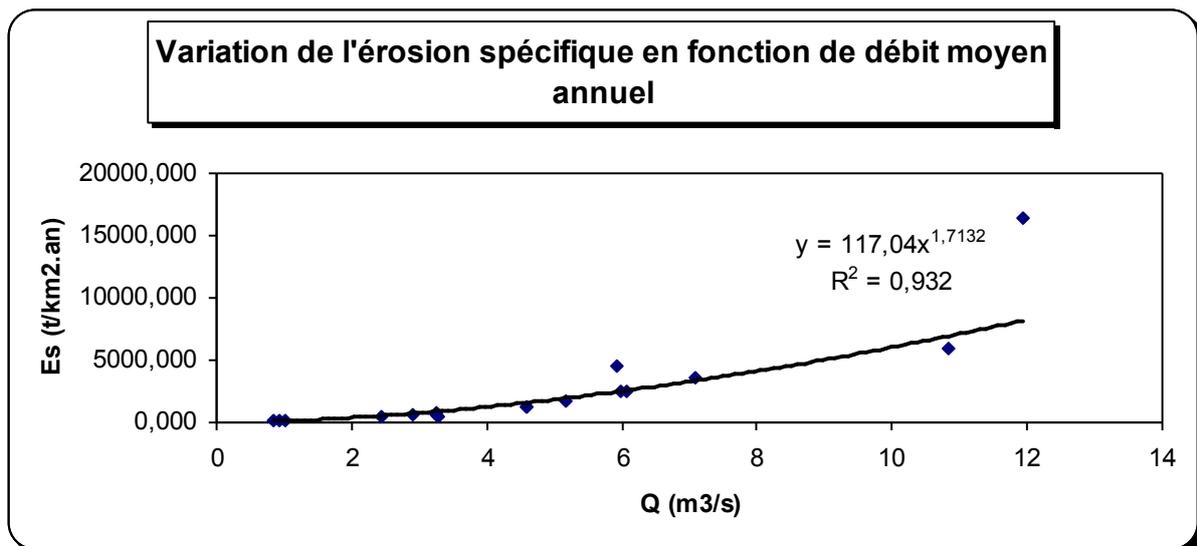


Figure 5.11. Variation du taux d'érosion spécifique en fonction de débit moyen annuel

5.3.3.3. Comparaison des résultats d'étude avec le levé bathymétrique du barrage Ghrib

1. Calcul du transport solide

Tableau 5.15. Apport solide calculé (station Ghrib amont)

Années	Apport calculé en Hm ³ /an
1977-1986	1,24
1986-1994	2,28

2. A partir de l'envasement du barrage (bathymétrie)

Le barrage Ghrib a fait l'objet de mesure de bathymétrie par l'Agence National des barrages en 1976, 1986 et 2004

Tableau 5.16. Envasement du barrage Ghrib pour différentes campagnes bathymétriques (ANBT)

Année de levé bathymétrie	1939	1976	1986	2004
Capacité Hm ³	280	177	165	115
Perte de capacité Hm ³	0	102	12	50
Perte de capacité annuelle Hm ³	0	2,76	1,22	2,70

Tableau 5.17. Comparaison des apports en sédiments obtenus par mesure des turbidités à la station Ghrib –amont et par mesure de l'envasement du barrage Ghrib

Année	Envasement du barrage Ghrib (Hm ³ /an)	Apports solide station Ghrib –amont (Hm ³ /an)	Rapport
1974-1976	2.76	-	-
1976-1986	1.22	1.24	1.02
1986-1994	2.70	2.28	0.84

Le tableau ci-dessus montre que la production estimée de sédiments au niveau de la station de Ghrib - amont, dépasse sur la période 1976-1986 l'envasement du barrage Ghrib d'un facteur égal à 1,02. Ceci nous permet de conclure:

- que les terrains cultivés en amont de la station de Ghrib – amont produisent presque la totalité des sédiments qui envasent le barrage Ghrib (période 1976-1986);
- que le rapport inférieur à 1 ne peut s'expliquer que par le manque des données hydrométriques de la station Ghrib – amont (période 1994-2004).

La comparaison des mesures d'apports solides, obtenues par turbidimétrie de la station Ghrib - amont et bathymétrie au barrage Ghrib, montre une ligature des résultats et traduit un fort impact du ruissellement dans le processus de l'érosion du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib en amont du barrage Ghrib.

5.4. Conclusion

En utilisant la relation $Q_s = a Q_l^b$, déterminée à partir des mesures de turbidité réalisées au niveau de station hydrométrique Ghrib amont, il est possible de quantifier les débits solides des grands cours d'eau d'un bassin versant, et de déterminer les taux de dégradation des terrains en amont des stations. Les coefficients de cette relation varient en fonction des caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques des bassins versants. En tenant compte de ces caractéristiques, on peut procéder à un classement des différentes régions en fonction de leur susceptibilité à l'érosion.

La recherche d'une corrélation entre le taux d'érosion spécifique calculé et quelques paramètres hydro climatiques, tels que, le débit moyen annuel et la lame ruisselée a permis de trouver des relations hautement significatives.

Les résultats de la quantification du transport solide semblent très cohérents avec les mesures directes de l'envasement dans la retenue du barrage Ghrib.

Chapitre 6

Cartographie de l'érosion hydrique par SIG et télédétection

Chapitre 6. Cartographie de l'érosion hydrique par SIG et télédétection

6.1 Introduction

La détection des zones érodées, ainsi que l'évaluation des facteurs qui contrôlent l'érosion et leur caractéristiques, sont des tâches complexes mais pouvant être résolues avec l'intégration de plusieurs sources de données (données spatiales, mesures et enquêtes sur le terrain et images satellitaires) dans des systèmes de traitement géo-spatiale, tels que les systèmes d'information géographique (SIG).

6.2. Méthode d'évaluation de l'érosion utilisée

L'avènement du système d'information géographique (SIG) et la télédétection ont permis à l'équation universelle de perte en sol (USLE) d'être utilisée d'une manière répartie dans l'espace parce que chaque cellule dans une image raster s'agit de représenter une unité sur le terrain. L'approche utilisée a consisté dans un premier temps, à détecter les facteurs de déclenchant l'érosion et à les spatialiser en utilisant les images satellitaires Landsat-TM. Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisées pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. La modélisation prédictive dans un environnement SIG offre une opportunité pour l'évaluation des risques d'érosion. Les données sur l'érosion par rapport à certains indicateurs sont collectées, calibrées et sont entrées dans une base de données SIG, après quoi elles seront spatialement modélisées pour représenter le risque d'érosion des sols dans n'importe quel élément du paysage choisi.

Des couches individuelles ont été créées pour chaque paramètre de l'USLE et sont ensuite combinées par une procédure de modélisation dans la grille ArcGIS. Chaque grille de facteur avait une taille de cellule de 30 m, bien que la résolution réelle (de la source de données la plus basse résolution) est d'environ 100 m. Ce ré-échantillonnage a été fait pour intégrer la plus grande précision de la précipitation et interpolations topographiques. Toutes les couches ont été projetées en UTM zone 31N en utilisant le WGS 1984. La méthodologie suivante a été utilisée pour générer les grilles des facteurs. La figure (6.1) montre le cadre général suivi.

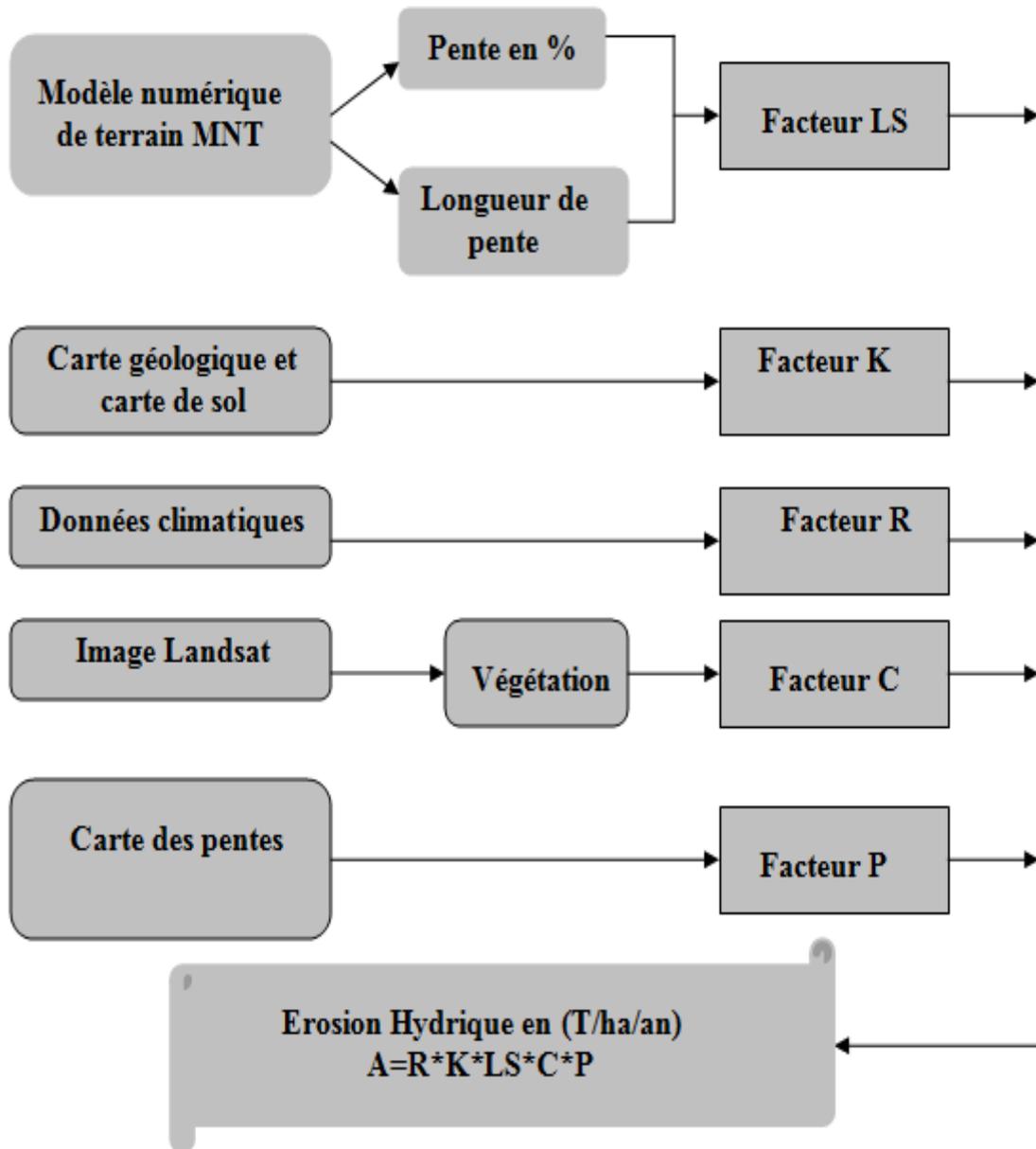


Figure 6.1. Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Cheliff- Ghrib.

6.2.1. L'équation universelle de perte en sol USLE

Plusieurs modèles d'érosion des sols existent avec différents degrés de complexité. Même si une grande variété de modèles est disponible pour l'estimation du risque d'érosion, la plupart demande tellement de données-sources que leur application à l'échelle régionale devient un problème. L'équation bien connue USLE (*Wischmeier et Smith, 1978*) a été utilisée car c'est le modèle qui demande le moins de données-sources, et il a été appliqué largement à toutes les échelles (*Fistikoglu et al, 2002*).

Fondamentalement, USLE a l'avantage de fournir des estimations à long terme de moyenne de perte annuelle de sol à partir de petites zones et est considéré comme un «bon modèle» si le but de la modélisation est d'arriver à des estimations globales de l'érosion des sols. Cependant, le modèle est limité dans le sens où il ne peut pas simuler l'érosion du lit de dépôt, ou en ravin (*Foster, 1988*).

L'Equation universelle de pertes en sol (*Wischmeier et Smith, 1978*) s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappe et en rigole. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique: agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives:

$$A = R.K.LS.C.P \quad (6.1)$$

Où

A : est le taux annuel de perte en sol (t ha an)⁻¹;

R : est le facteur de l'érosivité des pluies, il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 min consécutives, et est exprimé en MJ mm (ha h an)⁻¹;

K : est l'érodibilité des sols, et dépend de la granulométrie, de la quantité de matière organique, de la perméabilité et de la structure du sol, et est exprimé en t ha h (ha MJ mm)⁻¹;

LS : est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m);

C : est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale;

P : est un facteur sans dimension, rapport qui tient compte des techniques culturales antiérosives telles que le labour en courbes de niveau.

Les unités de la perte de sol annuelle moyenne (A) sont portées par les facteurs R et K . Ces deux facteurs représentent la cause de l'érosion des sols. Le facteur R représente érosivité de la pluie, ou le pouvoir érosif de la pluie sur le sol quel que soit son type. Le facteur K représente l'érodibilité du sol, ou dans la mesure où le type de sol spécifique résiste aux forces érosives.

Les facteurs de l'USLE restants (L , S , C , P) peuvent être considérés comme des facteurs d'ajustement. L'USLE a été formulée par l'examen des données enregistrées à partir de l'érosion des parcelles de terrain de l'unité qui avait une longueur fixe de 72,6 pieds (soit 22,1 mètres) et une pente fixe d'environ 9 % (ou 5,14 degrés). Le L , S , C , et les facteurs P ajustent les conditions réelles par rapport aux conditions de parcelles expérimentales sur le terrain. Ces facteurs représentent des rapports, et sont sans dimension.

L'USLE a connu par la suite plusieurs variantes. La "Revised Universal Soil Loss Equation" (RUSLE) (*Renard et al, 1997*) retient la structure de base de l'USLE en complexifiant la manière d'estimer les différents termes de l'équation. La gamme de variation du facteur R a été élargie à de nouveaux domaines et surtout le facteur LS a été modifié pour pouvoir rendre compte d'une topographie variable.

Initialement conçue pour une parcelle, et pour fournir des estimations de pertes annuelles, l'équation a subi de très nombreuses adaptations dans le but de l'adapter à l'échelle de l'évènement d'une part, et/ou à l'échelle du bassin versant d'autre part. L'adaptation à l'échelle de l'évènement a été réalisée en remplaçant le paramètre statistique érosivité par une combinaison des débits moyen et maximal d'un évènement donné. L'adaptation à l'échelle d'un bassin versant a été réalisée en remplaçant le paramètre topographique, initialement conçu pour l'échelle parcellaire, par un paramètre rendant compte de l'accumulation de ruissellement en un point donné, basé sur les aires contributives en amont de chaque point, par exemple celui proposé par (*Desmet et Govers, 1996*). Ces modifications sont incluses dans différentes variantes d'USLE, dont les deux principales sont l'équation MUSLE ("Modified USLE ») de (*Williams, 1975*), ou USLE-M (« USLE-modified ») de (*Kinnell, 2001*).

Malgré ces multiples développements, les limites de l'USLE liées notamment à sa nature statistique n'ont pu être entièrement dépassées. Les recherches en modélisation se sont tournées vers une approche plus déterministe basée sur la description des processus physiques au travers de modèles mathématiques (*Cheggueur, 2008*).

6.2. 2. Traitement des images satellitaires

Le but du traitement d'images satellitaires est d'extraire de celles-ci des informations utiles pour la compréhension et la modélisation d'un phénomène se déroulant à la surface terrestre. Pour cela une bonne préparation (prétraitement) de ces données est nécessaire afin d'éviter toutes les erreurs provenant de l'instrument de captage et effets atmosphériques.

Les propriétés des imagerie desquelles ont été utilisées au cours de cette partie sont représentées dans le tableau 6.1. Ces données ont été choisies en raison de leur excellente qualité. Ce sont des images multi-bandes issues du radiomètre Landsat-TM d'une résolution de 30 m pour les bandes du visible et de l'infrarouge et d'une résolution de 60 m pour la bande thermique.

Tableau 6.1. Caractéristiques des bandes spectrales (Toumi, 2013).

N°	Nature	Longueur d'onde (ym)	Résolution (m)
1	Bleu	0.485	30
2	Vert	0.560	30
3	Rouge	0.660	30
4	Proche infrarouge (PIR)	0.830	30
5	Infrarouge moyen (MIR)	1.65	30
6	Infrarouge thermique (IRT)	11.450	60
7	Infrarouge moyen (MIR)	2.220	30

Les bandes spectrales de chaque image téléchargée sont en format TIFF (Tagged Image File Format) sous le mode BSQ. A ces bandes s'ajoute un fichier méta-information (en-tête) pour toute l'image.

- **Données de télédétection**

Le choix des produits et l'échelle appropriée :

La nature du phénomène à étudier peut conditionner le choix des produits, des capteurs, du nombre de dates de prise de vue. On ajoute aussi d'autres facteurs techniques et économiques, tels que, la taille de l'objet à percevoir, la durée de vue et le budget.

L'objectif de ce travail est de produire une cartographie du risque érosif et d'occupation du sol à l'échelle d'un bassin versant de 1379 km². Il est indispensable de choisir un satellite dont les capteurs disposent de plusieurs canaux dans le visible. Ainsi, la taille du pixel permet de détecter

des petites parcelles (sol nu, de la végétation et de plan d'eau) d'une résolution spatiale de 50 m. Pour ce travail, une image à haute résolution (Landsat-TM 5) est acquise le 24.04.1985.

Le choix de la résolution spatiale du capteur dépend également du niveau de caractérisation visé : détection, identification et interprétation.

- La détection d'un objet peut être effectuée même avec des pixels de taille nettement inférieure à la taille de l'objet à partir du moment où il existe un bon contraste entre cet objet et l'environnement.

- L'identification d'un objet suppose de disposer de pixels de taille similaire à celle de l'objet.

- L'analyse d'un objet (nécessite que l'objet soit couvert par plusieurs pixels).

Notre région d'étude se situe dans une seule scène (figure 6.2). L'image satellitaire a été acquise le 24.04.1985.

Tableau 6.2. L'image satellitaire disponible et couvrant la région d'étude.

Date de prise	Résolution	Chemin d'accès et Rangée (Path and Row)
24 04 1985	30 m	35/136

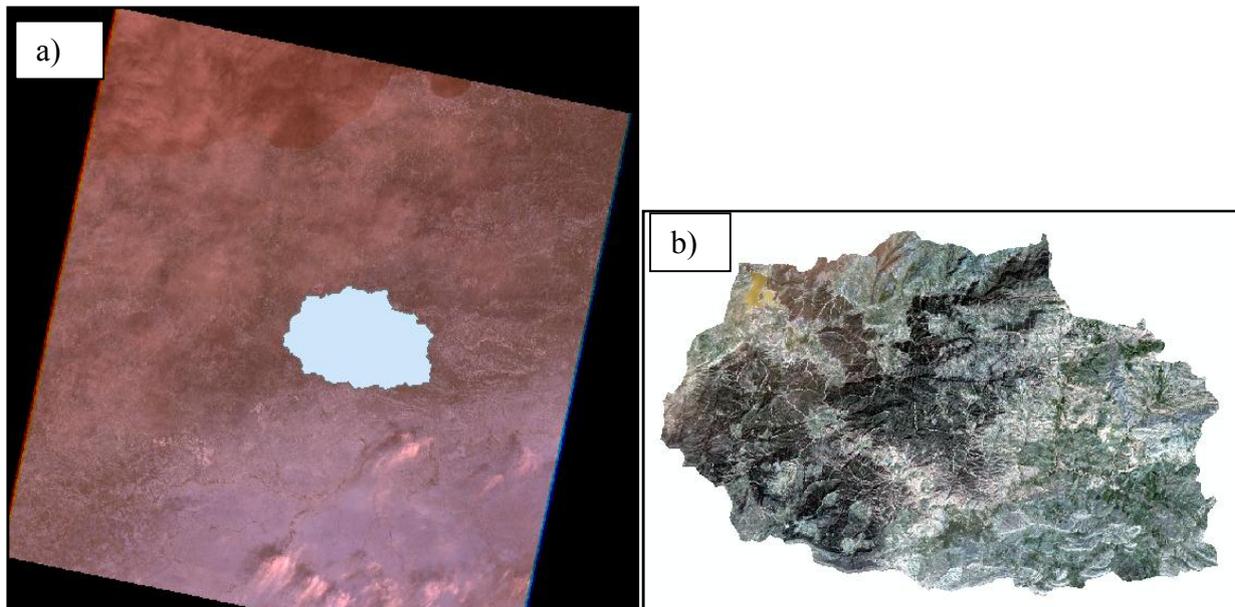


Figure 6.2. Préparation des images satellitaires. a) scène qui couvre le bassin versant. b) Extrait d'images Landsat TM5 en composition colorée RVB 321 représentant la zone d'étude.

Les images satellitaires utilisées au cours de cette étude ont été téléchargées gratuitement à partir du site <http://glovis.usgs.gov/> de l'USGS. Le choix des images téléchargées a été fait rigoureusement suite aux critères suivants :

- Le temps entre la prise de deux scènes couvrant la région d'étude soit aussi bien court que possible pour éviter les anomalies du au système de captage lors du balayage ;
- Les scènes couvrant la région d'étude soient dégarnies de toute couverture nuageuse ou de brunes (taches);

Toute image téléchargée est accompagnée d'un fichier « métadonnées » offrant toutes les informations possibles sur l'image, telles que, la période de prise de vue, ces coordonnées géographiques, le système de projection, le taux du couvert nuageux, la qualité de l'image et autres informations de calibration.

6.2.3. Transformation des images et production d'images non spectrales

L'objectif d'utilisation des images non spectrales est d'examiner une propriété des objets de la surface terrestre, c'est-à-dire examiner directement une ou des caractéristiques biophysiques de la couverture végétale, des sols et de l'eau. Le principe de cette opération consiste à affecter à chaque pixel une valeur dérivée des luminances spectrales. La plupart des indices issus de la télédétection concernent la végétation. Ils sont calculés à partir des trois régions spectrales de l'infrarouge moyen (MIR), du proche infrarouge (PIR) et du visible (VIS) (*Cherel, 2010, Tillah, 2016*).

Les différents indices de végétation

Les indices de végétation, qui sont des combinaisons arithmétiques des réflectances dans le visible (généralement le rouge) et le proche infrarouge, sont relativement bien corrélés à la croissance des plantes, la couverture végétale et la quantité de biomasse verte (*Rondeaux et al, 1996*). En effet, les bandes rouge et proche infrarouge présentent un intérêt majeur. Outre une plus faible dépendance envers les conditions atmosphériques, la première coïncide avec une forte absorption du rayonnement, la deuxième, au contraire, offre une réflectance élevée. Il en résulte un écart important entre ces deux niveaux. Le rayonnement électromagnétique dans les longueurs d'ondes du rouge est absorbé en grande partie par la chlorophylle. Dans le proche infrarouge, la réflectance d'un couvert végétal varie essentiellement en fonction de la densité du couvert végétal vert (*Jacquemoud, 1993*). Un grand nombre d'indices de végétation ont été développés, du simple ratio aux indices plus élaborés, à partir de ces bandes rouge et proche infrarouge (tableau 6.3). La création d'indice de végétation vise donc plusieurs objectifs:

- L'estimation de la masse végétale recouvrant le sol.

- La description de l'état phénologique de la couverture végétale.
- La prévision des récoltes.
- L'évolution de la couverture végétale.

Tableau 6.3. Quelques formules des indices utilisés pour l'étude de la végétation (*Girard et Girard, 1999, Girard, 1995*).

Dénomination	Formules	Caractéristiques	Auteurs
Différence	$R - PIR$	Forte sensibilité aux variations atmosphériques	Monget (1980)
Rapport	$RVI = PIR / R$	Saturation aux forts indices, sensibilité à la contribution spectrale des sols et aux effets atmosphériques	(Jordan, 1969; Pearson <i>et al.</i> , 1972)
Indice de végétation par différence normalisée	$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$	Sensibilité aux effets atmosphériques, gamme de variation plus faible que le précédent, mais sensibilité aux variations angulaires de la visée, selon la position vis à vis du soleil	(Rouse <i>et al.</i> , 1974, Tucker, 1979)
Indice de végétation transformé	$TVI = (NDVI + 0,5)^{1/2}$	Essai d'élimination des valeurs négatives, stabilisation de la variance	(Deering <i>et al.</i> , 1975)
Indice perpendiculaire de végétation	$PVI = (PIR - aR - b) / (a^2 + 1)^{1/2}$ où a est la pente de la droite des sols et b son ordonnée à l'origine	Diminution de la contribution spectrale des sols, mais sensibilité à diverses caractéristiques des sols	(Richardson et Wiegand, 1977)
Indice de végétation ajusté au sol	$SAVI = [(1+L) (PIR-R)] / (PIR+R+L)$ avec $L = 0,5$ pour diminuer l'effet du sol	De nombreux indices sont issus de celui-ci pour minimiser l'effet du sol (TSAVI, MSAVI...)	(Huete, 1988)
indice de végétation résistant aux effets atmosphériques	$ARVI = (PIR-RB) / (PIR+RB)$ avec $RB = R - g(B-R)$ où g est fonction du type d'aérosols	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI mais sensible à la contribution spectrale des sols	(Kaufman et Tanre, 1992)
Indice de végétation amélioré	$EVI=2.5[(PIR-R)/(PIR+6R-7.5B+1)]$	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI et minimise l'effet du sol	(Huete, 1994)

6.3. Résultats et discussion

6.3.1. Calcul du facteur d'agressivité des précipitations (R)

L'estimation du facteur (R) selon la formule de Wischmeier nécessite la connaissance des énergies cinétiques (E_c) et l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) des gouttes de pluie de chaque averse. Elles sont données par la formule empirique de *Wischmeier & Smith (1978)*:

$$R = K \cdot E_c \cdot I_{30} \quad (6.2)$$

Les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations qui se trouvent dans le bassin ou à sa proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles.

Des auteurs comme (*kalman, 1967, Arnoldus, 1987, Rango & Arnoldus, 1987*) ont développé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations mensuelle et annuelle pour déterminer le facteur (R).

$$\log R = 1.74 \cdot \log \sum (P_i^2/P) + 1.29 \quad (6.3)$$

P_i : Précipitations moyennes mensuelles (mm) P : précipitation moyennes annuelles (mm)

Tableau 6.4. Précipitations moyennes mensuelles (mm), annuelles (mm) et valeur de R moyen pour la période 1976-2004

STATION	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	annuel	R
Ain boucif	27.19	30.98	36.41	42.76	46.79	34.14	18.39	26.78	19.09	9.00	3.94	7.09	301.38	50.36
Boukhari GR	18.00	28.60	31.28	38.90	42.70	27.30	23.90	27.60	23.80	7.50	3.30	10.30	257.50	50.01
Mongorno	24.51	44.37	57.33	74.13	65.00	54.09	43.31	51.72	38.32	10.76	3.28	11.01	477.82	71.77
Ghrib barrage	22.15	40.04	53.65	65.16	64.16	55.33	43.61	43.23	29.56	8.39	4.51	4.92	434.71	68.43
Ghrib amont	23.40	39.01	50.69	65.93	64.53	48.64	42.34	19.38	12.79	5.67	3.66	2.33	313.00	77.30
Médéa	25.61	50.30	77.44	96.22	95.71	72.84	59.52	62.54	40.95	9.15	4.21	4.81	595.13	90.88
Kherbathelale	18.54	29.29	36.31	43.93	39.69	33.19	31.69	36.07	31.33	7.26	2.43	3.27	313.00	51.59
Oumaria	28.10	32.00	37.70	37.70	48.30	35.40	20.50	27.70	19.70	9.30	4.00	7.30	468.67	36.62
djenane b-ouadah	23.62	31.07	53.23	60.35	72.63	54.24	26.03	41.29	30.32	10.02	0.76	7.56	411.16	49.40

La mesure de la quantité annuelle totale et la répartition spatiale de pluie érosive aux stations, montre que le bassin versant de Cheliff-Ghrib est soumis à une agressivité pluviale. Les valeurs de R subissent un gradient croissant de l'amont vers l'exutoire avec une légère augmentation de Sud vers le Nord. 90 % du territoire du bassin versant est soumise à une agressivité climatique élevée correspondante à une classe de R supérieur à 50 MJ.mm/ha.h.an. Ce résultat permet de déduire que le bassin est sujet à un pouvoir érosif important. Les valeurs de R varient entre 40.78 et 85.57 MJ.mm/ha.h.an, avec une moyenne établie à 64.77 MJ.mm/ha.h.an. Les valeurs de R les plus faibles présentées par la classe (40.78 à 50 MJ.mm/ha.h.an) se focalisent aux Sud- Est du

bassin versant, alors que les valeurs les plus fortes (plus que 80 MJ.mm/ha.h.an) se focalisent aux zones montagneuses du bassin. La (Figure 6.3) montre la distribution spatiale du facteur R.

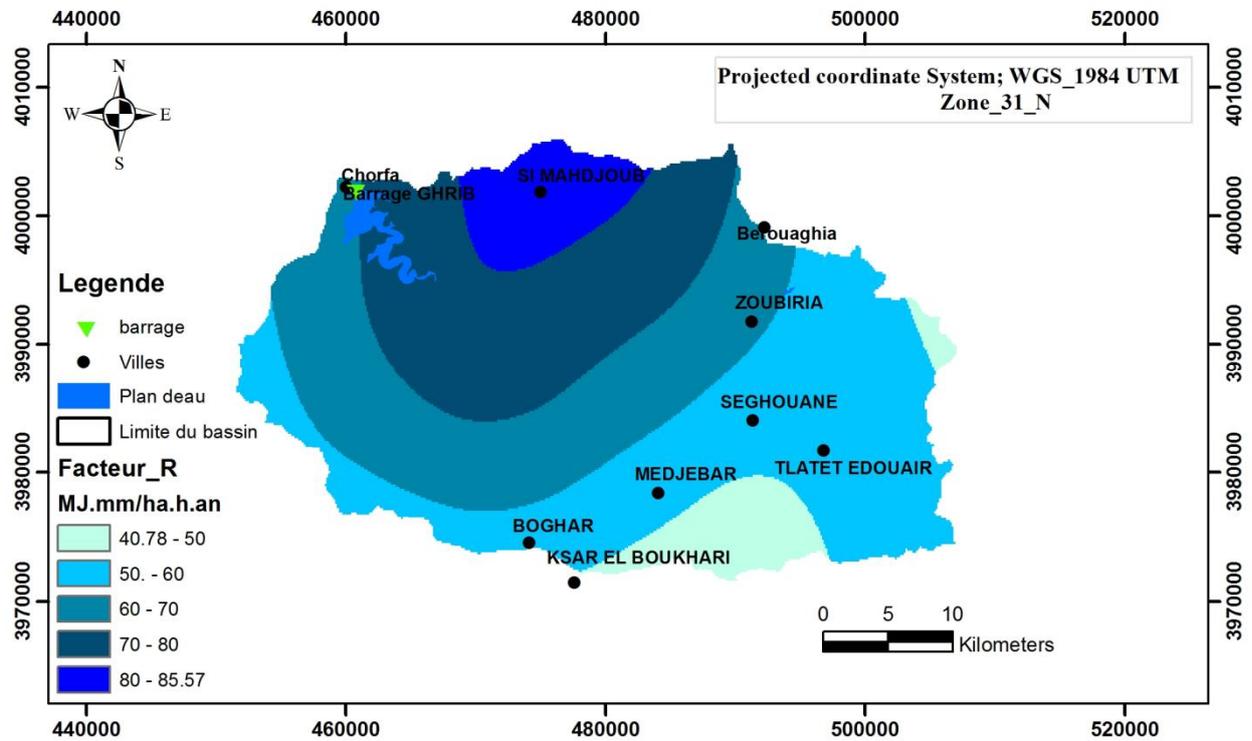


Figure 6.3. Carte du facteur d'érosivité de pluie R

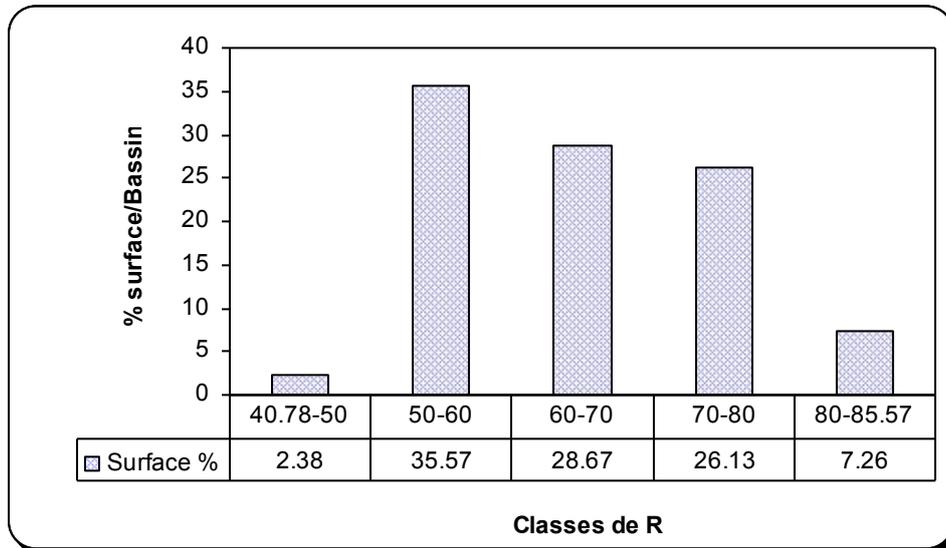


Figure 6.4 Distribution des classes du facteur R dans le bassin versant Cheliff-Ghrib

6.3.2. Détermination du Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique (LS) à l'intérieur de la MUSLE représente la combinaison des effets de la longueur (L) et du gradient (S). Ce facteur évalue les pertes de sol par érosion hydrique, considérant les effets que pourraient avoir la longueur (L) et le gradient (S) de la pente respectivement. Ainsi le facteur (LS) peut être défini comme la relation entre le sol perdu dans une zone avec une pente (p) et longueur (l), dans la parcelle standard correspondante de 22.1 m, utilisée pour le développement de la MUSLE. *Kirkby et Morgan (1984)* définissent la longueur de la pente comme la distance depuis le point d'origine du flux sur la superficie jusqu'au point où la pente diminue suffisamment pour que le dépôt ait lieu, ou jusqu'au point où l'écoulement entre dans un canal défini. Le canal peut faire partie d'un réseau de drainage où un canal construit (Figure 6.5). Le gradient de la pente est le degré d'inclinaison du terrain, exprimé généralement en pourcentage.

En relation au facteur L (effet de la longueur de la pente dans l'érosion), il est adimensionnel ou bien il constitue la raison entre la perte de sol dans la longueur des pentes sur le terrain en accord à la longueur d'une parcelle de 22,1 m qui a le même type de sol et gradient (*U.H.A.S.L.S, 2016*).

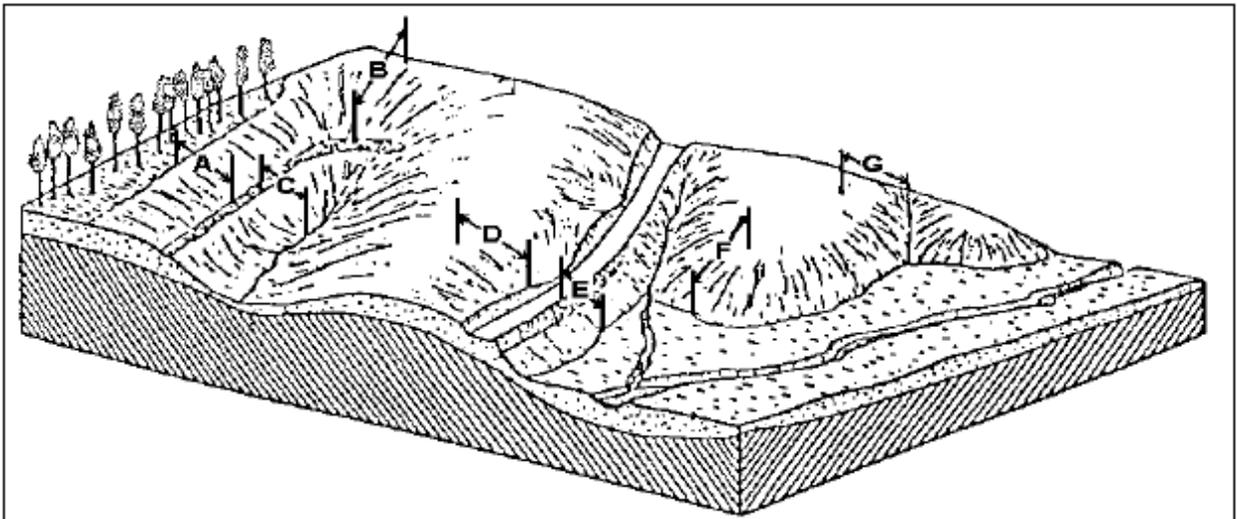


Figure 6.5. Illustration sur le concept de longueur du terrain (*U.H.A.S.L.S, 2016*).

A : Si l'écoulement superficiel ne se produit pas dans une forêt vierge, le point de départ de la longueur de pente doit commencer avec la fin de la forêt vierge et s'étendre vers le bas de la pente jusqu'au premier point où l'écoulement peut se concentrer.

B : Jusqu'au point de concentration de l'écoulement

C : Du point de concentration d'écoulement antérieur jusqu'au point de concentration du flux

D : Point d'origine d'écoulement jusqu'à une route qui concentre l'écoulement

E : De la route à la plaine inondable, où le dépôt pourrait avoir lieu

F : Du point d'origine d'écoulement à la plaine inondable où le dépôt pourrait avoir lieu

G : Point d'origine de l'écoulement à une dépression où l'écoulement pourrait se concentrer.

L'estimation des composantes de l'effet de la topographie dans l'érosion de sol établi par la RUSLE: le facteur longueur de la pente (L) et le facteur gradient (S). Ci-après, les équations du calcul utilisées :

· Le facteur L: où λ est la longueur de la pente (m), m est l'exposant de la longueur de la pente et β est l'angle de la pente. La longueur se définit comme la distance horizontale d'où commence le flux superficiel au point où commence le dépôt où l'écoulement coule à un canal défini (U.H.A.S.L.S, 2016).

Les équations utilisées pour le calcul de LS, en ArcGis 10.1 sont :

- $F = (\sin(\text{"slope_degree"} * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\sin(\text{"slope_degree"} * 0.01745), 0.8) + 0.56)$
- $m = "F" / (1 + "F")$
- $L = \text{Power}(\text{"FlowAcc"} + 625, ("m" + 1)) - \text{Power}(\text{"FlowAcc"}, ("m" + 1)) / \text{Power}(25, ("m" + 2)) * \text{Power}(22.13, "m")$
- $S = \text{Con}(\text{Tan}(\text{"slope_degree"} * 0.01745) < 0.09, (10.8 * \sin(\text{"slope_degree"} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \sin(\text{"slope_degree"} * 0.01745) - 0.5))$

En dernier lieu, est obtenu le facteur LS à travers la multiplication du facteur L et S. Ci-dessus, sa distribution spatiale (carte du facteur LS):

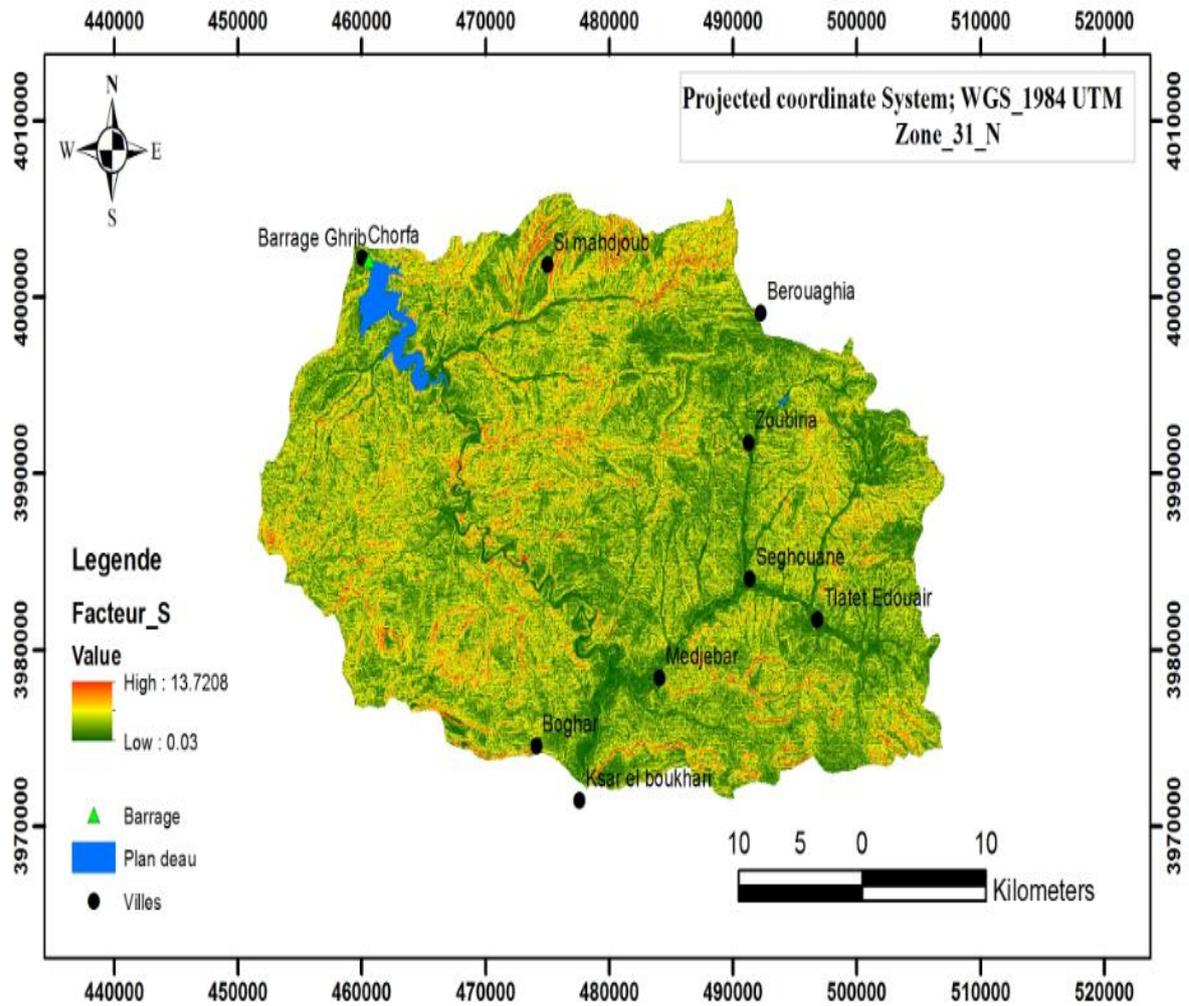


Figure 6.6. a. Carte de facteur S

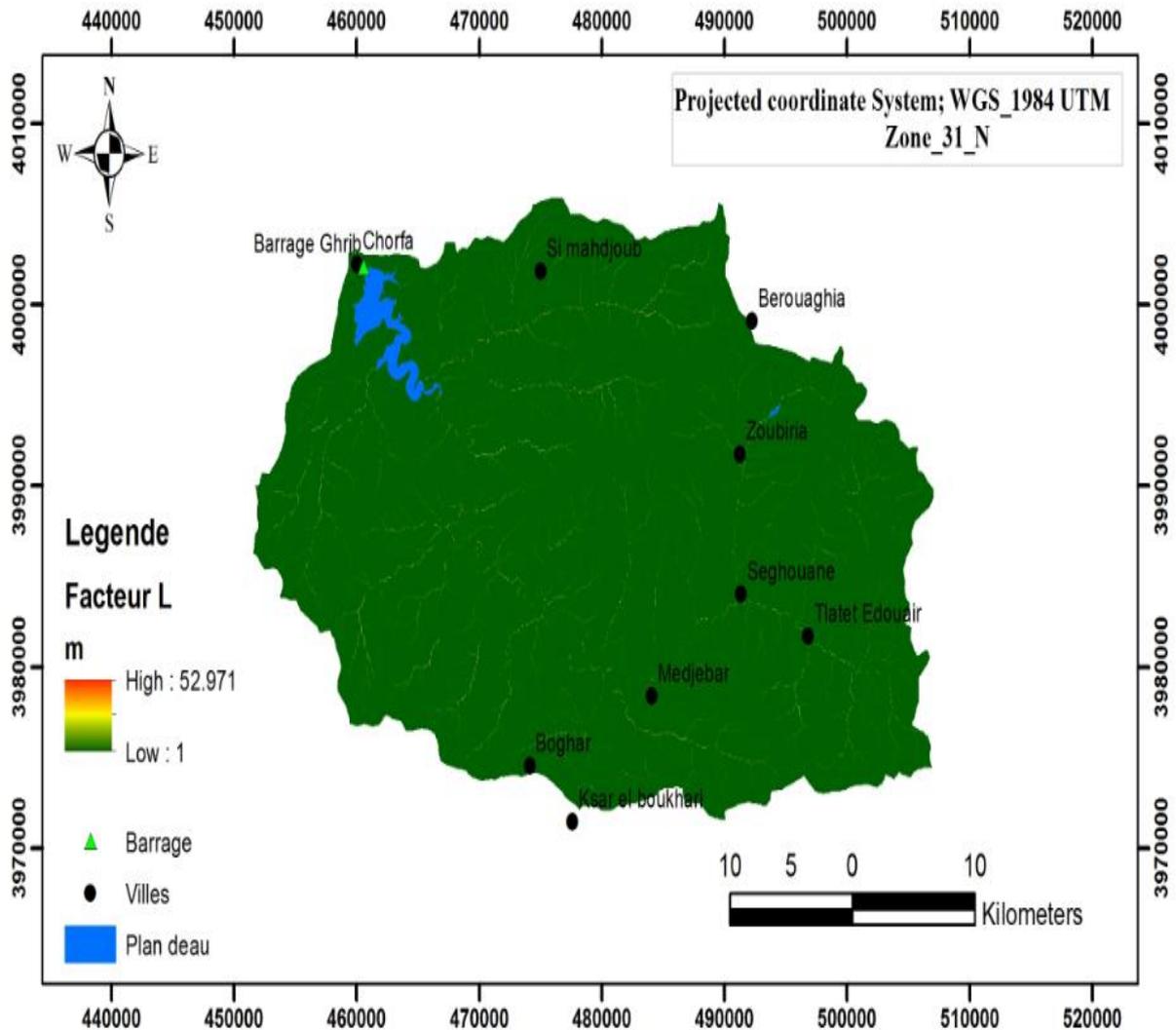


Figure 6.6. b. Carte de facteur L

Les valeurs obtenues pour le facteur LS ont été regroupées en trois classes de valeurs (figure 6.8). Elles ont été définies pour la cartographie de ce facteur à l'échelle du bassin du Cheliff-Ghrib. La longueur et l'inclinaison de pente influencent d'une manière importante le processus de l'érosion. Les valeurs de l'indice LS varient entre 0 et 5 qui sont considérées faibles occupent 80 % de la superficie du bassin, dans les zones qui sont naturellement attribuées à la plaine ainsi au lit du cours d'eau. Par conséquent, les 20% de la surface du bassin sont soumises à un grand risque d'érosion se trouvent dans le Nord, le Sud –Ouest du bassin versant.

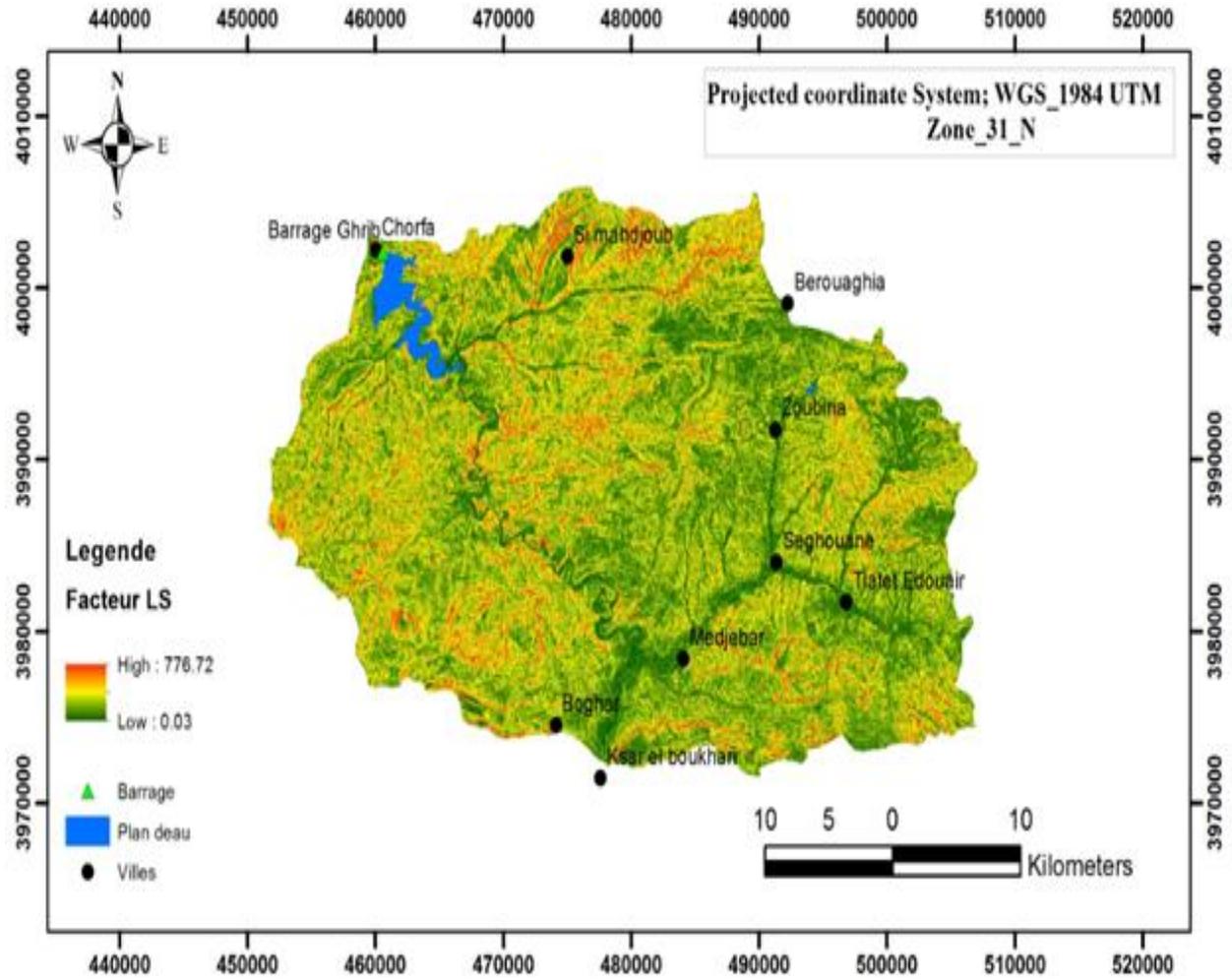


Figure 6.7. Carte du facteur LS

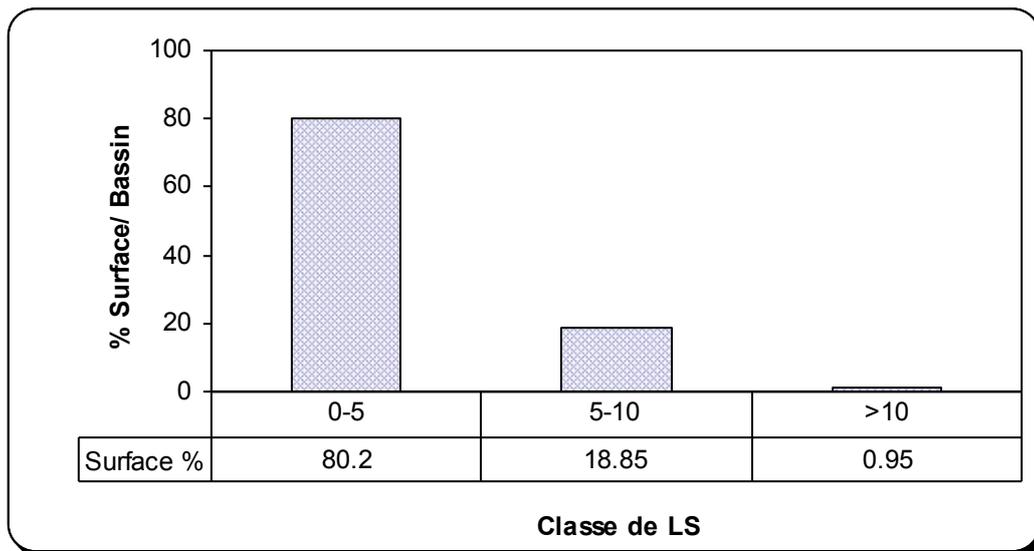


Figure 6.8. Distribution des classes du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib

6.3.3. Détermination du facteur d'érodibilité des sols K

L'érodibilité d'un sol se traduit par la résistance inhérente au détachement et au transport des particules par l'eau. Les paramètres intrinsèques du sol (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, texture) contribuent largement à influencer la sensibilité des sols à l'érosion (*Roose et Sarrailh, 1990*). Le facteur K est fonction de la texture, la teneur du sol en matière organique, et la perméabilité du sol. Ces données pour le bassin versant du Fiherenana ont été extraites à partir des échantillons de sols décrits dans la notice de la carte de sols au 1/ 100 000ième. Les pourcentages de matière organique (MO), de même que l'indice c (perméabilité du sol) et l'indice b (indice de structure du sol), n'étant pas fournis pour l'ensemble des échantillons, la méthode de Wischmeier et Smith proposée en 1978 (Équation 6.4) n'a pu être appliquée dans le cadre de cette étude.

$$K = 2.1 * M^{1.14} * 10^{-6} (12 - MO) + 0.0325 * (b - 2) + 0.025 * (c - 3) \quad (6.4)$$

Où M = (% sable fin + limon) * (100 - %argile)

MO = Matière organique

b = Indice de structure du sol

c = Perméabilité du sol

Le facteur K a donc été calculé à l'aide du tableau de correspondance de Stone et Hilborn permettant ainsi de déduire à partir de la texture les valeurs d'érodibilité des sols. Dans un premier temps, une typologie des sols du bassin versant a donc été effectuée. Puis les pourcentages de sable, de limon, d'argile et de matière organique ont ensuite été renseignés à partir des échantillons de la carte pédologique. Disposant d'un seul échantillon pour chaque type de sol, les valeurs ont été attribuées et généralisées aux classes de même type, sans prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle de K (type de végétation, pente). Ces valeurs ont permis par la suite de déterminer la texture des sols, au moyen du triangle des textures de l'United States Département of Agriculture (*Brown, 2003*). Une fois les textures déterminées, il est possible d'établir la correspondance entre la texture standard et le facteur K (*Stone et Hilborn, 2000*). Ces valeurs sont données en tonne/acres (Système US), et nécessitent d'être converties dans le système international, pour ceci un facteur de 0,1317 est multiplié à chaque valeur de K (Tableau 6.5). Bien que cette méthodologie apporte une approximation dans le calcul du facteur K, elle a cependant pour avantage de se prêter aux contraintes imposées par la zone d'étude.

Tableau 6.5. Variation de facteur K en fonction du type de sols (*Stone et Hilborn, 2000*).

Classe texturale	Teneur en matière organique		
	Moyenne	Moins de 2%	Plus de 2%
Argile	0.22	0.24	0.21
Loam argileux	0.30	0.33	0.28
Loam sableux gossier	0.07	-	0.07
Sable fin	0.08	0.09	0.06
Loam sableux fin	0.18	0.22	0.17
Argile lourde	0.17	0.19	0.15
Loam	0.30	0.34	0.26
Sable fin loameux	0.11	0.15	0.09
Sable loameux	0.04	0.05	0.04
Sable très fin loameux	0.39	0.44	0.25
Sable	0.02	0.03	0.01
Terre franche argileuse	0.20	-	0.20
Loam sableux	0.13	0.14	0.12
Loam limoneux	0.38	0.41	0.37
Agile limoneuse	0.26	0.27	0.26
Loam limono-argileux	0.32	0.35	0.30
Sable très fin	0.43	0.46	0.37
Loam sableux très fin	0.35	0.41	0.33

La figure (6.9) présente une cartographie du facteur d'érodibilité K pour le bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib.

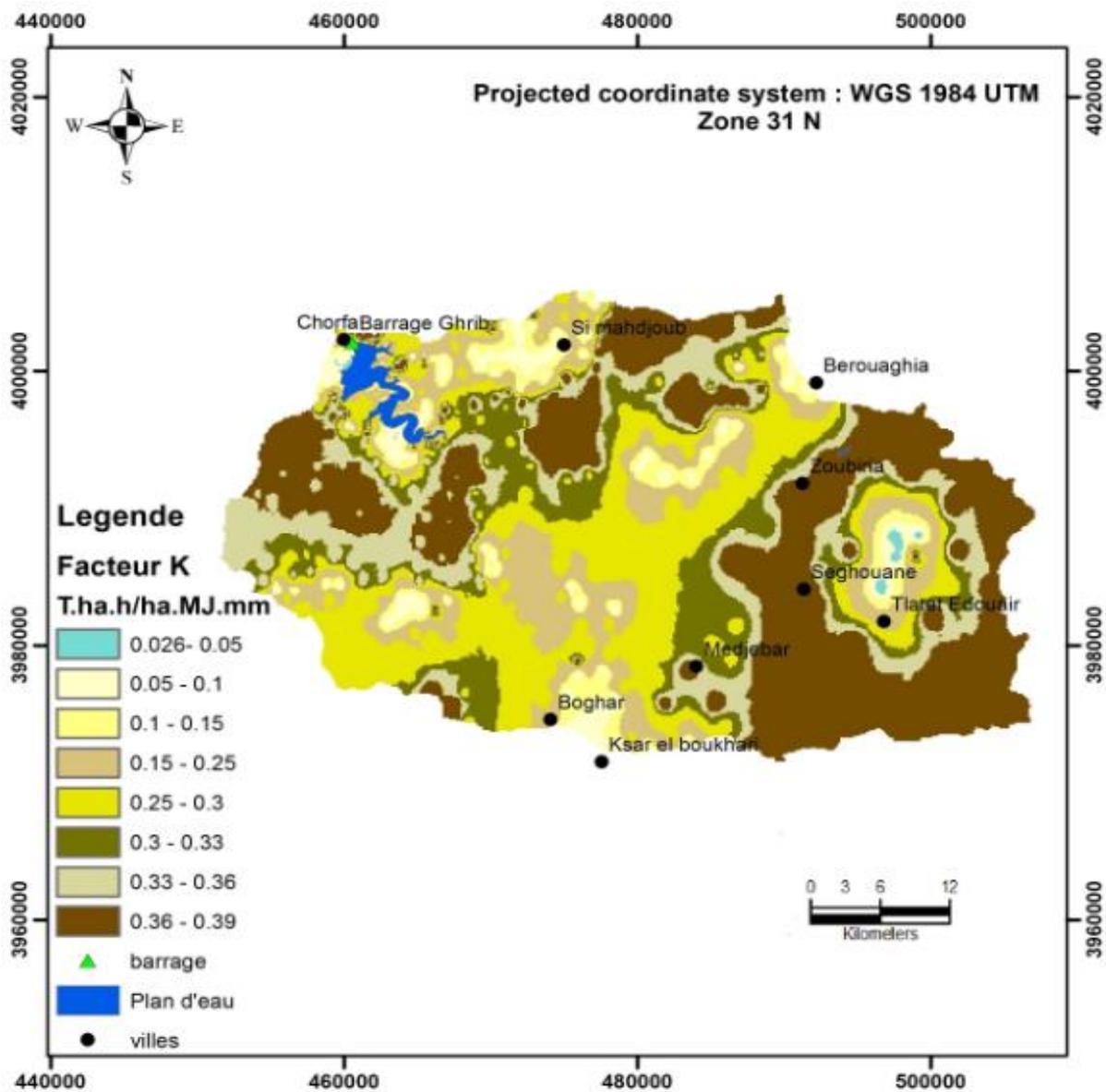


Figure 6.9. Carte de l'érodabilité des sols (K)

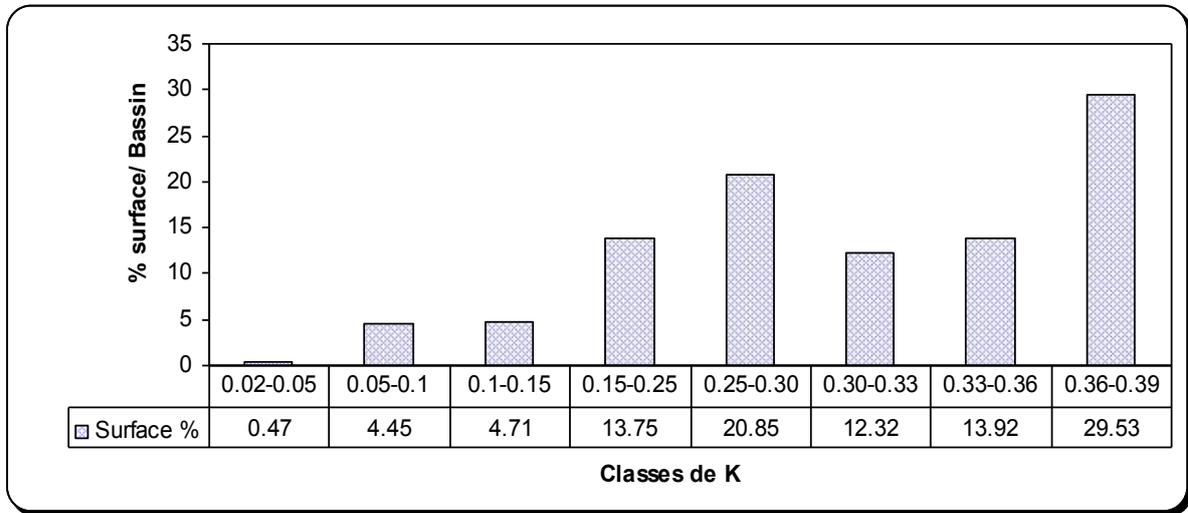


Figure 6.10. Fréquence des classes du facteur érodabilité K dans le bassin versant

La valeur moyenne du facteur d'érodabilité K atteint $0,21 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ sur l'ensemble du bassin versant. Les régions accusant une très faible érodabilité ($K < 0,05 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) sont localisées principalement à l'amont du bassin versant. Ces régions sont caractérisées par une lithologie imperméable regroupant les faciès Karstiques et sableux.

Les valeurs maximales d'érodabilité K atteint $0.39 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ dans les régions Sud-Est et à l'amont du barrage Ghrib.

6.3.4. Pratique anti-érosive (P)

Elle est le rapport de la perte de sol avec un soutien spécifique pratiqué sur les terres agricoles à la perte correspondante avec labour de pente parallèle (*Wischmeier et Smith, 1978*).

Le facteur P varie dans notre cas entre 0.55 et 1 (contour) selon les classes des pentes (Tableau 6.6).

Tableau 6.6. Le facteur P en fonction de la pente (*Shin, 1999*).

Pente (%)	contour	La culture en bande	terrassement
0-7	0.55	0.27	0.10
7-11.3	0.6	0.3	0.12
11.3-17.6	0.8	0.4	0.16
17.6-26.8	0.9	0.45	0.18
>26.8	1.00	0.5	0.20

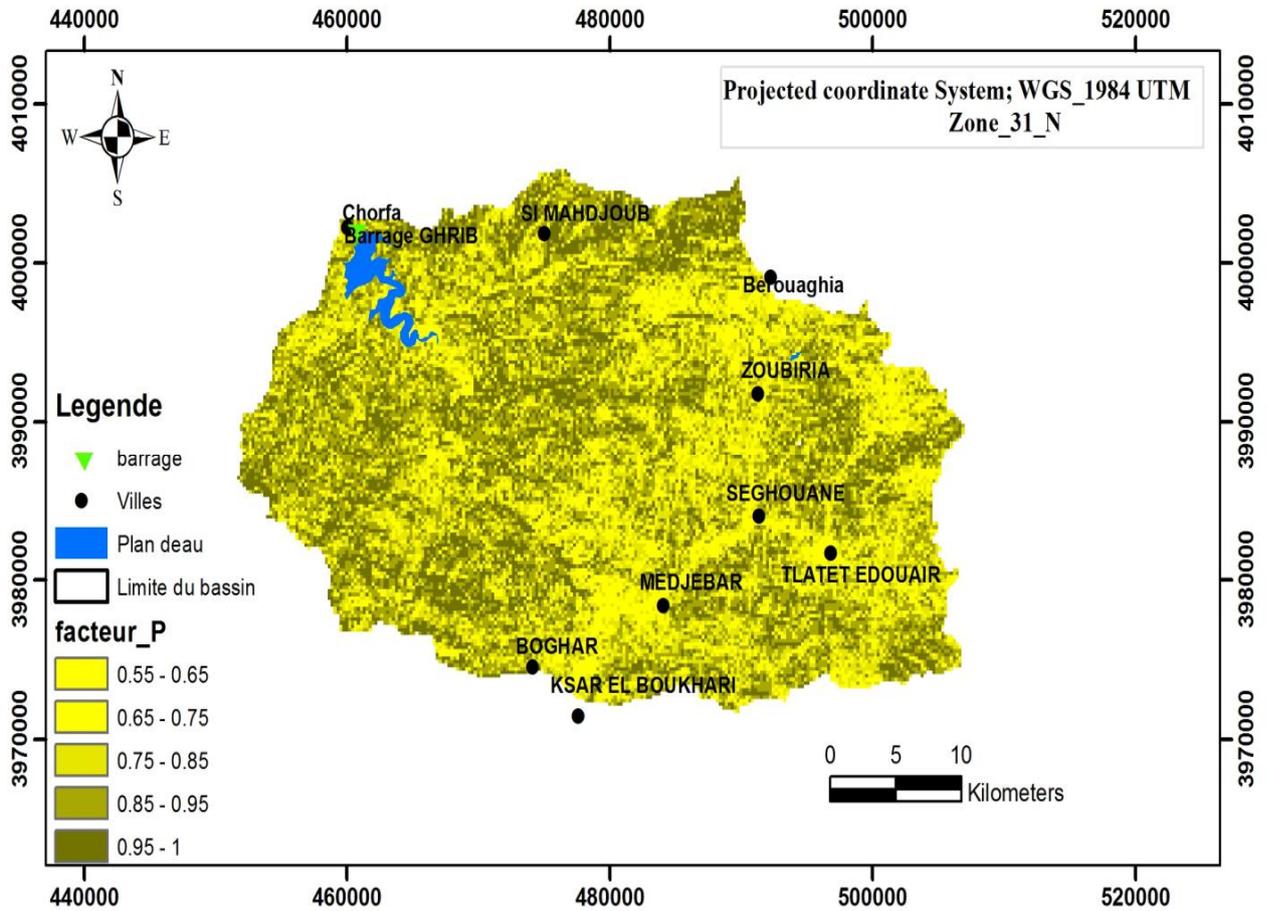


Figure.6.11. Carte du facteur anti-érosive P

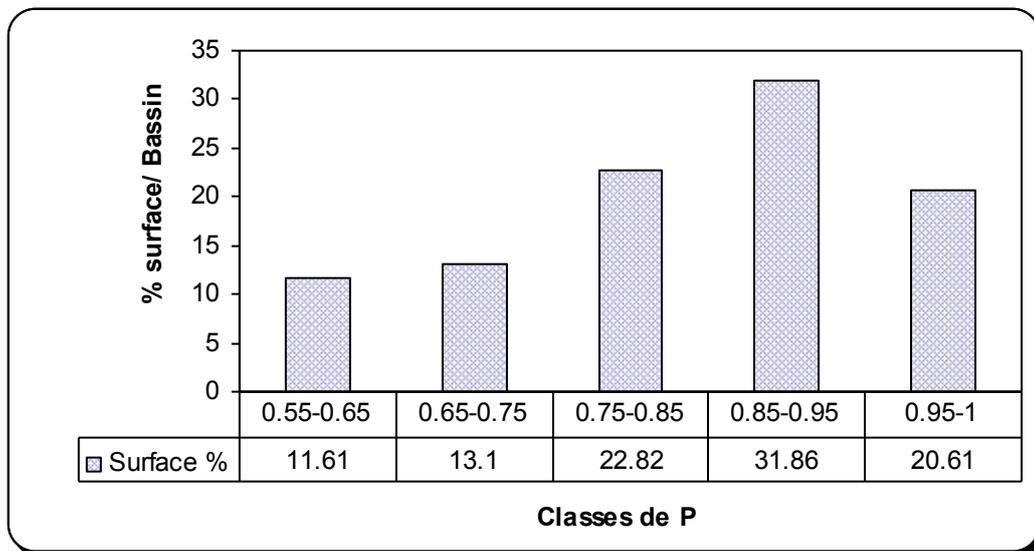


Figure 6.12. Fréquence des classes du facteur P dans le bassin versant

6.3.5. Occupation des sols (C)

L'occupation des terres et la végétation sont en rapport avec d'autres facteurs tels que: la topographie, la géologie, les sols, le climat et les caractéristiques hydrologiques. L'occupation du sol, sauf dans les endroits éloignés, est en rapport direct avec les activités humaines. Les activités qui ont la plus grande influence sur l'érosion des sols sont l'agriculture, l'élevage, les exploitations minières, l'abattage du bois, la construction de routes et l'urbanisation (*White, 1986*).

L'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib a été analysée en se basant sur l'interprétation d'images satellites Landsat-TM 5 du 24 avril 1985.

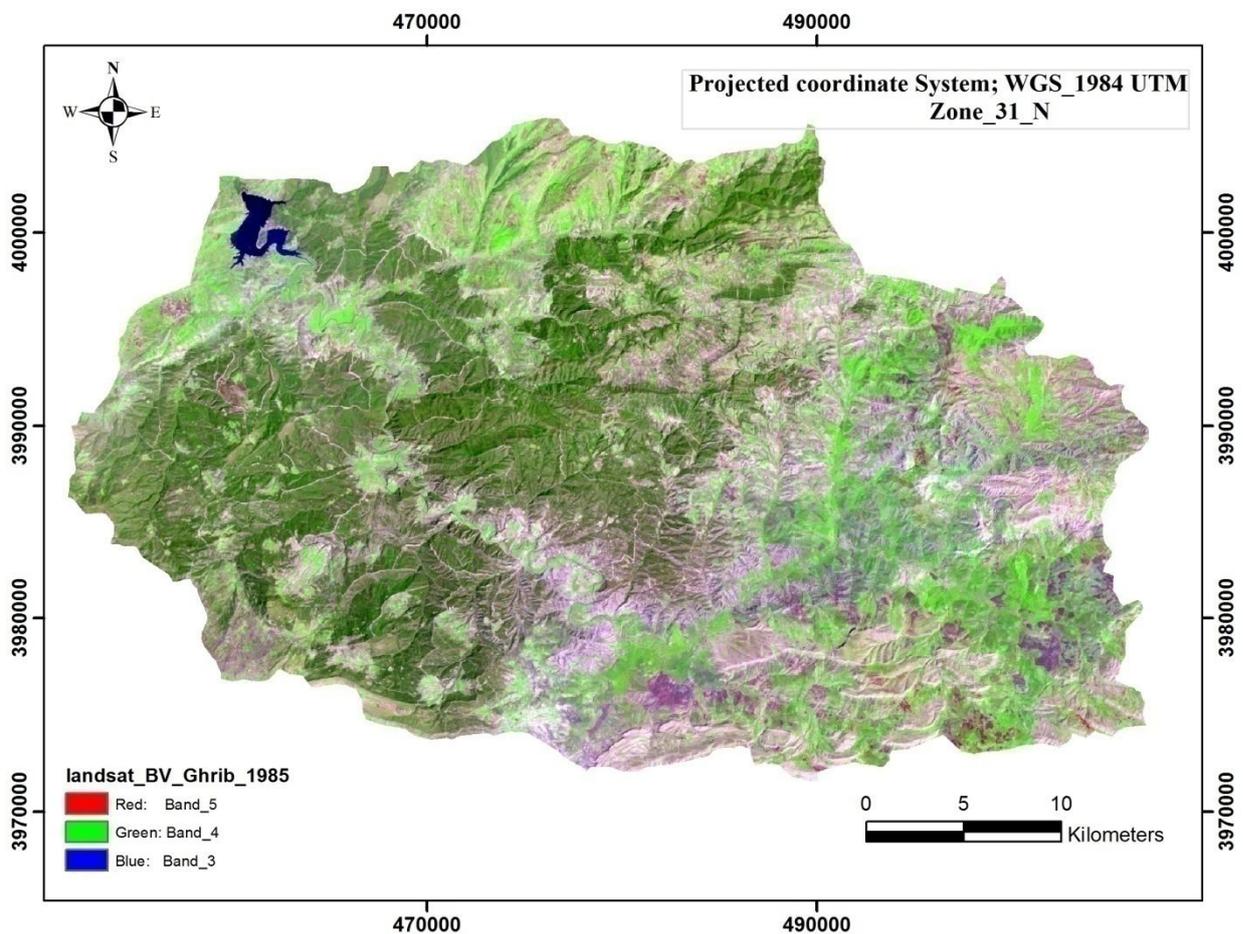


Figure 6.13. Image satellite Landsat-TM5 de 24 avril 1985 du bassin versant Cheliff-Ghrib

Le couvert végétal offre une grande diversité spatiale qui est influencée par des écarts climatiques induits par la proximité de la mer Méditerranée au Nord, d'une part, et le Sahara au Sud, d'autre part. L'activité agricole caractérise fortement la plus grande partie Ouest du bassin. Cette activité agricole concerne essentiellement la partie haute du bassin.

C'est pourquoi, l'approche basée sur le NDVI été plutôt utilisée pour obtenir des valeurs approximées du facteur C. En fait, La valeur du facteur C dépend de la nature de la végétation et du pourcentage du couvert végétal. Ce dernier peut être estimé par l'écart normalisé de l'indice de végétation (NDVI). La figure 6.14 présente les valeurs du NDVI dans le bassin versant et la figure (6.16) présente la relation entre le facteur C et le NDVI.

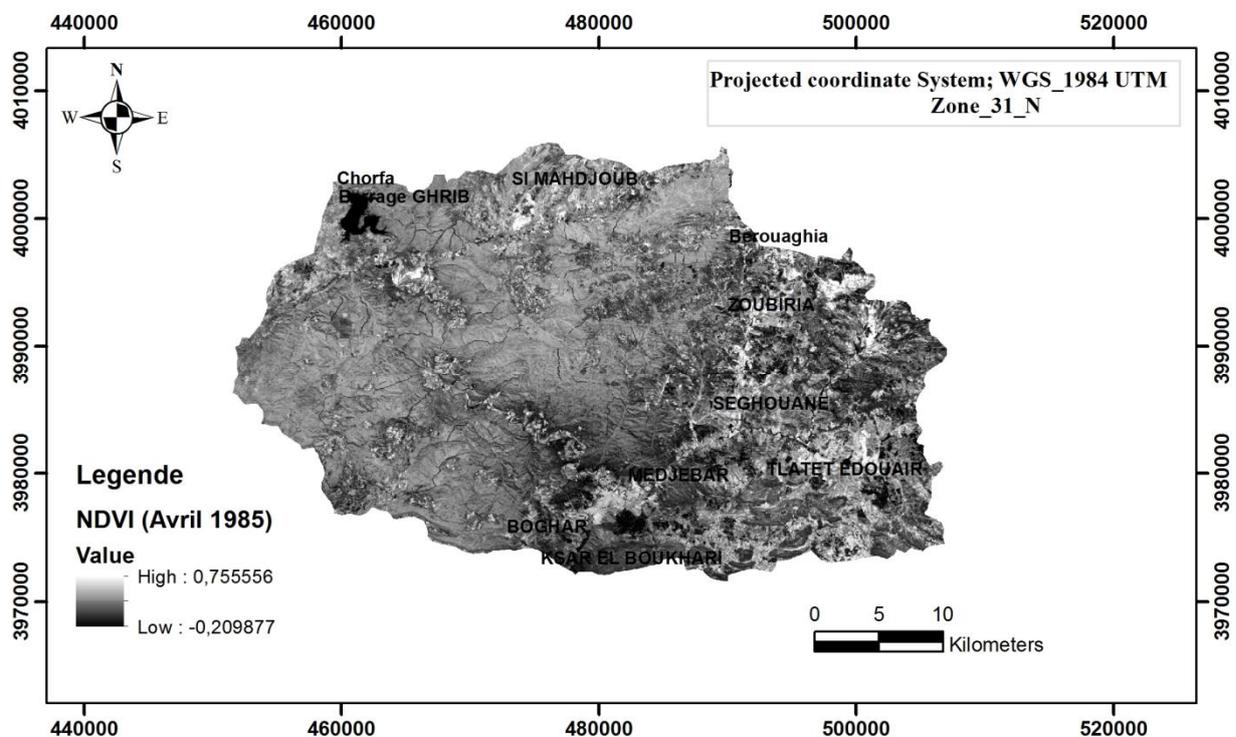


Figure 6.14. Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'imagette Landsat du 24 Avril 1985.

La classification de la végétation est réalisée suivant les conditions de seuillage suivantes:

$NDVI < -0.1$: Eau

$-0.1 < NDVI < 0.15$: Sol nu

$0.15 < NDVI < 0.25$: Végétation clairsemée

$0.25 < NDVI < 0.4$: Végétation moyennement dense

$NDVI > 0.4$: Végétation dense

Les classes d'occupation du sol ont été choisies selon la réflectance spectrale des objets.

La valeur maximale reflète le pourcentage le plus élevé de la couverture végétale et représente aussi le bon état de la végétation. Les régions sans végétation (sol nu et plans d'eau) ont une faible valeur du NDVI. Le NDVI intervient également pour assister la classification d'une image lors du choix de zones d'échantillonnage (Caloz et Collet, 2001).

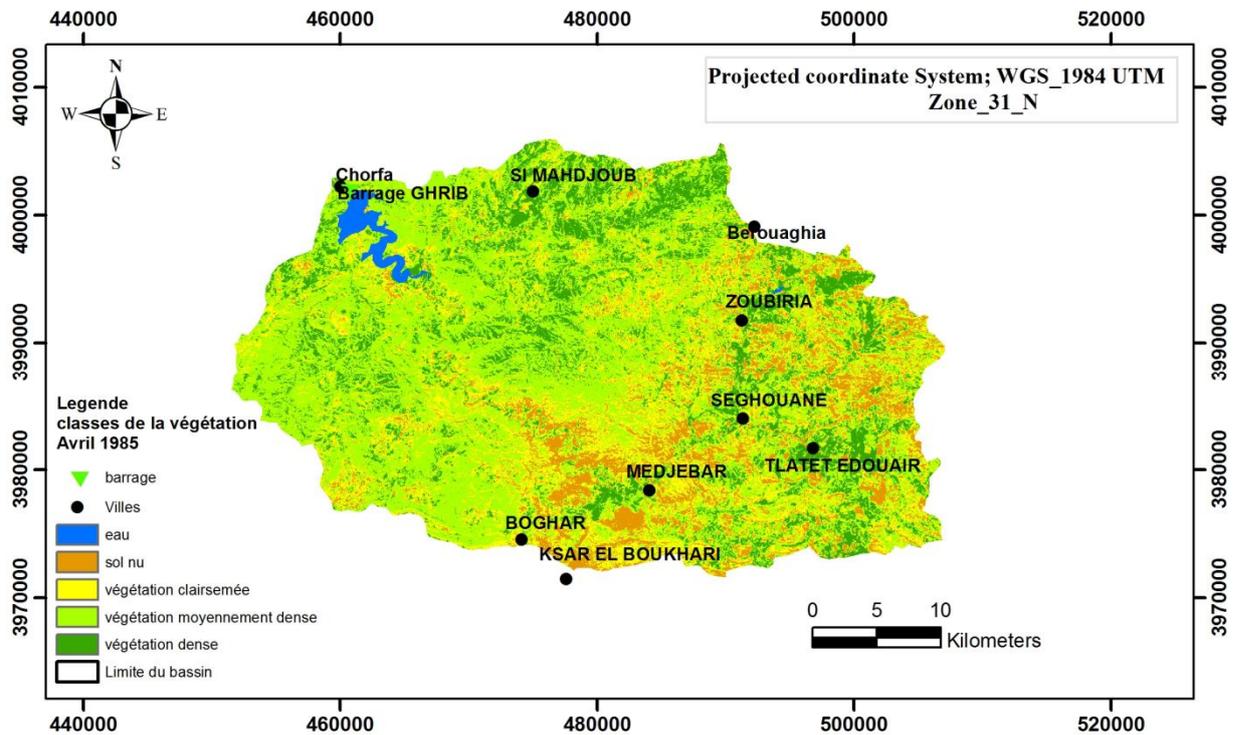


Figure 6.15. Cartes de la classification de l'occupation du sol dans la région d'étude.

Afin d'estimer les valeurs du facteur C dans la région d'étude, on a utilisé la régression entre deux valeurs extrêmes. Ces valeurs sont tirées du diagramme expérimental représenté dans la figure (6.16 (a)) (Gitas et al, 2009).

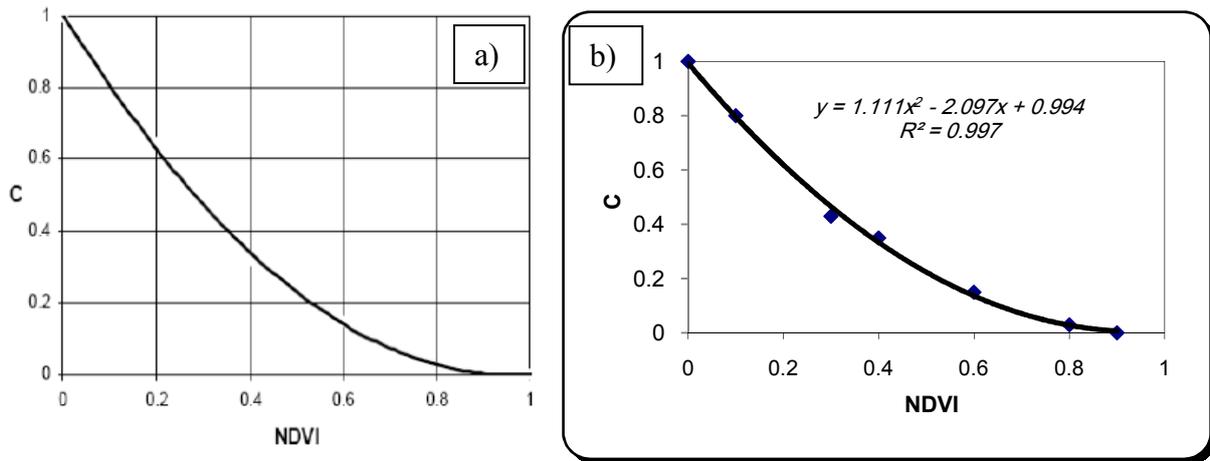


Figure 6.16. a) Diagramme expérimental d'estimation du facteur C de *Gitas et al, (2009)*,
 b) relation entre le facteur « C » et le NDVI.

La droite de régression trouvée est : facteur C = $1.1119 \cdot (\text{NDVI})^2 - 2.0976 \cdot (\text{NDVI}) + 0.9944$

La carte du facteur (C) est générée en utilisant l'équation de la droite de régression polynomiale trouvée à l'aide du module « Spatial analysis » d'ARC GIS 10.1.

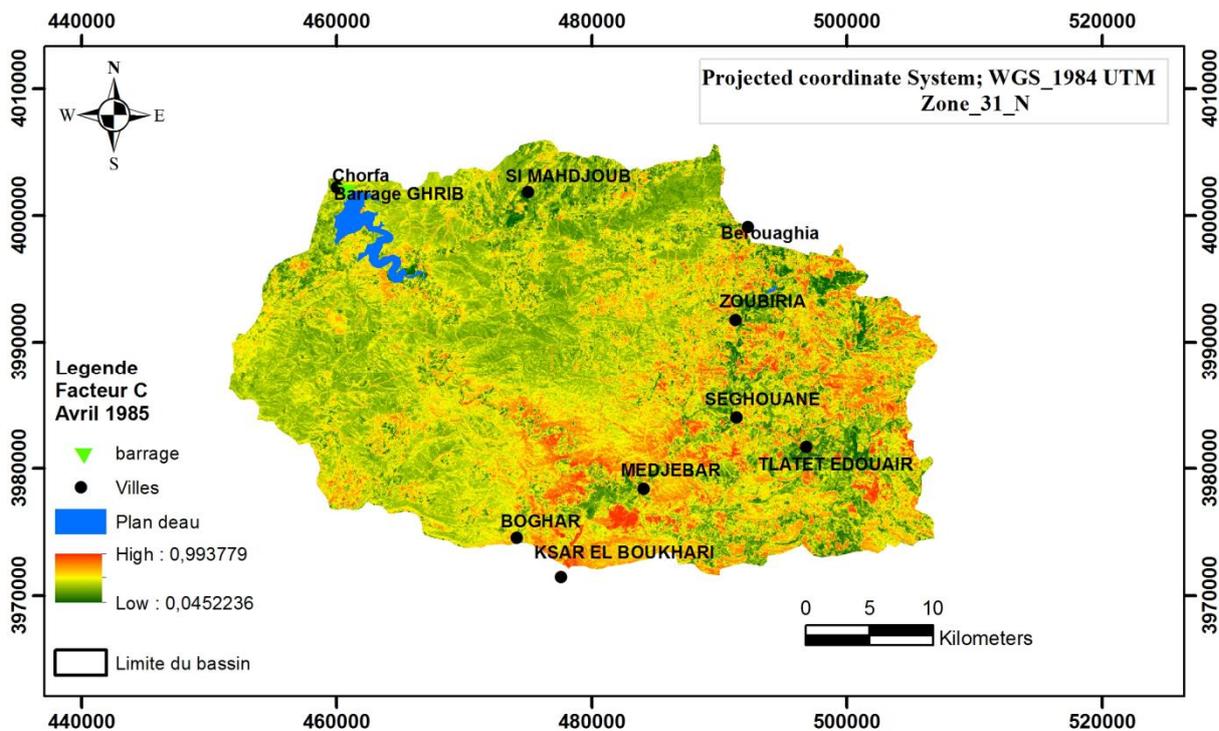


Figure 6.17. Carte du facteur C

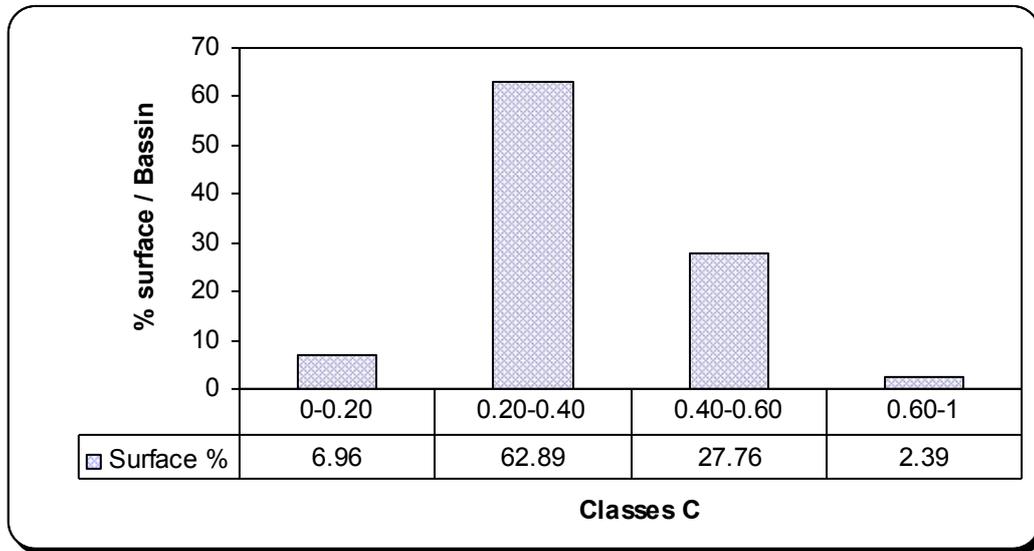


Figure 6.18. Fréquence des classes du facteur (C)

La majeure partie du bassin est caractérisée par des valeurs du facteur (C) entre 0.2 et 0.4. Ces zones sont des sols nus. La seconde classe en importance est constituée de valeurs variant de 0,4 à 0,6. Les régions dans lesquelles se situe cette seconde classe sont principalement au Sud et Sud- Est du bassin versant.

6.3.6. Risque érosif

La carte du risque érosif est déterminée en multipliant les couches de résolution représentant les paramètres de RUSLE en format matriciel. La figure (6.19) n'indique pas seulement la perte du sol de chaque pixel, mais fournit aussi des informations sur les zones critiques vis à vis du risque de la perte en sol.

Pour les besoins de lisibilité de la carte, ces différentes unités ont été regroupées en classes (Figure 6.20). La classification adoptée est une classification établie aux Etats-Unis fondée sur la tolérance des sols aux pertes. Elle suppose qu'en moyenne, les sols peuvent tolérer des pertes allant jusqu'à 7,41 t/ha/an tout en permettant un niveau élevé de production agricole. Au-delà de 20 t/ha/an, la perte est forte et les sols sont très dégradés ce qui peut nuire à la production.

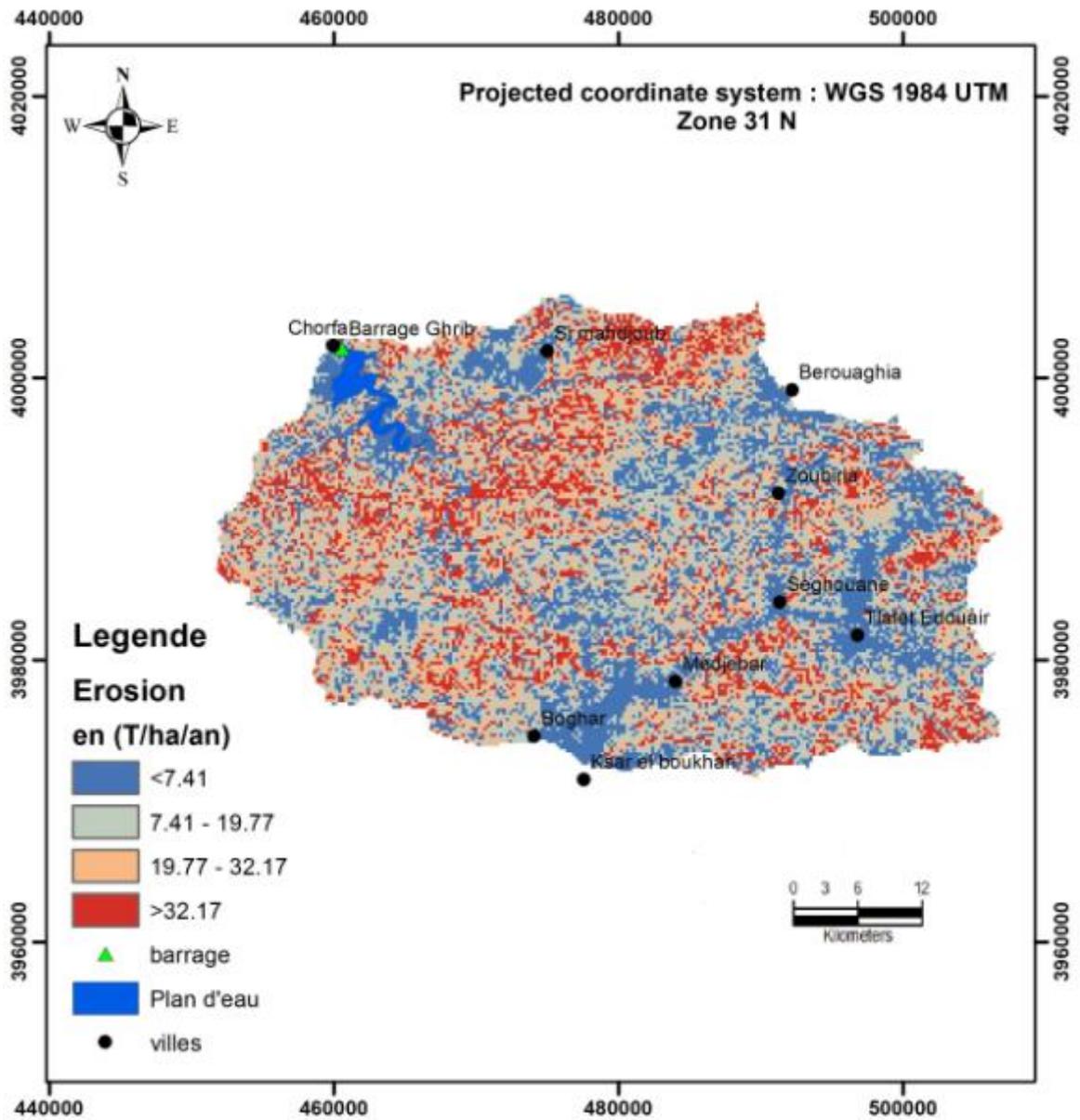


Figure 6.19. Carte d'érosion hydrique du bassin versant

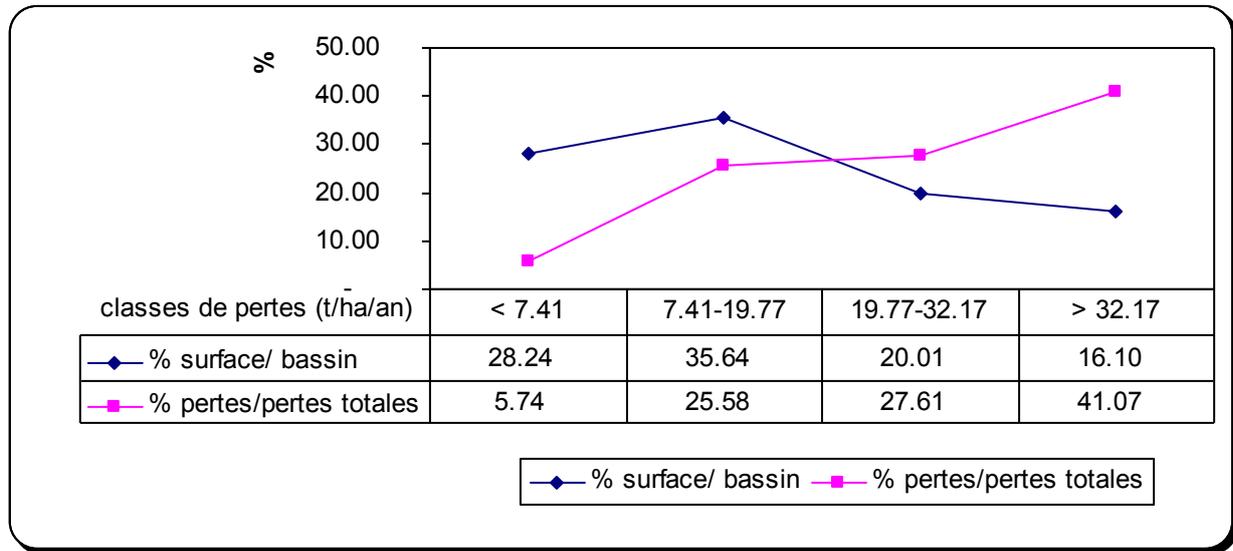


Figure 6.20. Répartition des pertes en sols dans le bassin versant Cheliff-Ghrib

Les valeurs faibles du risque érosif occupent la partie Nord et la partie Sud-ouest du bassin. Les terrains dans ces régions sont quasiment plates (pente inférieure à 10 %). Alors que les valeurs fortes se localisent dans la région Est (en amont du barrage de Ghrib) et la région Ouest du territoire. Le risque érosif est important dans ces régions à cause de la forte inclinaison des terrains mais aussi aux fortes valeurs du facteur R malgré l'existence d'une végétation dans certaines régions (facteur protecteur).

La carte d'érosion fournit des informations synthétiques et systématiques sur la nature, l'intensité et la répartition spatiale du phénomène, et permet donc d'identifier les zones les plus affectées et les types d'érosion dominants. Plus en détail, la mesure des phénomènes d'érosion dans certains milieux particulièrement intéressants apporte les données quantitatives et qualitatives précises, qui sont indispensables à la gestion intégrée et constituent une base

La perte moyenne par érosion hydrique en nappes pour l'ensemble du bassin versant est d'environ **18.31** t/ha/an. Les pertes maximales et minimales par unité sont respectivement de **226.96** t/ha/an et de **0.007** t/ha/an. Les pertes totales annuelles du bassin sont de **2524271.53** t/an. Les taux d'érosion diffèrent d'une zone à l'autre du bassin versant, selon l'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion. La répartition des pertes en terre n'est pas proportionnelle aux surfaces ; en effet, **16.10%** de la surface du bassin contribuent à **41 %** des pertes totales (Figure 6.20).

L'application du modèle USLE donne des résultats relativement très fiables qui peuvent apporter une aide précieuse, aux décideurs et aménageurs du territoire dans le but de simuler des scénarios d'évolution et par suite cibler les zones prioritaires qui nécessitent des actions de conservation et de lutte contre l'érosion.

Les résultats obtenus, sous format cartographique, permettent de cibler les zones qui nécessitent une action prioritaire pour une analyse à plus grande échelle, en vue de trouver les solutions appropriées pour lutter contre l'érosion et protéger le milieu naturel.

6.4. Analyse statistique de différents facteurs

Les différentes couches thématiques élaborées sont superposées dans le SIG. Ce dernier permet de faire une analyse spatiale de chaque couche.

Tableau 6.7. La valeur minimale et maximale de chaque facteur ainsi que la moyenne et l'écart-type.

Couches	Min	Max	Moyenne	Ecart Type
Risque érosif	0.007	226.96	18.31	0.21
Facteur R	40.78	85.57	64.03	0.287
Facteur K	0.026	0.39	0.296	0.087
Facteur C	0.04	0.99	0.35	0.115
Facteur LS	0.03	776.72	3.30	0.187
Facteur P	0.55	1	0.83	0.12

Tableau 6.8. Corrélation spatiale entre les facteurs.

	Risque érosif A	Facteur R	Facteur K	Facteur C	Facteur LS	Facteur P
Risque érosif A	1					
Facteur R	0,733	1				
Facteur K	0,787	0,815	1			
Facteur C	0,972	0,794	0,909	1		
Facteur LS	0,997	0,694	0,741	0,953	1	
Facteur P	0,695	0,998	0,813	0,767	0,652	1

D'après le tableau 6.7, on constate que la corrélation est très forte entre le risque érosif et les facteurs R, K, C, LS et P.

6.5. Les étapes de répartition du bassin en sous bassin par HEC-GEO-HMS

La délimitation des sous-bassins hydrographiques, effectuée par le module HEC GEO HMS, est utilisée pour découper le bassin versant par des zones selon le niveau de gravité de la perte des sols.

A partir du MNT, sont réalisées neuf opérations qui permettent d'obtenir la schématisation du modèle de bassin :

1. Correction du MNT par un remplissage des cuvettes (**Fill Sinks**) afin de pouvoir déterminer le sens d'écoulement dans l'étape suivante.
2. Sens de l'écoulement (**Flow direction**). Lors de cette étape la direction de chaque cellule est définie selon les 8 directions possibles (nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest, nord ouest).
3. Accumulation de l'écoulement (**Flow Accumulation**). Cette étape détermine le nombre de cellules ascendantes s'écoulant dans une cellule donnée.
4. Définition du cours d'eau (**Stream Definition**). Cette étape classe toutes les cellules dont l'accumulation d'écoulement est plus grande qu'un seuil défini par l'utilisateur.
5. Segmentation du cours d'eau (**Stream Segmentation**). Cette étape divise les cours d'eau en des segments. Les segments du cours d'eau sont des sections d'un cours d'eau qui relient deux jonctions successives ou une jonction et un exutoire, ou une jonction et une diffluence.
6. Délimitation en sous-bassins (**Catchment Grid Delineation**). Cette étape trace les limites des sous-bassins pour chaque segment du cours d'eau.
7. Polygones des sous-bassins (**Catchment Polygone Processing**). Cette étape convertit la représentation en grille des sous-bassins en représentation vectorielle.
8. Traitement des segments du cours d'eau (**Drainage Line Processing**). Cette étape convertit les ruisseaux de la représentation en grille en représentation vectorielle.
9. Agrégation des lignes de partage (**Adjoint Catchment Processing**). Cette étape agrège les sous-bassins à chaque confluence de ruisseaux.

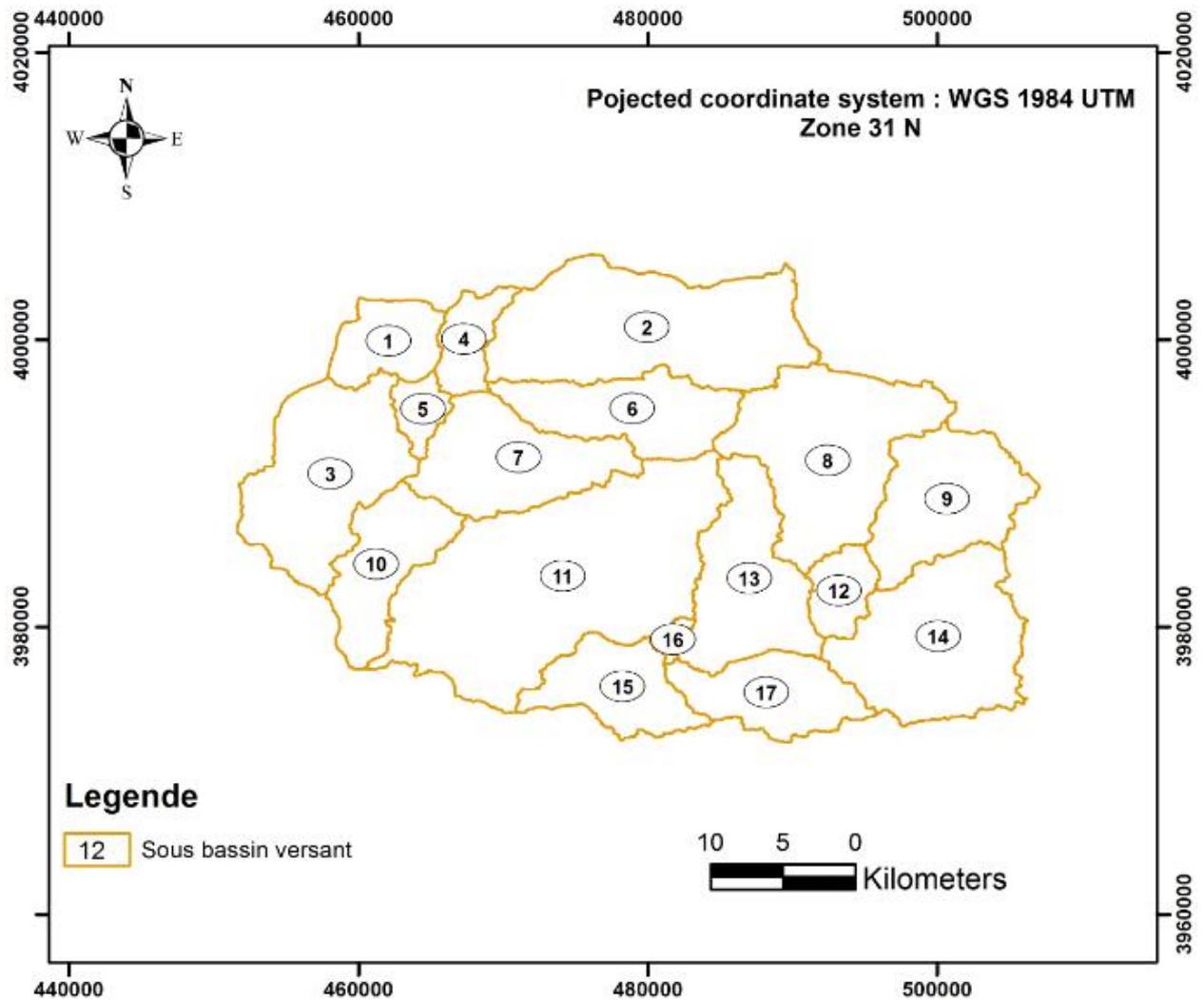


Figure 6.21. Répartition du bassin en sous bassin par HEC-GEO HMS

La valeur moyenne de chaque facteur est aussi estimée par sous bassin. La figure (6.27) montre le risque d'érosion actuel par sous bassin. La carte a été réalisée en calculant, pour chaque sous bassin, la moyenne de l'érosion prédite. De façon similaire, la moyenne des facteurs R, K, C et LS est déterminée.

Les sous bassins présentant de fortes valeurs du risque érosif sont situés dans le Nord, centre, Sud et Sud-est du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib en amont du barrage Ghrib. Les faibles valeurs s'enregistrent dans les sous bassins 1 et 15 qui se trouvent aux niveaux de barrage et à l'amont du bassin versant.

Tableau 6.9. Les valeurs moyenne du risque érosif et des facteurs R, K, LS et C par sous bassin versant.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N° SB	superficie en (km ²)	E _{moy} Erosion moyen (t/ha/an)	Facteur (R)	Facteur (K)	Facteur (LS)	Facteur (C)	Facteur (P)	E _c Erosion estimée	Diff (E _{moy} et E _c) %
1	40.54	12.11	71.24	0.18	2.95	0.39	0.83	12.44	-2.78
2	158.38	21.38	78.67	0.29	3.82	0.29	0.86	21.10	1.31
3	114.60	21.74	63.65	0.34	3.65	0.31	0.87	21.07	3.11
4	24.88	17.37	78.49	0.22	3.71	0.32	0.86	17.21	0.90
5	15.09	7.54	73.92	0.13	2.34	0.35	0.76	5.93	21.26
6	68.46	21.12	76.34	0.28	3.50	0.32	0.85	20.73	1.83
7	82.00	26.28	76.13	0.33	3.85	0.31	0.87	25.55	2.76
8	129.70	16.24	60.53	0.33	2.74	0.35	0.80	15.37	5.35
9	85.54	15.89	53.43	0.27	3.15	0.39	0.83	15.06	5.23
10	62.90	21.70	64.56	0.30	3.88	0.32	0.87	21.58	0.52
11	245.02	17.95	65.79	0.26	3.43	0.36	0.84	17.86	0.53
12	23.65	16.25	52.74	0.32	2.99	0.37	0.82	15.27	6.00
13	86.80	18.28	57.17	0.34	2.78	0.40	0.80	17.11	6.40
14	121.3	17.34	52.56	0.36	2.98	0.35	0.81	15.86	8.54
15	56.08	9.39	54.93	0.19	2.54	0.42	0.78	8.90	5.22
16	4.60	9.41	56.42	0.30	1.83	0.36	0.73	8.13	13.62
17	59.09	18.90	46.88	0.36	3.26	0.40	0.84	18.50	2.11

-colonne 1 : numéro du sous bassin versant ;

-colonne 2 : superficie de chaque sous bassin versant ;

-colonne 3 : les valeurs d'érosion moyen de chaque sous bassin tirées à partir de la figure 6.27

-colonne 4 : Valeurs de R de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 6.26

-colonne 5 : Valeurs de K de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 6.23

-colonne 6 : Valeurs de LS de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 6.24

-colonne 7 : Valeurs de C de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 6.22

-colonne 8 : Valeurs de P de chaque sous bassin tirée à partir de la figure 6.25

-colonne 9 : Erosion estimée (E_c) par la multiplication des valeurs moyenne de R, K, LS et C.

-colonne 10 : Différence entre l'érosion moyen de chaque sous bassin E_{moy} et l'érosion estimée par la multiplication des valeurs moyenne de R, K, LS et C. (E_c) en (%).

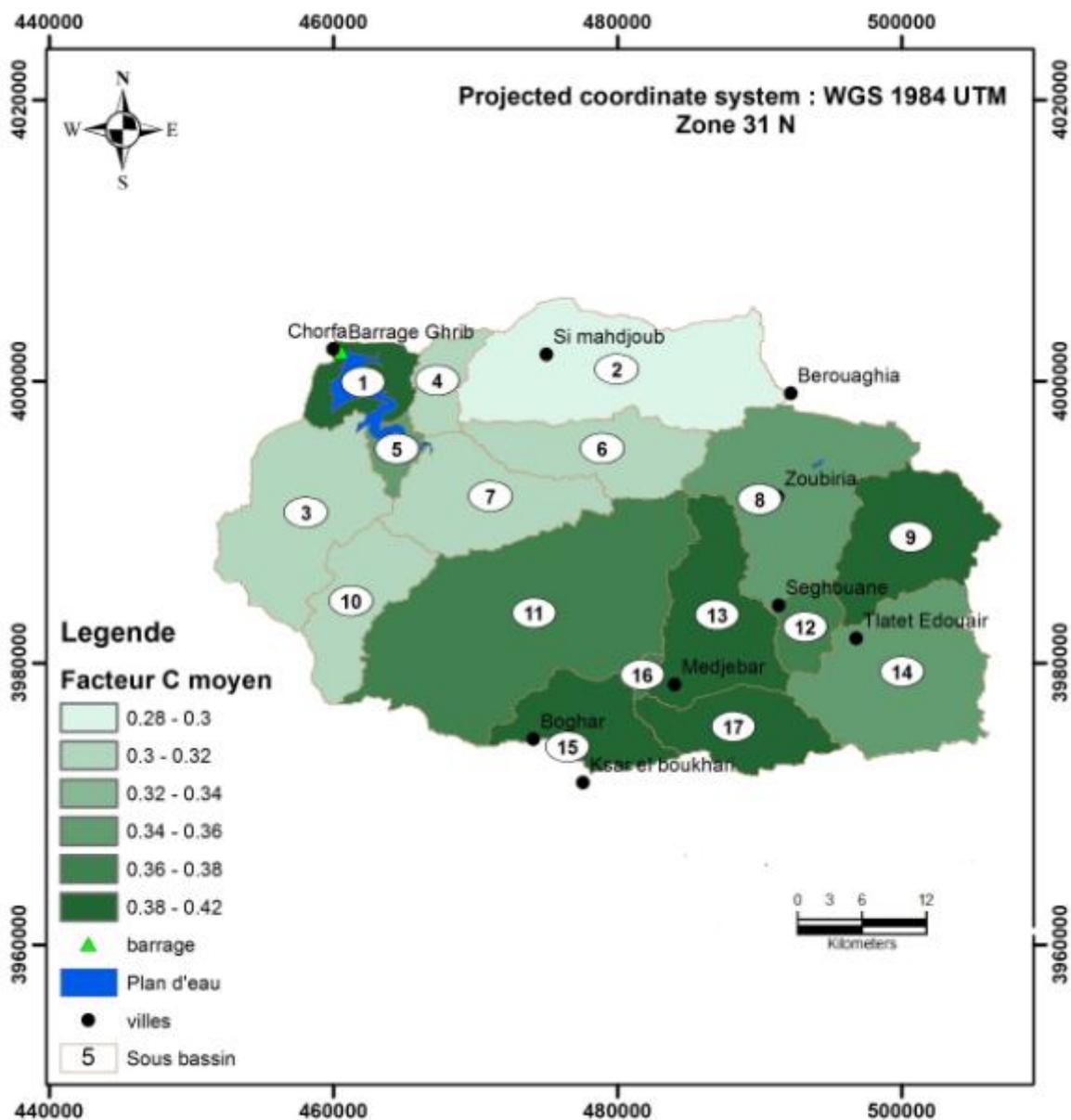


Figure 6.22. Les valeurs moyennes du facteur (C) par sous bassin versant.

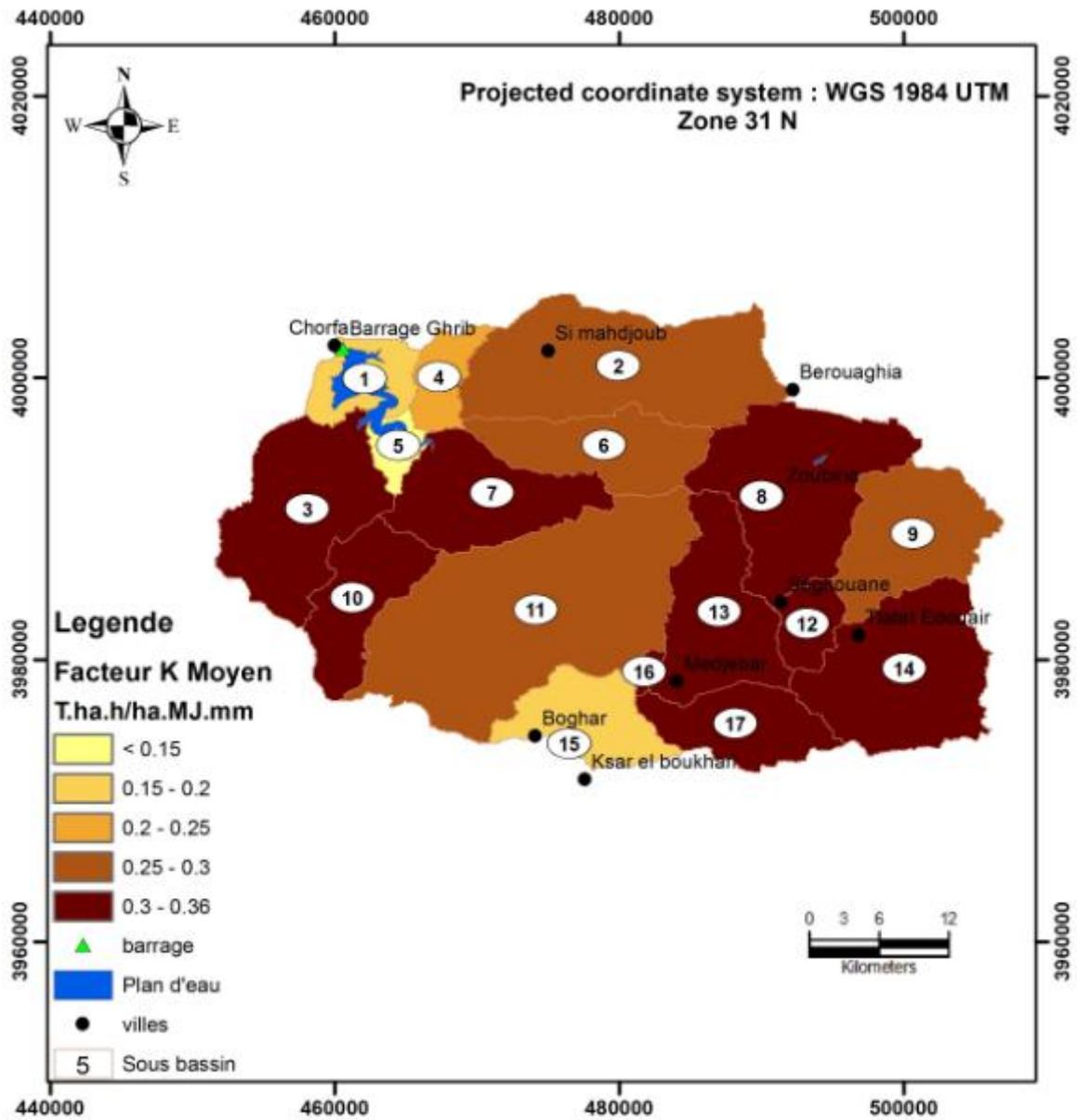


Figure 6.23. Les valeurs moyennes du facteur (K) par sous bassin versant.

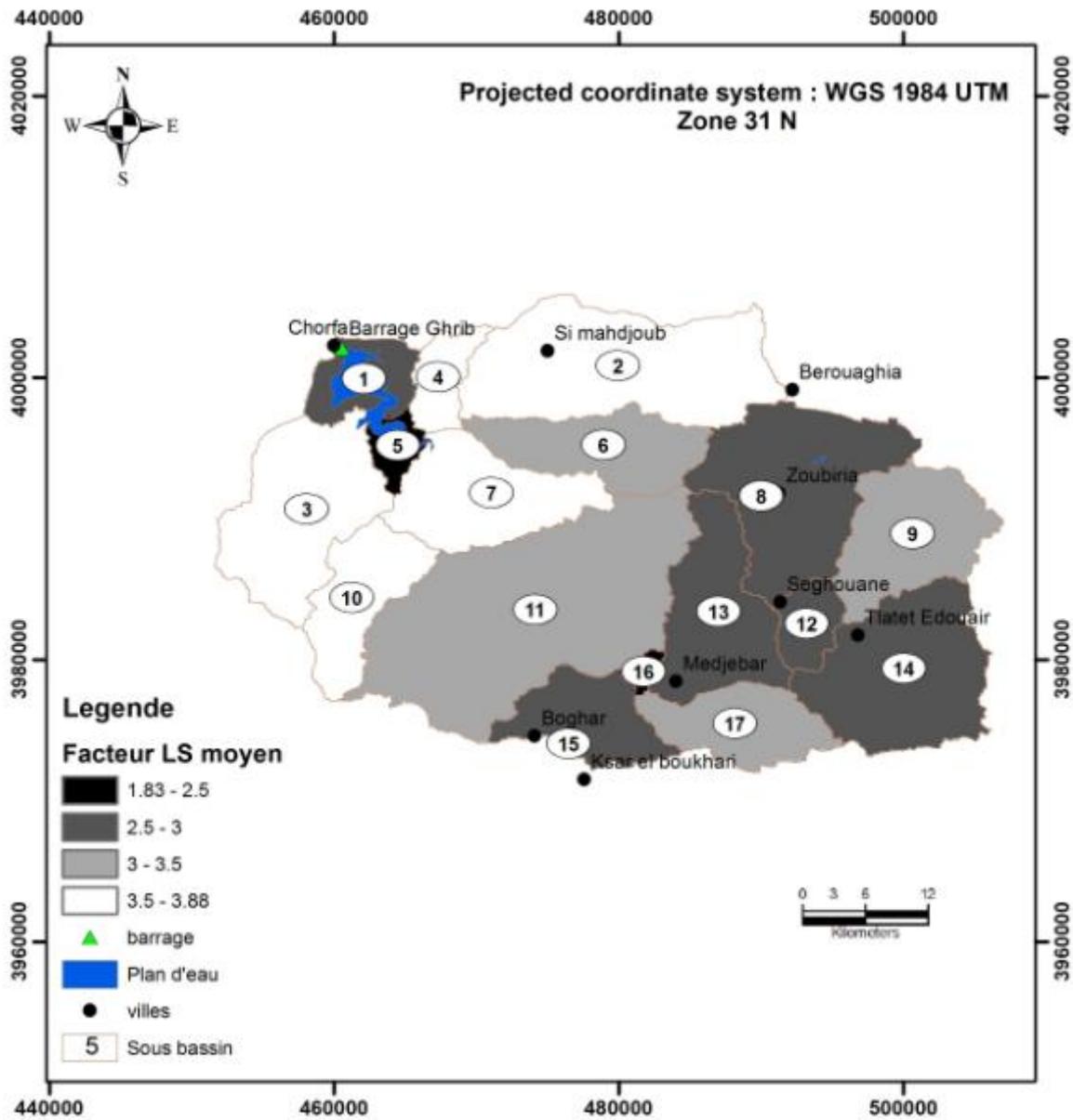


Figure 6.24. Les valeurs moyennes du facteur (LS) par sous bassin versant.

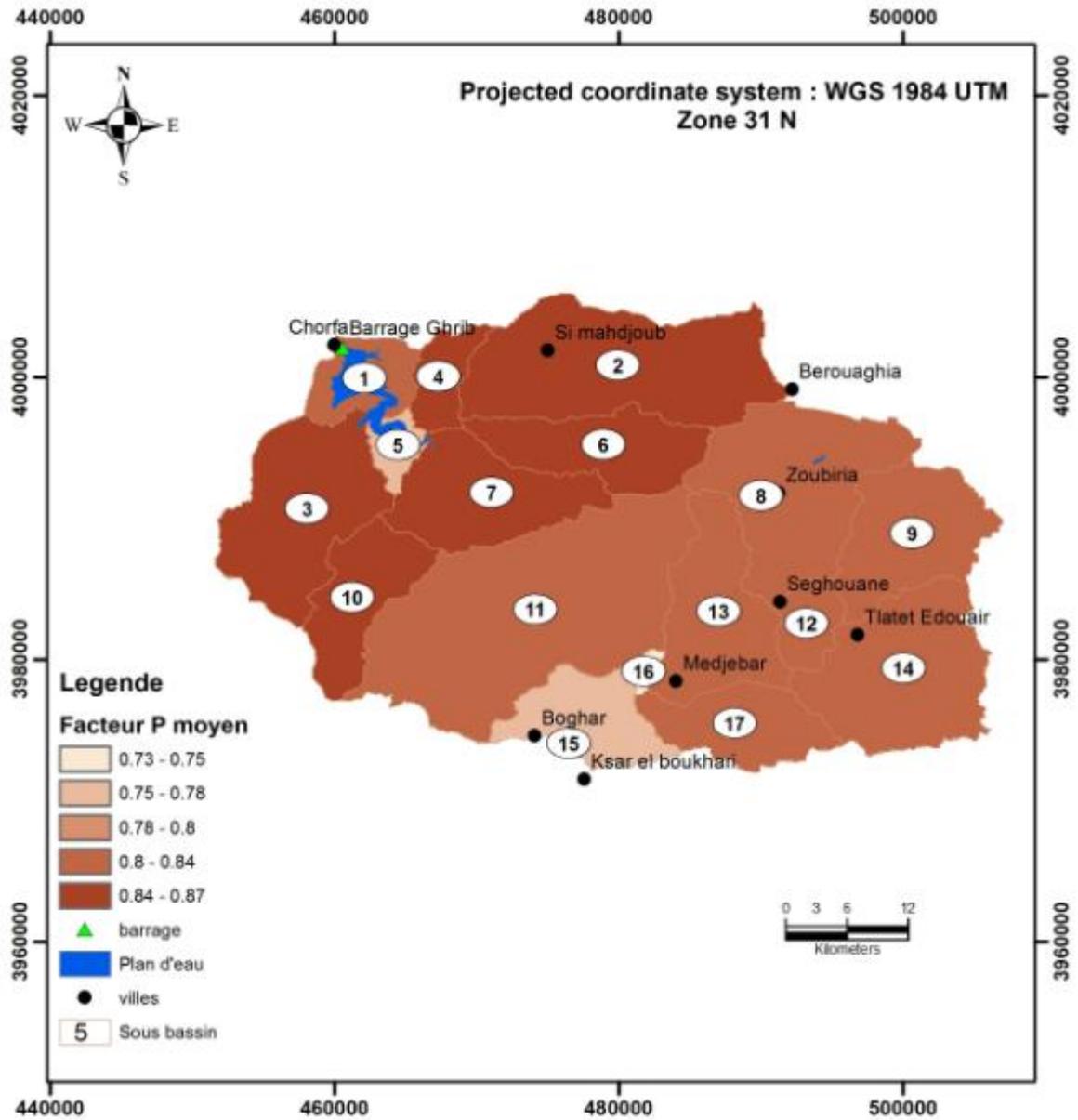


Figure 6.25. Les valeurs moyennes du facteur (P) par sous bassin versant.

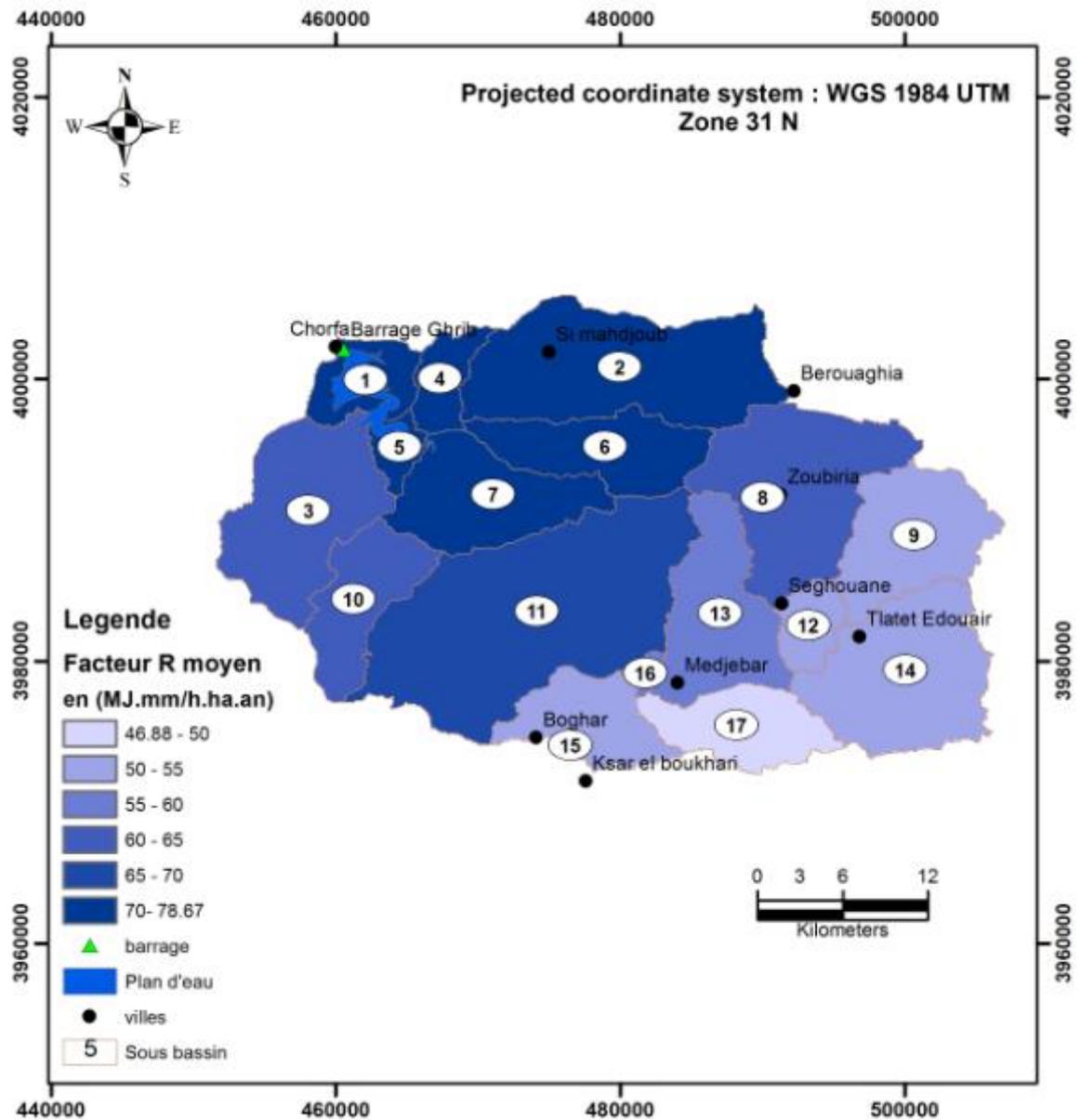


Figure 6.26. Les valeurs moyennes du facteur (R) par sous bassin versant.

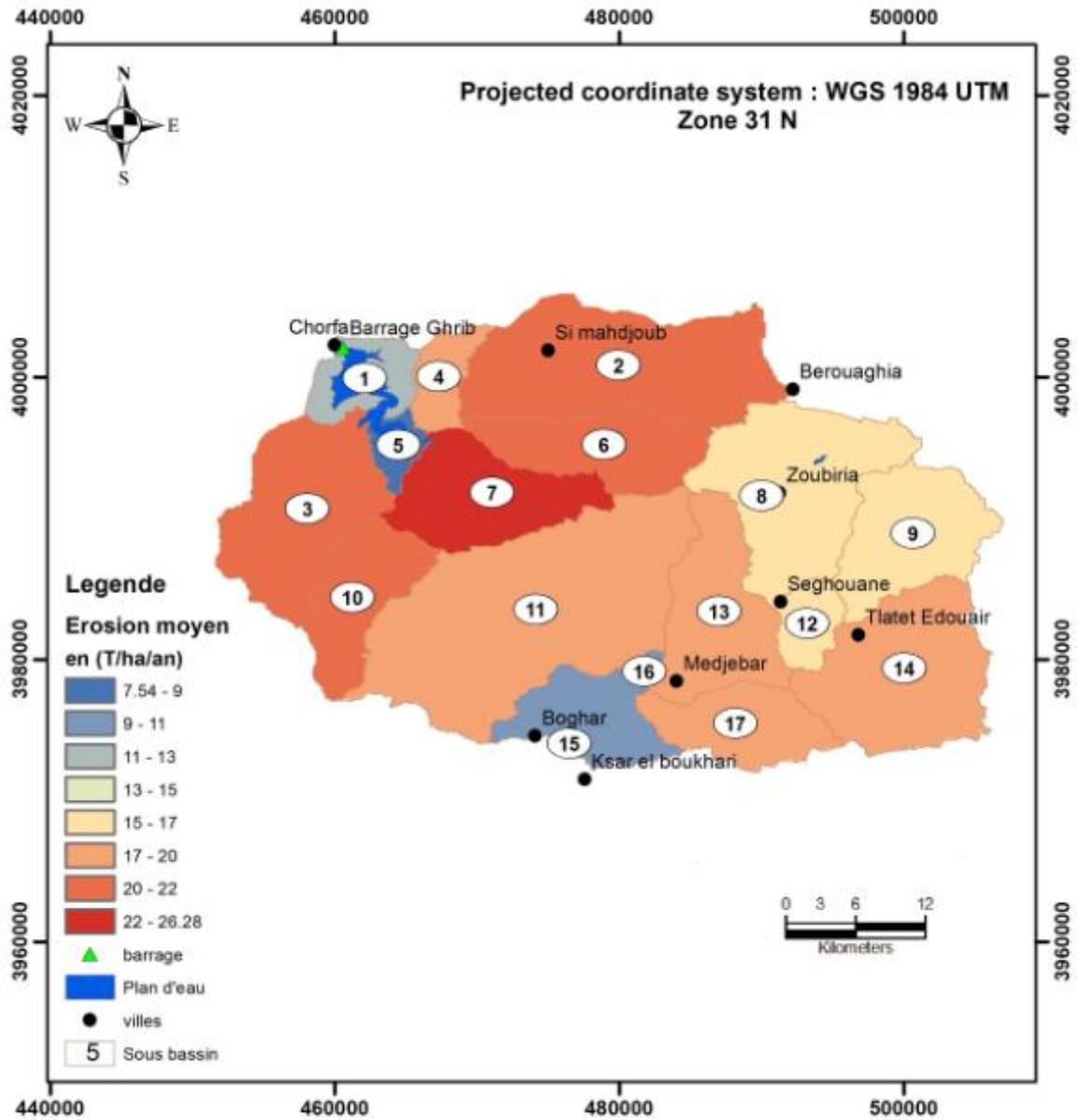


Figure 6.27. Les valeurs moyennes du risque érosif en t/ha/an par sous bassin versant.

6.6. Comparaison avec les études réalisées sur le bassin versant de Cheliff

D'après l'étude de *Tixeront en 1960*, il définit trois zones :

- une zone où la pluie annuelle est inférieure à 300 mm, elle est insuffisante pour causer une érosion appréciable,
- une zone où la pluie annuelle est comprise entre 300 et 700 mm, l'érosion spécifique est très active ($E_s > 12 \text{ t/ha/} .\text{an}$).
- une zone où la pluie annuelle est supérieure à 700mm qui bénéficie d'un couvert végétal protecteur, l'érosion spécifique ($E_s < 350 \text{ t/km}^2 .\text{an}$).

Il admet que lorsque la pluie annuelle dépasse un certain taux, l'effet du substratum peut se trouver masquer par l'effet de la végétation qui assure une excellente protection quelle que soit la nature du terrain.

Selon l'étude de *Zaibek en 2008*, les valeurs de l'érosion spécifique fluctuent entre 10 et 30 t/ha/an dans le bassin versant de l'Oued Cheliff.

D'après *Bouaichi et Touaibia en 2006*, les principales zones productrices de sédiments se situent dans le haut et moyen Cheliff, ainsi que dans la partie sud de l'Oued Mina. Par l'analyse multivariée des données relevées dans les tronçons du réseau hydrographique des petits bassins versants de l'Oued Mina.

Kouri, 1993 a constaté que les différentes textures des marnes évoluent par glissement de terrain et par glissement pelliculaire et d'autres variables explicatives déterminant l'érosion linéaire, à savoir, la pente, le couvert végétal et la morphologie des parois.

Le modèle utilisé permet d'estimer l'érosion en nappe et en rigole et permet pas de calculer d'autre type d'érosion comme le ravinement. Or, certains chercheurs ont constaté que l'érosion par ravinement est très intense par rapport à l'érosion en nappe (*Kouri, 1993, Gomer, 1994, Touiabia et al, 1999*).

Dans notre zone d'étude l'érosion spécifique moyenne déterminée par USEL est 18,31 t/ha/an, et par les modèles statistiques pour différents l'échelle temporelle (mensuelle, saisonnières) varient entre 13.55 t/ha/an à 31.31 t/ha/an. Donc les résultats de la quantification du transport solide et l'érosion semblent très cohérents avec les mesures directes de l'envasement dans la retenue du barrage Ghrib et avec les études déjà réalisées sur le bassin versant de Cheliff.

6.7. Conclusion

Le problème de l'érosion des sols abordé au travers de l'équation de *Wischmeier & Smith* s'applique aisément au Système d'Information Géographique par la comptabilité entre RUSLE et l'algèbre de carte (*Khali Issa & al, 2016*). Le SIG permet de gérer d'une façon rationnelle, une multitude de données, à référence spatiale, relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols, ce qui nous a permis de conclure que ces facteurs principaux (R, LS, K, C, P) influencent l'érosion hydrique.

L'application du modèle RUSLE donne des résultats relativement très fiables qui peuvent apporter une aide précieuse, à coûts très bas, aux décideurs et aménageurs du territoire dans le but de simuler des scénarios d'évolution, et par suite cibler les zones prioritaires qui nécessitent des actions de conservation et de lutte contre l'érosion.

Chapitre 7

L'envasement du barrage Ghrib et les moyens de lutte contre l'érosion hydrique

Chapitre 7. Envasement du barrage Ghrib et les moyens de lutte contre l'érosion hydrique

7.1. Introduction

L'envasement est provoqué par l'homme suite à la réalisation des barrages dans les cours d'eau. En effet, ces ouvrages freinent l'écoulement et accélèrent les dépôts sédimentaires. Plusieurs travaux indiquent que les barrages de la région du Maghreb sont menacés par ce phénomène de disparaître si des dispositions de lutte ne sont pas prises (*Remini, 2001*).

7.2. Description de la zone d'étude

7.2.1. Situation géographique de barrage Ghrib

Le barrage Ghrib est situé dans la vallée du Cheliff, à 07 Km en amont du centre d'Ouest Cheurfa, à 45 Km de Khemis Meliana, à 30 Km au Sud ouest de Médéa et à 150 Km à l'Ouest d'Alger (Figure 7.1). En amont du Ghrib, le Cheliff est régularisé par le Barrage BOUGHZOUL qui est situé à 20 Km au sud de Ksar el Boukhari et à 110 Km du Ghrib. Le Barrage Ghrib est situé à une longitude de 02°35' 14 00'' E et une latitude de 36° 07' 52 90'' N (*ANRH, 1965*). Il a été construit en 1928 en bordure Nord de la chaîne Tellienne, au point où l'oued Cheliff quitte son orientation Sud- Nord pour prendre la direction Ouest.

Ce barrage est destiné à l'irrigation, l'AEP et le transfert vers le barrage de Bouroumi pour un volume régularisé annuel de 105 millions de m³.

L'ouvrage est une digue en enrochement de 700.000m³ bétonnée, constitué au moins à 30% d'air (interstitiel) longue de 400 m pour une hauteur de 65m désenvasé de 1950 à 1954, en 1950 il irrigue une superficie de 30.000 hectares et fournit 13700 kW en électricité pour l'Algérois.

Le barrage de Ghrib, sur l'Oued Chélif est l'ouvrage de base de l'aménagement de la vallée du Cheliff. Construit en amont des trois périmètres, il permet de fournir de l'eau indifféremment à chacun des trois périmètres : haut Cheliff, moyen Cheliff et le bas Cheliff.

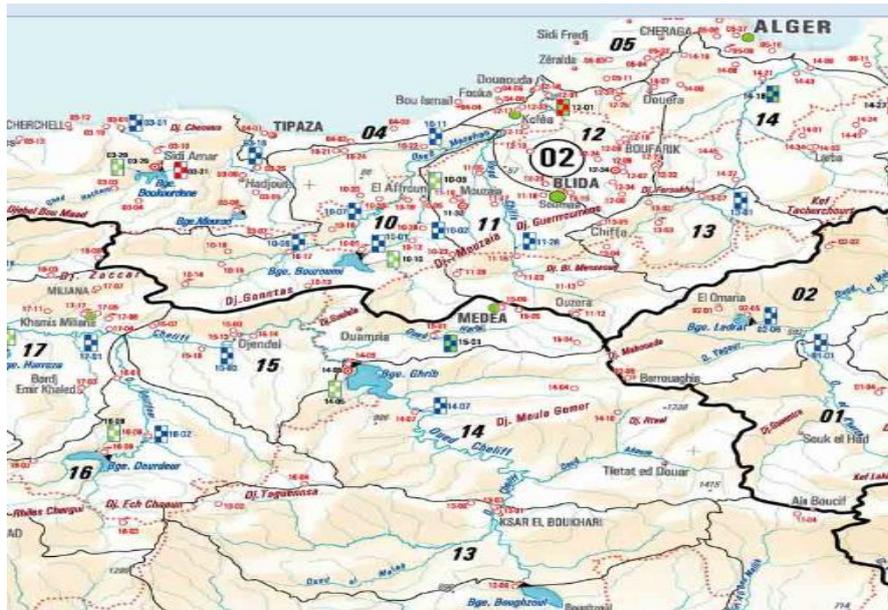


Figure 7.1. Situation géographique de barrage Ghrib (ANRH).

7.2.2. Bref historique sur le déroulement des travaux du barrage

La construction du barrage de Ghrib s'est étalée sur une période de 20 ans, (1927 à 1947).

- 1924 : Avant-projet du barrage,
- 1928 : Commencement des travaux relatifs au barrage, reconnaissance géologique, travaux de dérivation de l'oued,
- Juin 1933 : Glissement de l'ensemble des terrains formant la rive droite du canal de fuite de l'évacuateur de crue, sur une longueur de 100 m environ mettant en mouvement 500 000 m³ de terrain.
- 1934 : Fin des travaux du barrage de Ghrib.
- 1935 : Premier essai de mise en eau à la côte 386 m et fin de construction du mur de pied.
- Janvier – Novembre 1937 : essai de mise en eau à la côte 400 m et maintien jusqu'en novembre.
- Avril 1939 – Octobre 1939 : le plan d'eau atteint 427,50 m, déformation de la courbe Creager du déversoir suite au gonflement des marnes.
- 1941 : Achèvement des travaux de construction du barrage de Ghrib.
- 1943 : Noyage des galeries de cimentation rive gauche et rive droite ainsi que des galeries 346 et 366.

- Décembre 1944 : premier déversement au-dessus du déversoir.
- Avril-mai 1946 : second déversement au-dessus du déversoir.
- 31 mai 1947 : réception définitive du marché.
- 1953 : Chute d'une file de dalle due à la corrosion du grillage (avant-masque).
- 1954 : Démolition de l'avant masque. Mise en place d'une peinture réfléchissante protectrice.
- 1963 : Décollement d'une plaque de 200 m², remplacement partiel par de la toile bituminée.
- 1972/1974 : réparation partielle du masque amont,
- 1991/1993 : réfection du masque amont constitué d'un étanchement bitumeux protégé à l'extérieur par des dalles en béton avec ancrages,
- 1994/1995 : Réparation des vannes de l'évacuateur auxiliaires (Galerie de mi-hauteur).
- 1995 : Réparation d'un joint d'étanchéité de la galerie de contrôle.
- 1998 : Remplacement de la vanne papillon Ø 2600 mm par une vanne Wagon (vanne de réglage).
- 2001 : Construction d'un gué (pont) submersible à l'aval du barrage afin d'éviter l'accès à travers la digue (travaux en cours d'ouverture de route pour relier le gué (dans les deux cotés)
- Février 2004, détection de dégradations du masque d'étanchéité autour de la cote 415 (Décollement de quelques dalles, détérioration de joint d'étanchéité, fuite d'asphalte)
- 2005/2006 : étude pour l'installation de rehausse Hydroplus.
- 2005/2006 : étude pour une remise en service de la vidange de mi-hauteur rive droite.
- 2005/2006 : étude de confortement du barrage.

7.2.3. Caractéristiques techniques du barrage

- Année de construction : 1927
- Année de mise en eau : 1939
- Année d'achèvement des travaux : 1941
- Capacité initiale : 280 hm³
- Capacité levé 1986 : 165,6 hm³
- Apport moyen annuel : 148,5 hm³
- Envasement annuel : 3,20 hm³/an
- Volume régularisé : 105 hm³
- Côte R.N : 427,5 m
- Surface bassin versant : 25800 km².
- Capacité dernier levé (2004) : 115,30 hm³
- Capacité après surélévation : 185,32 hm³
- Surface du bassin versant : 23 300 km²
- Hauteur : 105 m
- Longueur : 270 m
- Côte de retenue normale (R.N) : 432,00 m
- Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E) : 432,50 m
- Déversoir HAUSSES FUSIBLES : 4 5000 m³/s
- Vidange de Fond : 100 m³/s.

7.3. Evolution dans le temps de l'envasement du barrage Ghrib

Nous constatons sur la figure (7.2), l'évolution de l'envasement dans le temps pour le barrage Ghrib, que les résultats obtenus par la relation de prévision de transport solide par le modèle statistique se rapprochent beaucoup mieux des mesures de levés bathymétriques avant les années 1986 et une différence remarquable entre le levé bathymétrique de l'année 2004 et les mesures obtenue par la relation d'estimation du transport solide.

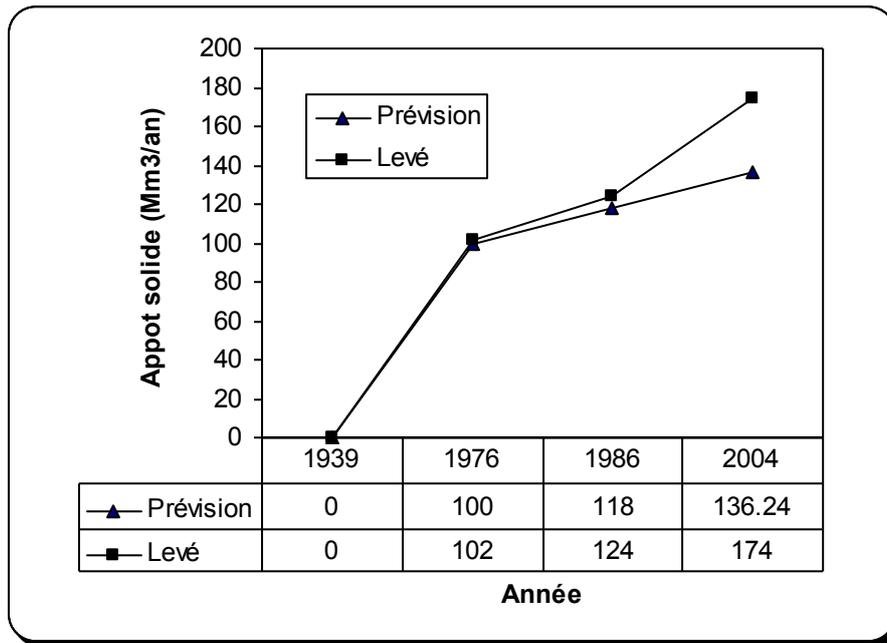


Figure 7.2. L'évolution dans le temps de l'envasement du barrage Ghrib

7.4. Comparaison de l'envasement annuel mesuré et calculé

La comparaison entre le taux de la sédimentation annuelle obtenu par la relation de d'estimation et celui obtenu par les mesures de levés bathymétriques comme le montre la figure 7.3 est jugée satisfaisante.

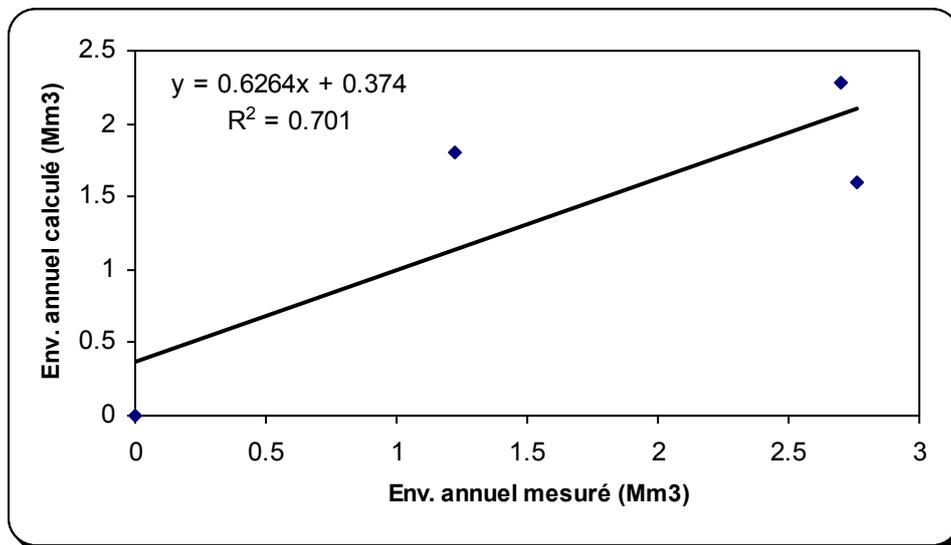


Figure 7.3. Comparaison de l'envasement annuel mesuré et calculé

7.5. Les moyens de lutte contre l'envasement du barrage Ghrib

Les moyens utilisés pour lutter contre ce phénomène sont :

- L'évacuation des sédiments par l'utilisation de la vanne de fond du barrage.
- La réalisation d'un barrage à l'amont du barrage de Ghrib.
- L'augmentation de stockage du barrage par le system de rehausses fusibles (Photo 7.1).

7.5.1. Réalisation de barrage de décantation

La meilleure façon d'éviter l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage, cela peut se faire par la création de retenues pour la décantation des apports solides, ce qui revient à construire un autre barrage en amont. C'est le cas du barrage de Boughezoul en amont de celui de Ghrib, bien qu'édifié essentiellement pour amortir les crues de oued Cheliff, cette retenue a permis de retenir un volume de près de $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase, qui sans elle, seraient venus s'ajouter aux $150 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ qui se sont déposés dans celle de Ghrib (en l'an 2000). Le barrage de Boughezoul a réduit l'envasement du Ghrib de 18 %.

7.5.2. L'augmentation de stockage du barrage Ghrib

Les systèmes de rehausses d'Hydroplus permettent de manière rapide et efficace le prolongement de la vie utile des barrages qui sous l'effet de la sédimentation ont perdu leur capacité de stockage, sans dégrader, voir en améliorant, la sécurité des barrages vis-à-vis des crues extrêmes.

L'installation de 20 hausse fusibles classiques de type Labyrinthe de 4.5 m de haut et de 2 clapets a permis de récupérer **70 millions de m^3 de capacité de stockage (44% de la capacité initiale)** du réservoir de Ghrib, ouvrage majeur destiné à l'irrigation de la plaine de la Mitidja en Algérie, dont la capacité avait été fortement réduite par suite d'envasement.



Photo.7.1. Hausses fusibles du barrage Ghrib (*Hydroplus*)

Troisième ouvrage algérien à être équipé du système de hausses fusibles, le barrage du Ghrib est le deuxième plus important barrage en service de l'ouest du pays.

Le barrage Ghrib est équipé de hausses fusibles en béton armé et de 2 clapets métalliques de 15 mètres de large.

Cette association permet de gérer finement le niveau de la retenue et d'accroître la période de retour du déclenchement de la première hausse (*Hydroplus*).

Tableau 7.1. caractéristiques de hausses fusibles

Type de hausse	Nombre	Hauteur	Largeur
Labyrinthe	20	4.50 m	6.75 m

7.6. Moyens de lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages en Algérie

Les moyens de lutte utilisés surtout en Algérie sont :

- Le reboisement, la restauration des sols, l'implantation des banquettes, la création des petit barrages (retenues collinaires), la plantation des cultures suivant les lignes de niveau, la plantation des végétations à longue tiges dans les oueds.

Pour l'envasement des barrages, plusieurs dispositifs ont été mis en place pour lutter contre ce phénomène (méthodes de chasses, soutirage par courant de densité et dragage).

7.6.1. Actions palliatives

1. Soutirages et chasses

L'Algérie a connu ces 25 dernières années une sécheresse persistante ayant un impact négatif sur le niveau de remplissage des barrages.

Les chasses et les lâchés par vidange de fond au moment des crues n'ont pu être effectués au détriment de l'envasement.

2. Surélévation

L'Algérie a été parmi les premiers pays du monde à pratiquer la surélévation des barrages. Cette pratique a concerné neuf (09) barrages pour un gain de capacité de l'ordre de 170 Hm³. Cette technique implique de lourds travaux de génie civil et ne peut être envisagée pour tous les barrages.

7.6.2. Actions curatives

• Dévasement par dragage

En Algérie, cette alternative est incontournable afin de permettre aux barrages de continuer à sécuriser l'AEP des populations et les besoins pour l'irrigation ; et ce à l'égard de la rareté des sites pour la construction de nouveaux barrages.

La première opération de dévasement en Algérie, a commencé en 1957 et a concerné le barrage de Cheurfas (W.Mascara) avec un volume à extraire de 10 Hm³. A ce jour 10 barrages ont été concernés par le dévasement.

Avec le programme en cours et celui lancé en 2010, le dévasement aura permis un gain de capacité de 108 hm³ (ANBT).

7.6.3. Actions préventives

• Traitement et protection des bassins versants

Le programme de 2004 de la Direction Générale des forêts a concerné les bassins versants de 09 barrages totalisant une superficie de 14625 km² et qui s'est traduit par le reboisement, la fixation des berges, les corrections torrentielles, les plantations fruitières et fourragères (ANBT).

Un important programme est en cours d'études au niveau de l'Agence Nationales des Barrages et Transferts (ANBT) et qui concerne le traitement et la protection des bassins versants d'une trentaine de barrages et portera sur la réalisation d'ouvrages de capture de sédiments, de retenues collinaires, la réalisation de drains et exécutoires et la protection des abords routiers. Cet ambitieux programme traduit la prise de conscience en Algérie des conséquences ravageuse résultant de l'impact négatif de l'érosion des sols et les mesures préventives à prendre pour en atténuer l'impact (*ANBT*).

7.7. Conclusion

La prévision des dépôts des sédiments dans une retenue de barrage, est extrêmement importante pour les ingénieurs et les gestionnaires de barrages. La relation prévisionnelle, donne des résultats satisfaisante. Grâce à cette relation, nous estimons le volume des dépôts sédimentaires du barrage Ghrib.

L'Algérie perd annuellement un volume d'eau de 20 à 30.10⁶ de m³ suite aux dépôts successifs des sédiments dans les retenues de barrages. Cependant ce volume pouvait atteindre le double si ce n'est les moyens techniques de lutte déployés par les services hydrauliques depuis plusieurs années. Pour nous, il est indispensable d'entretenir les barrages (anciens) en exploitation en utilisant les différents moyens de lutte contre l'envasement. La technique de dragage devra être pratiquée pour les barrages les plus envasés. Pour les barrages en réalisation, il faut aménager dès maintenant leurs bassins versants, et concevoir les pertuis de dévasement spécialement pour le soutirage de courants densité. A l'aval du barrage la vase évacuée par les pertuis de vidange ou par dragage doit être utilisé dans les différents domaines agricole, industriel et artisanal quant à l'eau perdue, elle doit être utilisée pour la réalimentation de la nappe (*Remini, 2004*).

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de cette étude, nous pensons avoir contribué à la connaissance des problèmes de l'érosion et du transport solide en suspension, en particulier dans le bassin d'Oued Cheliff.

L'objectif principal de l'étude étant la compréhension du phénomène et l'estimation de l'érosion et le transport solide en suspension, ce travail, basé sur les données observées, durant la période 77/94, a été conduit sur le bassin d'oued Cheliff. Ce bassin représente un échantillon des bassins du Nord de l'Algérie qui sont caractérisés par un taux de transport solide élevé en raison de nombreux facteurs mis en jeu.

On parvient aux conclusions suivantes :

Du point de vue altimétrie, le bassin est caractérisé par des altitudes variant de 375m à 1615 m et des pentes favorables à l'écoulement par endroit.

L'analyse climatique et particulièrement la répartition pluviométrique a révélé l'existence d'une variation de la pluviométrie faible au niveau des stations pluviométriques.

Le régime hydrologique de L'oued Cheliff est caractérisé par deux saisons bien distinctes : la période pluvieuse qui s'étend d'Octobre à Mai. Les conditions hydrogéologiques indiquent l'absence de nappe et l'oued est souvent à sec pendant la période estivale.

La période d'étude 1977-1994 était caractérisée par deux années à écoulement très important, les années 89/90 et 91/92 qui ont enregistré un coefficient de l'hydraulicité très élevés par rapport aux autres années.

A l'échelle des crues, l'échantillon reconstitué sur la période d'étude est faible mais apporte beaucoup de réponses quant à la forte irrégularité annuelle de l'écoulement, et confirme le caractère aléatoire du régime méditerranéen du bassin d'oued Cheliff.

La mise en service de la modélisation comme outil pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, et d'aide à la décision est l'une des meilleures méthodes reconnues à la fois simple et fructueuse.

La modélisation pluies – débits par le modèle HEC HMS s'intéressait premièrement à appliquer une combinaison modulaire appropriée du modèle HEC-HMS. Ensuite, après avoir été validé sur au moins l'un des événements présélectionnés, l'étude se penchait sur l'utilisation de ce modèle pour prédire le comportement hydrologique futur du bassin vis-à-vis des scénarios de changement climatique et de modification d'occupation du sol. Après avoir

validé complètement le modèle HEC-HMS sur le bassin versant du Cheliff-Ghrib, on peut l'utiliser pour la protection contre les inondations, en utilisant ce qu'on appelle la modélisation à temps réel qui repose sur le principe de reconstitution du débit à l'exutoire pour chaque pas de temps pour lequel la donnée pluie est mesurée, par conséquent on peut reconstituer l'hydrogramme d'une crue au fur et à mesure de l'enregistrement de la hauteur de pluie. Ce système d'alarme s'avère plus efficace que celui qui se base sur la mesure de la hauteur d'eau dans la rivière en amont du bassin versant.

La méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau algériens est l'échantillonnage uni-ponctuel. Cette technique d'acquisition est souvent objet de critique. Mais malgré son caractère empirique, cette méthode a fourni des résultats et des données exploitables sur la période 77-94.

L'approche suivie a consisté au traitement des couples débits liquides-débits solides en vue de l'établissement des modèles de régression pour différentes échelles temporelles. Dans cette partie, nous avons constaté que le modèle puissance présente un taux d'explication de la variance supérieur à 70 %. De fait, le modèle puissance a été retenue pour la suite du travail.

L'exposant **b** est bien relié aux caractéristiques de l'écoulement, tandis que **a** est considéré comme paramètre représentatif de l'état du sol, constatant pour un même bassin et une même saison.

A l'échelle des crues, les faibles valeurs de **a** signifieraient un état de saturation du sol, alors que les fortes valeurs de **b** caractériseraient l'écoulement durant la saison d'automne.

Par ailleurs, nous avons constaté que le bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib a une dégradation spécifique élevée ($E_s = 2541 \text{ T/km}^2 \cdot \text{an}$). Cette dégradation des sols est très visible sur le terrain. Elle est due aux caractères favorables à l'érosion des sols et au sapement des berges. L'ampleur de ce chiffre est aussi admise par Demmak (1982) qui rapporte que 15 bassins des régions Cheliff et Cotiers Algérois, dont l'oued Allalah, bassin limitrophe de l'oued Ouahrane, produisent des débits solides spécifiques supérieurs à $1000 \text{ T/km}^2 \cdot \text{an}$.

Les techniques de SIG et les données provenant de la télédétection ont été utilisées avec succès pour déterminer les facteurs d'érosion des sols, y compris l'érosivité des pluies (R), l'aptitude du sol à l'érosion (K), l'occupation de sol (c) et longueur / inclinaison de la pente (LS). Par conséquent, les cartes thématiques de ces paramètres et l'érosion du sol estimée ont été déterminées. Avec ces informations, les interventions de gestion peuvent être précisément ciblées.

Il faut souligner que les résultats des analyses spatiales présentées dans cette étude possèdent des limites et des défauts. Tout d'abord, l'équation universelle de perte en sol (USLE) donne seulement une estimation de la perte en sol attendue sur le long terme. Elle prédit seulement l'érosion en nappe et en rigoles : le ravinement n'est pas pris en compte et les dépôts ne sont pas inclus, seule l'érosion grossière est prédite. On ajoute aussi les incertitudes associées aux différentes sources de données et les modèles utilisés pour la détermination de différents facteurs.

L'estimation du facteur (R) est basée sur une relation approximée avec les précipitations annuelles. L'extrapolation du facteur (R) sur la totalité du bassin sur l'ensemble du bassin peut être inappropriée à cause de la grande variété de climats que l'on trouve dans le bassin. Le facteur (K) est estimé à partir de la perméabilité. Cependant, le K est en fonction avec la perméabilité et la texture. Pour le facteur (LS), l'angle de pente a été déterminé par un MNT avec une résolution de 30 mètres, qui est peut être adapté à l'échelle du bassin versant. Le facteur C a été estimé à partir des images NDVI, ce dernier peut être influencé par les effets atmosphériques ce qui peut fausser l'estimation du facteur (C).

La comparaison entre le taux de la sédimentation annuelle obtenu par le modèle statistique de prévision et celui obtenu par les mesures de levés bathymétriques est jugée très satisfaisante.

Les travaux futurs que nous projetons de réaliser sont :

- ✓ Etudier l'évolution du sapement des berges du tronçon : Barrage Bougezoul – Barrage Ghrib ;
- ✓ Quantifier l'érosion des berges de l'oued Cheliff-Ghrib avec l'utilisation des cartes satellitaires et les logiciels des modélisations hydrologiques et hydrauliques HEC RAS, HEC HMS et IDRISI.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abaoui, Jet al, 2005.** Deux approches de cartographie de l'érosion hydrique par télédétection et SIG : cas de la région de Bin el Ouidane (haut Atlas, Maroc). *Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable"*. 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc.
- Abdelli M., Zeggane M., 2007,** Problématique et enjeu de l'envasement. L'expression. Du 05 Septembre 2007.
- ABH (Agence du Bassin Hydrographique Chélif Zahrez), 2004.** *Cadastré Hydraulique du bassin hydrographique Chélif-Aval du barrage de Boughzoul*, Deuxième partie : Bas Chélif et Mina, 52 pages.
- Achite, M. et Meddi M, 2005.** Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi aride. Cas du bassin de l'oued Mina (nord ouest Algérien Rev. Sci. Eau. 18 (spécial), pp : 37-56.
- Achite, M., et al, 2006.** Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences & Perspectives. *14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments. Marrakech, Morocco, May 14-19, 2006 (ISCO 2006).*
- Achite, M., Touaibia B., 2000.** Analyse multivariée de la variable d'érosion spécifique : cas du bassin versant de l'oued Mina (Wilaya de Relizane, Algérie). *Actes du Séminaire International d'Hydrologie des régions méditerranéennes du 11 au 13/10/2000*, Montpellier, France, UNESCO-IRD (51) : 119-28.
- Achite, M., B., Touaibia, et S., Ouillon, 2006.** Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences & Perspectives. *14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments. Marrakech, Morocco, p 14-19.*
- Ahbari, A, 2013.** Le bassin versant de Rheraya : Modélisation pluie- débit et prédiction de comportement hydrologique, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, p 101.
- Al-Ahmadi, F.S., 2005,** Rainfall-Runoff Modelling in arid regions using geographic information systems and remote sensing (Case study: Western region of Saudi Arabia), Dep. of Hydrology and Water Resources Management, King Ab-dulaziz University, p441.
- Alejandro, M. et K. Omasa, 2007.** Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 62 (2007) 309–324
- Ali, M., Khan, S. J., Aslam, I. and Khan, Z, 2011,** Simulation of the impacts of landuse change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan, *Landscape and Urban Planning*, 102(2011), pp 271–279.
- ANBT, 2016.** (Agence nationale des barrages et transferts). Erosion et envasement des barrages réservoirs.. Exposé établi par mr. Manser Amour, consulté le 01/09/2016. <http://docplayer.fr/1600124-Erosion-et-ensablement-des-barrages-reservoirs.html>.
- Anderson, H.W, 1949.** Flood frequencies and sedimentation from forest watersheds. *Trans. American Geophysical Union*, Vol 30 ,n°4.(1954) : Suspended sediment discharge related to steamflow, topography, soil and land use, *Trans American Geophysical Union*, vol 35 n°2.
- A.N.R.H, 1970.** Etude de transport solide dans le Nord Algérie. Rapport de l'Agence National des ressources hydrique. Alger.
- Arabi, M., 1991.** Identification de l'agriculture en Algérie, Contraintes et espoirs. *Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'ensablement des barrages*. P 96-104.

- Arabi, M., 1991.** Influence de quatre systèmes de production sur le ruissèlement et l'érosion en milieu méditerranéen à Médéa (Algérie). *Thèse doctorat Université de Grenoble III*. 273 p.
- Arabi, M., et E., Roose, 1989.** Influence du système de production et du sol sur l'érosion et le ruissèlement en nappe en milieu montagnard méditerranéen (station de Ouzera). *Bullettin Réseau Erosion*, IRD, Montpellier (France).
- Arabi, M., et E.,Roose, 1998.** Influence du système de production et du sol sur l'érosion et la ruissèlement en nappe en milieu montagnard méditerranéen (station de Ouzera). *Bullettin Réseau Erosion N°*, IRD, Montpellier (France).
- Araf.A, (non datée).** Application de HEC-ResSim, SWAT, et HEC-HMS dans la gestion de l'eau de la Wilaya de Tlemcen, Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, p221.
- A.R.C.E, 2001.** Rapport de l'Association pour la Recherche sur le Climat et l'Environnement, Oran, Algérie.
- Arekhi, S,2012,** Runoff modeling by HEC-HMS Model (Case Study: Kan watershed, Iran), *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(23), pp1807-1811.
- Arekhi, S. Rostamizad, G. and Rostami, N., 2011,** "Evalua-tion of HEC-HMS Methods in Surface Runoff Simulation (Case Study: Kan Watershed, Iran)", *Advances in Environ-mental Biology*, AENSI, 1316-1321.
- Arnoldus, H.M.J,1977.** Methodology used to determine the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. Report of an FAO/UNEP Expert Consultation on Assessing soil degradation, Rome, 18-20 January 1977, *FAO Soils Bulletin* 34 (1977) 39-48.
- Atilah, A, 2016.**Aperçu général des principales méthodes d'Extraction d'informations thématiques à partir des images satellites. *Projet GIZ-CRTS Formation en Télédétection spatiale et SIG CRTS, 18 - 21 janvier 2016*
- Axelsson.V,1967.** The laitaure Delta. A study of deltaic morphology and processes. *Geogr. Ann.* 49A.pp 1-127.
- Auzet A.V, Boiffin J, Ludwig B. (1995).** Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms*; 20: 5-14.
- Bastian. M, 2011.** Etude préalable du Programme d'actions de prévention des Inondations (PAPI) du bassin versant de la Fensch. Analyse des enjeux et proposition d'aménagements. Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du Mastère Spécialisé « Eau potable et assainissement ».Ecole nationale de génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg.France.
- Benkhaled, A et B., Remini, 2003.** Influence des paramètres hydrométéorologiques sur l'estimation des apports solides dans un bassin versant de zone semi-aride. L'oued Ouahrane. Colloque International Oasis, Eau et Population. Biskra.22-23 et 24 Septembre.
- Benkhaled, A et B., Remini. 2003.** Analysis of a sediment rating curve in Wahrane river basin (Algéria). *Revue des sciences de l'Eau* N°16/3.pp 333-356.
- Benkhaled, A et B., Remini. 2003.** Tomporal variabilty of sediment concentration and hysteresis in the Wadi Wahrane basin. Algéria. *Hydrological Science Journal*. N° 48 (2). Pp 243-255.
- Bhatt, A., Yadav, H. L. and Kumar, D, 2012,** Estimation of Infiltration Parameter for Tehri Garhwal Catchment, *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 1(7), pp 1-6.
- Bobee, B., 1990 :** Eléments de statistiques. Univ.P et M. Curie. Laboratoire de Géologie Appliquée. France
- Boiffin, J., 1976.** Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Annales Agronomiques*, 27(4):447-463.

- Boiffin J., 1984.** La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies, Thèse pour le titre de Docteur ingénieur, Sciences Agronomiques, INA-PG, Paris Grignon, 320 + annexes p.
- Boiffin, J., Papy F., Eimberck M, 1988.** Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I - Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8 : 663-73.
- Boiffin, J., 1994.** Place des bassins versants expérimentaux dans les études sur l'érosion hydrique des sols. In : Du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales. Actes du Séminaire national, hydrosystèmes. Paris : Cémagref, : 197-201.
- Bonn, F., 1998.** La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*; 9 : 185-92.
- Bonn, F., et al., 1996.** Précis de télédétection – Volume 2. Applications thématiques, Sainte-Foy, *Presses de l'Université du Québec/AUPELF*, 633 p.
- Bouanani, A., et al., 2003.** Variations climatiques et conséquences hydrologiques : cas du bassin versant de la Tafna (NW Algérie). Symposium int. Hydrologie des régions méditerranéennes et semi arides. Montpellier avril 2003.
- Bouanani, A., 2005.** Hydrologie transport solide et modélisation, étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie), thèse de doctorat d'état, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 249p.
- Bouaichi, I., et B.,Touaibia, 2006.** Approche quantitative de l'érosion spécifique Pour l'élaboration d'un abaque. Cas du bassin versant de l'oued cheliff. *LJEE-ENSH-N°08*.
- Boussema, 1996.** Système d'information pour la conservation et la gestion des ressources naturelles ; Colloque International sur le rôle des technologies de télécommunication et de l'information en matière de protection de l'environnement, Tunis, 1-2 Novembre 1994, P.P.64-70.
- Bouziane, A., 2009.** Cours de modélisation hydrologique. École MOHMMADIA d'ingénieurs, Université Mohammed V, Rabat. 120p.
- Bradford, J. M. & Huang, C,1996.** Splash and detachment by waterdrops. Dans Agassi, M., éditeur, *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation*, Books in Soils, Plants and the Environment, Chapitre 4, pages 61–76. Dekker, New York.
- Brown, R.B., 2003,** *Soil Texture*, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Fact Sheet SL29, 8 p.
- Bryan, R.B., and Campbell, LA,1986.** Runoff and sediment discharge in a semi-arid drainage basin. *Z.G geomorphol.*, 58: 121-143.
- Burrough, P.A., 1986.** Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford: *Clarendon Press*.
- Caloz, R., et C., Collet, 2001.** Précis de Télédétection, Traitement Numérique d'images de Télédétection. *Presses de l'université du Québec*, Volume 3, 381 pages.
- Celik, I., et al, 1996.** A review of the erosion control studies during the republic in Turkey. In Kapur.S,Akça.E,Eswaran.H,Kelling.G,Vita-Finzi,Mermut A6R,Ocal A-D, editor 1st international conference on land degradation, Adan. Turkey.10-14 june 1996, 175-18
- Chang C.W, 2009.** Application of SCS CN Method in HEC-HMS in ShihMen Watershed - Simulation of Rainfall- Runoff Hydrologic Model. Electronic Theses, Treatises and Dissertations, Paper 3900. 96p.
- Chebbani, R., et al, 1999.** Etude des risques d'érosion dans le bassin versant Isser, Algérie. Bulletin Réseau Erosion 19 : 85-95.

- Chevalier, J.J., et al 1995.** Système d'aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie). Système d'information géographique utilisant les données de télédétection. Act du colloque scientifique international, Hammamet. Tunisie, 1-2 Novembre 1994, 4-12
- Cheggour, A., 2008.** Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G. : Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad. MARRAKECH.
- Cherel. J-P 2010.** Transformation d'images de télédétection. *Support de cours MI SIIG3T - Traitement d'images transformation d'images de télédétection.*
- Chu, X. and Steinman, A, 2009,** Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS, Journal of Irrigation And Drainage Engineering, January-February 2009, 135 (1) pp 119-124.
- Cola, R., 1980.** Presupposti teorici et technica della ricerca sperimentale in idraulica .Atti del XVII convegno di idraulica et costruzioni idrauliche pp.129-184
- Cosandey C. et Robinson M., 2000.** Hydrologie continentale p 360. 128 fig. Ed. Armand Colin.
- Cros-Cayot, 1996 :** Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte armoricain. Thèse de Docteur de l'ENSAR, 218p.+annexe.
- Degoutte, G., 2006.** Aide mémoire d'hydraulique a surface libre, Edition ENGREF.
- Delhoume, J-P., 1981.** Etude en milieu méditerranéen semi-aride : ruissellement et érosion en zone montagneuses de Tunisie (Djebel Semmama). Compagne 1975-1979. Tunis, Orstom/DRE. 185p.
- Demmak, A., 1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale .Thèse de docteur –Ingénieur.Université de Pierre et Marie Curie ,France .p 323
- De Ploey, 1990.** L'érosion pluviale : Expérience à l'aide de sable traceurs et bilan morphogénique. Acta géog. Lovaniensia, Vol VII, p1-89
- Deursen, W.P.A. van, 1995.** Geographical Information Systems and Dynamic Models:Development and Application of a Prototype Spatial Modelling Language. *Ph.D Thesis, UtrechtUniversity, Utrecht, The Netherlands.*
- Desmet P.J.J. and Govers G, 1995.** A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation 51: 427-433.
- Droesen, W., 1999.** Spatial Modelling and Monitoring of Landscapes: With Cases in theAmsterdam Waterworks Dunes. Ph.D Thesis, Wageningen Agricultural University,Wageningen, The Netherlands.
- Douglas, I., 1969.** Sediment yields from forested and agricultural lands. In: Proc. Symp. On The Role of Water in Agriculture, University of Wales, Aberystwyth, Memorandum No. 12, pp. E1-E22.
- Du Boy M.P.1879.** Le rohne et les rivières à lit affouillable.Mem .et Doc, Annales des ponts et chaussées .Ser 5 Vol .XVIII.
- Dutil, P., 1984.** L'érosion en grande culture, revue technique des agriculteurs dynamique, N°169, France.
- Dzubakova, K., 2010,** Rainfall- runoff modeling: Its development, classification and possible applications. ACTA Geographical Univerciti Comeniana, 54, 2010, N0. 2, pp 173-181.
- Ekern, P. C, 1950.** Raindrop impact as the force initiating soil erosion. Soil Science Society of America Proceedings, 15:7–10.
- Ellison, W. D,1944.** Studies of raindrop erosion. Agricultural Engineering, 25:131–136, 181–182.
- Ellison W.D. 1947.** Erosion studies. Parts I to VII .Agric .Engng.

- Engelund, F Et Hansen, E 1967.** A monograph on sediment transport in alluvial streams, Teknisk for lag, Compenhagen, Danemark.
- FAO, 1977.** Assessing soil degradation. Soils Bulletin, vol.34, 83p.
- FAO, 1980.** Conservation des ressources naturelles en zones arides et semi-arides. Cahiers FAO : conservation des sols, vol.3, 135.
- FAO, 1983.** Garder la terre en vie : L'érosion des sols, ses causes et ses remèdes. Bulletin pédologique, vol. 50, 62p.
- FAO, 1990.** Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. Bulletin pédologique 57: 182 p.
- FEM, et FIDA, 2002.** Publication FIDA. Edition GMS GRAFICHE, Rome , juillet 2002.
- Fistikoglu, O., et N.B., Harmancioglu, 2002.** Integration of GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion. *Water Resources Management 16*: 447–467.
- Foster, G.R., 1988.** Modelling Soil Erosion and Sediment Yield. In R., Lal (Editor), Soil Erosion Research Methods. *Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA*.
- Fournier, F., 1960.** Climat et érosion : La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. PUF, Paris, France.
- Fournier, F., 1969.** Transport solides effectués par le cours d'eau, Bull. Assoc. Int. Hydrol. Scient ; t.13, N°3.
- Free G., 1952.** Soil movement by raindrops. *Agricultural Engineering*, pages 491–494, 496.
- Ghenim, A., 2001.** Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna : cas d'oued Isser, oued mouilah et de la Haute tafna. Em. Magister, Univ. Tlemcen.
- Gimenez, R. & Govers, G, 2002.** Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds . *Soil Science Society of America Journal*, 66:1475–1483.
- Girard, M.C., 1995.** Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 1, pages 7- 24.
- Girard, M.C., et C.M., Girard 1999.** Traitement des données de télédétection. *Paris*.
- Gitas, I.Z., K., Douros, C., Minakou, G.N., Silleos, et C.G., Karydas, 2009.** Multi-temporal soil erosion risk assessment in n. Chalkidiki using a modified usle raster model. *EARSeL eProceedings 8, 1/2009*. pp 40-53.
- Gomer, D., 1994.** Ecoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen. Thèse de Doctorat, Wasserbau, Universität de Kajsruhe, Allemagne.
- Govers, G., Takken, I. & Helming, K, 2000.** Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20:131–146.
- Gravilovic, S., 1972.** Ingénierie des cours d'eau torrentiels et de l'érosion. Yougoslavie.
- Greco, j., 1966.** L'érosion, la défense et la restauration des sols , le reboisement en Algérie. MARA. Alger.
- Halwatura, D., and Najjim, M. M. M, 2013.** Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment, *Environmental Modeling and Software*, 46 (2013) pp 155-162.
- HEC-HMS, 2000.** Hydrologic Modeling System: Technical Reference Manual March 2000, Arlen D. Feldman, Editor, U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC. 609 Second St. Davis, CA 95616-4687.
- HEC-GEO HMS, 2009.** Hydrologic Modeling System, Geospatial hydrologic Modeling System, User's manual. May 2009. U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC. 609 Second St. Davis, CA 95616.
- Heusch, B., 1970.** L'érosion du Pré Rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique. *Ann de la Recherche Forestière du Maroc 12* : 9-176.

- Heusch, B., 1971.** Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin versant .Aplication au Maghreb.mines et géologie, Rabat .
- Hu, H. H et al, 2006,** Gridded Snowmelt and Rainfall-Runoff CWMS Hydrologic Modeling of the Red River of the North Basin, Journal of Hydrologic Engineering, March/April 2006, 1, pp 91-100.
- Hudson, N.W., 1957.** Erosion control Research Progress Report on Experiments at Henderson Research Station 1953-1956, Rhod. Agric.J,54 (4); P297-230.
- Huete, A. R., 1988.** "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)", *Remote Sensing of Environment*, 25(3): 295-309.
- Huete, A., Justice, C. et Liu, H., 1994.** "Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS", *Remote Sensing of Environment*, 49(3): 224-234.
- Hydroplus :** société innovante dans le domaine de l'environnement, créée en 1991 afin de développer et de commercialiser à l'échelle internationale le système de hausses fusibles. http://www.hydroplus.com/hydroplus/hydroplus.nsf/web/ref_barrage_du_ghrib.htm. consulté le 25/08/2016.
- Jacquemoud, S., 1993.** "Inversion of the PROSPECT+ SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: theoretical study", *Remote Sensing of Environment*, 44(2): 281-292.
- Janssen, L., 1994.** Methodology for Updating Terrain Object Data from Remote SensingData.*Ph.D Thesis*, Wageningen University.
- Jordan, C.F., 1969.** "Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor", *Ecology*(50): 663-666.
- Julien, P.Y, 1994.** Erosion and sedimentation, 280 pp., Cambridge University Press.
- Kadam, A. S, 2011,** Event based rainfall-runoff simulation using HEC-HMS model, Unpublished P. G. thesis submitted to Deptt. of Soil and water Conservation Engg., CAET, Dr. PDKV, Akola.
- Kalman, R., 1967.** Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou. Rapport du Ministère de l'Agriculture, Maroc, 40 p.
- Kattan, Z., et al, 1987.** Suspended se sdiment load and mechanical erosion in the Senegal basin. Journal of hydrology. N°92.pp59-76.
- Khali, Issa., et al, 2016.** Cartographie Quantitative du Risque d'Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental), *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (8) (2016) 2778-2795
- King D., Le Bissonnais Y, 1992.** Rôle des sols et pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux : exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *CR Acad Agric Fr*, 78 : 91-105.
- King C., Delront G. (1993).** Spatial assessment of erosion: contribution of remote sensing, a review. *Remote Sensing Review* ; 7 : 223-32.
- Kinnell, P.I.A., 2001.** Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. *Soil Till Res* 58 (2001) 11-17.
- Kirkby, M.J, yR. P. Morgan, 1984.** Erosión de suelos.Editorial Limusa, México, 375 pp.
- Kishor, C and all, 2014,** Simulation of rainfall-runoff process using HEC-HMS model for Balijore Nala watershed, Odisha, India, international journal of geomatics and geosciences volume 5, no 2.
- Kouri, L., 1993.** L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie), étude des processus et types fonctionnels des ravins dans la zone des marnes tertiaires.
- Kosmas, C., Danalatos N., Cammeraat L.H., et al, 1997.** The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*, 29: 45-59.

- Knebl, M. R et al,2005**, Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event, *Journal of Environmental Management*, 75, 4, 325–336.
- Kumar, D. and Bhattacharya, R, 2011**, Distributed Rainfall Runoff Modeling. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4,(6) SPL, pp 270-275.
- Laborde, 2003**. Hydrologie de surface. Univ de Nice –Sophia Antipolis
- Lafi et Remini, 2006**.Le transport solide dans le bassin versant de l'oued isser.impact sur l'envasement du barrage Beni Amrane.Algérie. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n 05, Juin 2006, pp.63-73.
- LAHLOU A., 2000**, Quel environnement pour l'Afrique du nord. Edition Dar El Qualam, Rabat (Maroc), 265 p.
- Le Bissonnais, Y., 1988**. Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France.
- Le Bissonnais, Y., Le Souder C, 1995**. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Étude et Gestion des Sols*; 2: 43-56.
- Le Bissonnais, Y., 1996**. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur J Soil Sci* ; 47 : 425-37.
- Le Bissonnais, Y, Arrouays D, 1997**. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur J Soil Sci* ; 48 : 39-48.
- Le Bissonnais, Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J, 2002**. L'érosion hydrique des sols en France, Institut National de la Recherche Agronomique et Institut Français de l'Environnement. Rapport, 106p.
- Le Bissonnais, Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchere V., Martin P. 2005**. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, 62, 111-124.
- Leguedois, S., 2003**. Mécanismes de l'érosion diffuse des sols : modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Thèse Université Orléans. INRA. 167p.
- Leguedois, S., Planchon O., Legout C, 2005**. Splash projection distance for aggregated soils: theory and experiments. *Soil Science Society of America Journal* 69, 30-37.
- Levainier, 1989**. L'hydrologie Appliquée aux petits Bassins Versants Ruraux, CEMAGREF, France.
- Leopold, L.B et Maddock.T.G, 1953**. The hydraulic geomerty of sream channels and some physiographic implications. Waschington D.C.U.S. Geological.Survey. Proffessional Paper.252p.
- Liamas, J., 1992**. L'Hydrologie Générale. Application et principe. Edition Gaetan morin. Canada.
- Ludiwg, 1992**. L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du bassin parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse de doctorat, université de Strasbourg I, 201p.
- Mabit, L., Laverdière M. R., Bernard C, 2002**. L'érosion hydrique : méthodes et études de cas dans le Nord de la France. Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures. Volume 11, Numéro 3, 195-206.
- Majidi, A., and Shahedi, K., 2012**, Simulation of Rainfall-Runoff Process Using Green-Ampt Method and HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran), *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(1), pp 5-9.

- Majidi, A., and Vagharfard, H, 2013**, Surface Run-off Simulation with Two Methods Using HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran), Current Advances in Environmental Science, 1(1), pp 7 11.
- Maneux, E., 1998**. Erosion mécanique des sols et transports fluviaux de matières en suspension: Application des Systèmes d'Information Géographique dans les bassins versants de l'ADOUR, de la DORDOGNE et de la GARONNE. Thèse de Doctorat. Université Bordeaux 1. 252 p.
- Markhi. A., et al , 2015**. Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSSEL et déposition intégrés dans un SIG. application dans le bassin versant n'fis dans le haut atlas de marrakech (maroc), European Scientific Journal October 2015 edition vol.11, No.29
- Martine, B., 2011**. Etude préalable du Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) du bassin versant de la Fensch. Analyse des enjeux et proposition d'aménagements. Mémoire Mastère Spécialisé « Eau potable et assainissement ». Ecole nationale de génie de l'eau et de l'environnement strasbourg France.
- McCull, C., and Aggett, G, 2006**, Land use forecasting and hydrologic model integration for improved land use decision support, Journal of Environmental Management, 84, 4, 494-512.
- Meddi, M., 1992**. Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina .Thèse unique, Université louis Pasteur.
- Meftah, 2013**. Modélisation pluies debits par HEC HMS cas du basin versant Cheliff-Ghrib, Mémoire de Master en Hydraulique, Université Mohamed Boudiaf M'sila, Algérie.
- Megnounif, A., Bouanani A., Terfous A. et Baba Hamed K., 1999**. Distributions statistiques de la pluviométrie et mise en évidence de l'influence du relief (cas des monts de Tlemcen, Nord ouest algérien). Rev. Sci & Tech n°12. pp. 77 - 80. 6 fig.
- Megnounif, A., Terfous A., , et Bouanani A., 2000**. Contribution des deux composantes de l'écoulement à la production de sédiments transportés en suspension dans les zones semi-arides : cas de l'oued Mouilah (Nord ouest Algérie). Sem. Int. « Hydrologie des régions méditerranéennes», Montpellier 11-13 Octobre. Phi-V/Doc. Tech. en hydrologie / N°51. Ed. UNESCO.
- Megnounif, A., Bouanani, A., Terfous A., 2000**. Etude du transport solide dans l'oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). Colloque méditerranéen Eau-Environnement. Alger, 128-132. Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute Tafna (Nord-Ouest algérien). Rev. Des Sci. Eau 16/3. 369-380.
- Meguenni, K., et B., Remini 2008**. Evaluation du débit dans Le bassin versant de harreza (algerie). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 07, Juin 2008, pp. 7-19
- Meyer Peter, 1934**. Formulas for bed –load transport preceding of second meeting of IHAR , Stockholm
- MOHAMMEDI K., 1995**, Possibilité de production d'eau douce à partir de l'humidité atmosphérique. Actes du 2ème colloque national climat - environnement. L'eau, une réalité, une urgence, un déficit, Oran (Algérie), 24 -25 décembre.
- Moog, d.b., et Whithing, P.J.1998**. Annual hysteresis in bed load rating curves. Water resources research N°34(9).pp 2393-2399.
- Mokhtari, El., 2009**. Contribution à l'étude du transport solide en suspension : cas du bassin versant Cheliff-Ghrib. Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie.
- Mlaouhi A., 2003** ; Climat et érosion par ravinement dans les bassins versants des oueds Maïz et Redjel (Haffouz) Tunisie centrale. *Thèse de doctorat*, Univ. Aix-Marseille I, 2003, 221 p.
- Morgan, R.P.C., J.N., Quinton, JR.J., Rickson, 1991**. *EUROSEM A User Guide*. Silsoe College, Silsoe, Bedford, U.K.
- MORSLI B., MAZOUR M., ARABI M., MEDEDJEL N. et ROOSE É,2006**. Influence of land use, soils and cultural practices on erosion, eroded carbon and soil carbon stocks at the

- plot scale in the Mediterranean mountains of Northern Algeria. *In : Soil erosion and carbon dynamics*, É. ROOSE, R. LAL, C. FELLER, B. BARTHÈS and B.A. STEWART édit, Édit. CRC Press, Advances in Soil Science, vol. 15, p. 103-124.
- NASH, J.E., et SUTCLIGE J.V.,1970**, Riverflow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles. *J. Hydrol*, 10 : 282-290.
- Newson M.D, 1985**. Forestry and water on the uplands of Britain - the background of hydrological research and options for harmonious land use. *J. For.*, 79: 113-120.
- NRCS, 1997**. National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology. United States, Department of Agriculture, 762p.
- Okoth, P.F., 2003**. A hierarchical method for soil erosion assessment and spatial risk modelling, *Thesis Wageningen University* 232 pages.
- Onibon, H., 1995**. Caractérisation des zones homogènes du bassin versant de l'oued EZZIOUD à des fins de modélisation hydrologique. Mémoire de fin d'études d'ingénieurs, ESIER/ORSTOM.
- Patton, P.C., and Schumm S.A, 1975**. Gully erosion, Northwestern Colorado: a threshold phenomenon. *Geology*, 3: 83-90.
- Paustian, S.J., et Beschta.R.L, 1979**. The suspended sediment regime of an oregon coast range stream . *Water Ressources Bulletin*.v. 15 N° 1. pp 144-154
- Pearson, R.L., et L.D., Miller, 1972**. "Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie, pawnee national grasslands, colorado". *8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, Ann Arbor, Mishigan (USA), ERIM, pp 1357- 1381.
- Poesen, J., Govers G, 1994**. Bodemerosie in Midden-België. Een stand van zaken. *Onze Alma Mater*, 48 (3): 251-267.
- Rango, A. et Arnoldus H.M.J. 1987**. Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*.
- Razafiniaina, 2002**. Etude expérimentale de l'érosion hydrique inter rigole sous culture de MIL et d'ARACHID au Sénégal. DAKAR.
- Reed, L.A., 1971**. Hydrological and sedimentation of Corey Creek and Elk Run Basins, North-Central Pennsylvania. *US Geol. Surv. Water Supply Paper*.
- Remini, B., 1997**. Envasement des retenues de barrages : mécanisme et moyens de lutte par la technique du soutirage. Th. Doct. Etat, Ecole Nationale polytechnique d'Alge, 342p.
- Remini, B., 1999**. Envasement des barrages dans le Maghreb. *Bul. Int. de l'eau et de l'Env.*, 22 : 4-8.
- Remini, B., et al, 2003**. Envasement des barrages, EDOC, ALGER.
- Remini, B., 2004**. Les moyens techniques de lutte contre la sédimentation des barrages en Algérie. Colloque International « TERRE et EAU » Annaba, 21, 22 & 23 Novembre 2004.
- Remini, B., 2011**. Une nouvelle approche de lutte contre l'envasement des barrages : la technique des obstacles émergés. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 09, Décembre 2011, pp. 43-53
- Remini, B., W., Hallouche, 2007**. Studying Sediment. *Revue Internationale Water Power et Dam construction*. Octobre, 42-45.
- Remini B., Avenard J., Kettab A., 2003**. Envasement des barrages. Les Editions CEDOC.
- Remini W., Remini B., 2003**. La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord. *Larhyss Journal*, 2 : 45-54.
- Remini B., Hallouche W., 2005**. Prévision de l'envasement des barrages du Maghreb. *Larhyss journal*, 4 : 69-80.
- Remini B., Hallouche W., Achour B., 2009**. L'Algérie : Plus d'un siècle de désenvasement des barrages. L'état des ressources en eau du Maghreb en 2009. UNESCO. p : 123-142.

- Remini B., Bensafia D., 2009.** Le problème de la sédimentation dans les barrages des zones arides. Cas Algériens. Atelier scientifique MED - FRIEND Rabat 11-12 décembre 2009 Université Mohamed V-Agdal, Faculté des Sciences.
- Renard, K.G., G.R., Foster, G.A., Weesies and J.,P., Porter, 1991.** RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 41, 1: 30-33.
- Roche, M., 1963.** Hydrologie de surface. Paris, Gauthier - Villars. 430 p. 204 fig.
- Roose, 1937.** Modern conception of the mechanic of fluid turbulence. Trans-ASCE.U.S.A.
- Roose, 1967.** Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agronomie tropicale (France)*, volume 22, n°2, p 123-152
- Roose, J.W., R.H., Haas, D.W., Deering, J.A., Schell, et J.C., Harlan, 1974.** "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation". *Greenbelt, Maryland, NASA/GSFC*, 371 p.
- Roose.E., et Piot, 1984.** Runoff, erosion and soil fertility restoration on the mossi plateau (central zone of upper- volta). Symp. Intern challenge in African Hydrology and water ressource. Harare Symposium I.A.N.S publ, 144, p 485-498.
- Roose,E., et Sarrailh J.-M., 1990** - érodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, Paris, vol. XXV, n° 1 2, p. 7-30.
- Roose, E., 1994.** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Pédol. FAO*, 70.
- Rondeaux, G., M., Steven, et F., Baret, 1996.** "Optimization of soil-adjusted vegetation indices", *Remote Sensing of Environment*, 55(2): 95-107.
- Saber, N., 2002.** La qualité du sol sous semis direct en milieu semi-aride marocain. Thèse de Doctorat d'état Es-sciences. Faculté des sciences El Jadida. 141p.
- Saber, N., et Mrabet R, 2002.** Impact of no tillage and crop sequence on selected soil quality attributes of a vertic calcixeroll soil in Morocco. *Journal Agronomie*. vol. 22, no5, pp. 451-459.
- Sadik, A., S., Bouhlassa, J., Auajjar, A., Faleh et J.,J., Macaire, 2004.** Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : *cas du bassin versant de l'oued Boussouab*. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 2004, n°26, p. 69-79.
- Seltzer, P., 1946** - le climat de l'Algérie. Univ. Alger. Inst. Météo et Phys du Globe, Carbonnel. 219 p., 2 cartes.
- Shabban, A., Khawlie.M, 1998.** Ceoenvironmental assessment of riparian zones under extreme climatic events ; a case study of representative rivers in lebanon.Mediterranean rivers and riparian zones- processes and management symposium, Zaragosa, Spain, 21 September-2October,1998 ,25per A hnlichkeitsmechanik und turbulenz forshung. Mitteil preuss, versuchants wasser und schiffsbou, Berlin n°26, Allemagne.
- Shaghaeghi, fallah, R., 2001,** Simulation of maximum peak discharge in river Tributaries using HEC-HMS model (Case study: Mohammadabad watershed, Golestan province), The-sis of M.Sc. natural resources faculty, university of Gorgan, p155.
- Shin, G. J, 1999.** The analysis of soil erosion analysis in watershed using GIS", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Gang-won National University.
- Sogreah, 1984.** Etude du schéma directeur des ressources en eau du Cheliff et réaménagement du périmètre du bas Cheliff. Modèle du bilan des ressources en eau dans la situation de référence. Rapport B4.
- Stone, R.P., et D., Hilborn, 2000.** Equation universelle des pertes en terre (USLE).Soil Erosion.*Water Resources Management 16: 447-467, 2002.*
- Suryana, N., 1997.** A geo-Information Theoretical Approach to Inductive Modelling Based on Terrain mapping Units.Ph.D Thesis, Wageningen Agricultural University.

- Taillon, A., 1991.** Classification de l'occupation des sols à des fins hydrologiques. Institut national de la recherche scientifique Inrs-eau. Mémoire de recherche. Université du Québec.
- Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani A., 2001.** Étude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14, 175-185.
- Terfous, A., Ghenim, A., Bouanani A., Megnounif, A., et Baba Hamed K., 2002.** Rôle des crues dans la énése des sédiments transportés en suspension par trois cours d'eau des zones semi-arides méditerranéennes. Int. Workshop on Water in the Mediterranean bassin. Ressources and sustainable development (WATMED), Monastir Tunisia 10-13 Oct . p888-893.
- Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani A., 2003.** Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes. IAHS pub. n° 278 , 366-372.
- Tixeront, J., 1960.** Taux d'abrasion et teneur en suspension des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie .Secretariat d'état à l'agriculture Tunis.
- Touaibia, B., Achite, M., 2003.** Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. Journal des sciences hydrologique p 235.
- Touaibia, B., 2000 .** Erosion – Transport solide- envasement des barrages . cas du bassin versant Mina, Thèse de Doctorat d'état , INA, EL-Harrache, Algérie.
- Touaibia, B., Gomer.D, Aidaoui.A et Achite, 2001.** Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi aride, de l'Algérie du Nord. journal des science hydrologique. 46(1), 41-53.
- Touaibia, B., S., Dautrebande, D., Gomer et A., Kidaoui, 1999.** Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales :bassin versant de l'Oued Mina. *J. Sciences Hydrologiques.*, 44, 6. : IAHS Press. Wallingford.UK : 973- 986.
- Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., et Brou, Y.T., 2013.** Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina enAlgérie par télédétection et SIG. Hydrological Sciences Journal 58 (7), 1–17.
- Toumi, S., 2013.** Application des Techniques Nucléaires et de La Télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de L'oued Mina. Thèse doctorat en science. ENSH.
- Touré M. Karambiri H. Hamma Y. (2004).**
<http://www.bf.refer.org/toure/pageweb/degrasols1.htm>
- Tribak, A., EL Garouani , A., etabahrour, M. 2006.** Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique dans un espace montagnard marocain : cas du sous bassin versant de l'Oued Tleta, Prérif oriental. *In : ISCO - Marrakech*:1-10.
- U.H.A.S.L.S, 2016.** Unité Hydrographique Aquin Saint Louis de Sud, rapport de l'étude sur l'érosion des sols MUSLE
http://haitienvironnement.org/yahoo_site_admin/assets/docs/Erosion.145104054.pdf
 Consulté le 21/08/2016
- Walling, D.E., 1974.** Suspended sediment and solute yield from small catchment prior to urbanisation in : Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers (ed. by G.P., Willams, 1989). *J. Hydrol.*, 111: 89-106.
- Walling, D. E., 1984 -** The sediment yields of African rivers. *IAHS Publ.*, Harare Symp., 144, 265-283.
- Wassenaar, T., 2001.** Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résolution spatiale. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 194 p.
- White, W.R., 1986.** Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants, *Projet 5.3 du programme hydrologique international*, 155 pages.
- Williams, K.F., and Reed L.A. (1972).** Appraisal of stream sedimentation in the Susquehanna River basin. US Geol. Surv. Water Supply Paper.

- Williams, G.P.,1989.** Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers.J.Hydrol.N°111.pp89-106.
- Willams, G.P., 1989.** Sediment concentration versus water discharge during single Hdrologic events in rivers. J. Hydrol., 111: 89-106.
- Wischmeier, 1978 .** Predicting rainfall erosion losses, aguide to conservation planning. Agricultur Hand- Book. N°537.USA.
- Wischmeier, W.H., Smith D.D, 1978.** Predicting Rainfall Erosion losses, Agriculture Handbook no. 57, US Department of Agriculture. Washington DC. USA. 58p.
- Wood, P.A., 1977.** Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother, West Sussex, England. Sedimentology 24: 437-445.
- Wundt, W., 1937 -** Beziehungen zwischen den Mittelwerten von Niederschalg, Abfluss, Verdunstung und Lufttemperatur für die Landflächen der Erde. Deutsche. Wasserwirtschaft. 4 p., 1fig.
- Seltzer, P., 1946 -** le climat de l'Algérie. Univ. Alger. Inst. Météo et Phys du Globe, Carbonnel.219 p., 2 cartes.
- Yalin, M.S., 1980.** Mechanics of sediment transport, Pergamon Press, Oxford.
- Yener, M. K et al,2012,** Modeling Studies with HEC-HMS And Runoff Scenarios in Yuvacik Basin, Turkiye, International Congress on River Basin Management, pp 621-634.
- Yusop, Z., et al,2007,** Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modelling stormflow hydrograph in an oil palm catchment, Water Science and Technology, 56(8), pp41-48.
- Zaibak, I., 2008.** Contribution à une approche cartographique de l'érosion spécifique dans le bassin versant de l'oued Cheliff. Mémoire de Magister. ENSH. Algérie.

Annexes

Annexe 1. Données des précipitations et des débits**Crue de 06 à 09 mars 1980****PJmax=36 mm**

jours	heure	Ql (m ³ /s)
06-mars-80	08:00	30.550
06-mars-80	09:25	79.900
06-mars-80	09:35	96.250
06-mars-80	09:45	110.500
06-mars-80	13:00	164.333
06-mars-80	14:10	185.000
06-mars-80	16:30	197.143
07-mars-80	07:15	41.935
07-mars-80	09:50	33.250
08-mars-80	07:55	83.500
08-mars-80	09:35	96.250
08-mars-80	10:00	77.500
09-mars-80	08:00	40.450

**Crue de 18 à 21 avril 1982
PJmax32.32 mm**

jours	heure	Ql (m ³ /s)
18-avr-82	08:00	2.420
18-avr-82	12:00	33.250
18-avr-82	12:30	37.975
18-avr-82	12:40	55.500
18-avr-82	13:00	61.800
18-avr-82	13:30	77.500
18-avr-82	13:45	96.250
18-avr-82	13:46	96.250
18-avr-82	14:20	122.250
18-avr-82	16:30	163.300
18-avr-82	16:35	163.300
19-avr-82	08:00	40.450
19-avr-82	19:00	31.000
20-avr-82	08:00	8.840
21-avr-82	08:00	3.446

Crue de 08 à 12 mars 1986**PJ max= 28.61 mm**

jours	heure	Ql (m ³ /s)
08-mars-86	08:00	89.500
08-mars-86	17:00	154.000
08-mars-86	17:00	154.000
08-mars-86	18:00	197.143
08-mars-86	18:30	215.357
08-mars-86	18:30	215.357
09-mars-86	07:00	331.400
09-mars-86	09:00	351.000
09-mars-86	16:00	337.000
10-mars-86	07:00	221.429
10-mars-86	10:00	209.286
10-mars-86	10:10	209.286
10-mars-86	11:00	197.143
10-mars-86	13:30	174.667
10-mars-86	17:00	164.333
11-mars-86	08:00	31.000
11-mars-86	12:00	26.500
12-mars-86	08:00	19.300

Crue de 23 à 25 septembre 1993**PJ max= 22 mm**

jours	heure	Ql (m ³ /s)
23-sept-93	08:00	3.138
23-sept-93	09:30	9.520
23-sept-93	10:05	16.720
23-sept-93	10:20	24.700
23-sept-93	11:00	31.000
23-sept-93	11:30	38.470
23-sept-93	12:00	46.410
23-sept-93	14:10	67.150
23-sept-93	16:45	60.750
23-sept-93	17:00	77.500
23-sept-93	17:25	106.750
23-sept-93	18:00	126.500
24-sept-93	07:20	33.250
24-sept-93	09:00	26.500
24-sept-93	11:30	21.100
24-sept-93	17:00	13.600
25-sept-93	07:00	4.78
25-sept-93	08:00	7.05
25-sept-93	09:00	10.88
25-sept-93	09:30	13.60
25-sept-93	09:45	17.95
25-sept-93	10:00	22.90
25-sept-93	10:20	26.50
25-sept-93	11:00	21.55
25-sept-93	12:00	17.95
25-sept-93	13:00	15.94
25-sept-93	14:00	13.60
25-sept-93	18:00	10.20

Crue de 23 à 26 septembre 1994

PJ max= 22.9 mm

Précipitations maximales journalières en mm

jours	heure	Ql (m ³ /s)
23-sept-94	08:00	3.138
23-sept-94	09:00	9.520
23-sept-94	10:00	16.720
23-sept-94	10:30	24.700
23-sept-94	11:00	31.000
23-sept-94	11:30	38.470
23-sept-94	12:00	46.410
23-sept-94	13:00	53.985
23-sept-94	14:00	67.150
23-sept-94	16:00	60.750
23-sept-94	17:00	77.500
23-sept-94	17:30	106.750
23-sept-94	18:00	126.500
24-sept-94	07:00	33.250
24-sept-94	09:00	26.500
24-sept-94	11:00	21.100
24-sept-94	13:00	18.400
24-sept-94	17:00	13.600
25-sept-94	13:00	7.92
26-sept-94	13:00	5.01

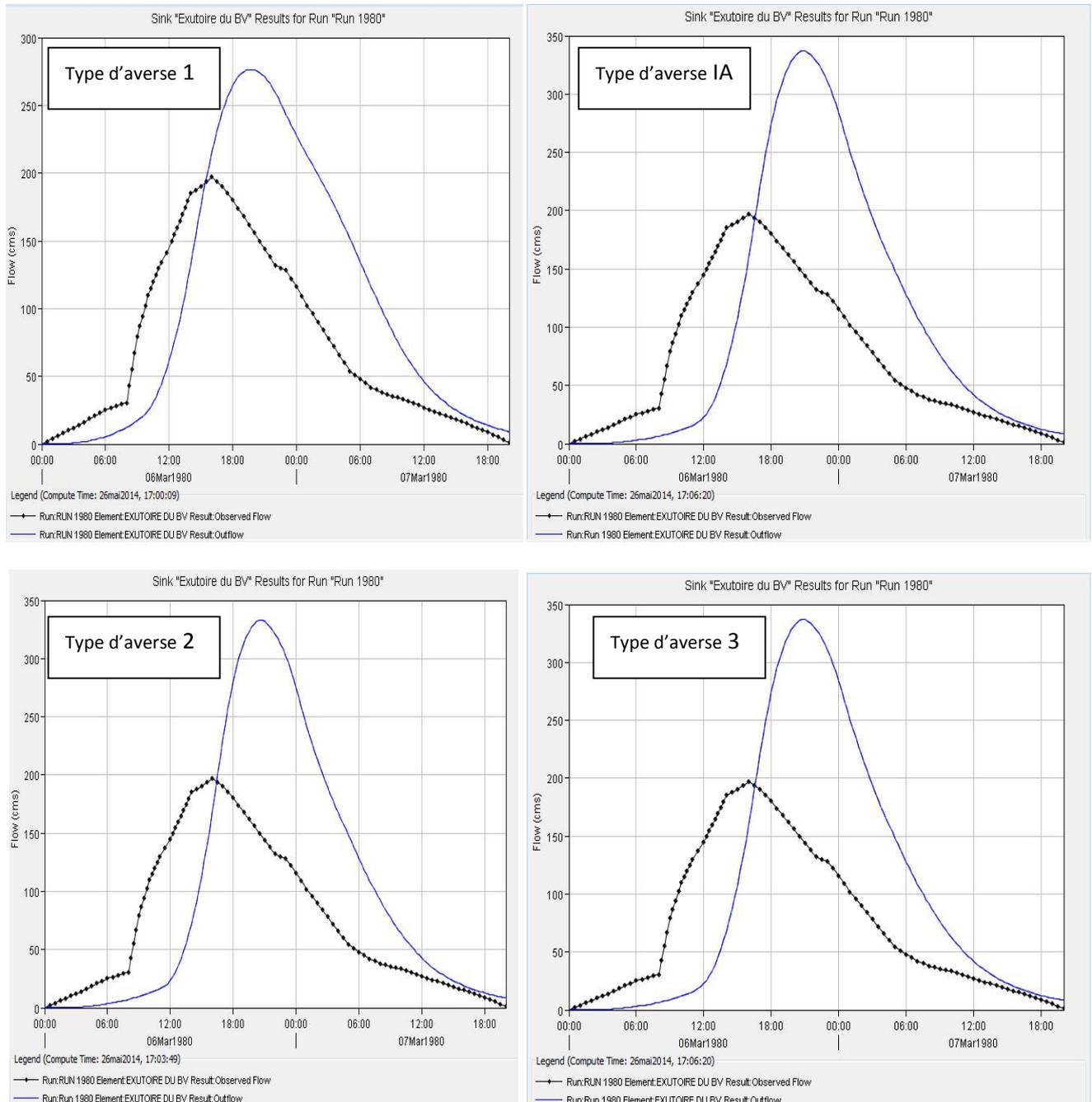
stations	011407
1976/77	27,1
77/78	19,8
78/79	35,4
79/80	54
80/81	39,6
81/82	44,1
82/83	52,8
83/84	35,6
84/85	67,8
85/86	41,1
86/87	31,6
87/88	17,5
88/89	40,8
89/90	62,5
90/91	29,2
91/92	48
92/93	27,5
93/94	22,3
94/95	58
95/96	37,8
96/97	42,3
97/98	63,8
98/99	51,6
99/00	38,3
00/01	33,7
01/02	34,1
02/03	56,1
03/04	27,7
04/05	26,2
La moyenne	40,22
Le maximum	67,80
Le minimum	17,50
Ecart-type	13,64
La variance	186,14
Coef Asymétrie	0,36

Tableau : Le curve Numbers (CN) en fonction de type de sol et le groupe hydrologiques des sols

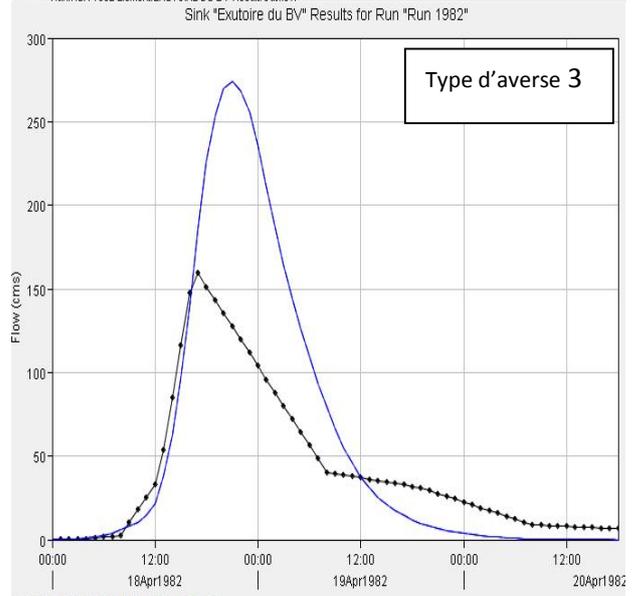
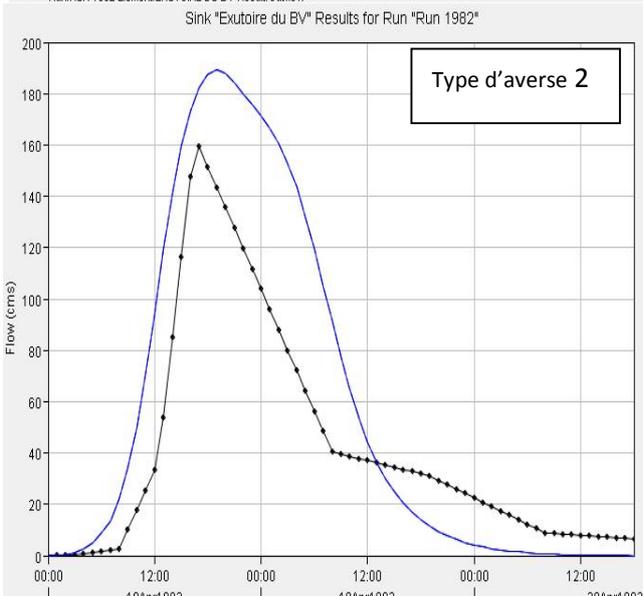
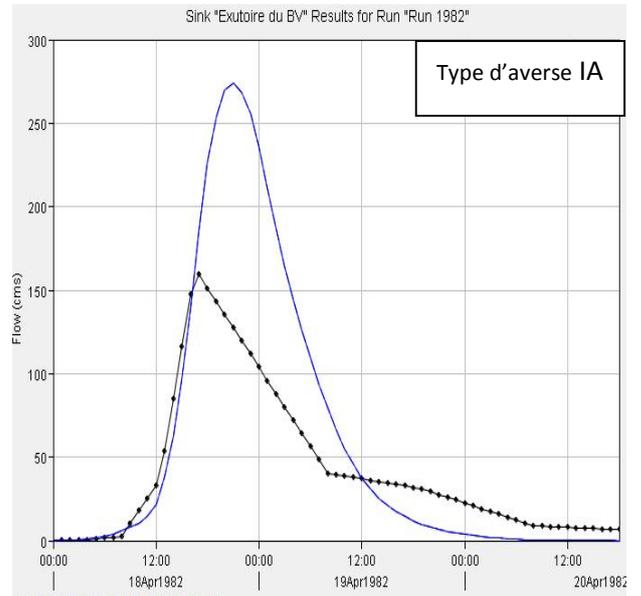
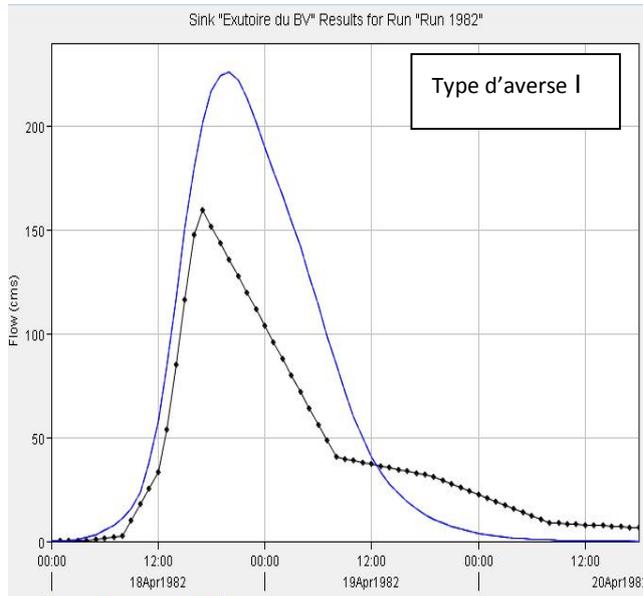
Description	Average % Impervious	Curve Number by Hydrologic Soil Group				Typical Land Uses
		A	B	C	D	
Residential (High Density)	65	77	85	90	92	Multi-family, Apartments, Condos, Trailer Parks
Residential (Med. Density)	30	57	72	81	86	Single-Family, Lot Size ¼ to 1 acre
Residential (Low Density)	15	48	66	78	83	Single-Family, Lot Size 1 acre and Greater
Commercial	85	89	92	94	95	Strip Commercial, Shopping Ctrs, Convenience Stores
Industrial	72	81	88	91	93	Light Industrial, Schools, Prisons, Treatment Plants
Disturbed/Transitional	5	76	85	89	91	Gravel Parking, Quarries, Land Under Development
Agricultural	5	67	77	83	87	Cultivated Land, Row crops, Broadcast Legumes
Open Land – Good	5	39	61	74	80	Parks, Golf Courses, Greenways, Grazed Pasture
Meadow	5	30	58	71	78	Hay Fields, Tall Grass, Ungrazed Pasture
Woods (Thick Cover)	5	30	55	70	77	Forest Litter and Brush adequately cover soil
Woods (Thin Cover)	5	43	65	76	82	Light Woods, Woods-Grass combination, Tree Farms
Impervious	95	98	98	98	98	Paved Parking, Shopping Malls, Major Roadways
Water	100	100	100	100	100	Water Bodies, Lakes, Ponds, Wetlands

Annexe 2. Les graphes de simulation des événements

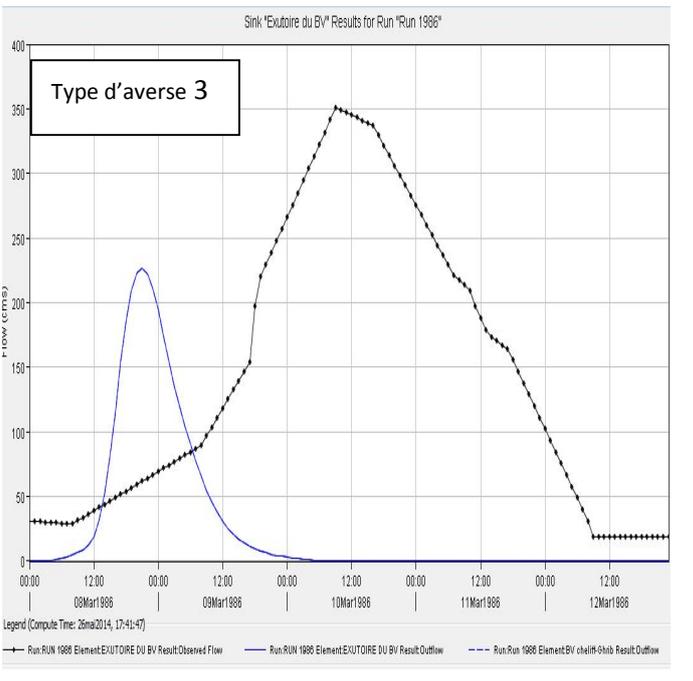
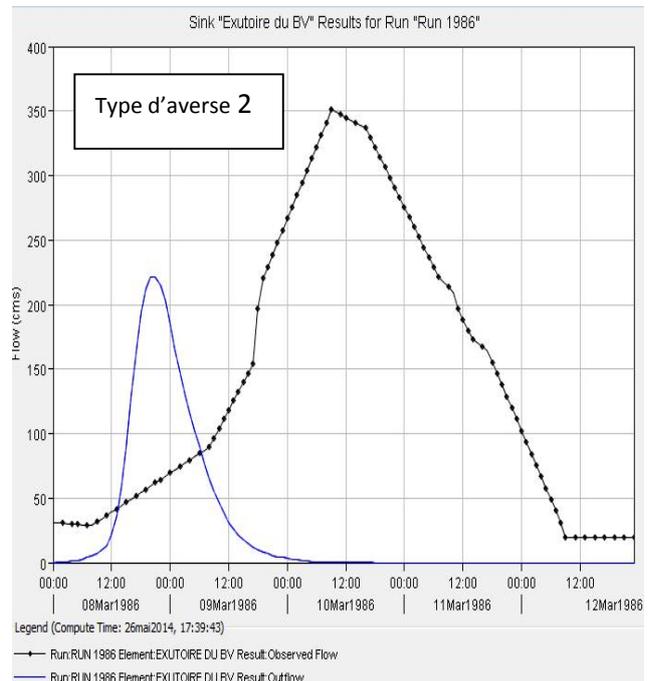
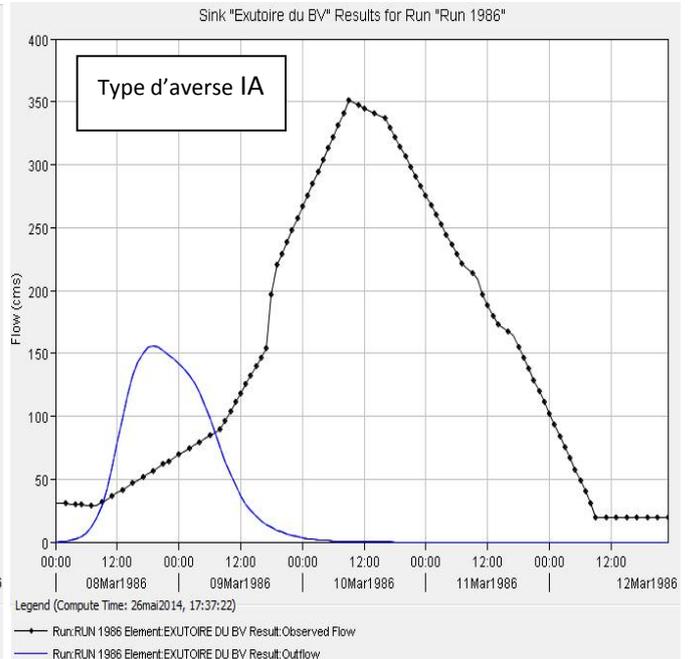
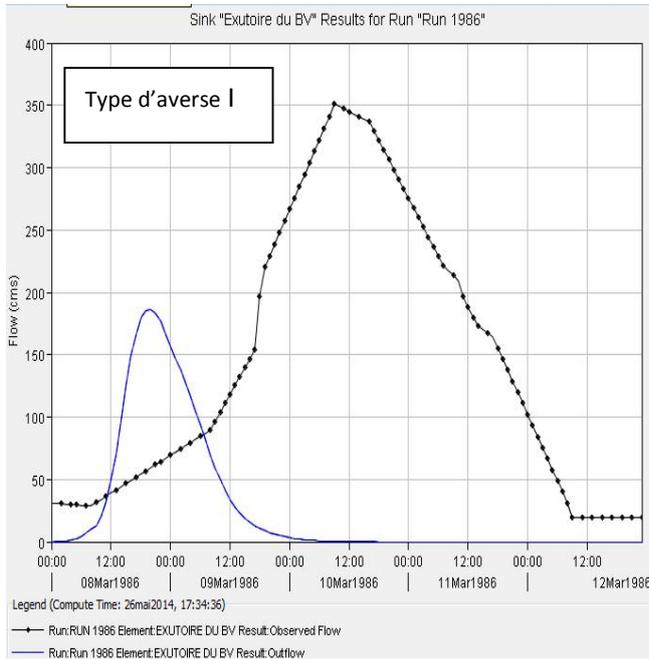
1. Graphes de simulation des événements en utilisant le formalisme Lag



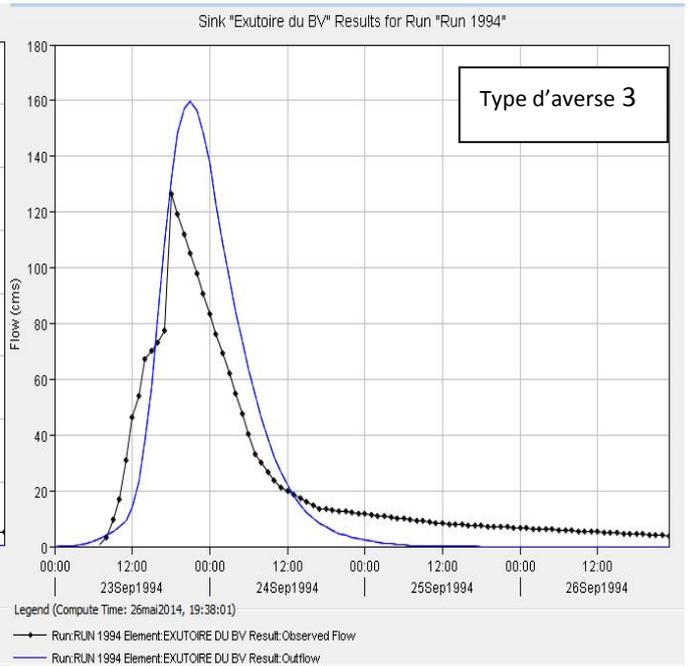
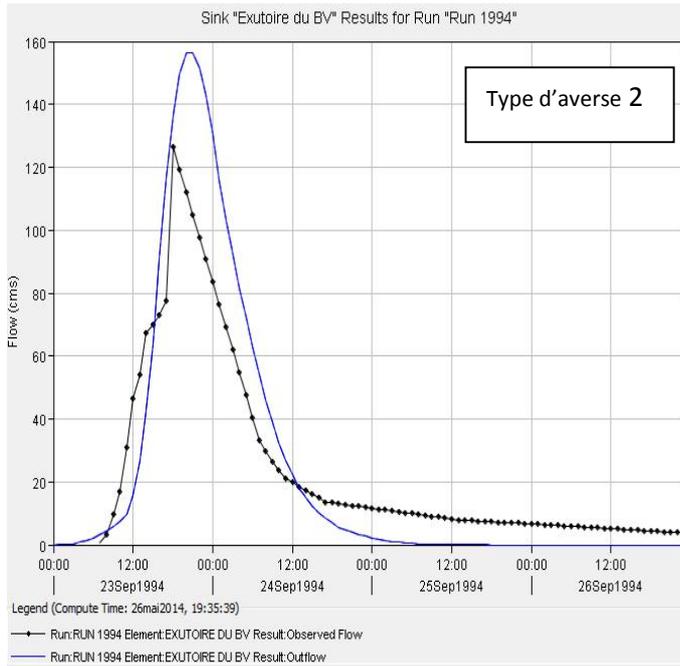
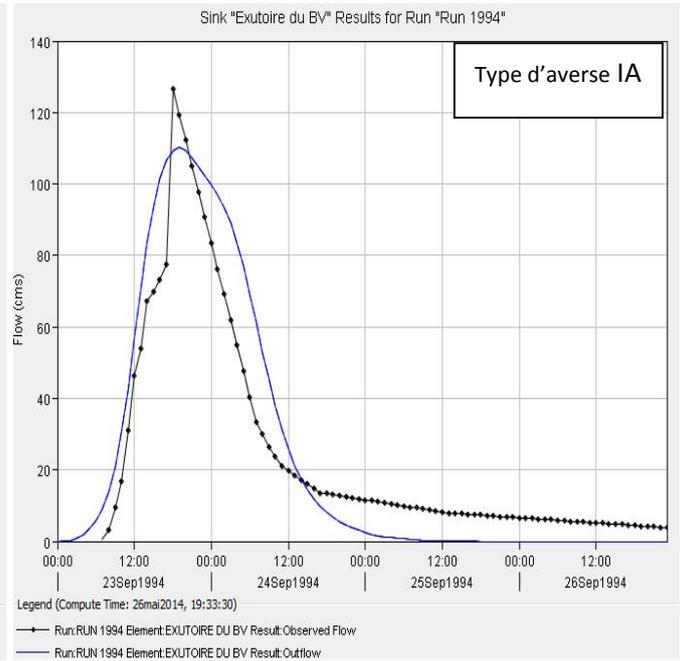
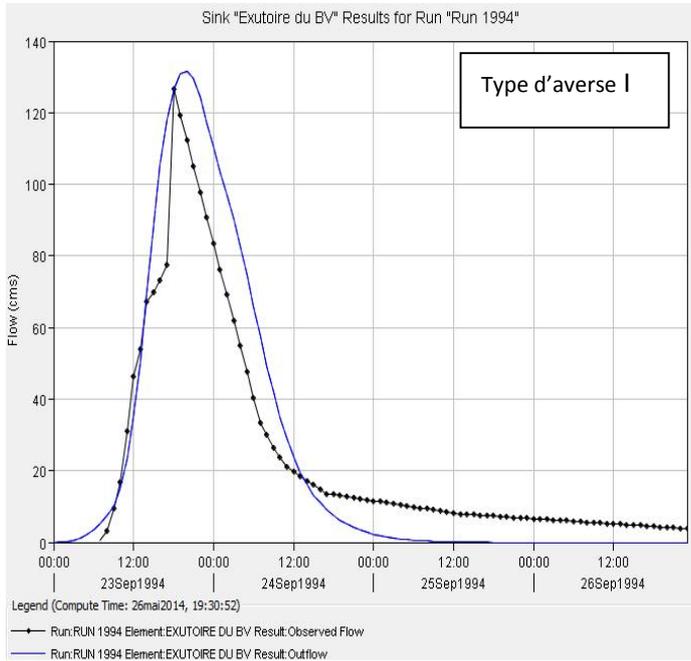
Hydrogrammes des crues de l'évènement de 06-09/03/1980 avec la fonction de formalisme lag



Hydrogrammes des crues de l'évènement de 18-21/04/1982 avec la fonction de formalisme lag

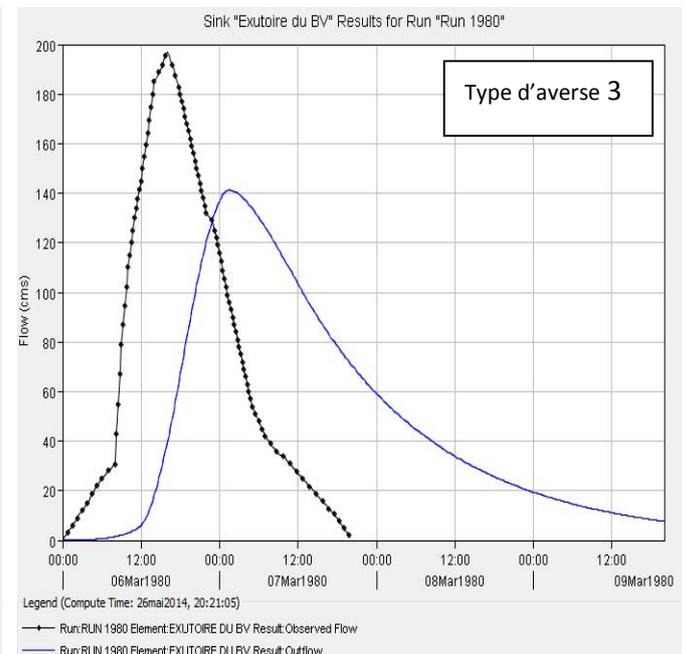
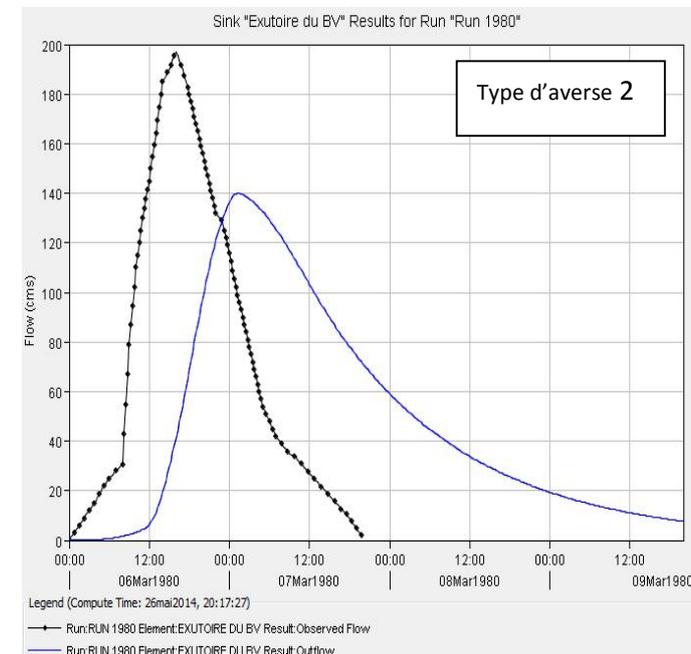
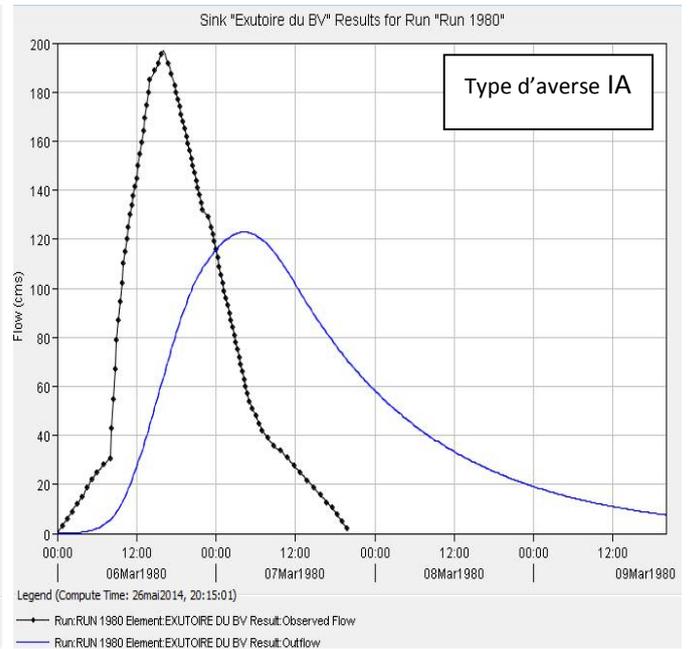
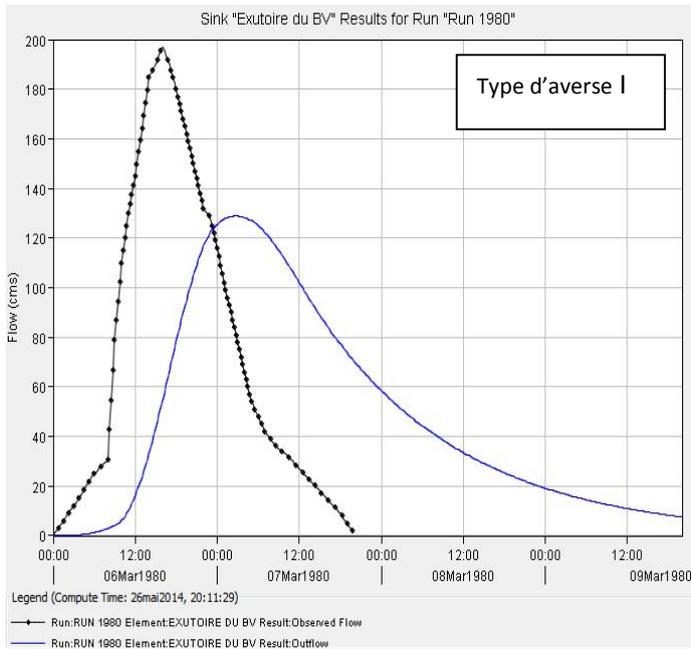


Hydrogrammes des crues de l'évènement de 08-12/03/1986 avec la fonction de formalisme lag

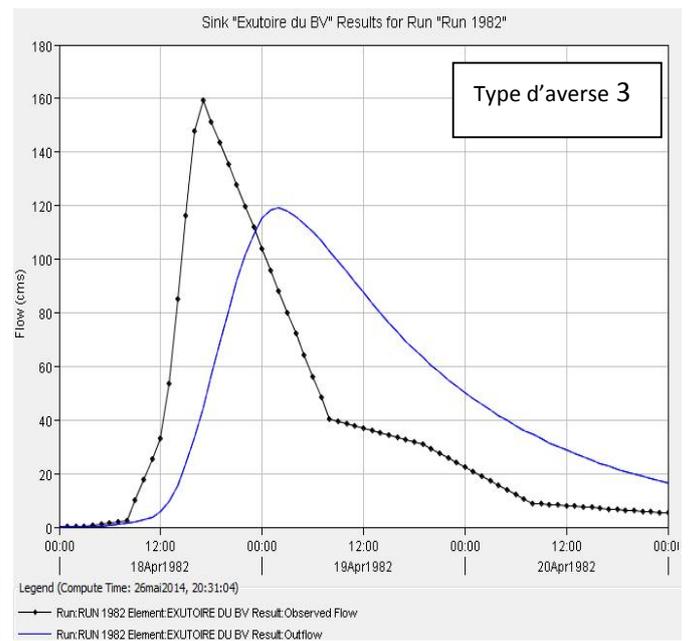
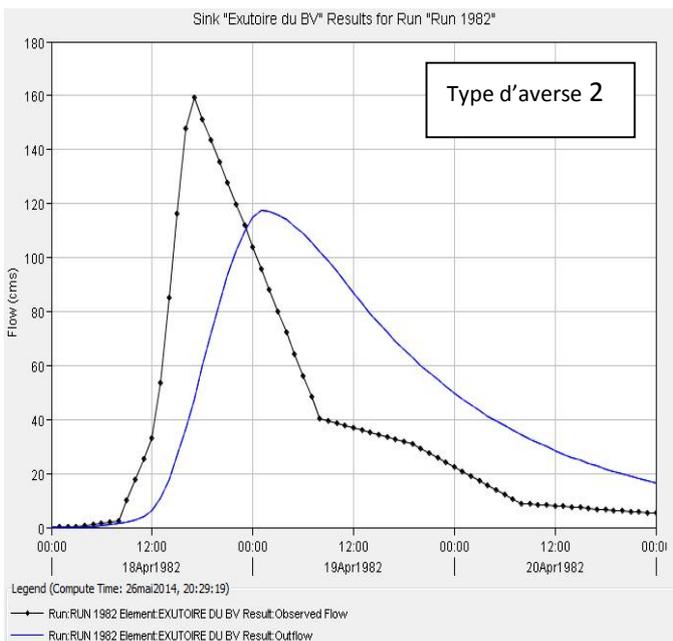
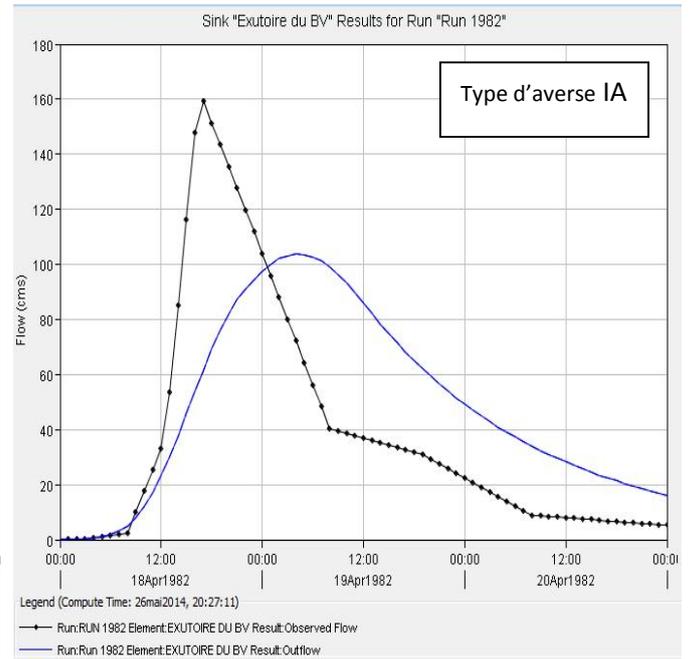
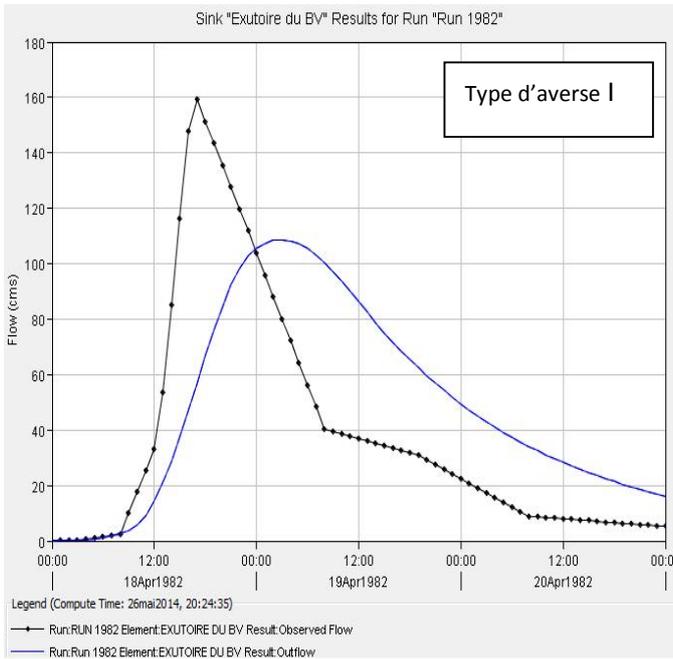


Hydrogrammes des crues de l'évènement de 23-26/09/1994 avec la fonction de formalisme lag

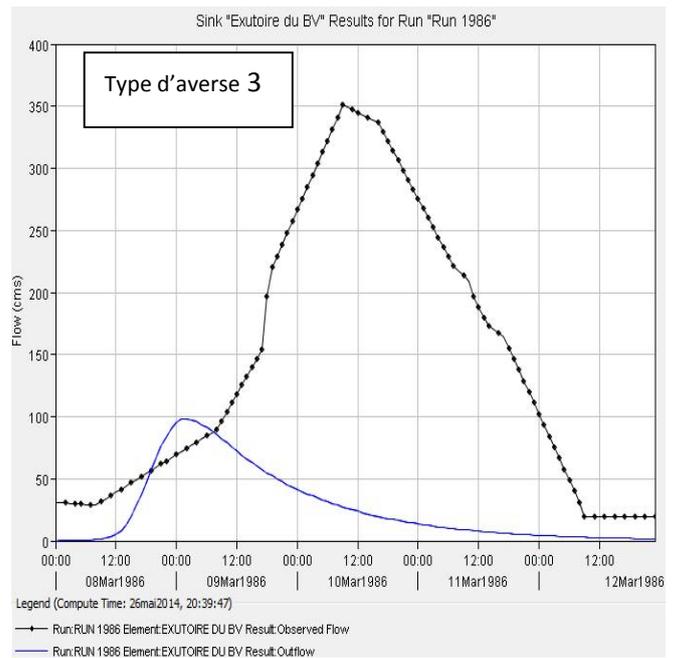
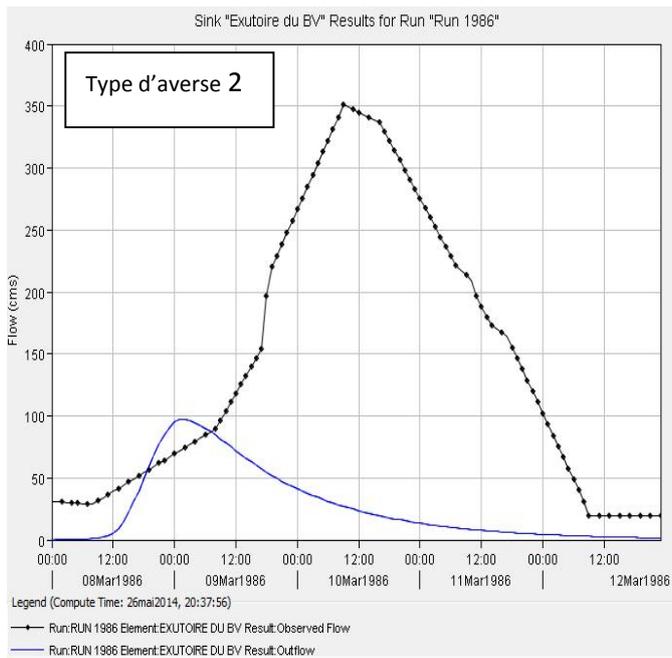
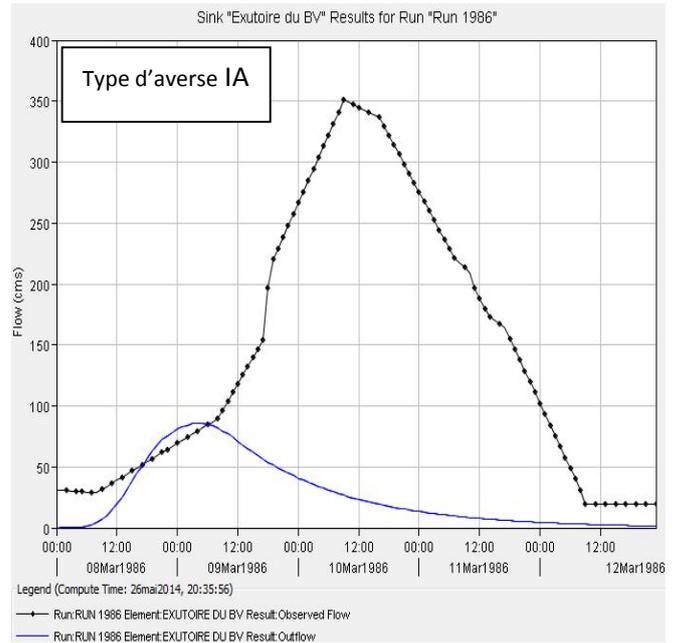
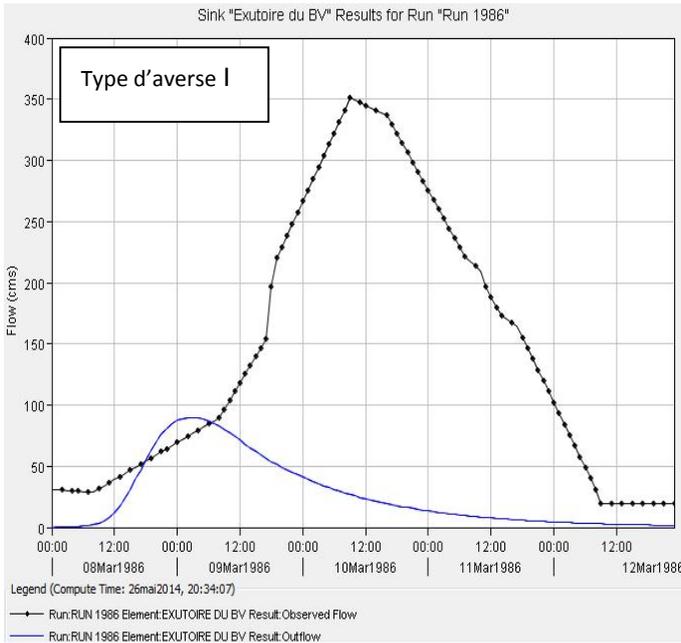
2. Graphes de simulation des événements en utilisant le formalisme Clark



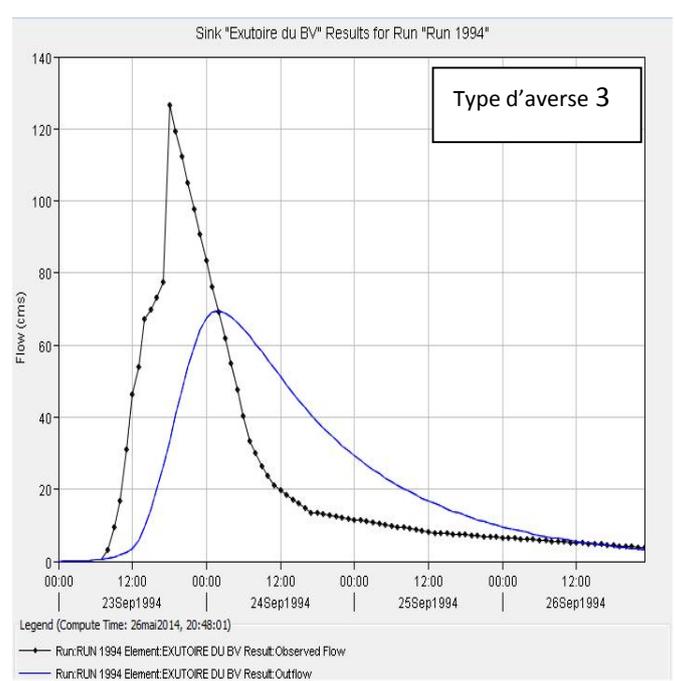
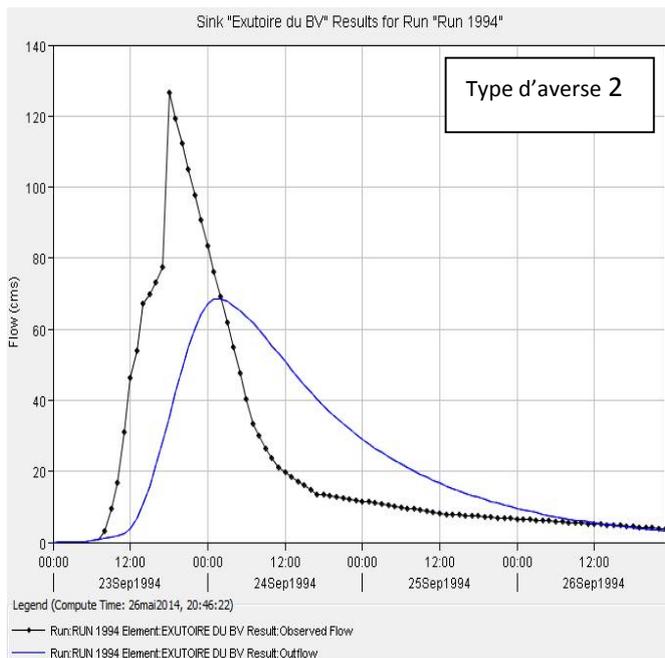
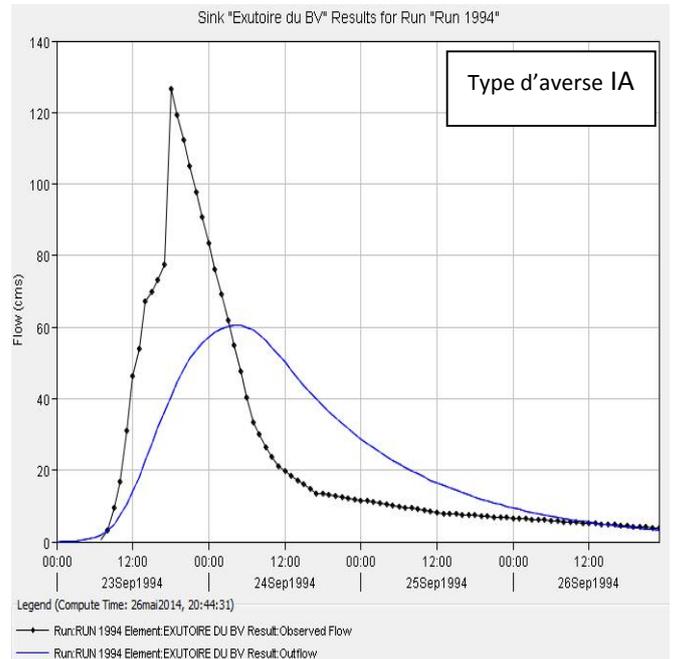
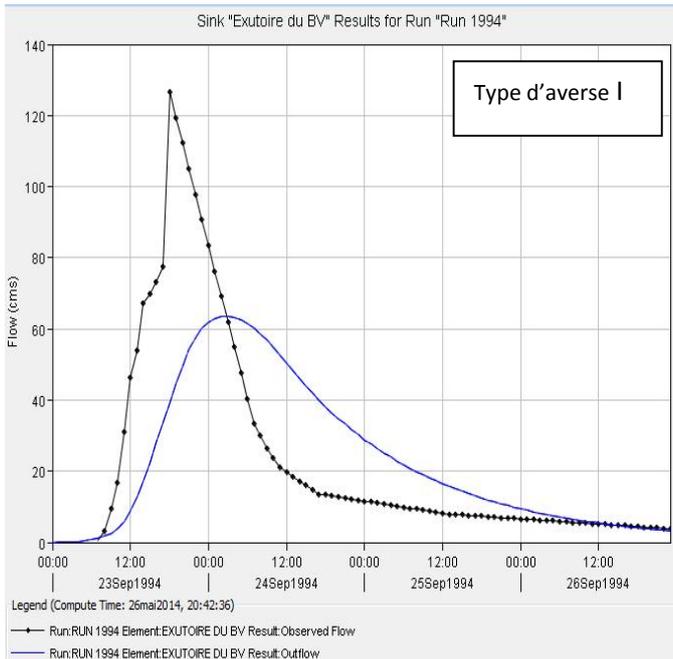
Hydrogrammes des crues de l'évènement de 06-09/03/1980 avec la fonction de formalisme Clark



Hydrogrammes des crues de l'évènement de 18-21/04/1982 avec la fonction de formalisme Clark



Hydrogrammes des crues de l'évènement de 08-12/03/1986 avec la fonction de formalisme Clark

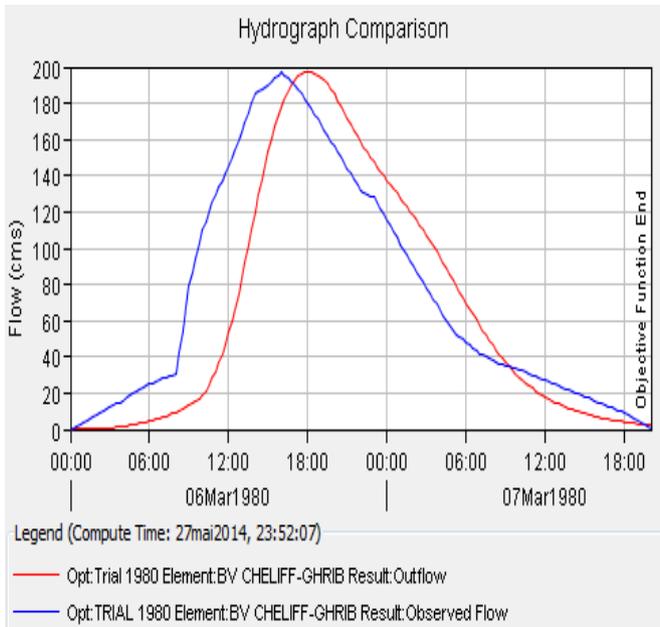


Hydrogrammes des crues de l'évènement de 23-26/09/1994 avec la fonction de formalisme Clark

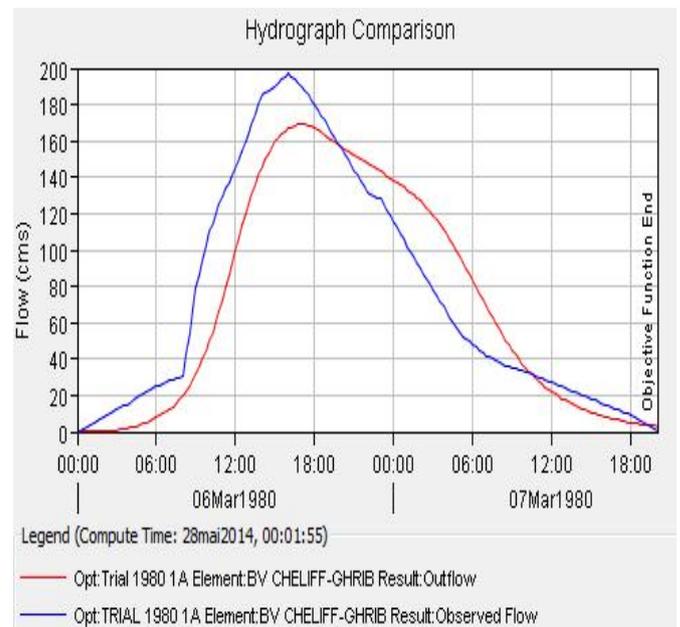
3. Graphes de calibration des événements avec formalisme Lag:

1-événement 1980 :

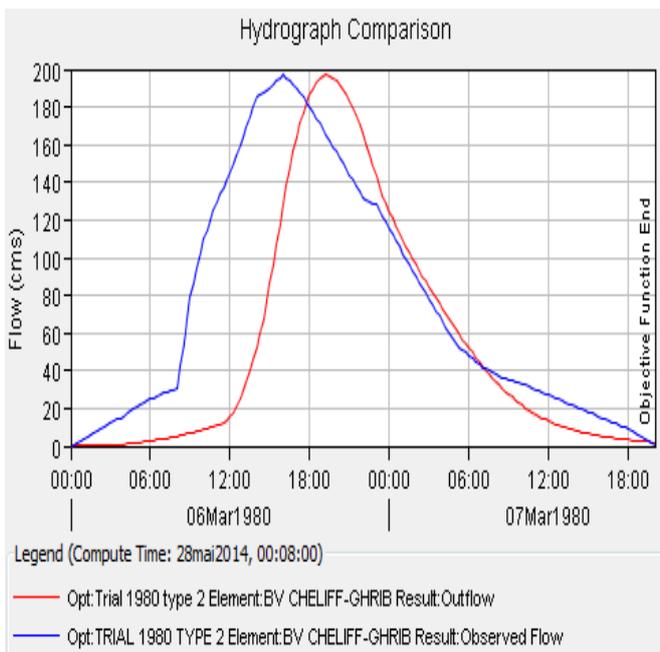
Averse type 1 :



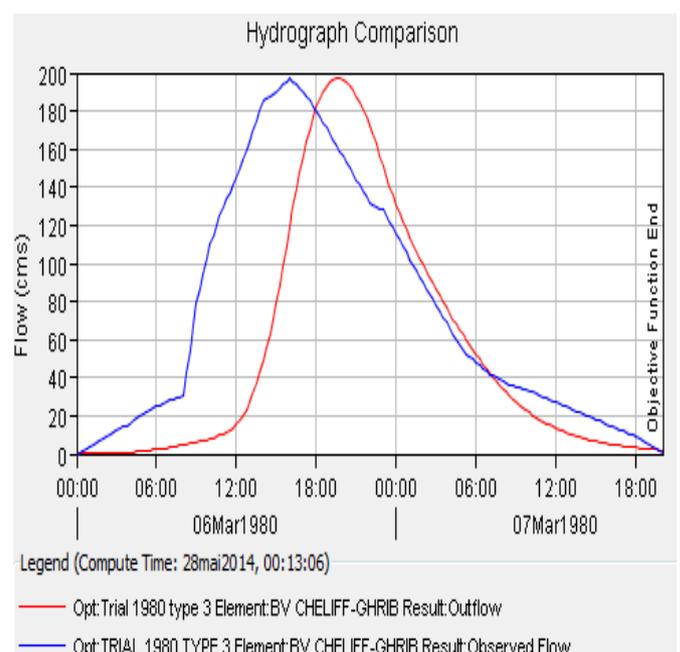
Averse type 1A :



Averse type 2 :

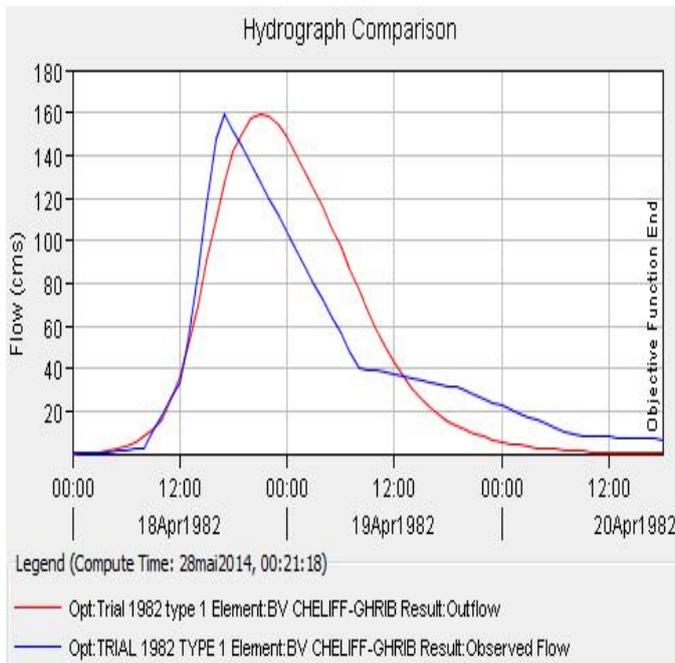


Averse type 3 :

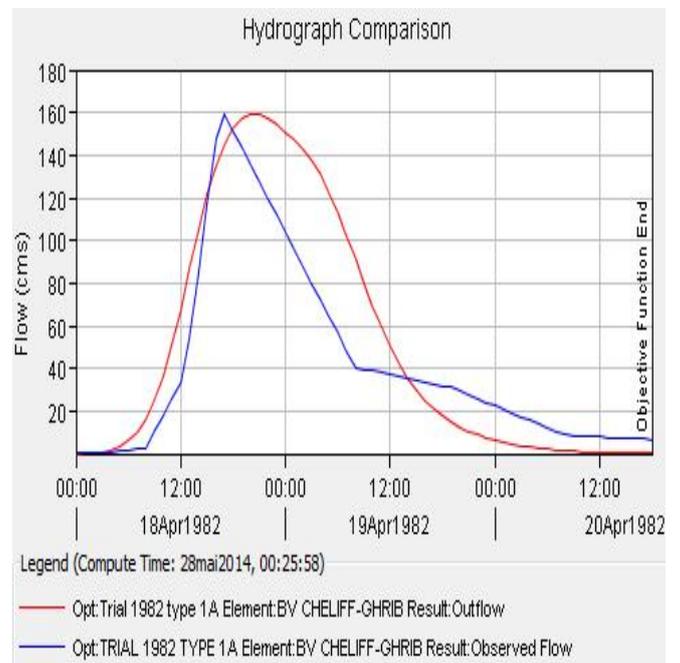


2-évènement 1982 :

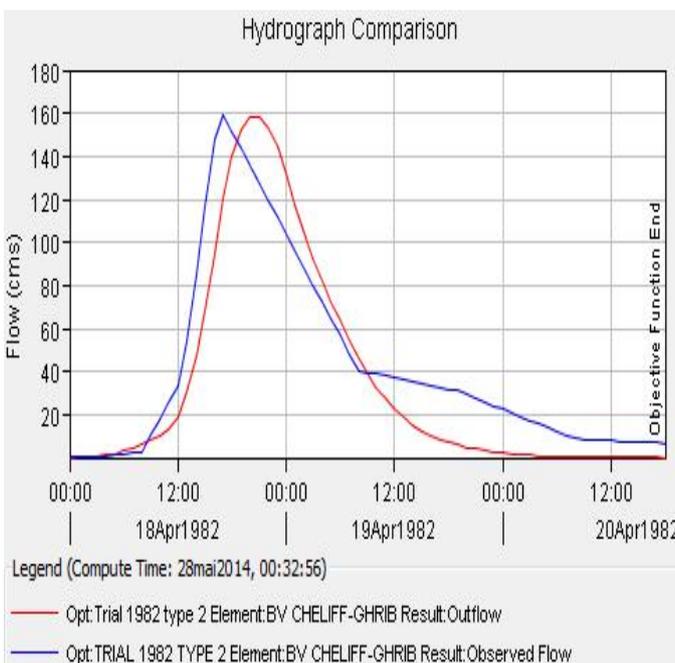
Averse type 1 :



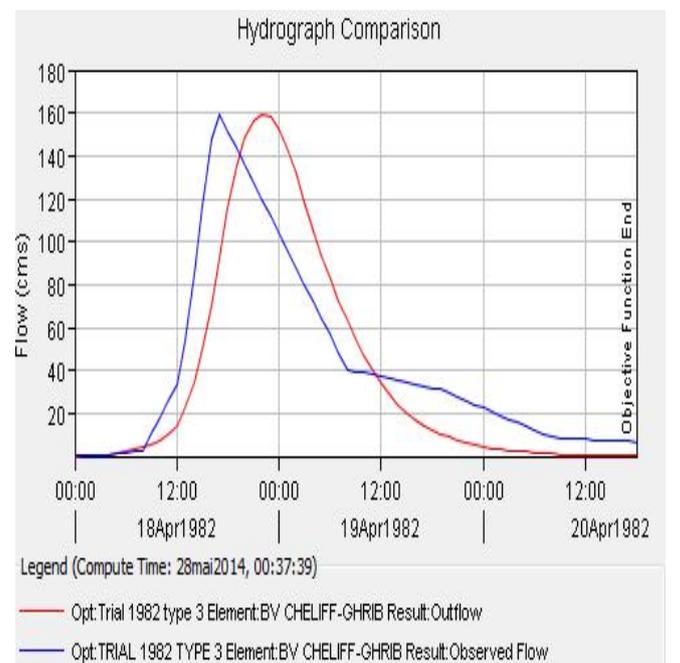
Averse type 1A :



Averse type 2 :



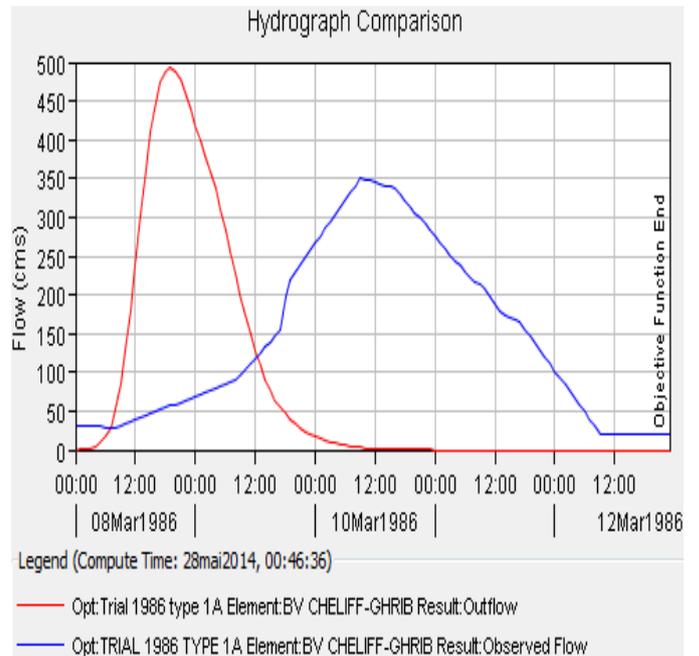
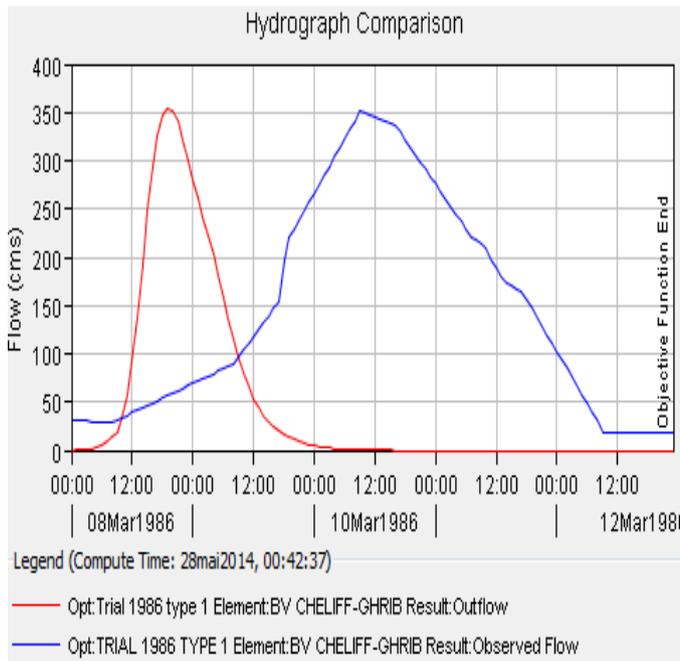
Averse type 3 :



3-événement 1986 :

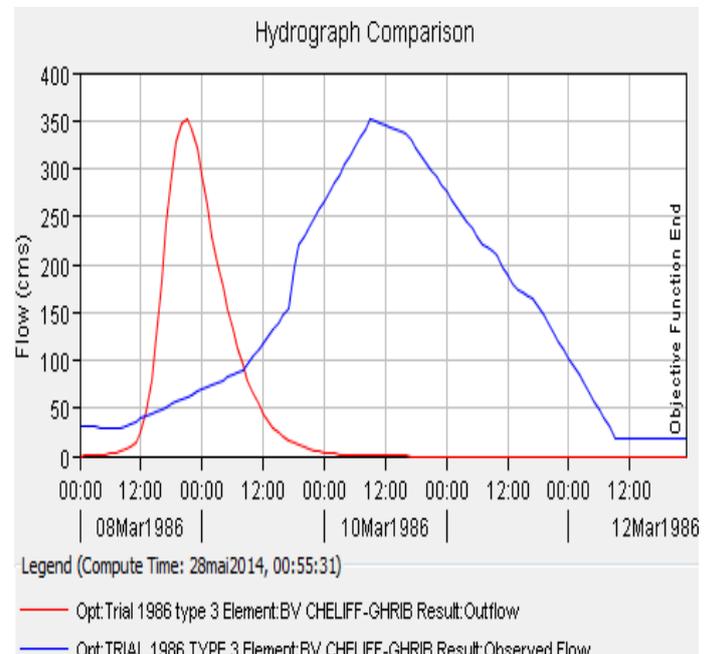
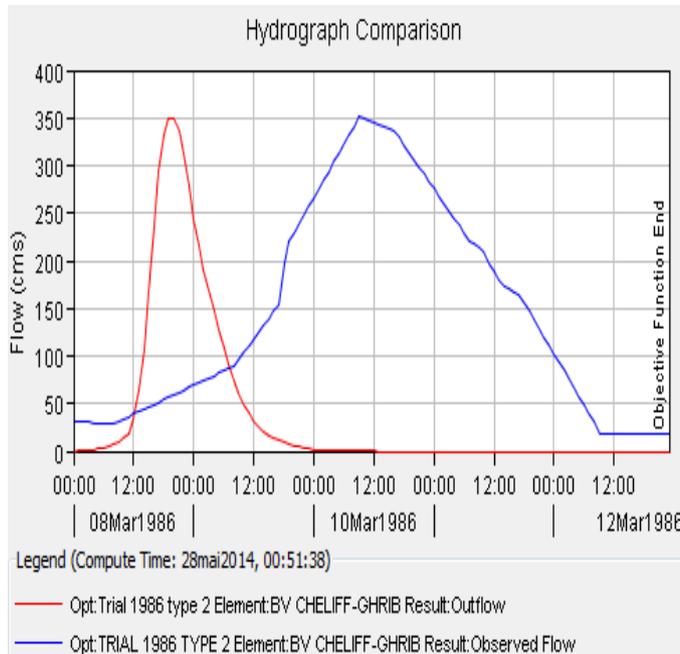
Averse type 1 :

Averse type 1A :



Averse type 2 :

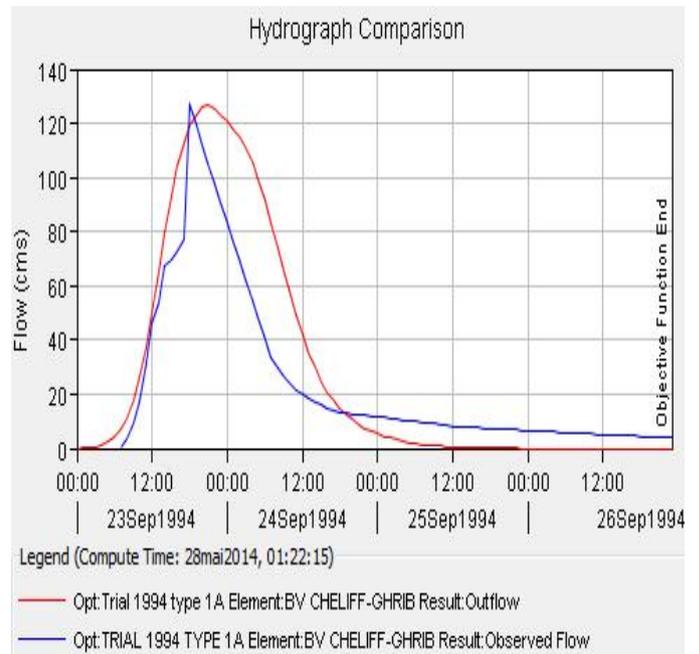
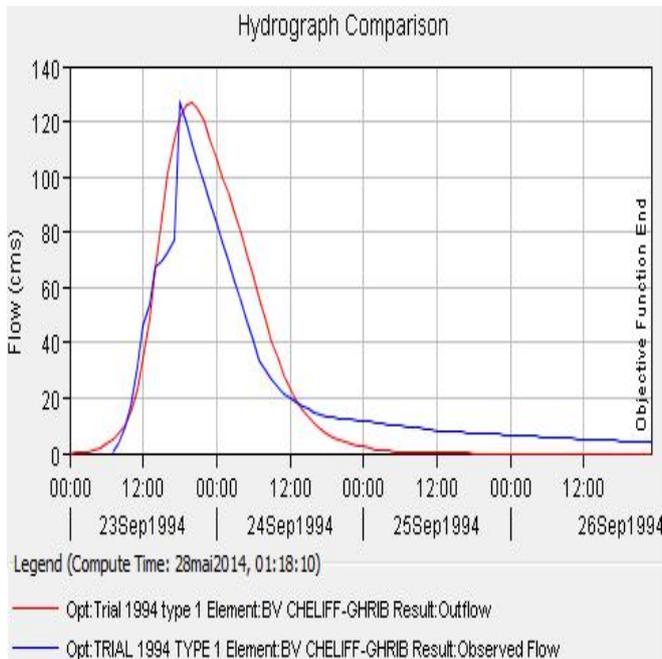
Averse type 3 :



4-événement 1994 :

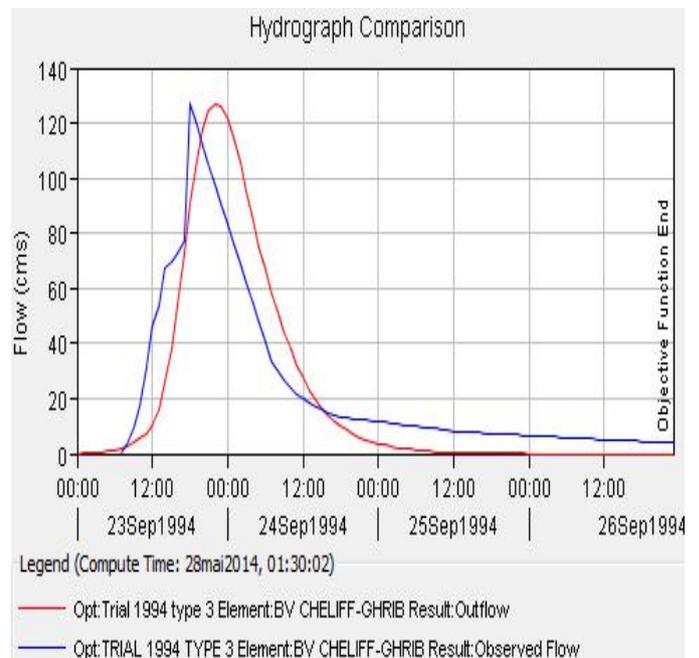
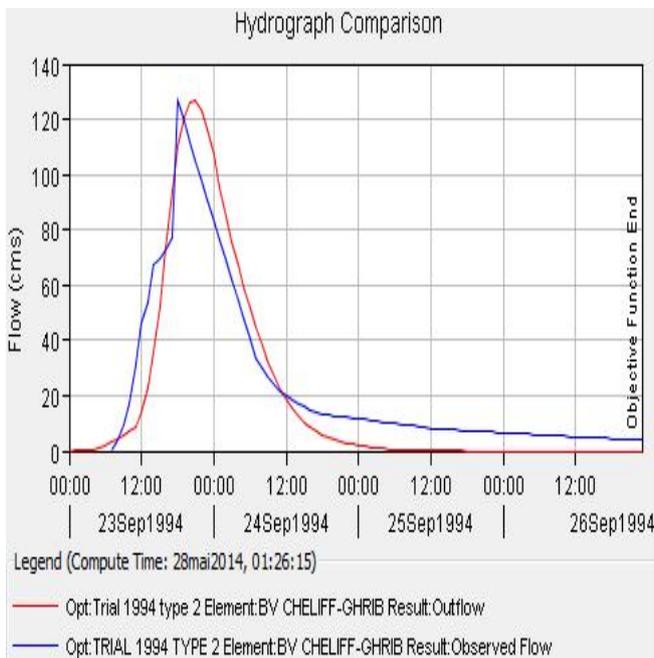
Averse type 1 :

Averse type 1A :



Averse type 2 :

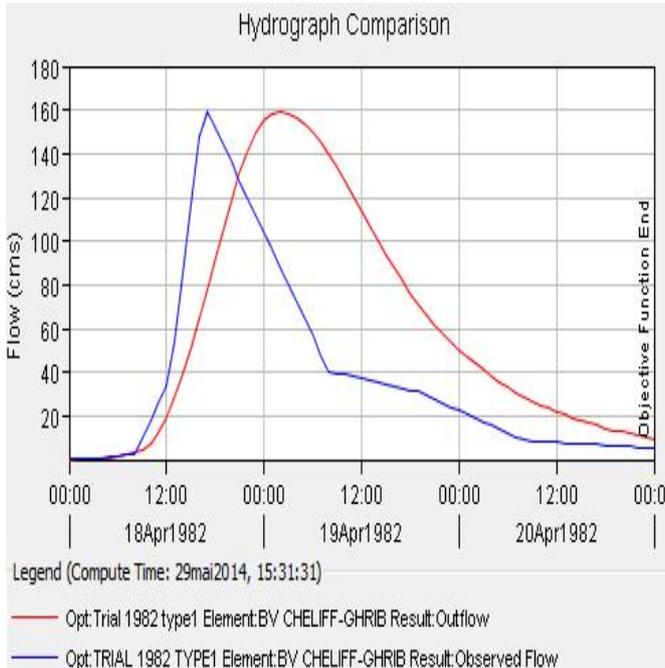
Averse type 3 :



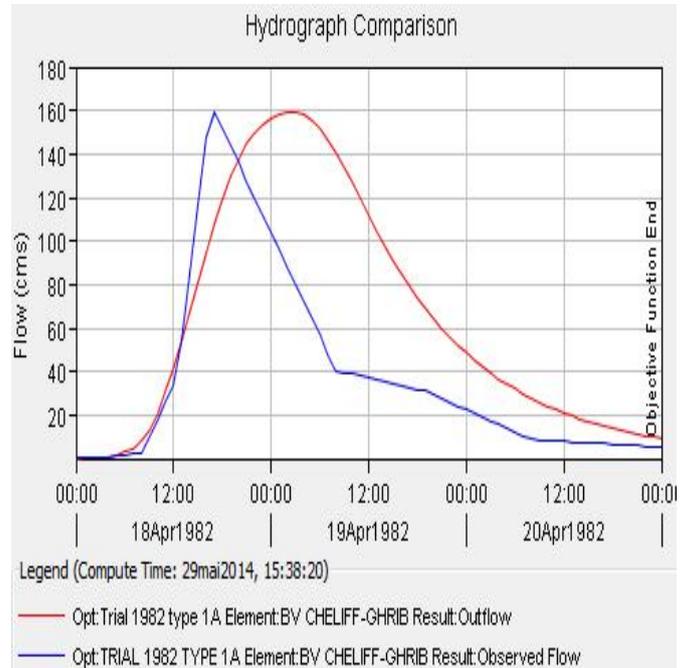
4. Graphes de calibration des événements avec formalisme clark:

1-événement 1982 :

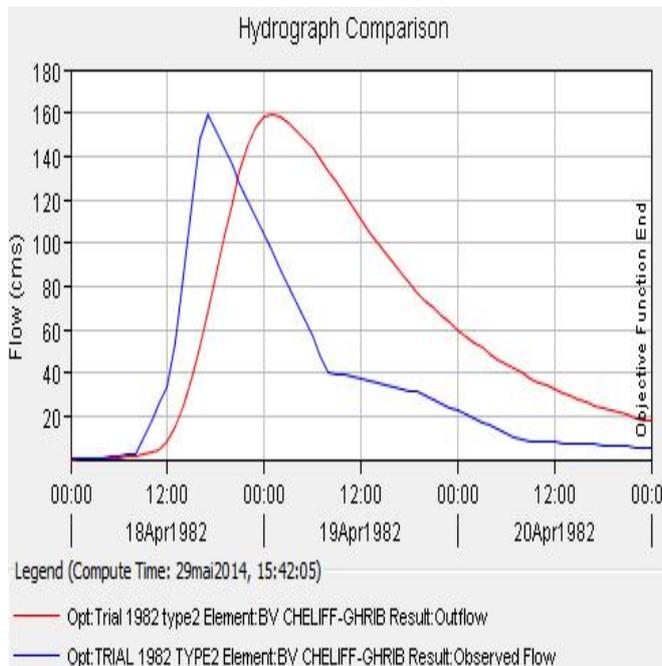
Averse type 1 :



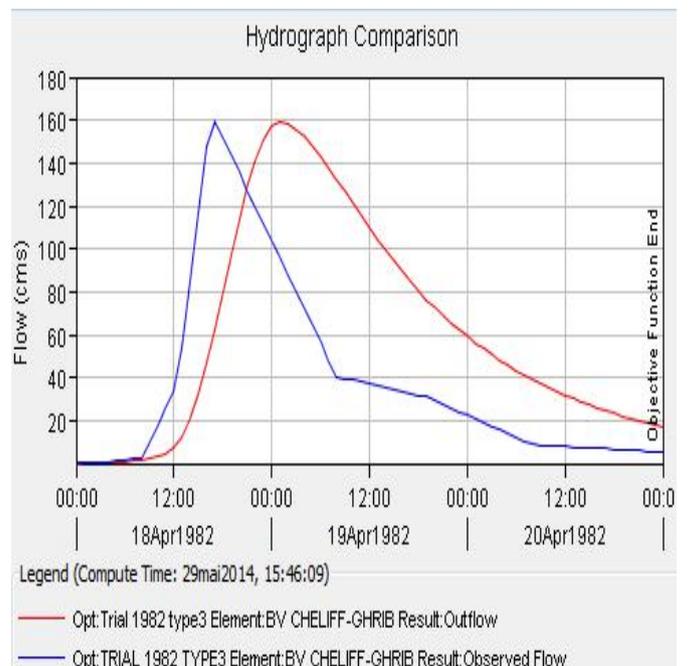
Averse type 1A :



Averse type 2 :

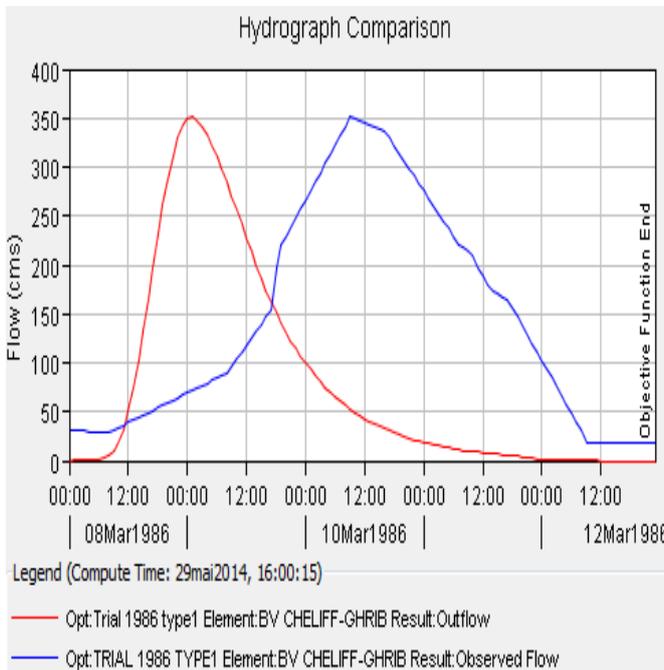


Averse type 3 :

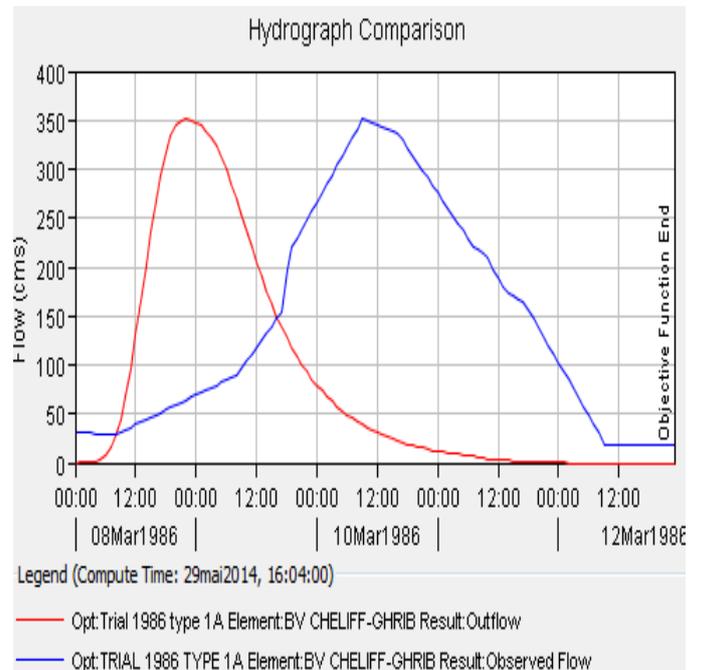


2-événement 1986 :

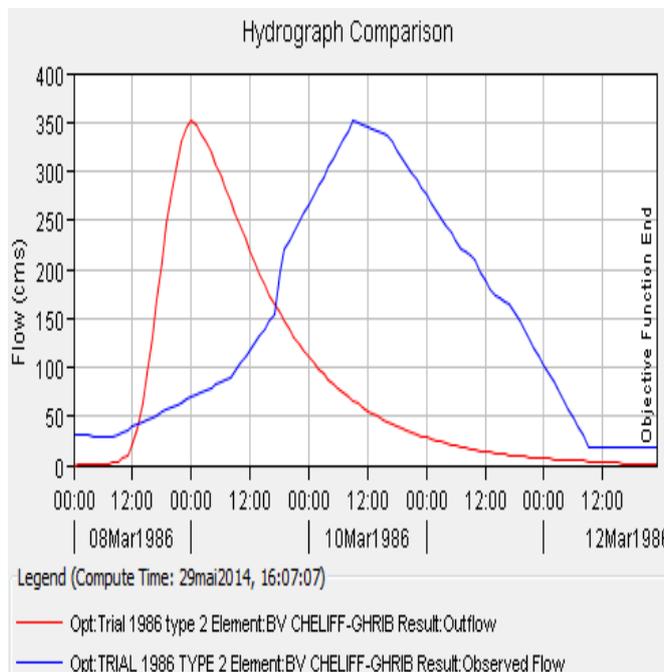
Averse type 1 :



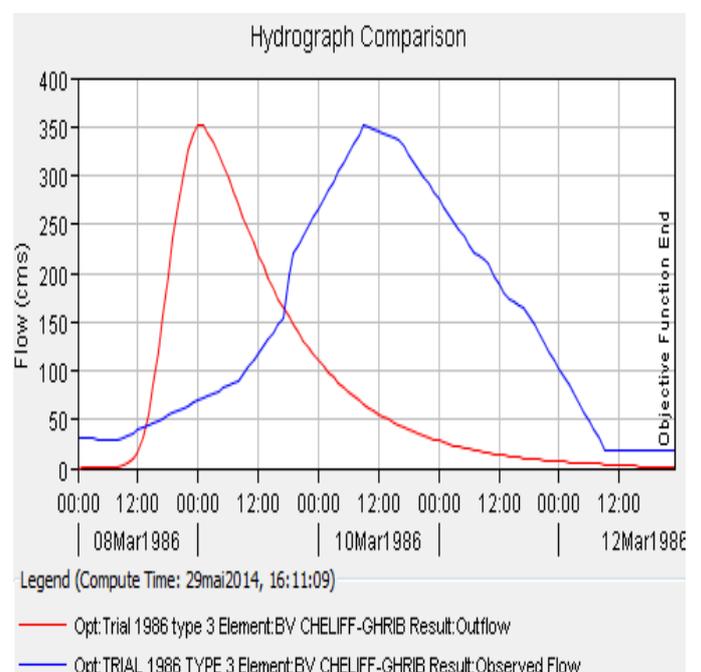
Averse type 1A :



Averse type 2 :



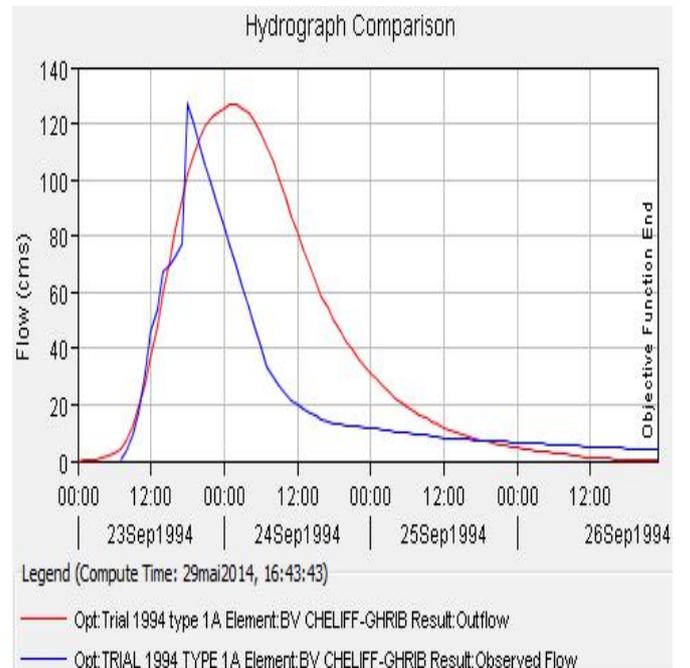
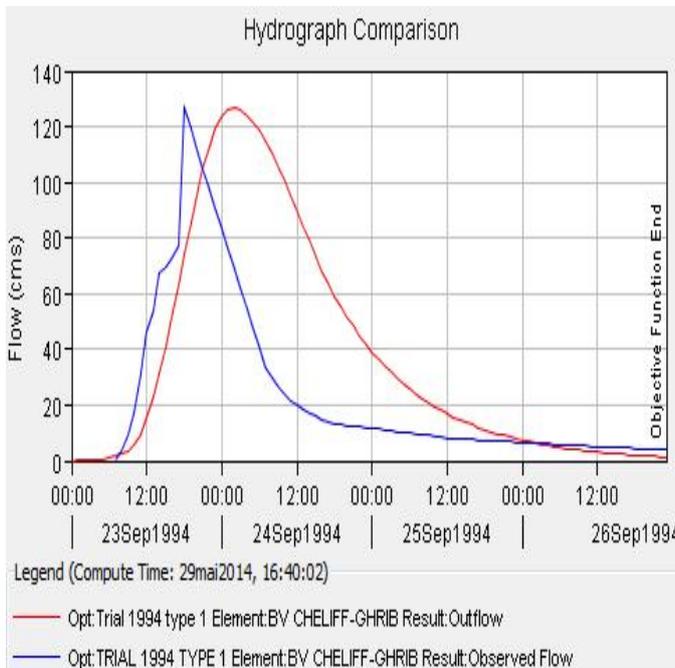
Averse type 3 :



3- évènement 1994 :

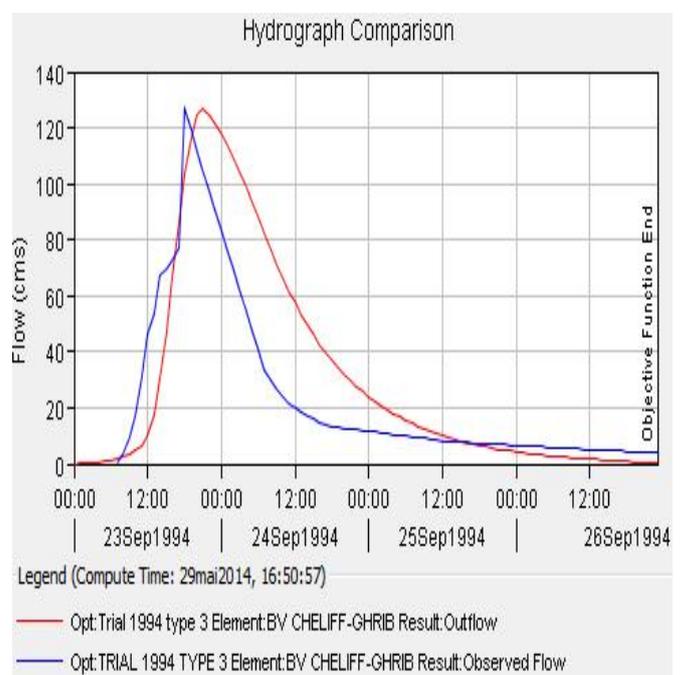
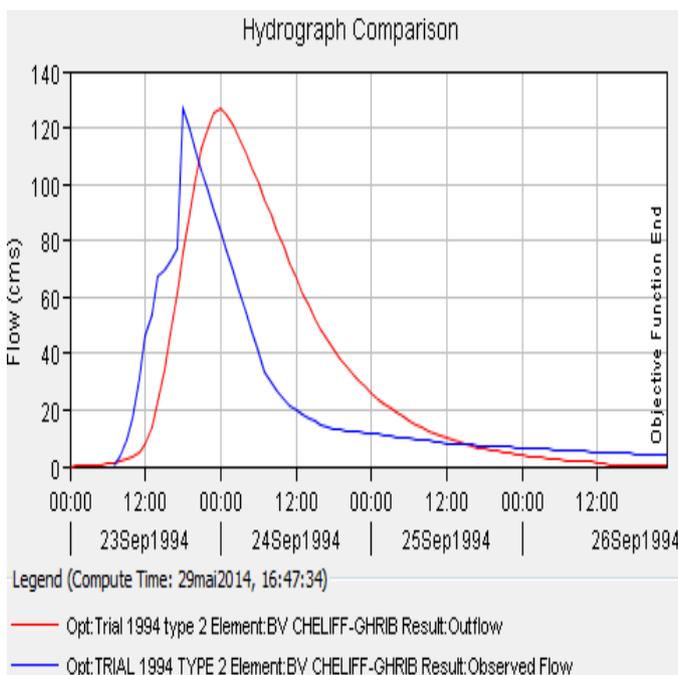
Averse type 1

Averse type 1A



Averse type 2

Averse type 3



Production scientifique

Received 18.03.2016
Reviewed 22.04.2016
Accepted 10.05.2016A – study design
B – data collection
C – statistical analysis
D – data interpretation
E – manuscript preparation
F – literature search

Modelling of the rain–flow by hydrological modelling software system HEC-HMS – watershed’s case of wadi Cheliff-Ghrib, Algeria

El Hadj MOKHTARI¹⁾ ABCDE, Boualem REMINI²⁾ DE,
Saad Abdelamir HAMOUDI¹⁾ DF

¹⁾ University of Hassiba Ben Bouali, Faculty of Architecture and Civil Engineering, Department of Hydraulic, University Pôle Ouled Fares, N19, Chlef, Algeria; e-mail: hadjmokhtari@gmail.com, hamoudisaad@yahoo.fr

²⁾ University of Saad Dahlab, Department of Water Sciences and Environment, Blida, Algeria; e-mail: reminib@yahoo.fr

For citation: Mokhtari E.H., Remini B., Hamoudi S.A. 2016. Modelling of the rain–flow by hydrological modelling software system HEC-HMS – watershed’s case of wadi Cheliff-Ghrib, Algeria. *Journal of Water and Land Development*. No. 30 p. 87–100. DOI: 10.1515/jwld-2016-0025.

Abstract

The purpose of this study is to make a hydrologic modelling type of rain–flow on watershed of wadi Cheliff-Ghrib, by means of HEC-HMS model. Afterwards, this model is used to predict hydrologic response of the basin to the climate changes scenarios and land use. The model calibration was made in two phases; the first one is to select events, formalism of transfer function and appropriate NRCS downpour. The second is to deduce optimised parameters set which is used in validation. By using optimised parameters set, we were able to predict impact of quantiles downpours, changes in land use due to urbanisation, deforestation and reforestation on the peak flow and on runoff volume. Towards the end, we reconfirmed that influence of land use decreases for extreme storms.

Key words: *Algeria, HEC-HMS – watershed, modelling, rain–flow, wadi Cheliff-Ghrib*

INTRODUCTION

In hydrology, a simplified mathematical representation of all or in part of hydrological cycle process is essential. Thus hydrological concepts are expressed in mathematical language to represent the corresponding behaviour observed in the nature. For the user, interest of a model, resides in its capacity to provide a “satisfactory” response to the asked questions about modelled object. Nowadays there are different models types: from physical model and empirical model, from distributed and overall, and each type expresses some way to design the hydrological cycle. [MOUELHI 2003]. A classification may be done on some differentiating keys according to criteria set out by CLARKE [1973] and AMBROISE [1998].

The decision-support tools can help in the best development options in order to allow human to check water, soil and potentials. A solution and reliable approach to this challenge is use of appropriate hydrological models for efficient management of watersheds and ecosystems [YENER *et al.* 2012], hydrological modelling is a tool generally used to estimate the hydrological response of the basin due to rainfall. It forecasts hydrological response at various management practices of watershed and have better impacts understanding of these practices [KADAM 2011].

It is obvious through extended review of literature that studies on comparative assessment models of watershed for hydrological simulations are quite limited in developing countries including India [KUMAR, BHATTACHARYA 2011]. This explains necessity to

undertake study of hydrological simulation by developing an appropriate model to the watershed. The hydrological modelling system of hydrological centre of technology (HEC-HMS) is a model widely used to simulate process of run-off and rainfall.

Several studies have used model of HEC-HMS in different regions (soils and different climatic conditions). CHU and STEINMAN [2009] have used HEC-HMS model for event and continuous hydrological modeling in watershed of Mona lack in western Michigan. The HEC-HMS model has also been used to simulate rainfall-runoff process with geo-informatics and atmospheric models for flood forecasting and early detections in different regions of the world [ALI *et al.* 2011; AREKHI 2012; AREKHI *et al.* 2011; DZUBAKOVA 2010; HALWATURA, NAJIM 2013; HU *et al.* 2006; KNEBL *et al.* 2005; MAJIDI, SHAHEDI 2012; MAJIDI, VAGHARFARD 2013; MCCOLL, AGGETT 2006; PANIGRAHI 2013, YENER *et al.* 2012; YUSOP *et al.* 2007]. Also, it has been used for management of watersheds in different regions of India [BHATT *et al.* 2012; KADAM 2011; CHOUDHARI *et al.* 2014; KUMAR, BHATTACHARYA 2011]. The model has been found précis in response's basin in time and space at event scale and for a longue and continuous period as well as simulating various scenarios in flood forecasting and early detections. AL-AHMADI [2005] made a rainfall-runoff by HEC-HMS, GIS and RS in three sub-basins in south-west of Saudi Arabia.

He carried out the model with automatic method of calibration and obtained acceptable results SHAGHAEGHI FAL-LAH [2001] applied the model of HEC-HMS to simulate runoff of river into the watershed of Mohammadabad (located to the North of Iran). Results of simulation were reliable and valid compared with observations' data. The goal of the present study is to simulate rainfall-runoff process through hydrological model of HEC-HMS in watershed of Cheliff-Ghrib Algeria, in order to verify its feasibility in this mountainous area well known by its spatio-temporal heterogeneity. Furthermore, we will try to predict the future hydrological response of

this basin, due to scenarios of climatic change by quantile rain showers, and other caused by land use changes and types of soil, in order to make decision makers aware of anthropogenic actions, notably, urban development and excessive deforestation at level of Cheliff-Ghrib on hydrological regime.

STUDY AREA

The watershed of wadi Cheliff-Ghrib is a part of wadi Cheliff's basin (Fig. 1 and 2). It is located at 100 km south-west of Algiers, between, 2°25' and 3°45' of east longitude and between 35°45' and 36°00' of nord altitude, of average altitude of 895 m. It drains an area of 1.390,32 km². Wadi Cheliff Ghrib flows for a distance of over 79.9 km following orientation south-east to west of watershed, the landform reaches an altitude of 1.500 m, while the lowest point is at the outlet with altitude of 400 m. The watershed of wadi Cheliff-Ghrib is elongated in shape in the axis of the main stream. The wadi is tributary of wadi Cheliff. The outlet is about 20 km on the south-west of Medea wilaya (Fig. 1 and 2).

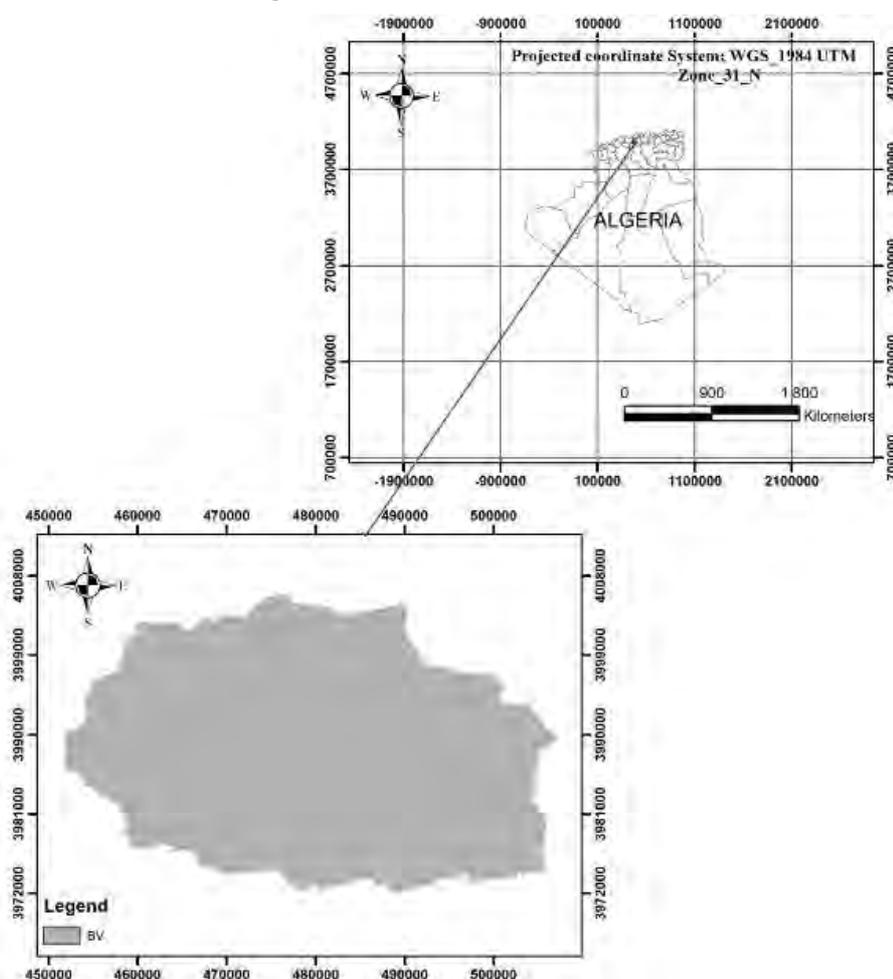


Fig. 1. Location of basin study (wadi Cheliff-Ghrib); source: own elaboration

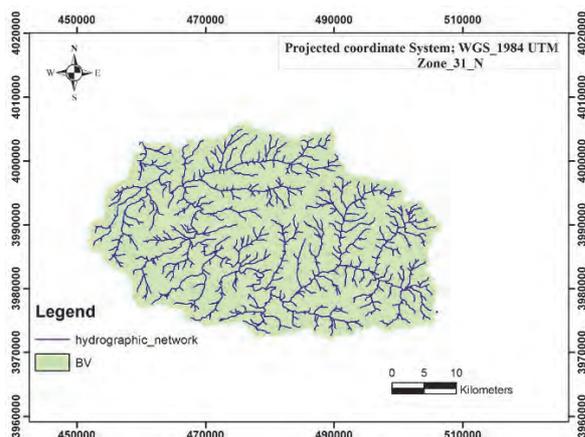


Fig. 2. Hydrographic network map of wadi Cheliff-Ghrib's basin; source: own elaboration

HEC-HMS HYDROLOGICAL MODEL

HEC-HMS is hydrologic modeling software developed by the US Army Corps of Engineers- Hydrologic Engineering Center (HEC) [FELDMAN (ed.) 2000]. It is the physically based and conceptual semi distributed model designed to simulate the rainfall-runoff processes in a wide range of geographic areas such as large river basin water supply and flood hydrology to small urban and natural watershed runoff.

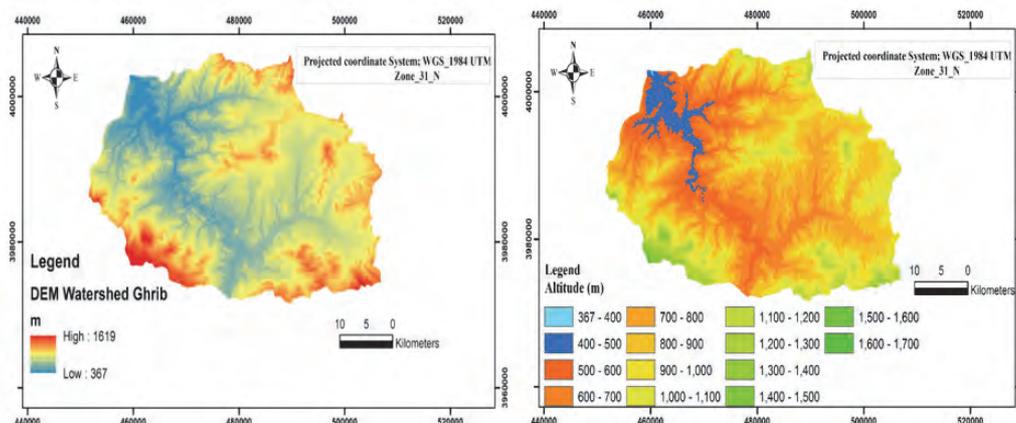


Fig. 3. Digital Elevation Model (DEM) and altitude map of Cheliff-Ghrib's watershed; source: own elaboration

Land use

Considering particular requirements of selected modular combination, specifically the NRCS CN method as production function, producing of land use map on the whole study area was an unavoidable way. However, information supposed found in this map should be authentic to the recognised by NRCS classification; consequently, we had to do connexions between classes of NRCS and information gathered from all identified bibliographic data dealing this part (Fig. 4).

The rain data

For each event, rain should be regarded in the form of rainfall height fell on the watershed during the day where this event occurred, of which we asso-

The system encompasses losses, runoff transform, open channel routing, and analysis of meteorological data, rainfall-runoff simulation and parameter estimation. HEC-HMS uses separate models to represent each component of the runoff process, including models that compute runoff volume, models of direct runoff, and models of base flow. Each model run combines a basin model, meteorological model and control specifications with run options to obtain results.

Following methods were selected for each component of runoff process such as runoff depth, direct runoff, base-flow and channel routing in event based hydrological modeling. These methods are selected on the basis of applicability and limitations of each method, availability of data, suitability for same hydrologic condition, well established, stable, and widely acceptable, researcher recommendation etc.

INPUT DATA OF MODEL

Digital Elevation Model

Before undertaking any operation of a simulation file preparation HMS, it is essential to have at his disposal the DEM of the study area, where its role is fundamental in physical characterization and calculation of the parameters (Fig. 3).

ciate every time one of the four NRCS distributions [NRCS 1997]. In our case, we have been limited to period 06–09.03.1980, 18–21.04.1982, 08–12.03.1986, 23–25.09.1993 and 23–26.09.1994.

MODEL'S DEVELOPMENT

Before to begin calibration, we prepared all simulations files of the five events previously preselected, in taking into account the four rain showers of NRCS types and the two formalisms of transfer function to analyse the sensitivity of the model successively to rain showers types and to the formalisms. So, we have 40 simulation files (Fig. 5 and 6). For every simulation files, we will have the following data (Tab. 1).

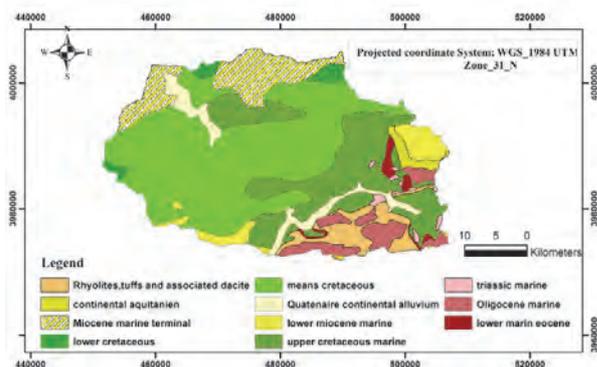


Fig. 4. Rock type map of watershed Cheliff-Ghrib; source: own elaboration

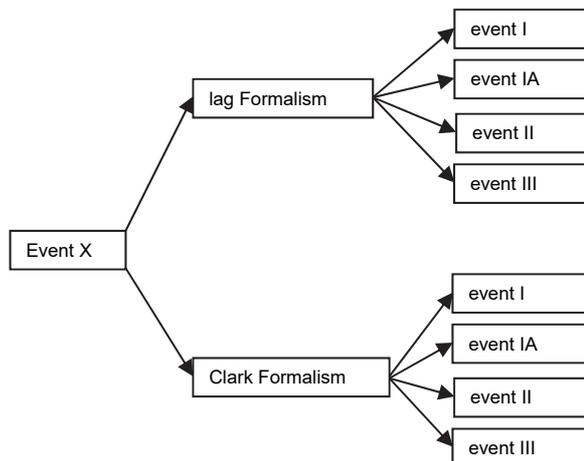


Fig. 5. Number of simulation files prepared for every event; source: own elaboration

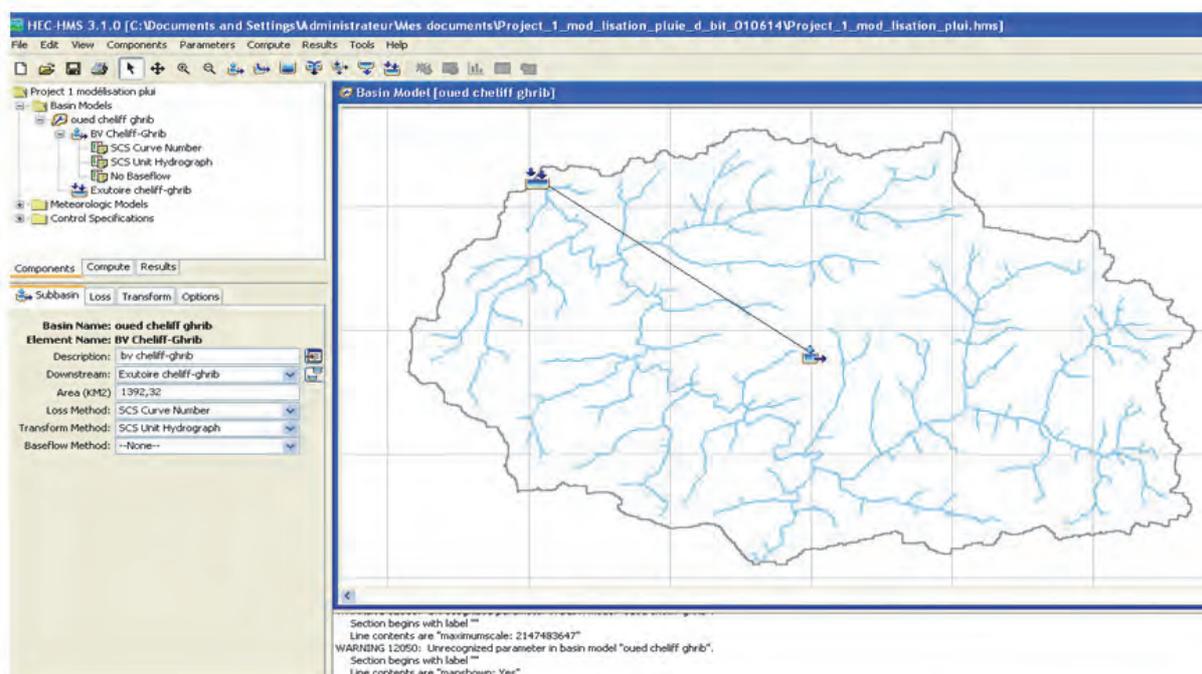


Fig. 6. Software HEC-HMS interface; source: own study

Table 1. Inputs to be entered for each simulation file

Model's module	Input	Value	Unit
The basin	the surface	1390.32	km ²
Meteorological module	rain	event function	mm
	rain shower type	–	–
Module of function production	NRCS CN	initial abstraction	ni
		curve number CN	72
		impervious percentage	10
Module of transfer function	NRCS	time lag T _{Lag}	476
		concentration time C _t	13.22
	Clark	destocking coefficient ST	21.52

Source: own study.

RESULTS AND DISCUSSION

RESULTS OF SIMULATION

The simulation results for both transfer functions NRCS CN and Clark are in Table 2 and 3.

Results of simulation for both functions of NRCS and Clark transfer are the following graphs (Fig. 7, 8).

MODEL CALIBRATION

In order to achieve optimising values of model parameters, calibration was made for the 40 simulation files using the objective function on peak flow.

Table 2. Simulation results: NRCS CN formalism

Event	Rain shower	Model parameters			Simulation results					
		NRCS CN			$Qp, m^3 \cdot s^{-1}$			V_r, mm		
		Ia	CN	Tlag	observed	simulated	difference %	observed	simulated	difference %
1980	1	1	72	476	197.14	276.4	28.67	8.56	11.73	27.02
	1A					228.9	13.87		11.73	27.02
	2					333.4	40.80		11.75	27.15
	3					337.3	41.55		11.75	27.15
1982	1	1	72	476	159.34	225.8	29.43	7.26	10.02	27.54
	1A					189.3	15.83		10.02	27.54
	2					274.3	41.90		10.02	27.54
	3					274.3	41.90		10.02	27.54
1986	1	1	72	476	351.0	186.5	46.87	45.03	8.29	81.59
	1A					85.8	75.55		8.25	81.59
	2					97.0	72.36		8.25	81.59
	3					98.5	71.94		8.25	81.59
1993	1	1	72	476	126.5	127.7	0.90	4.67	5.51	15.24
	1A					105.8	16.50		5.51	15.24
	2					154.2	17.96		5.51	15.24
	3					156.0	18.91		5.51	15.24
1994	1	1	72	476	126.5	131.6	3.90	5.63	5.87	4
	1A					110.3	12.81		5.87	4
	2					150.4	15.89		5.87	4
	3					159.9	20.90		5.87	4

Explanations: Qp = peak flow, V_r = runoff volume, CN = curve number, Tlag = time lag.
Source: own study.

Table 3. Simulation results: Clark formalism

Event	Rain shower	Simulation Results							V_r, mm		
		NRCS CN		Clark		$Qp, m^3 \cdot s^{-1}$			observed	simulated	difference %
		Ia	CN	t_c h	St h	observed	simulated	difference %			
1980	1	1	72	13.22	21.52	197.14	128.9	34.61	8.56	11.28	24.11
	1A						122.9	37.65		11.48	25.44
	2						139.9	29.03		11.47	25.37
	3						141.3	28.32		11.47	25.37
1982	1	1	72	13.22	21.52	159.34	108.7	31.78	7.36	9.17	19.74
	1A						103.7	34.92		9.17	19.74
	2						117.3	26.38		9.16	19.65
	3						119.1	25.25		9.15	19.56
1986	1	1	72	13.22	21.52	351.0	89.8	74.42	45.03	8.25	81.62
	1A						85.8	75.56		8.25	81.62
	2						97.0	72.36		8.25	81.62
	3						98.5	71.94		8.25	81.62
1993	1	1	72	13.22	21.52	126.5	63.5	71.15	4.67	5.72	18.36
	1A						60.6	52.09		5.72	18.36
	2						68.6	45.77		5.72	18.36
	3						69.6	44.98		5.72	18.36
1994	1	1	72	13.22	21.52	126.5	59.8	52.72	5.63	4.03	28.42
	1A						57.0	54.94		4.04	28.42
	2						65.0	48.62		4.01	28.77
	3						63.5	49.80		5.72	1.60

Explanations: Qp , V_r , CN, Tlag as in Tab. 2, t_c = concentration time, St = storage time.
Source: own study.

From calibration results, we can generally see that value of objective function; optimised values of parameters, peak flows and simulated volume vary all in function of the event, of the selected rain shower type and the chosen formalism for transfer function. Results of model calibration are found in the following graphs (Fig. 8).

In effect, by carefully searching results, we can clearly note that: in the case of NRCS formalism choice, the objective function is null for the four rain shower types of events 18–21.04.1982, 23–25.09.1993 and 23–26.09.1994. For other events 06–09.03.1980 and 08–12.03.1986 objective function takes null values for rain showers 1.2 and 3 and values

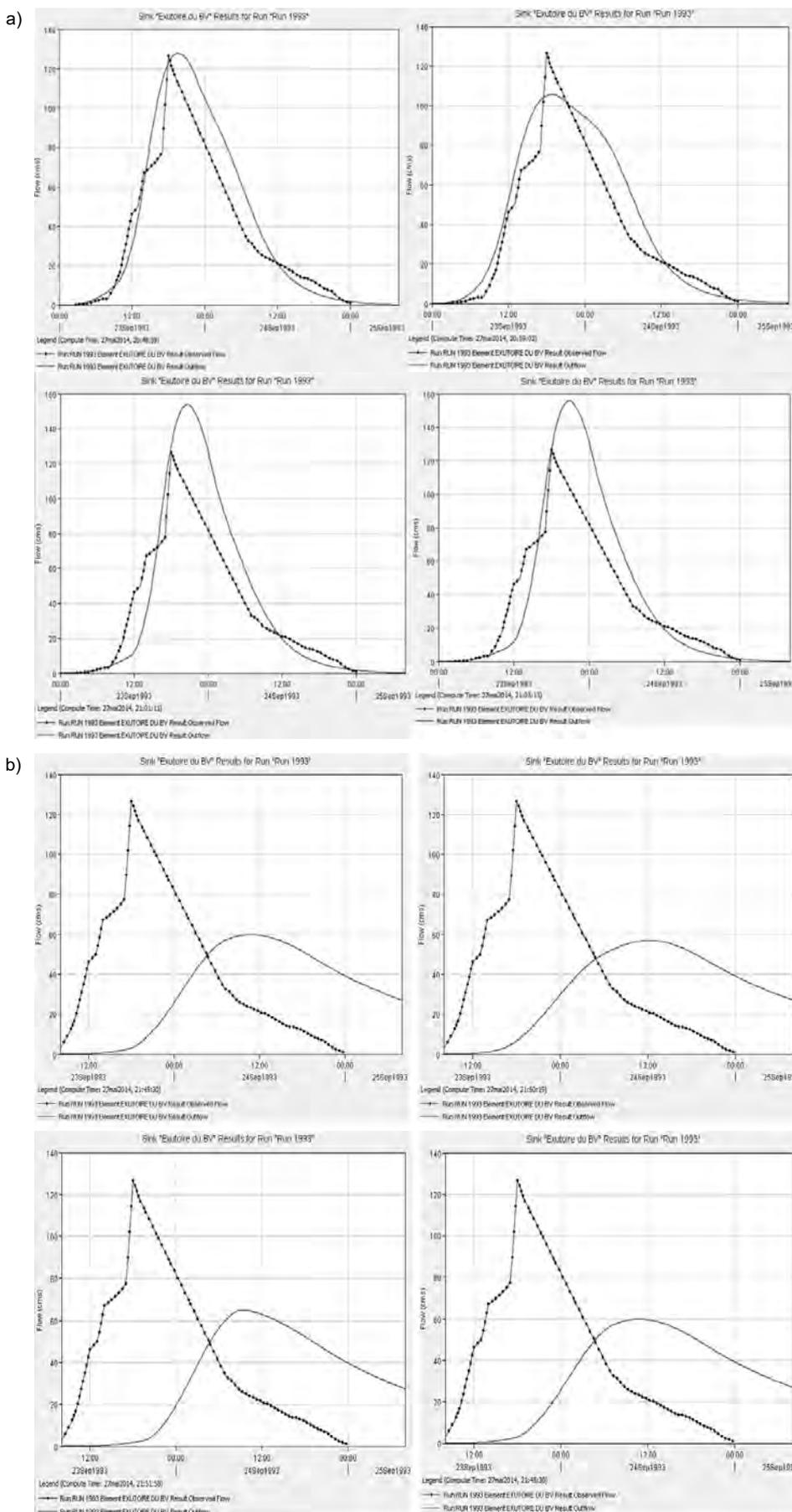


Fig. 7. Flood hydrographs of event 23–25.09.1993 with: a) NRCS transfer function b) Clark transfer function; source: own study

14.2 and 11.9 for rain showers type 1A. This finding is valid for peaks flows, where they are better recovered when using of rain showers 1.2, and 3. For simulated volumes, they are well estimated for event of 06–09.03.1980, 18–21.04.1982, 23–25.09.1993 and 23–26.09.1994 and are underestimated for event of 08–12.03.1986 and whatever is the rain shower type. Concerning optimised values of parameters, we note that these parameters change by passing from event to the other; and they are less variable within the same event. These parameters sets can serve to validate the model since they are close to events 23–25.09.1993 and 23–26.09.1994.

In the case of choice of Clark formalism, the objective function is null for the four rain showers types of all events. As for flood volumes, we note that problem of the excessive overestimate is still persisting, subject which is well understood because the transfer function has no effect on the flood volume, but it is rather on the movement of this volume that it intervenes.

According to this first calibration, we were able to highlight some conclusions which are going to allow us to limit simulation number from which we deduce the optimal parameter set, these conclusions are: the formalism of the unitary hydrograph of NRCS is much more adapted to our study context that of Clark, thus, research of optimal parameters values had to be concentrated in its results, detailed in Table 2.

By use simplified results presented in Table 4, we have made several approaches to reach the optimal parameters set, in this case:

- **method 1:** use of the average parameters values of the 5 events;
- **method 2:** use of the maximum parameters values of the 5 events;
- **method 3:** use of the minimum parameters values of the 5 events.

These approaches were carried out on the both rain shower types 1 and 2 in order to detect that one which allows, with its parameters set, to converge towards a model validation.

Rain shower type 1: the percentage difference between the peak flow observed and simulated varies of 0.74 (method 2, event 1980) until 56.83 (method 1, event 1982). As for efficiency on volume, it appears that it has a different behaviour according to the method and to the event, for instance it fell for event 1986 whichever the method, it increased for event 1993 and 1994. Generally, the problem of overestimating volumes still endures which require checking hypothesis stated previously.

Rain shower type 2: the validation results for the different methods are much the same to those of rain shower 1.

This first test of validation allowed qualifying the method of the average values as the one that gives the best results, this is justified in part of the fact that the model is closely linked to the surface state of the basin, namely that if we consider that land use of Che-

liff-Ghrib varies intensely on short periods of time, thus optimal parameter sets of events will never be stable since every one of them occurs during a different surface state. However, we cannot talk about a model validation basing on this first test on the one hand because we have not enough events in each year, and on the other hand, the lack of efficiency observed during validation cannot be linked only to the change in land use, but we also need to check the above hypothesis quoted at the beginning of this part, notably:

- choice of the objective function,
- percentage estimation of impervious,
- the daily rainfall distribution.

MODEL VALIDATION

By applying parameter set defined in Table 5 to events, we reach the following results:

This optimised parameter set is composed of accepted and realistic parameters values such as case of concentration time equal with which we have calculated by method of Giandothi, and CN value very close of that estimated by land use map and soil type. Graphs of flood hydrograph for different events are as follow (Fig. 9).

The Table 5 shows that with the new optimised parameter set, model was able to reproduce the peak flow in a fair way for event 23–26.09.1994, as for the rest, we realize a flow underestimation for event of 06–09.03.1980 and for 08–12.03.1986 and overestimation for event 18–21.04.1982.

Simulated volumes for their part, they vary between 26.74% for event 18–21.04.1982 and 81.79% for 08–12.03.1986.

The overestimated volumes are essentially caused by use of project NRCS rain showers in place of acquired temporal distributions from rainfall recorders as we have demonstrated it in the calibration part.

In order to quantify level of achievement of these different objectives, the performance criterion used is the NASH one [NASH SUTCLIFE 1970]. This latter one gives an overall appreciation of flood reconstitution.

Criterion formula of NASH is as follows:

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs})^2} \quad (1)$$

This criterion is true for 100% for a perfect reconstitution of the flood and is cancelled for model “called at every hour”, the computed flow is equal to average flow of the flood. So, it shows that if simulation which comes through the model is better than estimation which would give an average flow throughout the calibration period.

As it uses squared deviations, it is sensitive to the reconstitution of heavy flows. We consider as bad a NASH below 80%. Validation criterion of NASH model = 88%. Statistically, the NASH criterion shows that the model is validated.

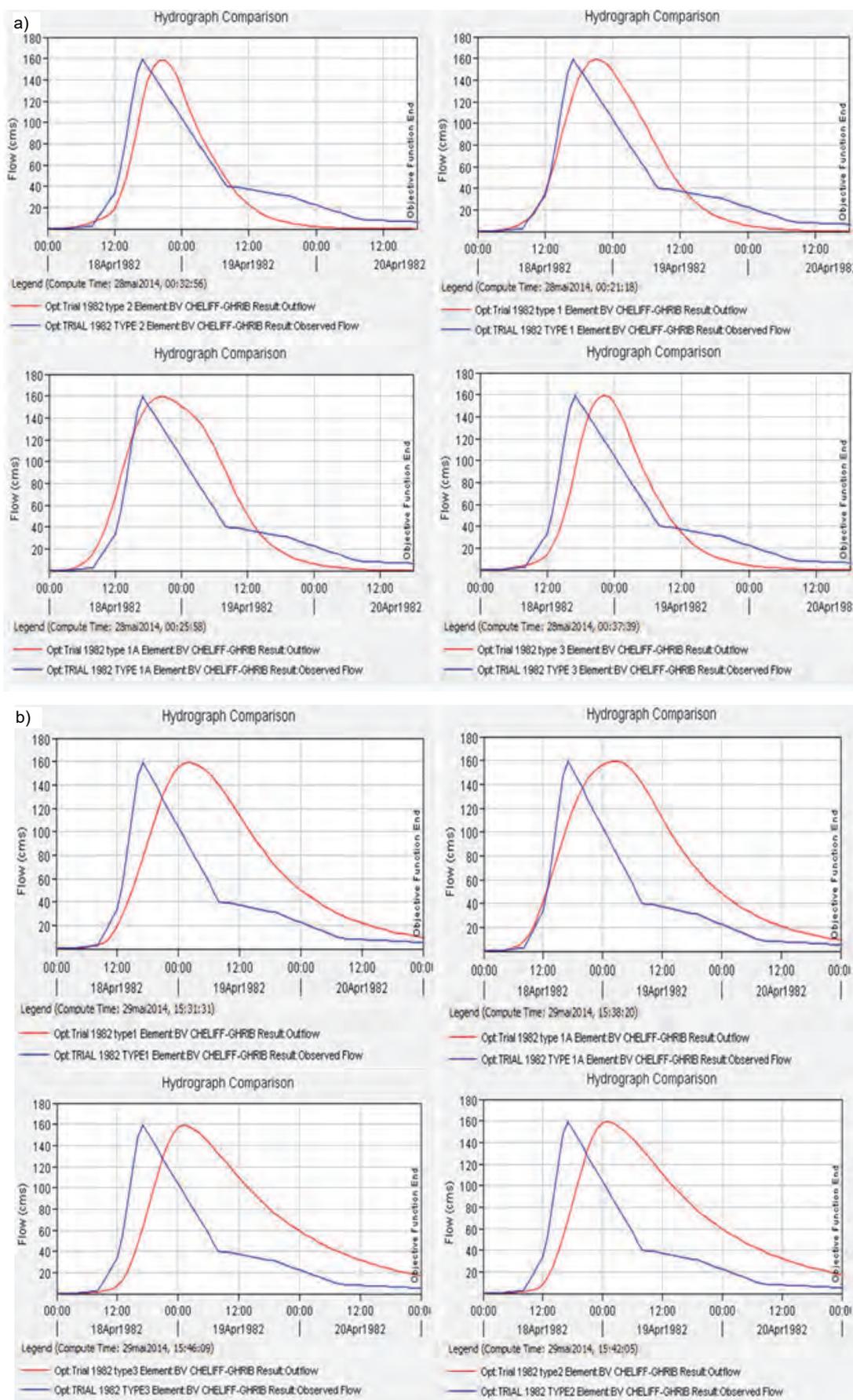


Fig. 8. Flood hydrographs of event 18–21.04.1982 after calibration by: a) NRCS transfer function, b) Clark transfer function; source: own study

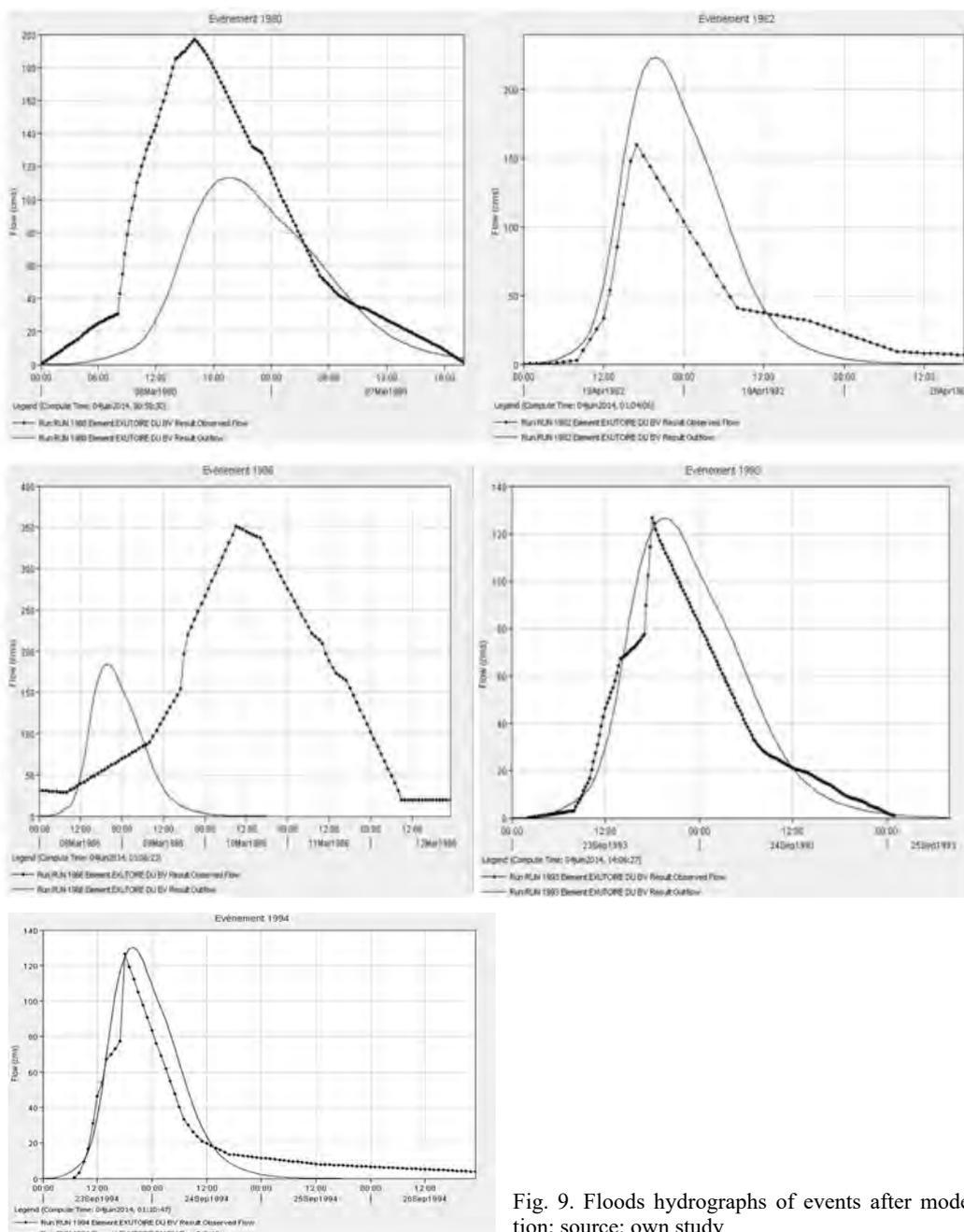


Fig. 9. Floods hydrographs of events after model validation; source: own study

Table 4. Simplified results of Lag's formalism use

Rain shower	Event	Calibrated parameters			Calibration results				Function Obj %
		NRCS CN			$Qp, m^3 \cdot s^{-1}$		V, mm		
		Ia	CN	Tlag	observed	simulated	observed	simulated	
1	1980	1	85.77	399.68	197.1	197.1	8.56	7.58	0
	1982	1	60.03	547.40	159.3	158.8	7.26	7.64	0
	1986	1	89.74	457.15	351.0	354.2	45.03	14.97	0
	1993	1	71.56	476.00	126.5	126.4	4.67	5.45	0
	1994	1	70.56	478.18	126.5	126.7	5.63	5.67	0
2	1980	1	80.10	403.21	197.1	197.2	8.56	6.18	0
	1982	1	47.11	481.38	159.3	158.7	7.26	6.02	0
	1986	1	84.05	422.69	351.0	350.5	45.03	11.91	0
	1993	1	68.04	547.07	126.5	126.5	4.67	5.02	0
	1994	1	62.98	483.91	126.5	126.5	5.63	4.81	0

Explanations: Qp , V, CN, Tlag as in Tab. 2.

Source: own study.

Table 5. Optimised parameter set used for HEC-HMS model validation on Cheliff-Ghrib's basin

Parameters	Ia mm	CN	T _{lag}	Imper-viousness	Rain shower type
Optimised values	1	71.56	476	10	1

Explanations: CN, T_{lag} as in Tab. 2.
Source: own study.

Table 6. Results of model validation

Event	Q _p , m ³ ·s ⁻¹		Differ-ence %	V, mm		Differ-ence %
	ob-served	simu-lated		ob-served	simu-lated	
06–09.03.1980	197.14	113.2	42.58	8.56	4.85	43.34
18–21.04.1982	159.34	223.3	28.64	7.26	9.91	2674
08–12.03.1986	351.0	184.4	47.46	45.03	8.20	81.79
23–25.09.1993	126.5	126.4	0	4.67	5.45	14.31
23–26.09.1994	126.5	130.1	2.76	5.63	5.80	2.93

Explanations: Q_p and V as in Tab. 2.
Source: own study.

PREDICTION OF THE FUTURE BEHAVIOUR OF CHELIFF-GHRIB

INTRODUCTION

Nobody can deny effect of climatic changes and land use on hydrological processes and disturbance of the natural environment of runoff. Consequently, planners and decision-makers are supposed knowing which will be the impacts downstream of their anthropic actions undertaken in upstream of watershed, such as urban development, deforestation and reforestation.

Based on this, the present part tries to reuse the HEC-HMS model adjusted to the watershed of Cheliff-Ghrib to predict its response to the positive and negative scenarios by taking into consideration, changes at climatic level by exploitation of predetermined quantile rain showers, and other relating land use. All these scenarios will be implemented on event of 23–26.09.1994 of which model was able to reconstitute the peak flow. As for flood volume, it will be compared to that simulated by model and afterwards to the one actually observed at the outlet station.

SCENARIO 1: THE QUANTILES RAIN SHOWERS

This first scenario simulates effect of rain showers of different return periods on flow's hydrograph at station of Ghrib. So, we have replaced the average rain height of the event by estimated heights by the statistical laws.

Input data

The following table summarises the estimated rain values for return periods which will be used in simulations (Tab. 7).

Each rainfall height will be added to optimised parameters set defined in Table 5 to configure a file of

Table 7. The estimated of rainfall-heights of basin Cheliff-Ghrib for different return periods

Return period, year	Estimated value, mm
10	63.43
25	75.79
50	84.95
100	94.05
200	103.11
1 000	124.11

Source: own study.

distinct simulation. Consequently, we have to compare six simulation files, in addition of the simulated and observed results for event of 23–26.09.1994.

Simulation results

Simulated results in Table 5 and graphs in Figure 10 present expected values by HEC-HMS model in watershed of Cheliff-Ghrib in terms of hydrographs' peak and of runoff volume. They show amongst other, a linear correlation of $R = 0.99$ for both variables with the rain. These results impose to responsible to strengthening the protection of measuring equipment of flow to the outlet in order it would not be dragged by anticipated flood, and to implement structural measures that can support the huge simulated volumes (Tab. 8).

SCENARIO 2: CHANGE IN LAND USE IN A NEGATIVE SENSE

Input data

In this scenario, we try simulating effect of deforestation and urbanisation on flows and on flood volumes at Ghrib's station. But due to the reasons linked essentially to absence of information and to global character of the model, we have opted for general changes on land use and soil type. These changes being made to the map, mainly affects:

- surface expansion of the urbanised area;
- disappearance of forest cover where density is low (light juniper, light oak and clear forest);
- percentage growth of bare lands favouring deforested land;
- percentage growth of impervious due to urbanisation.

From these changes, we have recomputed the new CN composite of the basin passing to 71.56 to 77. Impervious percentage is evaluated to 15%.

These CN values and impervious percentage will replace the old ones in the optimised parameters' set, and then we launch the simulation.

Simulation results

The following table shows peak flow values and volume obtained for the scenario studied, then results by associating it to quantiles rain showers (Tab. 9).

We can clearly see that peak flow has increased about 22% knowing we have used a rain height simi-

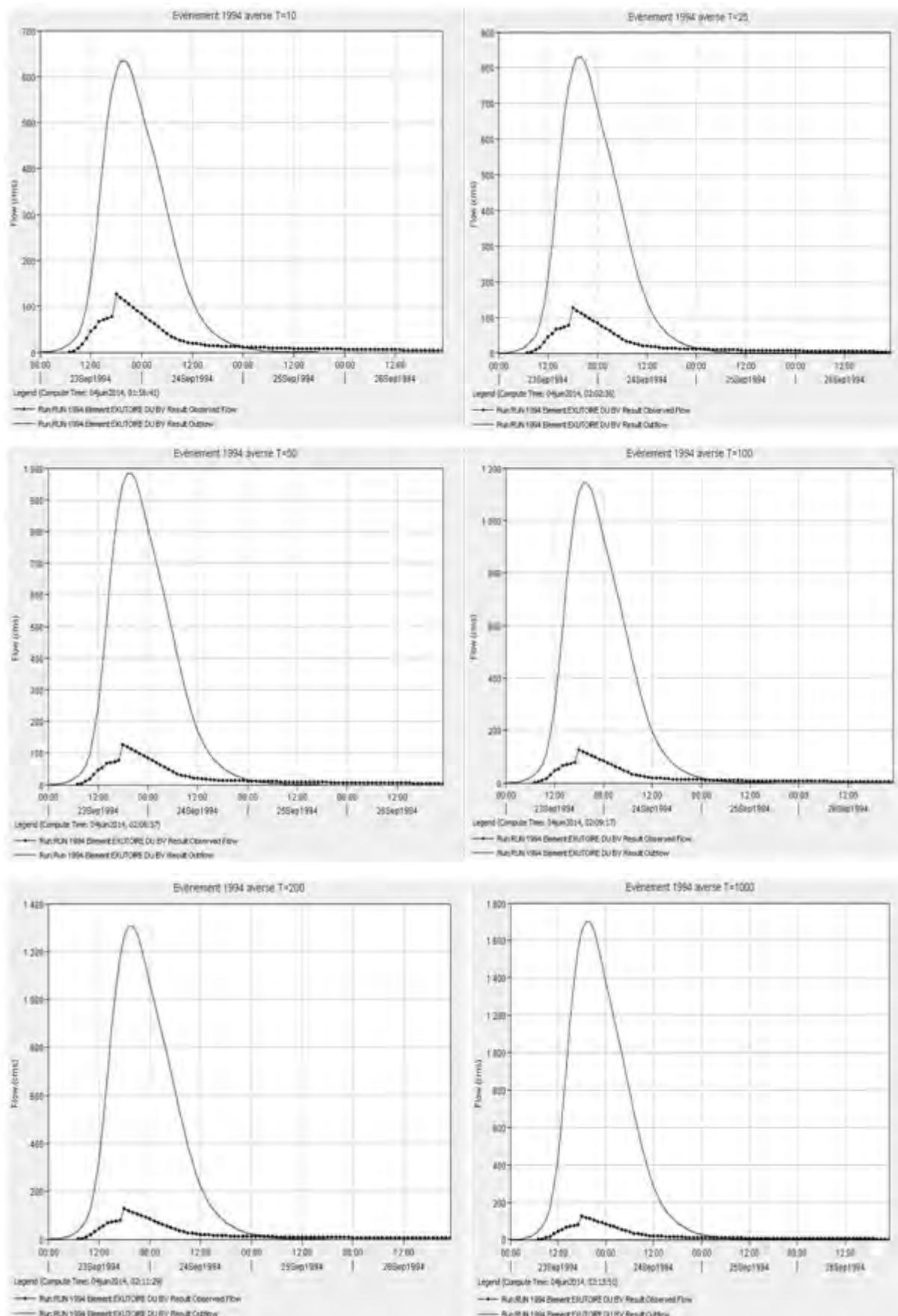


Fig. 10. Flood hydrographs for different events and different return period; source: own study

Table 8. Predicted values of peak flow Qp and volume V at Ghrib's station for scenario 1

Parameter	Observed	Simulated	$T = 10$	$T = 25$	$T = 50$	$T = 100$	$T = 200$	$T = 1\ 000$
$Qp, m^3 \cdot s^{-1}$	126.5	130.1	635.2	830.5	983.8	1 142.0	1 304.7	1 700.5
$V, 1000 m^3$	7 827.50	8 063.85	38 669.4	50 364.6	59 505.4	68 922.4	78 586.0	101 897.2

Explanations: T = return period.
Source: own study.

Table 9. Predicted values of the peak flow Qp and volume V at Ghrib's station for scenario 2

Parameter	Observed	Simulated	Scenario	$T = 10$	$T = 25$	$T = 50$	$T = 100$	$T = 200$	$T = 1\ 000$
$Qp, m^3 \cdot s^{-1}$	126.5	130.1	167.1	750.4	968.3	1 137.6	1 311.2	1 488.6	1 914.1
$V, 1000 m^3$	7 827.5	8 063.8	10 326.5	45 518.9	58 452.8	68 451.0	78 670.3	89 086.0	113 975.4

Explanations: Qp = peak flow, V = volume, T = return period.
Source: own study.

Table 10. Comparison between results of scenario 1 and 2

Parameter	Return period, year					
	$T = 10$	$T = 25$	$T = 50$	$T = 100$	$T = 200$	$T = 1\ 000$
Qp scenario 1, $m^3 \cdot s^{-1}$	635.2	830.5	983.8	1 142.0	1 304.7	1 700.5
Qp scenario 2, $m^3 \cdot s^{-1}$	750.4	968.3	1 137.6	1 311.2	1 488.6	1 914.1
Difference, %	15.36	14.23	13.52	12.90	12.35	11.16
V scenario 1, $1000 m^3$	38 669.4	50 364.6	59 505.4	68 922.4	78 586.0	101 897.2
V scenario 2, $1000 m^3$	45 518.9	58 452.8	68 451.0	78 670.3	89 086.0	113 975.4
Difference, in %	15.05	13.83	13.07	12.39	11.79	10.59

Explanations: V and T as in Tab. 9.
Source: own study.

lar to that recorded during event. If we compare peaks flows during the six return periods with their homologues of the first scenario (Tab. 9), we note that as large is the return period as this percentage of 22% decreases, in other words, for heavy downpours, influence of land use on the flows decreases, this finding has been demonstrated in other contexts [JENÍČEK 2007]. Also are volumes behaving in identical way, that is to say as frequency of rain shower is small less will be the effect of surface state on the streamed volume (Tab. 10).

SCENARIO 3: CHANGE IN LAND USE IN A POSITIVE SENSE

Input data

As for this third scenario, action is put on evaluation of an urbanisation impact of the basin with the

same scale of that of scenario 2, but in parallel, we undertake actions of bare soils reforestation and strengthening of forest cover with low density, so:

- bare soils will become a clear forest;
- clear density will become average;
- urbanised area is similar to that of scenario 2.

From these changes, we have recomputed the new CN composite of the basin that is equal to 65. The impervious percentage is evaluated to 15%.

This value will replace that of optimised parameters set, then we launch simulations.

Simulations results

In the following, are represented results obtained for this scenario, which is the peak flow and volume coming from scenario simulation and those arising by rain substitution of event 23–26.09.1994 by rain at distinct return periods (Tab. 11).

Table 11. The expected values of the peak flow and volume at Ghrib's station for scenario 3

Parameter	Observed	Simulated	Scenario	$T = 10$	$T = 25$	$T = 50$	$T = 100$	$T = 200$	$T = 1\ 000$
$Qp, m^3 \cdot s^{-1}$	126.5	130.1	135.1	592.7	769.7	909.0	1 053.8	1 053.8	1 568.9
$V, 1000 m^3$	7 827.5	8 063.8	8 347.9	36 350.6	47 051.0	47 051.0	47 051.4	47 051.0	94 803.5

Explanations as in Tab. 9.
Source: own study.

We realize that the addition of 5% of impervious surface compared to the initial state has generated an increase of 4% for the flow and 3.4% in volume term, even though CN decreased from 71.56 to 65. We can thus understand the negative effect of imperviousness of watershed surfaces, through urbanisation for instance, on its hydrological regime. In addition, we note that both variables flow and volume show less

high values than the case of scenario 2, this proves that reforestations although modest, influence on previous urbanisation effects. Finally, influence diminution of land use on flows and volumes for heavy downpour is also valid for this scenario.

From the foregoing, we arrive to recognize the positive and negative effect of some situations which might occur on the ground in the next decades and

that the authorities responsible are expected to take into consideration in their land-use planning of Cheliff-Ghrib basin. Furthermore, we have been able to reconfirm that the causal relationship between change of land use on the one hand, and flows and volumes on the other hand, is less and less narrow than down-pour are extreme.

CONCLUSIONS

Through these results, it clearly appears that simulations done by HEC HMS model are encouraging. They show that modelling of rivers is complex, requiring a good knowledge of the field and flows; it also requires collection of important data base in spatio-temporal, multi sources and multi-disciplines.

The rainfall-runoff models are tools which allow simulating flows in a given point of a stream from knowledge of rain over the corresponding watershed. This modelling is made at the scale of the watershed, characteristic entity of flows concentration, and allows thus to simulate transformation which carries out the basin on the rains to generate flows.

Applications of rainfall-runoff models are multiple: flood simulation at short term, low flows forecast, floods predetermination and sizing of structures, highlighted of non-stationarity of hydrologic behavior under climatic change effect or of land use evolution. In addition, the rainfall-runoff models allow spreading the forecasting deadlines compared to models flow-flow. After having completely validated the HEC-HMS model on the watershed of Cheliff-Ghrib, we can use it for protection against floods, by using which we call modelling in real time based on reconstitution principle of the flow to outlet for each time-step for which the given rain is measured, consequently, we can progressively reconstitute hydrograph of a flood with recording of rain height. This alarm system proves to be more efficient than one basing on water height measure upstream in the river watershed.

At the end of this work, we can say that application of HEC-HMS model to watershed data of wadi Cheliff-Ghrib provides very satisfactory results.

REFERENCES

- ALI M., KHAN S.J., ASLAM I., KHAN Z. 2011. Simulation of the impacts of landuse change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 102 p. 271–279.
- AMBROISE B. 1998. The dynamics of the water cycle in a process watershed factors model. *Bucarest. HGA* pp. 200.
- AREKHI S. 2012. Runoff modeling by HEC-HMS model (Case study: Kan watershed, Iran). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. Vol. 4. Iss. 23 p. 1807–1811.
- AREKHI S., ROSTAMIZAD G., ROSTAMI N. 2011. Evaluation of HEC-HMS methods I in surface runoff simulation (Case study: Kan Watershed, Iran). *Advances in Environmental Biology*. Vol. 5. Iss. 6 p. 1316–1321.
- AL-AHMADI F.S. 2005. Rainfall-runoff modelling in arid regions using geographic information systems and remote sensing (Case study: Western region of Saudi Arabia). Jeddah. King Ab-dulaziz University. Department of Hydrology and Water Resources Management pp. 441.
- BHATT A., YADAV H.L., KUMAR D. 2012. Estimation of infiltration parameter for Tehri Garhwal Catchment. *International Journal of Engineering Research and Technology*. Vol. 1. Iss. 7 p. 1–6.
- CHOUDHARI K., PANIRAGHI B., PAUL J.Ch. 2014. Simulation of rainfall-runoff process using HEC-HMS model for Balijore Nala watershed, Odisha, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*. Vol. 5. No. 2 p. 253–265.
- CHU X., STEINMAN A. 2009. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 135. Iss. 1 p. 119–124.
- CLARKE R.T. 1973. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*. Vol. 19 p. 1–20.
- DZUBAKOVA K. 2010. Rainfall-runoff modeling: Its development, classification and possible applications. *ACTA Geographical Univerciti Comenianae*. Vol. 54. No. 2 p. 173–181.
- FELDMAN A.D. (ed.) 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual March 2000. Davies, CA. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center pp. 149.
- HALWATURA D., NAJJIM M.M.M. 2013. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modeling and Software*. Vol. 46 p. 155–162.
- HU H.H., KREYMBORG L.R., DOEING B.J., BARON K.S., JUTILA S.A. 2006. Gridded snowmelt and rainfall-runoff CWMS hydrologic modeling of the Red River of the North Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 1 p. 91–100.
- JENÍČEK M. 2007. Rainfall-runoff modelling in small and middle-large catchments – an overview. *Geografie – Sborník Č GS*. Vol. 111. No 3 p. 305–313.
- KADAM A.S. 2011. Event based rainfall-runoff simulation using HEC-HMS model. Unpublished P.G. thesis submitted to Dept. of Soil and Water Conservation Eng. CAET, Dr. PDKV, Akola.
- KNEBL M.R., YANG Z.L., HUTCHISON K., MAIDMENT D. R. 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*. Vol. 75. Iss. 4 p. 325–336.
- KUMAR D., BHATTACHARYA R. 2011. Distributed rainfall runoff modeling. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. Vol. 4. Iss. 6 SPL p. 270–275.
- MAJIDI A., SHAHEDI K. 2012. Simulation of rainfall-runoff process using Green-Ampt method and HEC-HMS model (Case study: Abnama Watershed, Iran). *International Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 1. Iss. 1 p. 5–9.
- MAJIDI A., VAGHARFARD H. 2013. Surface run-off simulation with two methods using HEC-HMS model (Case study: Abnama Watershed, Iran). *Current Advances in Environmental Science*. Vol. 1. Iss. 1 p. 7–11.
- MCCOLL C., AGGETT G. 2006. Land use forecasting and hydrologic model integration for improved land use decision support. *Journal of Environmental Management*. Vol. 84. Iss. 4 p. 494–512.

- MOUELI S. 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluri-annuel, annuel, mensuel et journalier [Towards a coherent chain of lumped conceptual rainfall-runoff models with no multi-year time annual, monthly and daily]. PhD thesis. Paris. ENGREF pp. 323.
- NASH J.E., SUTCLIFE J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. Vol. 10 p. 282–290.
- NRCS 1997. *National Engineering Handbook*. Part 630. Hydrology. Washington, DC. USDA pp. 762.
- PANIGRAHI B. 2013. *A handbook on irrigation and drainage*. New Delhi. New Indian Publishing Agency. ISBN 9789351305637 pp. 600.
- SHAGHAEGHI FALLAH R. 2001. Simulation of maximum peak discharge in river tributaries using HEC-HMS model (Case study: Mohammadabad watershed, Golestan province). Thesis of M.Sc. Natural Resources Faculty, University of Gorgan pp. 155.
- YENER M.K., SORMAN A.U., SORMAN A.A., SENSOY A., GEZGIN T. 2012. Modeling studies with HEC-HMS and runoff scenarios in Yuvacik Basin, Turkiye. *International Congress on River Basin Management* p. 621–634.
- YUSOP Z., CHAN C.H., KATIMON A. 2007. Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modelling stormflow hydrograph in an oil palm catchment. *Water Science and Technology*. Vol. 56. Iss. 8 p. 41–48.

El Hadj MOKHTARI, Boualem REMINI, Saad Abdelamir HAMOUDI

Modelowanie relacji opad–przepływ przy użyciu systemu modelowania hydrologicznego HEC-HMS na przykładzie rzeki Cheliff-Ghrib w Algerii

STRESZCZENIE

Celem przedstawionych badań było utworzenie hydrologicznego modelu typu opad-przepływ w zlewni rzeki Cheliff-Ghrib za pomocą systemu HEC-HMS. Następnie model ten użyto do przewidywania reakcji hydrologicznej zlewni na różne scenariusze zmian klimatycznych i zmian użytkowania ziemi. Model kalibrowano w dwóch etapach. Pierwszy polegał na doborze zdarzeń, sformalizowaniu funkcji przejścia i doborze odpowiedniego opadu. Drugim etapem było określenie optymalnego zestawu parametrów użytych do walidacji modelu. Stosując zoptymalizowany zestaw parametrów, można było przewidzieć wpływ opadu i zmian użytkowania ziemi w związku z urbanizacją, wylesianiem i powtórny zalesianiem na maksymalny przepływ oraz odpływ wody. Potwierdzono, że wpływ użytkowania ziemi maleje w sytuacji ekstremalnych opadów burzowych.

Słowa kluczowe: *Algeria, Ghrib, HEC-HMS – zlewnia, modelowanie, opad–przepływ*