

FACULTE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT HYDRAULIQUE



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUE
FILIERE : HYDRAULIQUE
OPTION : OUVRAGES HYDRAULIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master**

Par : - Bun Yattou Saddam
- Zoureig Samir

Intitulé

**Etude de transport solide durant les crues
dans le bassin versant d'oued Chemora**

Dirigé par : Mr : BERGHOUT Ali

Soutenu devant le jury composé de :

PRESIDENT :	Université	M'sila	Mr.
EXAMINATEUR :	Université	M'sila	Mr.

Année universitaire : 2020 /2019.

ملخص

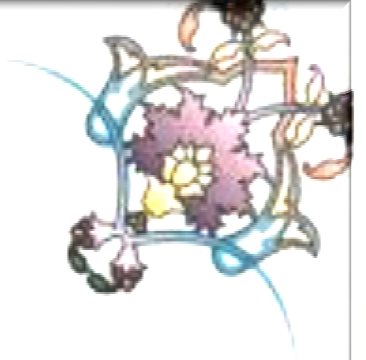
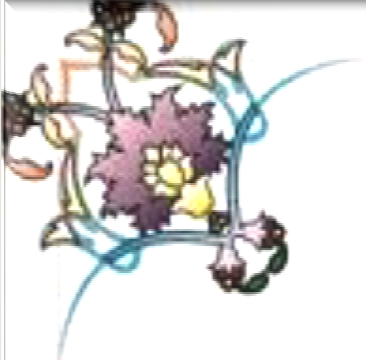
تتكون الدراسة من النمذجة المائية الرسوبية على مقياس الفيضان باستخدام نموذج Arc-Gis و Hec-Hms لمحاكاة السلوك الهيدرولوجي للحوض أثناء هطول الأمطار الغزيرة المسببة للفيضانات في المقام الأول، يأخذ هذا الكود في الاعتبار هطول الأمطار ، والخسائر (عن طريق التسلل ، والاحتفاظ أو التبخر) ، والجريان السطحي المباشر الذي يأخذ في الاعتبار الجريان السطحي ، والتخزين وانخفاض الضغط وسلوك الماء عندما يكون في مجرى النهر. ثانياً ، تقدير المدخلات الصلبة التي تصل إلى مخرج الحوض خلال هذا الهطول ، والتي تمثل الجزء الأكبر من المدخلات السنوية الصلبة.

Abstract

The study consists of hydro-sedimentological modeling at the flood scale, using the Arc-Gis and the Hec-Hms model in order to simulate the hydrological behavior of the basin during heavy rainfall causing the floods in the first place, which takes into account the losses (infiltration losses, retention or evapotranspiration), the flow rate that takes into account surface runoff, storage, pressure drop and water behavior when it is in the bed of a watercourse. Secondly, its sedimentological behaviour with the aim of estimating solid inputs reaching the outlet of this watershed during the same precipitations.

Résumé

L'étude consiste à la modélisation hydro-sedimentologique à l'échelle de la crue, en utilisant l'Arc-Gis et le modèle Hec-Hms afin de simuler le comportement hydrologique du bassin durant les précipitations fortes causant les crues en premier lieu, ce code prend en compte les précipitations, les pertes (par infiltration, retenue ou évapotranspiration), les ruissellements directs qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge et le comportement de l'eau lorsqu'elle se trouve dans le lit du cours d'eau. En deuxième lieu l'estimation des apports solides arrivant à l'exutoire du bassin durant ces précipitations qui représentent l'essentiel des apports solides annuels.



DÉDICACE

**Je dédie cet humble travail à toutes les personnes qui m'ont aidé
directement ou indirectement à réaliser cette thèse**

Maîtrise plus spécifique:

**à ma chère mère, tout mon respect est un témoignage de leur
soutien,
de leur sacrifice et de leur patience pour le bien de
Leurs conseils et orientations dans ma vie.**

à mes chers parents

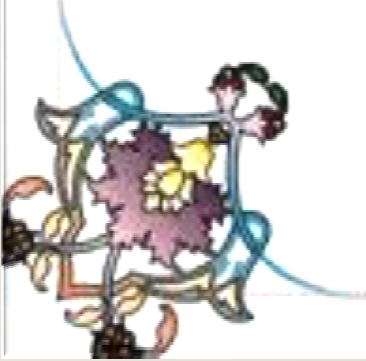
à mes frères et à leurs familles

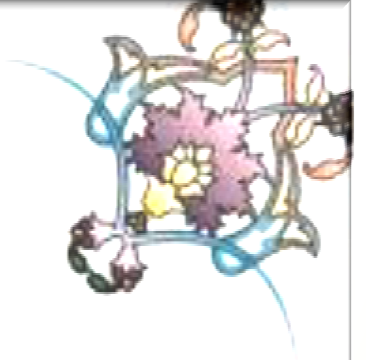
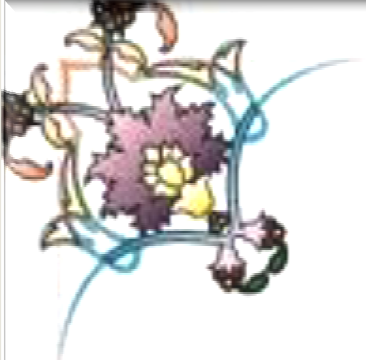
Pour toute ma famille

à mes amis

à mes chers collègues

BUN YATTOU SADDAM





DÉDICACE

**Je dédie cet humble travail à toutes les personnes qui m'ont aidé
directement ou indirectement à réaliser cette thèse**

Maîtrise plus spécifique:

**à ma chère mère, tout mon respect est un témoignage de leur
soutien,
de leur sacrifice et de leur patience pour le bien de
Leurs conseils et orientations dans ma vie.**

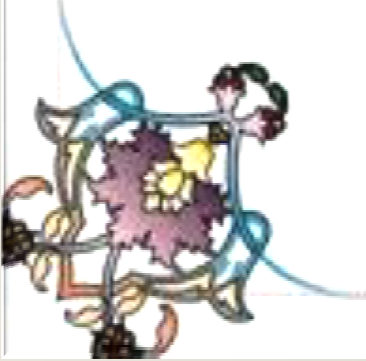
à mes chers parents

à mes frères et à leurs familles

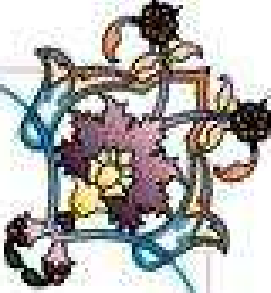
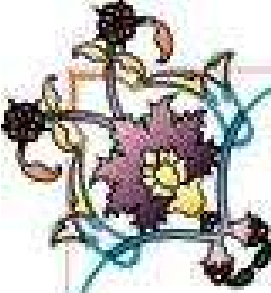
Pour toute ma famille

à mes amis

à mes chers collègues



ZOUREIG SAMIR



Remerciements

*A Nos remerciements avant tout au Dieu le tout
puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience
qu'il nous a donnés pour pouvoir arriver à ce niveau u afin de
réaliser ce modeste travail.*

*Au PROPHETE MOHAMMED paix et salut sur lui
A nos parents qui n'ont pas cessé à tout moment de nous
protéger et de veiller à notre instruction.*

*A notre promotrice MR BERGHOUT ALI pour avoir
assuré notre encadrement, pour leur aide, pour leurs efforts et
leurs précieux conseils*

*Au président et aux membres de jury qui nous a fait
l'honneur d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail et de
faire partie du notre jury et également pour ses conseils.*

Nos sincères remerciements s'adressent également à :

*A tous nos enseignants qui nous ont initié aux valeurs
authentiques, en Signe d'un profond*

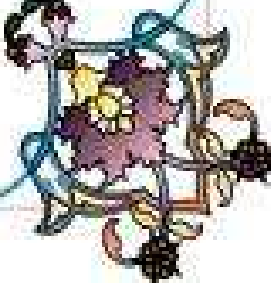
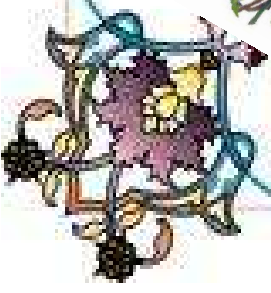
*Et à tous ceux qui nous ont enseigné tout au long de
notre vie scolaire*

*Nous n'oublions pas bien évidemment nos collègues de
promotion « HYDRAULIQUE » en les saluant chaleureusement
pour les agréables moments passés ensemble .*

Que Dieu réalise vos vœux



*Bun yattou Saddam
Zoureig Samir*



Sommaire

CHAPITRE I : Etude Bibliographique

I.1.Introduction générale :	01
I.2 Le Transport solide	03
I.2.1 Généralités sur le Transport solide	03
I.2.2 Modes de transport	04
I.2.2.1 Letransport solide en suspension	05
I.2.2.2 Le transport solide par charriage	07
I.2.3 La saltation	09
I.2.4 Estimation des pertes de terres	09
I.2.4.1 Mesure de transport solide	09
I.2.4.2 Problèmes liés au Transport solide	12
I.2.5 Les crues	12
I.2.5.1 définition	12
I.2.5.2 Les causes de la crue	13
I.2.5.3 Facteurs aggravant les crues	13
I.2.5.4 Le processus de formation des crues	13
a- Influence des facteurs naturels	13
b- Influence des facteurs anthropiques	15
I.2.5.5 Les types de crues	15
I.6. Conclusion	16

CHAPITRE II : Description de la zone d'étude

II .1. Introduction	17
II.2. Caractéristiques naturelles de la basse Chemora	17
II.2.1. Situation géographique	17
II.2. Caractéristiques physiques du bassin versant de Chemora.....	18
II.2.1.a La zone montagneuse	18
II.2.1.b La zone piémonts	18
II.2.1.c La zone de plaine	18
II.2.2 Aperçu général sur la géologie	18
II.2.2.1 La stratigraphie	18
II.2.2.2 Le Quaternaire.....	19
II.2.3 .1 Le Cadre structural et tectonique	20
II.2.3 .2 Pédologie.....	21
II.2.4 .1 Les sols salins (solontchaks)	21
II.2.4.2 les sols alluviaux :	22
II.2.4.3 les sols Calcimagnésiques	22
II.2. 5 La perméabilité	23
II.2. 5.1 Les formations imperméables dans le Bassin Versant Chemora :	23
II.2. 5.2 Les formations perméables dans le Bassin Versant Chemora :	24
II.2.6 Etude de couvert végétal	24
II.3 Etude du réseau hydrographique	25
II. 3.1 Analyse morphologique	25
II. 3.2 Caractéristiques de forme	25
II. 3.3 Indice de compacité de Gravellius (KG)	26

II. 3.4 Le rectangle équivalent	26
I-2-3-Les paramètre du relief	27
I-2-3-1-Courbe hypsométrique	27
II.4 Courbehypsométrique	28
I.4.1 L'altitude caractéristique du bassin versant	30
a) Les altitudes maximales et minimales	30
b) L'altitude moyenne	30
II.4.2 Dénivelée simple (D)	31
II.4.3 Les indices des pentes	31
II.4.3.1 Indice de pente globale (Ig)	31
II.4.3.2 Indice de pente de Roche (Ip)	31
II.4.4 Dénivelée spécifique (Ds)	32
II.5 Les caractéristiques du réseau hydrographique	32
II.5.1 Densité de drainage (Dd)	32
II.5.2 Temps de concentration	33
II.6 Etude climatologie	34
II.6.1 Les températures	34
II.6.2 Les autres facteurs climatiques	34
II.6.3 L'évapotranspiration	35
II.6.3.1 Estimation de l'évapotranspiration	36
a. Formule de THORNTHWAITE	36
b. Formule de TURC	36
c. Formule de GLANNY-CRIDDLE modifié par la FAO	37
II.6. 4 Les précipitations	38
II.7 Conclusion	40

CHAPITRE III : Description des logiciels Arc Gis, HecGeoHms et Hec-Hms

III .1 Introduction	41
III .2 La description du modèle ArcGis.....	41
III .2.1 Présentation du logiciel ArcGis.....	41
III .2.2 Mise en œuvre des SIG	42
III .2.3 Principe de fonctionnement	42
III .2.4 Modèles de représentation des données dans un SIG	43
III .2.5 Arc Gis Raster	43
III.2.6 Arc Gis vecteur	44
III .2.7 Modèle Numérique de Terrain (MNT)	44
III.2 Couplage ArcGIS – HEC-GeoHMS.....	45
III .3 La relation entre (Arc Gis, HecGeo HMS et HEC-HMS)	45
III .4 La description du modèle HEC-HMS	47
III .4.1 La Modélisation sous le HEC-HMS	47
III .4.1.1 La Modélisation hydrologique sous le HEC-HMS	47
III .4.1.2 La Modélisation hydro-sédimentologique sous le HEC-HMS	47
III.4.2 Les étapes de répartition du bassin en sous bassin par HEC-GeoHMS.....	48
III.4.4 Les caractéristiques générales du modèle	49
III.4.5 Le processus de fonctionnement	50
III.5 Conclusion	51

CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE HYDRO-SEDIMENTOLOGIQUE HEC-HMS AU B.V CHEMORA

IV.1 Introduction	52
--------------------------------	-----------

IV.2 Fonctionnalités	52
IV.3 Préparation des entrées du modèle HEC-HMS	53
IV.4 Modélisation du bassin versant	53
IV.5 La structure du modèle HEC-HMS choisie et les données d'entrée du modèle	54
IV.5.1 Le type de modélisation	54
IV.5.2 Les variables	54
a- Découpage des bassins	54
b- La carte de sols	55
c- La carte d'occupation du sol ou du couvert végétal	56
d- Le pourcentage d'imperméable.....	57
IV.6 Les paramètre	57
a- Curve number CN.....	57
b- Abstraction Initiale Ia.....	73
c- La pluie	73
VI.7. La fonction de transfert : l'hydrogramme unitaire de la NRCS.....	82
a- Le concept de base	82
b- Les paramètres	83
IV.8 Le débit de base : la récession exponentielle	83
IV.8.1 Le concept de base	83
IV.8.2 La variable.....	83
IV.8.3 Les paramètres.....	84
a- La constante de récession RC	84
b- Le seuil Td.....	84
c- Le lag des river.....	84
VI.9. Modèle hydro-sédimentologique (Erosion - Transport solide).....	82
VI.9.1. Facteur de l'érodabilité des sols (K)	86
a- Pourcentage de limon Li (0,002-0,050 mm)	88
b- Pourcentage d'argile Ar (0,000 - 0,002 mm).....	88
c- Pourcentage de sable Sa (0,05 - 2,00 mm).....	89
d- Pourcentage de matière organique (a).....	89
e- Pourcentage de sable très fin S_{fin} (0,05 - 0,10 mm).....	90
f- La carte M	91

g- Code de la classe de perméabilité (b) du sol	91
h- Code de la classe de structure (c) du sol	95
i- Carte du Facteur de l'érodabilité des sols	97
VI.9.2 Facteur topographique (LS)	98
VI.9.3 : Le couvert végétal (occupation du sol C)	100
VI.9.4 : Pratiques culturales (P)	107
IV.10. La calibration et validation du modèle hydrologique	108
IV.11. Résultats de l'application HEC HMS	109
IV.11.1. flux exutoire et courbe de simulation de volume.....	109
IV.11.2 débits et volumes simulés exécutoire	112
IV.11.3 Débits et volumes simulés	114
IV.11.4. La calibration et validation du modèle hydro-sédimentologique.....	117
IV.11.5 Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée....	118
IV. 12. Conclusion.....	121
Conclusion générale.....	122

Liste des figures

Figure I.1 : Diagramme de Hjulstrom.....	04
Figure I.2 : Différent types de transport solide en rivière.	04
Figure I.3 : Différent types de transport solide en rivière.....	05
Figure I.4 : Critères de suspension (Van Rijn 1984)	07
Figure I.5 : Equilibre d'un grain posé sur le fond d'un canal.....	08
Figure I.6 : Exemples d'échantillonneurs Helley-Smith.	10
Figure I.7 : Echantillonneurs de charge de fond (piège)	11
Figure I.8 : Traineau portatif des détecteurs.....	12
Figure II.1 : Situation géographique du bassin de Chemora.....	17
Figure II.2 : Carte géologique de Nord – Est des Aurés.	20
Figure II.3 : Carte d'occupation de sol Bassin Versant Chemora (carte extraite des cartes dossols).....	23
Figure II.4 : Carte de Couverture Végétale du Bassin Versant Chemora.....	24
Figure II.5 : Carte du Réseau Hydrographique du Bassin Versant Chemora	25
Figure II.6 : Carte Hypsométrique Bassin Versant Chemora.....	28
Figure II.7 : Courbe hypsométrique des surfaces cumulées.....	30
Figure III.1 : SIG un ensemble de couches d'information superposées	43
Figure III.2 : Mode de représentation Raster et Vecteur.	43
Figure III.3 Carte Digital élévation model (DEM) BV Chemora.....	44
Figure III.4 Extension HEC-Geo HMS sous Arc Map.	45
Figure III.5 ensemble du Arc Gis et du modèle hydrologique.	46
Figure III.6 Etapes de modélisation par HEC-HMS	47
Figure III.7 Découpage en des sous-bassins versants par HEC-GeoHMS.....	49

Figure III-8 : Organigramme de la modélisation hydro-sédimentologique par HEC-HMS...	50
Figure IV.1 : Carte des sous bassins bassin versant Chemora.	54
Figure IV.2 : découpage B V Chemora en sous bassins.	55
Figure IV.3 : la carte des sols type B NRCS du bassin versant Chemora.....	56
Figure IV.4 : la carte des sols type C NRCS du bassin versant Chemora.....	56
Figure IV.5 : Carte des pourcentages d'imperméables dans le bassin versant Chemora....	57
Figure IV.6. Corrélations entre les valeurs de l'NDVI et les valeurs du CN pour les différents types des sols NRC	59
Figure IV.7 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 02 /01/1991...	59
Figure IV.8 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 30/10/1990...	60
Figure IV.9 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 15/11/1990...	60
Figure IV.10 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 17/12/1990...	61
Figure IV.11 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 03/02/1991...	61
Figure IV.12 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 23/03/1991...	62
Figure IV.13 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 08/04/1991...	62
Figure IV.14 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 10/05/1991...	63
Figure IV.15 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 27/06/1991...	63
Figure IV.16 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 27/07/1991...	64
Figure IV.17 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 30/08/1991...	64
Figure IV.18 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 28/09/1990...	65
Figure IV.19 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 23/03/1991...	65
Figure IV.20 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 08/04/1991...	66
Figure IV.21 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 10/05/1991...	66

Figure IV.22 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 27/06/1991...	67
Figure IV.23 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 29/07/1991...	67
Figure IV.24 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 30/08/1991...	68
Figure IV.25 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 28/09/1991...	68
Figure IV.26 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 02/01/1991...	69
Figure IV.27 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 30/10/1990...	69
Figure IV.28 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 15/11/1990.....	70
Figure IV.29 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 17/12/1990...	70
Figure IV.30 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 03/02/1991...	71
Figure IV.31 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 02 /01/1991.....	73
Figure IV.32 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 30/10/1990.....	74
Figure IV.33 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 15/11/1990.....	74
Figure IV.34 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 17/12/1990.....	75
Figure IV.35 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 03/02/1991.....	75
Figure IV.36 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 23/03/1991.....	76
Figure IV.37 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 08/04/1991.....	76
Figure IV.38 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 10/05/1991.....	77
Figure IV.39 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 27/06/1991.....	77
Figure IV.40 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 29/07/1991.....	78
Figure IV.41 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 30/08/1991.....	78
Figure IV.42 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 28/09/1991.....	79
Figure IV.43 : Organigramme.....	85
Figure IV.44 : Organigramme.....	87
Figure IV.45 : Carte limon.....	88

Figure IV. 46. : Carte d'argile.....	88
Figure IV.47 : Carte sable.....	89
Figure IV.48 : Carte da matière organique.....	89
Figure IV.49 : Carte sable fin.....	90
Figure IV.50 : Carte M.....	91
Figure IV.51 : codes de perméabilité basés sur la classification des textures (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)	91
Figure IV.52 : Carte code de perméabilité.....	93
Figure IV.53 : Code Structure basée sur la texture (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993).....	95
Figure IV.54 : Carte code de structure.....	97
Figure IV. 55 : Carte du facteur K.....	97
Figure IV.56 : Carte de Le facteur topographique (LS) bassin versant Chemora.....	99
Figure IV.57 : relation entre le facteur « C » et le NDVI.....	100
Figure IV.58 : Carte de facteur C du 02 /01/1991.....	101
Figure IV.59 : Carte de facteur C du 30/10/1990.....	101
Figure IV.60 : Carte de facteur C du 15/11/1990.....	102
Figure IV.61 : Carte de facteur C du 17/12/1990.....	102
Figure IV .62: Carte de facteur C du 03/02/199.....	103
Figure IV.63 : Carte de facteur C du 23/03/1991.....	103
Figure IV.64 : Carte de facteur C du 08/04/199.....	104
Figure IV.65 : Carte de facteur C du 10/05/1991.....	104
Figure IV.66 : Carte de facteur C du 27/06/1991.....	105
Figure IV.67 : Carte de facteur C du 29/07/1991.....	105
Figure IV.68 : Carte de facteur C du 30/08/1991.....	106

Figure IV.69 : Carte de facteur C du 28/09/1991.....	106
Figure IV 70 : Carte de Le Facteur P ou indice des aménagements antiérosifs bassin versant Chemora.....	105
Figure IV 71 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Mar 1991)	109
Figure IV 72 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Avr 1991)	109
Figure IV 73 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (May 1991)	110
Figure IV 74 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Jun 1991)	110
Figure IV 75 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Jul1991)	111
Figure IV 76 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Nov 1991)	111
Figure IV 77 : Débits et volumes simulés EXCUTOIRE (NOV 1990)	112
Figure IV 78 : Débits et volumes simulés EXCUTOIRE (MARS 1991)	112
Figure IV 79 : Débits et volumes simulés EXCUTOIRE (AVR 1991)	112
Figure IV 80 : débits et volumes simulés exutoire (May 1991)	113
Figure IV 81 : débits et volumes simulés exutoire (Jun 1991)	113
Figure IV 82 : Débits et volumes simulés EXUTOIRE (JUL 1991)	113
Figure IV 83 : Débits et volumes simulés (NOV 1991.....	114
Figure IV 84 : Débits et volumes simulés (MARS 1991)	114
Figure IV 85 : débits et volumes simulés (Avr 1991)	115
Figure IV 86 : débits et volumes simulés (May 1991)	115
Figure IV 87 : débits et volumes simulés (Jun 1991)	116
Figure IV 88 : débits et volumes simulés (Jul 1991)	116
Figure IV 89 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée B .V.Chemora 15/11/1990.....	118
Figure IV 90 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée	

B .V.Chemora 23/03/1991.....	118
Figure IV 91 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée	
B .V.Chemora 08/04/1991.....	119
Figure IV 92 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée	
B. V.Chemora 10/05/1991.....	119
Figure IV 93 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée	
B. V.Chemora 27/06/1991.....	120
Figure IV 94: Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée	
B .V.Chemora 27/07/1991.....	120

Liste des tableaux

Tableau I-1 : La répartition des surfaces en fonction des altitudes.....	27
Tableau II. 2 : Calculs des surfaces partielles et cumulées.....	29
Tableau II. 3 : Classification de L'ORSTOM.	32
Tableau II.4 : Caractéristiques physiographiques des bassins versants de Chemora....	33
Tableau II.6 : Les facteurs climatiques au niveau du Bassin Versant Chemora.....	34
Tableau II.7 : Valeurs de l'ETP.	34
Tableau II.8 : Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées.	38
Tableau II.9 : Caractéristiques des échantillons.....	39
Tableau IV.1 : Les données utilisées pour les corrélations entre l'NDVI et CN pour les différents types des sols NRCS [BERGHOUT A. 2017].....	58
Tableau IV.2 : Résultats des valeurs de CN chaque sous bassin 1990 /1991	71
Tableau IV.3 : Les valeurs de la pluie Moyenne du 1990 / 1991 estimées aux différents sous bassins formant le bassin Chemora.....	79
Tableau IV.4: Rugosité des matériaux.....	84
Tableau IV.5 : couche de sol pour les séries de sols en Malaisie.....	91
Tableau IV.6 : code de perméabilité du sol basé sur la classe de texture du sol.....	92
Tableau IV.7 : Codification de la perméabilité du sol (b_p) (Wischmeier et Smith, 1978).....	93
Tableau IV.8 : algorithme pour détermine de la perméabilité du sol (b_p) (Berghout A. 2020).....	93
Tableau IV.9 : Codification de la structure des sols (c_s) (Wischmeier et Smith, 1978).....	95
Tableau IV.10 : algorithme pour détermine la structure des sols (c_s) (Berghout A. 2020).....	95
Tableau III.11 : Le facteur P en fonction de la pente (Shin, 1999).....	107
Tableau IV.12 : Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation.....	108
Tableau IV.13 : les résultats de calibration et de la validation du modèle.....	117
Tableau IV.14 : Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation.....	117
Tableau IV.15 : Les résultats de la validation et la calibration du modèle hydro-sédimentologique...	121

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Les transports solides en suspension varient d'une année à l'autre, d'une saison à une autre et d'une crue à une autre; ils mettent en évidence l'irrégularité des précipitations et de l'hydraulicité.

La concentration est maximale en automne et au printemps, lors des violentes crues. Elles sont faibles en année de faible hydraulicité, en saison sèche, et en hiver et en absence de crues.

Dans ce contexte et dans le but de la modélisation hydro-sédimentologique à l'échelle des crues en appliquant le modèle Hec-Hms, en commençant par l'application de l'équation universelle des pertes de sol modifiée (MUSLE) pour prédire le potentiel d'érosion durant les crues, suivi d'une modélisation du transport solide dans les cours d'eau en testant les différentes formules du transport solide dans les cours d'eau disponibles dans le modèle Hec-Hms ainsi que leurs capacités de transport, pour trouver à la fin la quantité des sédiments arrivant à l'exécutoire.

Ce travail est structuré de la façon suivante :

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur le transport solide.

Le second chapitre présente une description de la zone d'étude.

Le troisième chapitre sera réservé à la présentation des logiciels Arc Gis, Hec-Geo-Hms et Hec-Hms.

Le dernier chapitre présentera l'application du modèle Hec-Hms et les résultats simulés à échelles des crues et leurs comparaison avec les données mesurés au niveau de la station hydrométrique de Chemora.

En fin, le travail est conclu par une synthèse et une conclusion générale de cette étude dans laquelle on propose quelques voies pour des recherches futures.

CHAPITRE I : Etude Bibliographique

I.2 Le Transport solide :

I.2.1 Généralités sur le Transport solide :

On appelle transport solide d'un cours d'eau tous les matériaux, des boues les plus fines aux rochers les plus grossiers, que le courant peut entraîner.

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion. Est la conséquence partielle de la perte en terre des sols au niveau du bassin versant. Est cependant, la cause directe de la sédimentation dans les ouvrages hydrauliques.

Le transport des sédiments par un écoulement à surface libre joue un grand rôle dans de nombreux domaines. Dans la nature, il affecte la morphologie des cours d'eau, des estuaires et du littoral. Agit également par les matières en suspension sur tout l'écosystème aquatique (atténuation de l'énergie lumineuse en particulier).

Son impact sur les ouvrages hydrauliques est de première importance. Est responsable du comblement des retenues, du déchaussement d'ouvrages dû à l'abaissement du lit pour ne citer que ces effets.

Le transport solide est un phénomène complexe, en particulier, la chute des vitesses à l'entrée de la retenue qui entraîne par la diminution de sa capacité du transport, un dépôt immédiat des alluvions grossiers, par contre les éléments fins, plus légers poursuivent leurs chemins en suspension jusqu'à se déposer en eaux mortes où ils décantent lentement.

La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par le réseau d'écoulement dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie.

Ce phénomène est limité par la quantité de matériaux susceptible d'être transportée

(Selon la fourniture sédimentaire).est régi par deux propriétés du cours d'eau :

- a-** La compétence : Elle est mesurée par le diamètre maximal des débris rocheux que peut transporter le cours d'eau.
- b-** Cette caractéristique est fonction de la

Vitesse d'eau comme le montre le diagramme de Hjulstrom qui divise le transport solide en trois phases : la sédimentation, le transport avec une fonction croissante qui est toujours au-dessous de celle d'arrachement des particules (l'érosion).[2] [3] [4] [5] [6] [7]

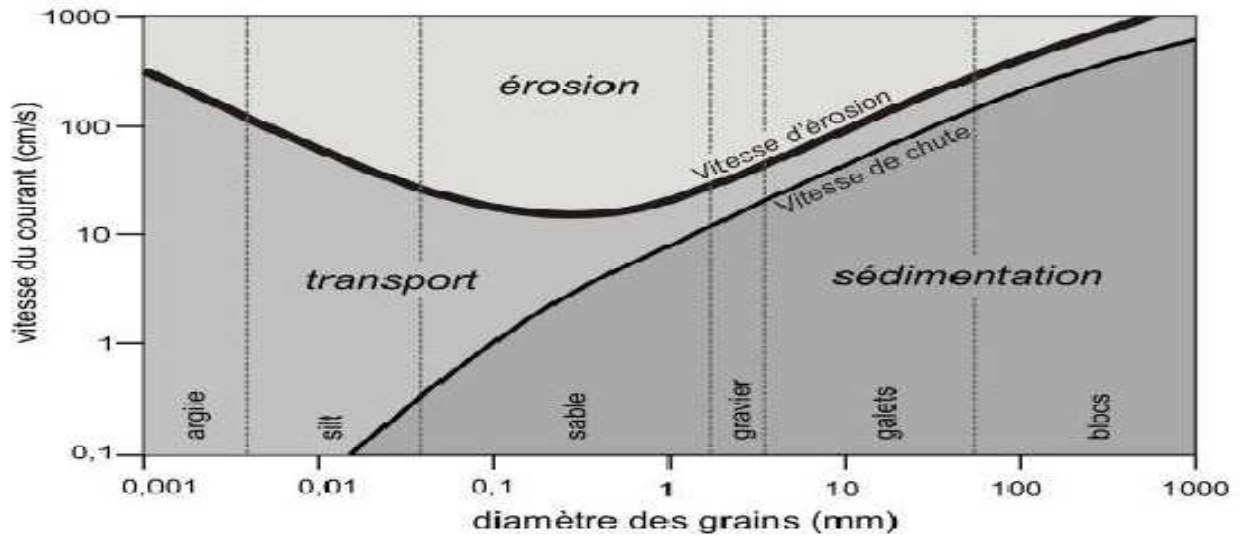


Figure I.1 : Diagramme de Hjulstrom

- c- La capacité : C'est la quantité maximale de matériaux solides que peut transporter en un point et à un instant donné le cours d'eau.
- d- Elle est fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section (forme, rugosité, etc...).

I.2.2 Modes de transport:

Existe différents modes de transport solide dans les cours d'eau, ils dépendent essentiellement de la morphologie du cours d'eau et des terrains traversés. S'agit de trois types de mouvements dans les cours d'eaux :

- Transport en charriage au fond du lit.
- Transport par saltation.
- Transport en suspension.

La figure suivante schématise les types de transport solide, rencontrés dans le bassin versant

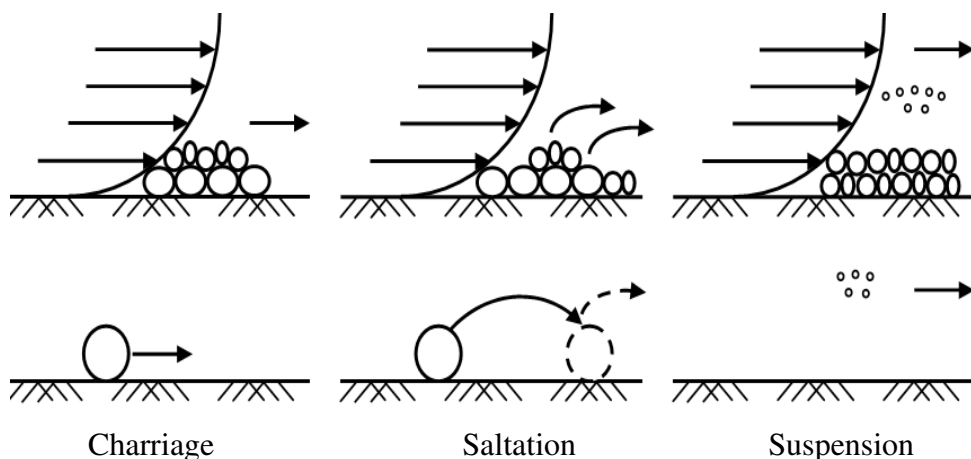


Figure I.2 : Différent types de transport solide en rivière.

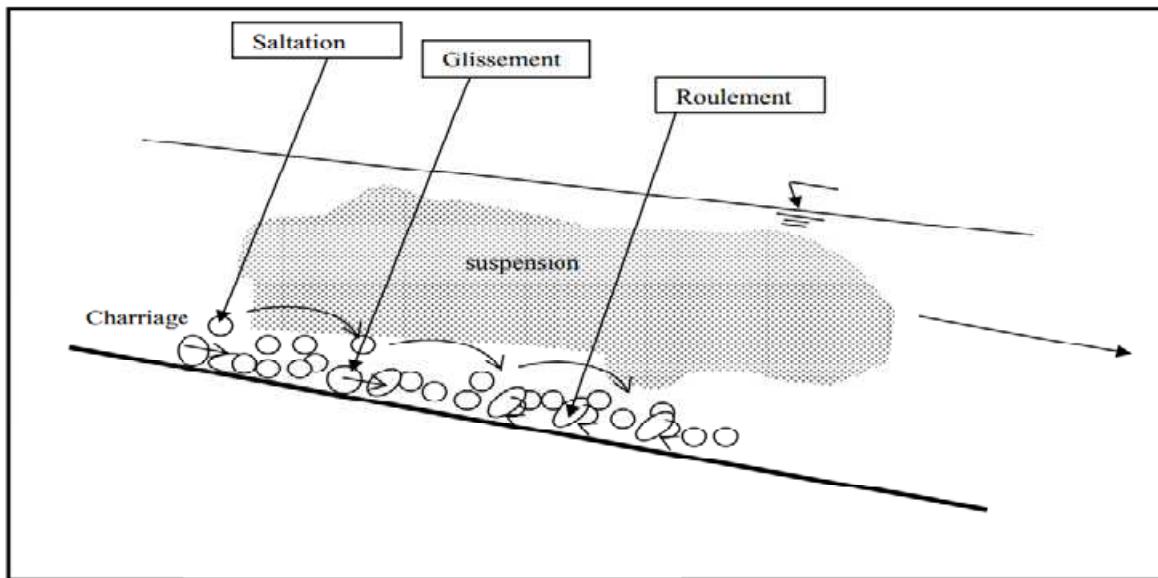


Figure I.3 : Différent types de transport solide en rivière

I.2.2.1 Le transport solide en suspension :

Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Le transport en suspension concerne principalement les matériaux produits par l'abrasion des sols. Aussi sa détermination est très utile en agronomie, car ce sont les éléments les plus fertilisants qui sont ainsi transportés : particules fines, éléments chimiques et matières organiques. Le transport solide en suspension est un phénomène assez continu dans l'espace. Les sédiments sont transportés sur de longues distances, à la vitesse du courant. Mais il est très discontinu dans le temps puisqu'il est conditionné par le phénomène d'abrasion.

Description du phénomène :

Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence et l'épaisseur de la couche limite turbulente s'accroissent également, on arrive finalement à un stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces ascensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules. A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire définie, mais elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur de fluide.

Le critère d'apparition des phénomènes de suspension qui consiste à définir la vitesse "U" d'écoulement du liquide, par laquelle la poussée de ce dernier sur les grains de diamètre "D" permet la mise en suspension des grains quartzeux de 0,2 à 0,85 millimètres de diamètre dans des écoulements naturels de rivières est définie par la formule de [W. Kresser](#) suivante :

$$U^2 = 360.g.D(I.1)$$

Avec :

$$U = C \sqrt{h.J} \text{ et } \tau = \gamma J \text{ où } \tau = 360 (\gamma g C^2)$$

τ : La contrainte tangentielle de l'écoulement

γ : Poids volumique du liquide (N/m^3)

C : Coefficient de Chazy.

h : Hauteur du liquide (m).

J : Perte de charge régulière de l'écoulement.

U : Vitesse de l'écoulement (m/s).

D : Diamètre des grains (mm).

g : Accélération de pesanteur (m/s^2).

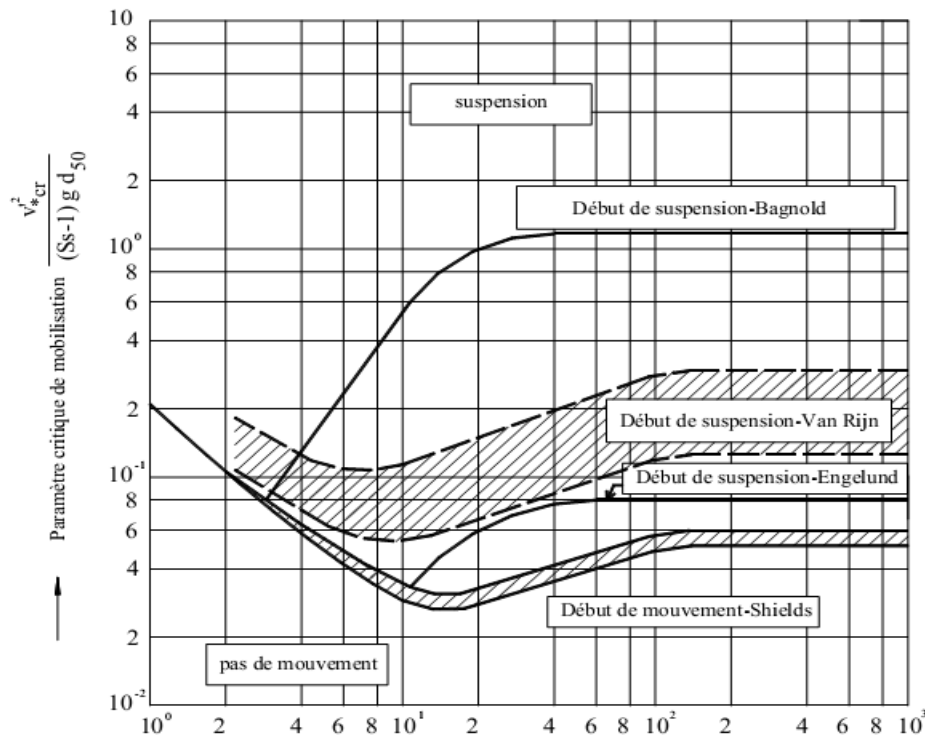
Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval.

Quelques valeurs indicatives, permettent de délimiter les deux modes de transport. Ces valeurs utilisent le rapport entre vitesse de l'écoulement V sur le lit du cours d'eau, et la vitesse W de chute des particules.

$V/W > 0,10$ début de transport par charriage.

$V/W > 0,40$ début de transport en suspension.

Les critères de suspension, donnés par [Bagnold](#), [Van Rijn](#), [Eugelund](#) et [Schields](#) sont représentés dans la (Figure I.4). [8] [5] [1]



Paramètres liés à la particule D^*

Figure I.4 : Critères de suspension (Van Rijn 1984)

I.2.2.2 Le transport solide par charriage :

Le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il s'alimente surtout par érosion du lit et des berges du cours d'eau. Il contribue pour une large part à la formation et à l'équilibre du lit, modelant ainsi le profil en long du cours d'eau. Les grains charriés se déplacent par à-coups à une vitesse moyenne très nettement inférieure à celle de l'eau (moins d'un mètre par heure).

Lorsque la turbulence de l'écoulement est importante, les grains sont susceptibles d'être emportés par suspension malgré leur poids. Ils peuvent alors se déplacer sur de longues distances sans rejoindre le fond, avec une vitesse égale à celle de l'eau. Le transport par charriage est très discontinu à la fois dans le temps et dans l'espace. C'est un phénomène très localisé puisqu'il est conditionné entre autres, par la pente et la constitution du lit, qui peuvent varier d'un tronçon de cours d'eau à l'autre. Par contre, pour une même section de cours d'eau, il peut être lié au débit liquide, donc, dans certaines conditions il se prête mieux à l'étude théorique et à l'élaboration de formules. [9] [10]

Description du phénomène :

Sur le lit des matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrauliques.

a) Les forces de pesanteur sont des forces stabilisatrices.

b) Les forces hydrauliques sont des forces déstabilisatrices dues à l'écoulement (traînée et portance)

La grandeur physique explicative de ce mode de transport (charriage) est la contrainte hydrodynamique critique « τ_c ». Donc les grains constituant l'interface solide-liquide, ayant un poids et un coefficient de frottement, ils ne peuvent être mis en mouvement par l'action du fluide que si la contrainte sur le fond " τ " dépasse la valeur de la contrainte critique « τ_c »

Ce mouvement de granulats se traduira par un transport sur le fond dans le sens de l'écoulement.

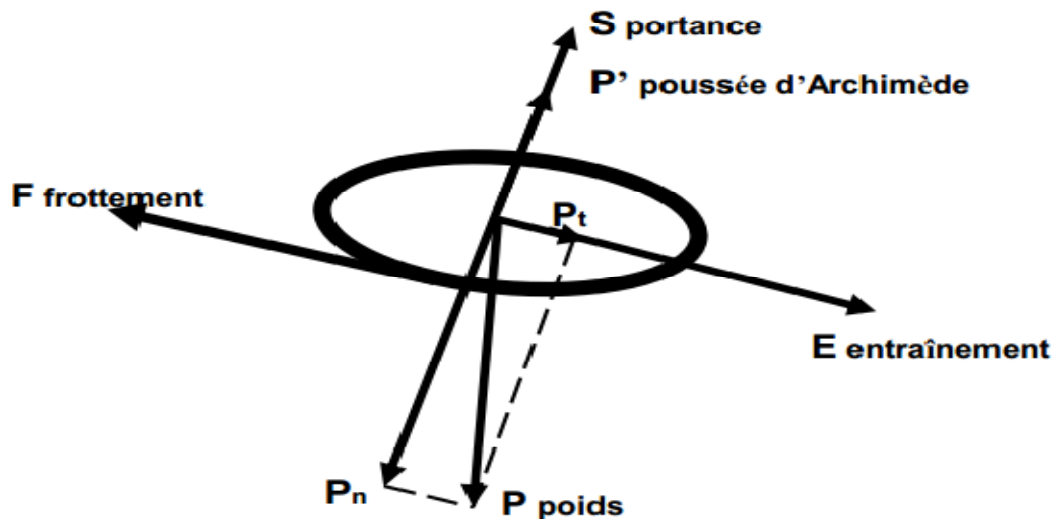


Figure I.5 :Equilibre d'un grain posé sur le fond d'un canal

La contrainte sur le fond de la rivière est exprimée par :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot J \quad (\text{N/m}^2) \quad (\text{I.2})$$

: La contrainte tangentielle de l'écoulement. (N/m^2)

τ_{cr} : contrainte critique du début d'entraînement. (N/m^2)

J : Perte de charge régulière de l'écoulement.

ρ : Poids spécifique de l'eau.

R_h : Rayon hydraulique (m)

g : Accélération de la pesanteur (m^2/s)

Pour cela, on dit que le charriage est un phénomène à seuil et l'analyse très simplifiée pour le début de mouvement, revient à comparer directement la force de déstabilisation due à l'écoulement à la capacité de résistance au mouvement des matériaux, qui tapissent le fond. [3]

I.2.3 La saltation :

C'est le mode de transport des éléments plus fins que les galets, c'est-à-dire les graviers et les sables grossiers, Les graviers sautent, progressent par bonds au fond de la rivière et occupent donc, dans la section, une certaine hauteur dépendant de la vitesse et des caractéristiques des grains.

On explique la progression par saltation de la façon suivante : un grain glisse sur le fond du lit, puis rencontre un obstacle, il se bute alors sur cet obstacle. La différence de pression entre l'amont et l'aval du grain augmente, il bascule, puis est arraché, entraîné par le courant et, par gravité, retombe au fond où le processus recommence.

Il est évident que les composantes multiples de la vitesse, qui caractérisent la turbulence, jouent un rôle important dans la saltation.[2]

I.2.4 Estimation des pertes de terres :

La quantification de transport solide peut se faire par:

- mesure directes.
- calculs à l'aide des formules existant dans la littérature.

I.2.4.1 Mesure de transport solide :

a) Mesure du transport en suspension :

En pratique, la mesure du transport solide se fait sur toute la largeur de la section de mesure. La méthode utilisée, consiste à explorer le champ des vitesses et des concentrations sur une section donnée du cours d'eau.

Des prélèvements d'échantillons par des équipements spécifiques, au droit de la section de mesure, se font parallèlement au jaugeage de débit au moulinet pour différentes largeurs et différentes profondeurs de la section de mesure. Le prélèvement d'échantillons doit se faire avec des appareils à action très rapide.

Existe plusieurs appareils de prélèvements d'échantillons actuellement utilisé, à savoir :

- Turbidison de NEYRPIC
- Turbidison de DELFT
- Prélèvement au moyen d'une pompe
- Prélèvement au moyen de bouteilles

Pour les faibles courants d'eau, les prélèvements peuvent être faits à l'aide de bouteilles que l'on envoie à la profondeur voulue grâce à un câble.

b) La mesure du transport de fond :

• Mesure directe

La fosse artificielle, c'est la manière la plus simple pour les mesures de transport solide par charriage.

Elle consiste à creuser un trou dans le lit du cours d'eau (Figure I.17) cela permet de récupérer puis peser les sédiments qui y pénètrent. Cette méthode devient plus longue et laborieuse lorsque la charge en sédiments devient plus grande. Parmi les équipements de mesures actuellement disponibles on peut décrire très sommairement :

• Les nasses constituées d'une poche de grillage montée sur un cadre métallique qui laisse passer les matières en suspension, mais retient les matériaux grossiers.

Le plus connu et le plus utilisé dans le monde est le préleveur Helley –Smith dont il existe de nombreux modèles, fonction notamment de la granulométrie des sédiments à prélever et des vitesses d'écoulement.

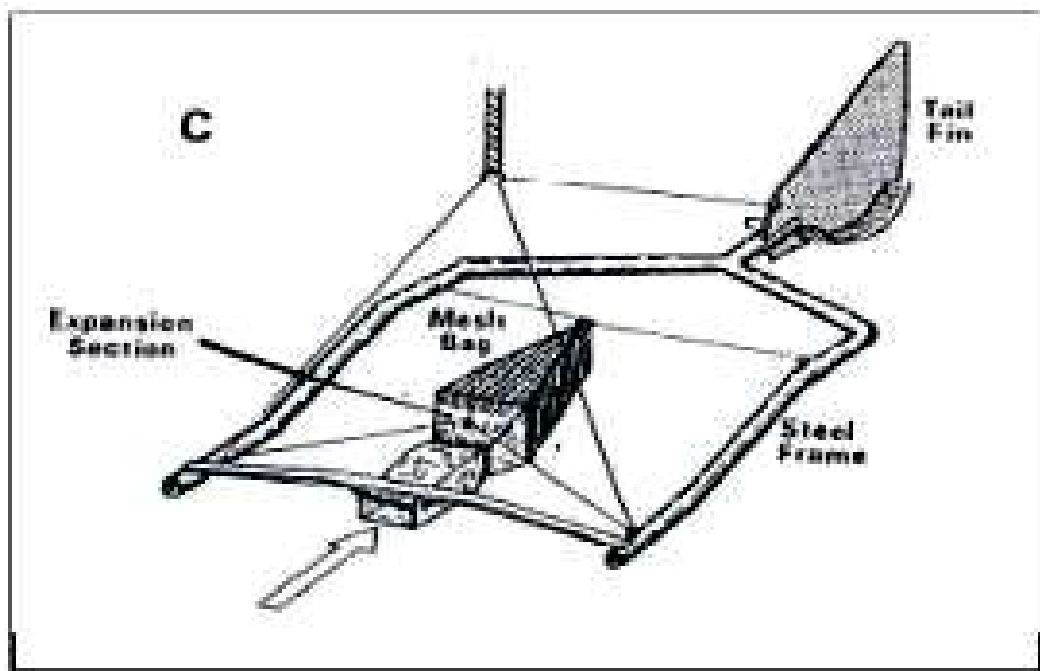


Figure I.6 : Exemples d'échantillonneurs Helley-Smith.

• Le piège constitué de récipients très aplatis de section longitudinale triangulaire dont le bord correspondant au sommet du triangle est dirigé vers l'amont. A l'opposé dans la partie supérieure aval du récipient, une série de petites cloisons inclinées vers l'aval constitue le piège où viennent se prendre les matériaux (sable essentiellement).

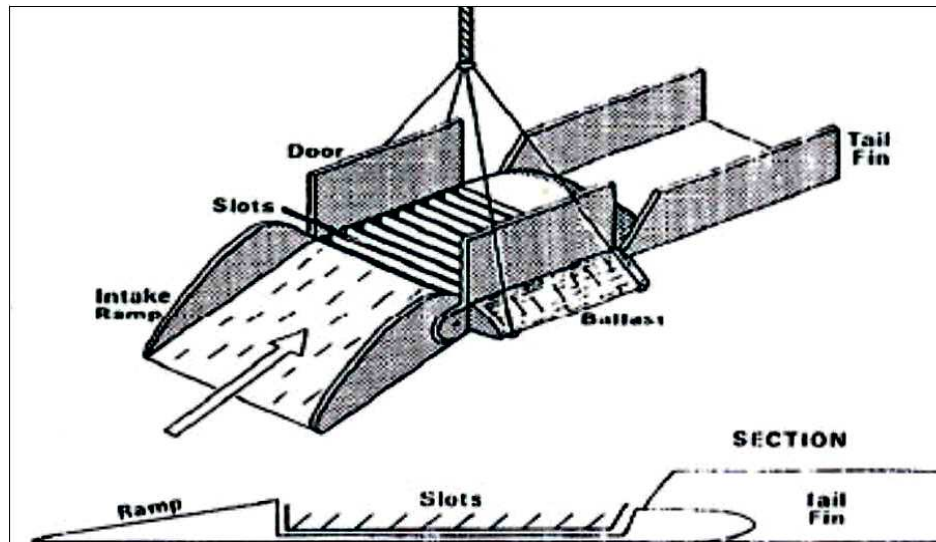


Figure I.7 : Echantillonneurs de charge de fond (piège)

- Les mesures indirectes :

Elles sont basées sur l'utilisation des ultra-sons ou des traceurs radioactifs.

- Les sondeurs à ultrasons : permettent de suivre le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faibles pentes.
- Le détecteur hydro phonique :

Il permet de déterminer le début et l'arrêt d'entraînement des particules de sable grossier et gravier grâce aux chocs enregistrés suite au contact des particules mises au mouvement avec une plaque placée au fond du cours d'eau. On peut avoir au lieu d'une plaque un peigne enfoncé dans les matériaux du fond sableux attachée à une tige reliée à un lecteur phonographique. Cet appareil est appelé aréna phone.

Méthode par l'outil des traceurs : la technique consiste à insérer dans l'écoulement un traceur radioactif sous une forme semblable aux particules en charriage (avoir la même forme, taille et poids). Le mouvement en aval peut alors être surveillé en utilisant les détecteurs portatifs. Alternativement, le traceur peut être appliqué à la surface du sédiment naturel, ou il peut être incorporé aux matériaux artificiels qui peuvent être rendus radioactifs (Fao, 1993). La complexité de cette technique est liée à la lourdeur de ces expérimentations (fabrication, détection de nuit, obtention des autorisations et le prix des traceurs) et le traitement ultérieur des données.

Les mesures faites servent à tracer des courbes iso-actives à différentes dates déterminées. L'étude de ces cartes permet d'aboutir à des informations semi quantitatives telles

que la direction générale, la vitesse moyenne et la zone intéressée par le transport, ou à des mesures quantitatives par intégration dans le temps ou intégration dans l'espace.

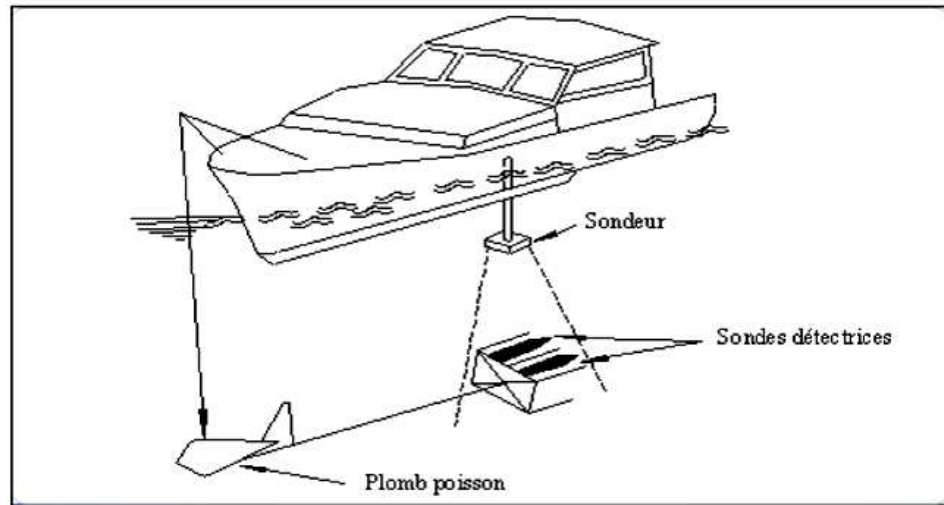


Figure I.8 : Traineau portatif des détecteurs

Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement. De ce fait, les évaluations de ce type de transport sont difficiles à mener en l'absence de bases de données. [6] [1]

I.2.4.2 Problèmes liés au Transport solide :

Les problèmes dépendants du transport solide peuvent être cités comme les suivants :

- Disparition des terres agricoles
- Décomposition des ressources en eaux potables
- Augmentation des coûts suivant les inondations
- Envasement des barrages et divers ouvrages hydrauliques etc.

Le problème le plus important et inquiétant est l'envasement des cuvettes des barrages.

I.2.5 Les crues :

I.2.5.1 définition :

Les crues sont un phénomène naturel. Toutefois, les catastrophes entraînées par les inondations sont le résultat d'une interaction entre ce phénomène naturel et des processus écologiques, économiques et sociaux. La crue correspond à l'augmentation de la quantité d'eau qui s'écoule dans la rivière et peut concerner l'ensemble du lit majeur de la rivière.

De nombreux géographes et hydrologues ont adopté le critère qu'une rivière est en crue lorsque son débit est trois à cinq fois supérieur à son débit moyen.

De façon plus pratique, on admet Qu'une rivière est en crue lorsqu'elle déborde des limites de son lit mineur. S'a git d'un phénomène naturel périodique qui n'est exceptionnel que lorsque les débits deviennent considérables par rapport à son module ; on parle alors de crue critique, la quelle peut engendrer une inondation sur les zones riveraines. Une crue se caractérise par son hydro gramme graphique qui représente les variations de débit en fonction du temps. Plus précisément, c'est la partie montante de ce hydro gramme qui est appelé « crue », la partie descendante étant « la décrue ».Une crue se définit par différents critère sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe et son volume.

I.2.5.2 Les causes de la crue :

La crue est la conjugaison brutale de plusieurs facteurs :

- l'augmentation brutale du débit en amont provoqué soit par des précipitations importantes en amont et sur site, soit par une décharge brutale des eaux en amont due à un réchauffement rapide (fonte des neiges ou de glacier) ou un évènement accidentel (rupture de barrage...).

Cet apport excessif est renforcé par une diminution de l'infiltration et du stockage en amont (urbanisation excessive et non contrôlée, antécédents pluvieux récents), par l'encombrement du lit du cours d'eau provoquant des mini barrages qui cèdent lorsque la pression des eaux est trop forte.

- La baisse de l'écoulement sur le site et en aval causée par l'encombrement du cours d'eau à caractère accidentel (éboulement, glissement de terrain, travaux dans le lit du cours d'eau) ou due à la négligence (urbanisation, absence de nettoyage). Parmi ces facteurs, certains sont prévisibles, d'autres ne le sont pas, certains sont imparables, d'autres peuvent être évités. En ce qui concerne les causes imparables (précipitations, sol saturé ...), la prévention est basée uniquement sur la mise en alerte et la surveillance.

I.2.5.3 Facteurs aggravant les crues :

-En milieu rural

1. Le développement des grandes cultures au déterminent des prairies fourragères a eu entre autres pour conséquence la disparition des haies et des taillis bocagers qui avaient un effet de ralentissement et de rétention de l'eau.

2. Le drainage des marais et l'assèchement de zones humides qui jouaient un rôle d'éponge ont accéléré les vitesses de transfert de l'eau vers les cours d'eau.

3. Le recalibrage des cours d'eau (suppression de méandres par exemple) a accéléré les vitesses d'écoulement de l'eau vers l'aval.

-En milieu urbain

L'imperméabilisation des sols dans les agglomérations a accentué le ruissellement pluvial.

I.2.5.4 Le processus de formation des crues :

Comprendre ce processus revient à analyser les différents facteurs concourant à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau. En simplifiant, on distingue :

- l'eau mobilisable, constituée de l'eau reçue par le bassin versant.
- Le ruissellement, qui correspond à la part de l'eau qui n'a pu s'infiltrer dans le sol. Il dépend de la nature du sol, de son occupation de surface et de l'intensité de l'épisode pluvieux
- Le temps de concentration, qui est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau partant du point le plus éloigné de l'exutoire du bassin versant parvienne jusqu'à celui-ci.
- La propagation de l'onde de crue, qui est fonction de la structure du lit et de la vallée alluviale, notamment de la pente et des caractéristiques du champ d'inondation.

a- Influence des facteurs naturels

- Surface et forme du bassin versant : ainsi pour une même surface, l'allure de l'hydrogramme de crue résultant d'une pluie donnée est très différente suivant la forme du bassin versant; un bassin très allongé ne réagit pas comme un bassin de forme ramassée ce qui a amené l'utilisation d'un indice pour évaluer le « coefficient de compacité ». En principe plus cet indice est faible, plus la concentration des eaux apportées par les affluents est rapide et plus les crues risquent d'être brutales et bien différenciées.

- Configuration du relief des lits des cours d'eau : La pente exerce une influence directe sur la rapidité de l'écoulement et donc sur la puissance de la crue. Si le profil en long du cours d'eau est assimilable à une suite de segments plus ou moins pentus, il exerce une action visible sur la crue. Le profil en travers est aussi important ; pour un même débit de crue, un cours d'eau encaissé verra sa hauteur d'eau monter beaucoup plus vite qu'un cours d'eau à profil plus évasé. En contrepartie, ce dernier a de plus grands risques de débordements.

- Densité des cours d'eaux et perméabilité du bassin versant : ainsi la densité des cours d'eau était fonction de la nature des terrains, le réseau est d'autant plus développé et complexe que le terrain est moins perméable. On comprend aisément que plus l'imperméabilité est forte, plus les eaux météoriques sont disponibles pour le ruissellement de surface. De ce point de vue, à priori les cours d'eau drainant les régions imperméables sont une plus forte probabilité à développer des crues dangereuses.

- Facteurs biogéographiques : la végétation joue un rôle climatique complexe, elle agit sur le ruissellement, retient une part des pluies, évapore l'eau, etc. L'on sait depuis longtemps

qu'une couverture végétale dense réduit et ralentit considérablement l'écoulement. D'abord la forêt intercepte la pluie et la neige, cette dernière pouvant mettre très longtemps à fondre sous couvert. En suite elle accroît fortement l'évapotranspiration ; pour la zone tempérée celle-ci atteint ou dépasse fréquemment 500 à 700 mm /an. On comprend facilement que cette limite le ruissellement direct et l'alimentation des cours d'eau.

b- Influence des facteurs anthropiques

- Occupation de zones riveraines : la concentration des personnes et l'accumulation des biens dans les champs d'inondation génère le risque d'inondation par accroissement des enjeux, augmentation des vulnérabilités et absence de prévention - précaution.
- Imperméabilisation forte (conséquences d'aménagements urbains ou agricoles);
- Défiance des dispositifs de protection (digues, déversoirs).

I.2.5.5 Les types de crues :

En général, on distingue deux types de crues :

a) Les crues fluviales, Elles se caractérisent par des montées relativement lentes des eaux et peuvent être prévues plusieurs heures, voire plusieurs jours à l'avance. En dépit de leur évolution lente, les crues de plaine peuvent être accompagnées localement de phénomènes très dangereux, notamment lors d'une débâcle, c'est à dire lors de la rupture d'un obstacle d'un cours d'eau, après que l'écoulement des flots ait été bloqué par des embâcles (amoncellement de débris) sous les ponts. C'est le cas des inondations de grands bassins versants ; elles résultent le plus souvent des précipitations importantes généralisées sur de grandes étendues et caractérisées par leurs quantité et leurs durée qui peut atteindre 10 à 15 jours

En Algérie, ce type d'inondation survient généralement en saison hivernale entre les mois de décembre et Mai.

b) crues torrentielles lorsque des précipitations intenses, telles des averses violentes, tombent sur tout un bassin versant, ou sur une portion de bassin versant, les eaux ruissellent et se concentrent rapidement dans le cours d'eau, engendrant des crues torrentielles brutales et violentes. Le cours d'eau transporte de grandes quantités de sédiments, ce qui se traduit par une forte érosion du lit et un dépôt des matières transportées.

Ces dernières peuvent former des barrages, appelés embâcles, qui, s'ils viennent à céder, libèrent une énergie pouvant aggraver les dégâts. [13] [12] [11]

I.6. Conclusion:

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre le phénomène de l'érosion et le transport solide ainsi que les problèmes et conséquences qu'ils engendrent, et de voir les différents types d'érosion ainsi que les facteurs mis en jeu et de quantifier le phénomène pour la mise au point de techniques d'aménagement antiérosives appropriées pour la sauvegarde et préservation du capital : eau –sol, permettent de combattre efficacement les effets de l'érosion .

CHAPITRE II : Description de la zone d'étude

II.1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de donner les différentes caractéristiques principales du bassin versant de Chemora.

II.2. Caractéristiques naturelles de la basse Chemora :

II.2.1. Situation géographique :

Le bassin versant de Chemora est situé dans le piémont Nord –Est des Aurès dans la wilaya de Batna.

Il couvre une superficie de 765 km², et constitué d'un couloir par une chaîne de montagnes du massif des Aurès leur original réside dans la permanence du phénomène l'endoréisme qui est traduit par le développement d'une multitude de sebkhas (Garas) occupant le centre des plaines qui constituent de ce fait leur niveau de base géomorphologique et leur exutoire hydrologique. (Figure II.1)

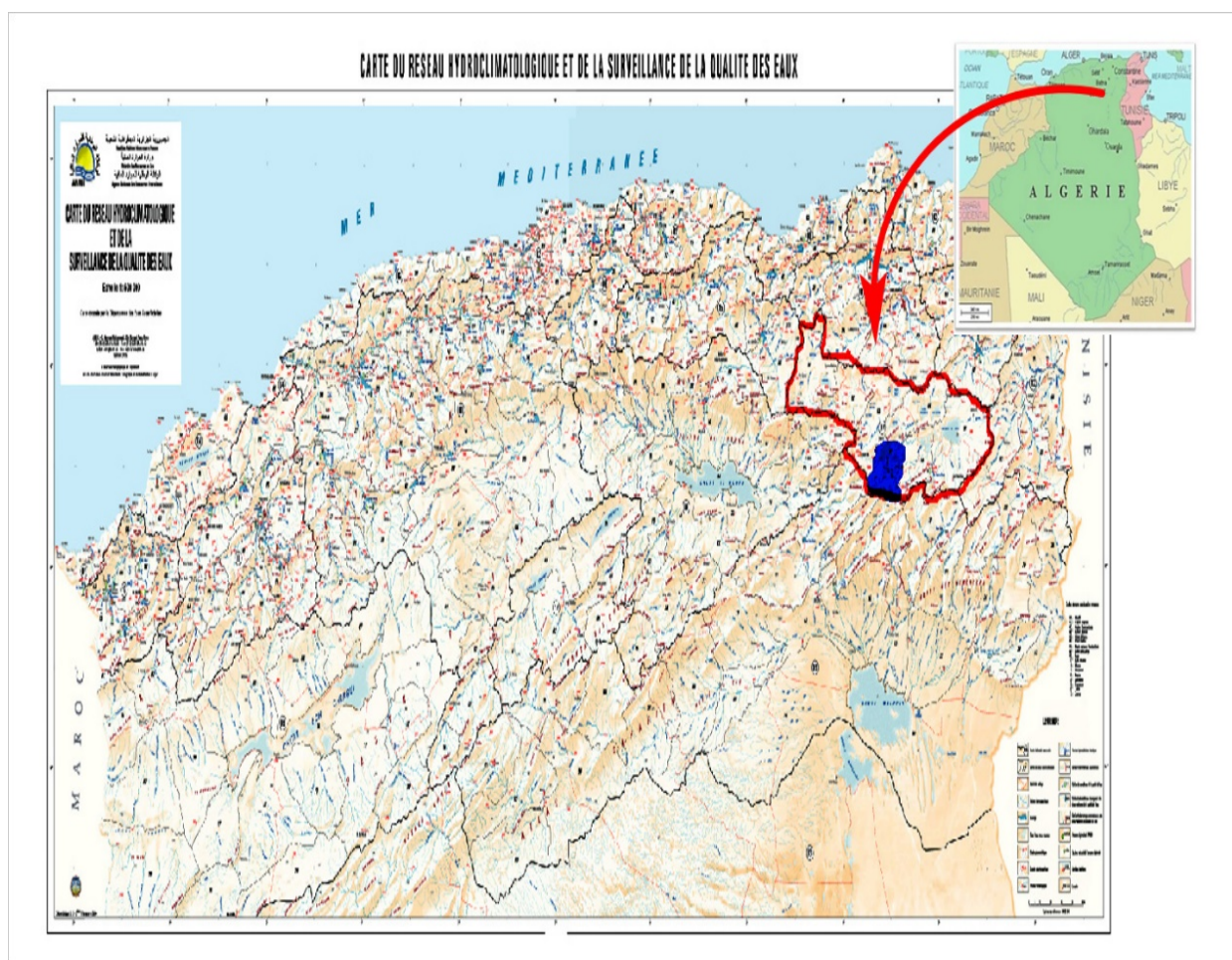


Figure II.1 : Situation géographique du bassin de Chemora.

II.2. Caractéristiques physiques du bassin versant de Chemora :

Le bassin d'oued Chemora est constitué d'ensembles physiques suivants :

II.2.1.a La zone montagneuse :

Cette zone est formée par le massif des Aurès, portant les forêts et s'élevant jusqu'à 2300 m d'altitude.

II.2.1.b La zone piémonts :

Les piémonts qui correspondent topographiquement à des zones de transition entre les montagnes et les plaines à des altitudes moyennes qui varient 1200 et 1400m.

II.2.1.c La zone de plaine :

Cette zone est formée par une succession de plaines et occupe le majeur parti de l'espace. S'étend au nord à l'Est du piémont 800-1200 m d'altitude.

II.2.2 Aperçu général sur la géologie :

Le rapport a été réalisé sur la base des travaux de ([R.Laffitte \(1939\)](#)).

La zone de Chemora est caractérisée par deux régions naturelles ou distinctes du point de vue stratigraphique et structural.

II.2.2.1 La stratigraphie :

Le Trias : cet étage est caractérisé par la présence de marne accompagnée de gypses et de sel gemme, et se situe sur les flancs des anticlinaux. Le trias affleure en masse chaotique, sans aucune, gypse marneux et gypses fibreux) et emballés dans des argilites vertes.

Le jurassique : il s'agit de marnes, de calcaires marneux et de dolomies, constituant la succession de cet étage.

La partie supérieure est constituée de calcaire de plus en plus dolomitique, jusqu'à la dolomie pure.

Le crétacé : le crétacé est très développé dans la zone d'étude est présenté par.

Le Crétacée inférieur :

Le barrémien existe seulement dans cet anticlinal du Chélia et du Djbel Bouarif.

N5bc Aptien : Affleure dans tous les anticlinaux de l'Aurès il présente une épaisseur 300 - 400 m et présente un faciès très fin.

Le crétacé supérieur :

Existe dans tous les anticlinaux de la zone d'étude et caractérise par un faciès marno-calcaire et un autre marneux :

- **C1B cénomanien moyen** : marnes grises et bio micrites.
- **C1C Cénomanien supérieur** : calcaire formant corniche.
- **C4 Santonien** : la santonine affleure sur le flanc Nord de l'anticlinal du Djebel Chélia il correspond de marnes gris-bleu et marno –calcaires.
- **C5 Campanien** : est très bien visible sur le flanc Nord de l'anticlinal du Djebel Chélia

Le Miocène :

Mc aquitano –burdigalien : (conglomérats rouges).

Les couches rouges aquitano-burdigaliennes sont discordantes sur le crétacé.

L'épaisseur ne dépasse pas 60 à 80 m.

- **M1 Langhien – Serravalien** : marnes, bio micrites, et grès blancs ; cet ensemble complexe repose directement en trias gression sur le trias
- **M3 tortonien supérieur continental** : (argiles silteuses) beiges rouges, cette formation est, beaucoup plus développée dans le bassin miocène de Chemora.

II.2.2.2 Le Quaternaire :

- Il représente des alluvions récentes le long des oueds (Reboa, Chemora) des nappes d'éboulis avec une origine calcaire ou gréseuse, focalisées sur les flancs de Djebel Timagoult.

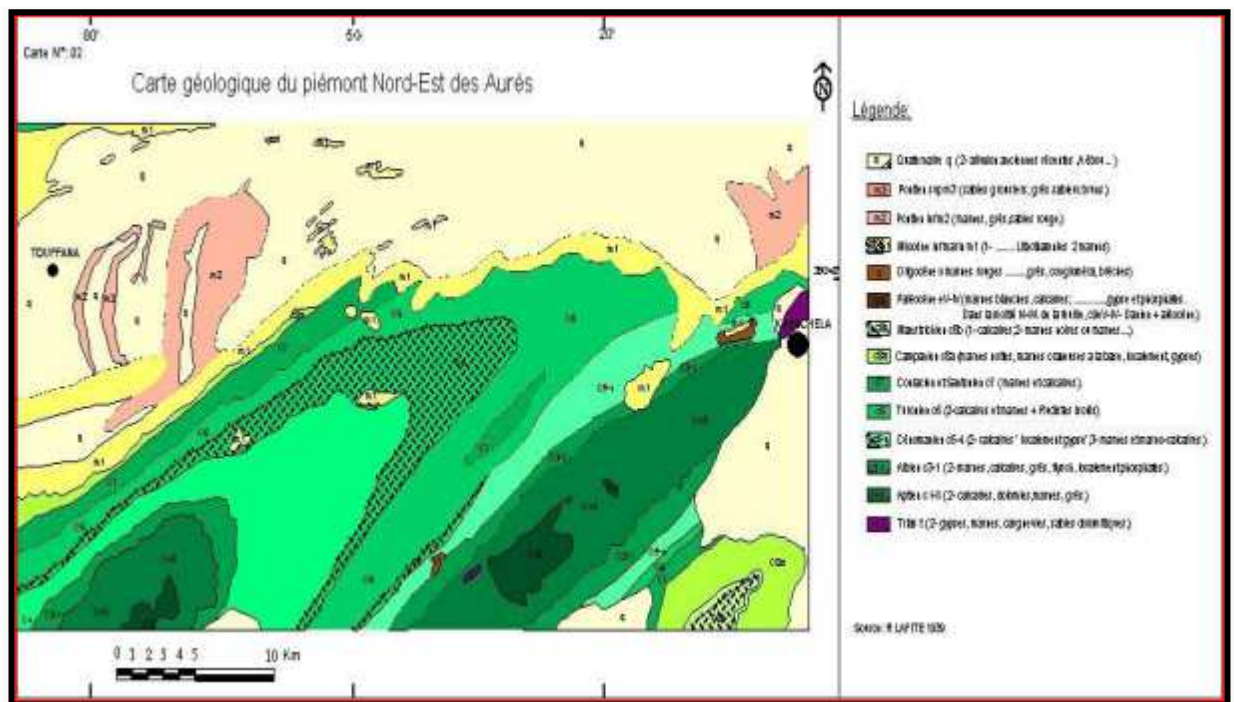


Figure II.2 : Carte géologique de Nord – Est des Aurès.

II.2.3 .1 Le Cadre structural et tectonique :

Le bassin versant de l'Oueds Chemora situe dans le Nord - Est de l'Algérie, sur la bordure Nord de la plaque Africaine, le long de sa zone de contact avec la plaque eurasiatique au Nord.

Depuis le tertiaire jusqu'à l'Actuel, l'Atlas saharien a subi plusieurs épisodes successifs de Subsidence et de soulèvement, en relation avec les mouvements relatifs de plaque tectoniques, ce qui indique un changement dans la dynamique d'écoulement. Cette mobilité tectonique apparaît dans les structures suivant :

- Le synclinal du Djebel l'Aurès, pli dissymétrique avec un flanc long au NO et un flanc court au SE.
- L'anticlinal de Khenchela.
- le synclinal du Djebel Djehfa.
- L'anticlinal du Djebel Chélia.

Ces plis dont l'expression morphologique constitue les reliefs au sud du barrage de forum El-Gueis et koudiat Medouar sont formés à la faveur de failles dont la direction des axes déplace.

La transition entre la plaine des sebkhas et les reliefs de l'Aurès est matérialisée par un piémont de grès miocène (tortonien) discordants sur les calcaires cénomaniens de l'anticlinal du

djebel Chélia. Dans le bassin miocène de Timgad s'accumulent des formations détritiques, alluviales.

II.2.3 .2 Pédologique :

Cette partie de l'étude est destinée à la présentation de différentes caractéristiques des grandes classes des sols de la région d'étude.

II.2.4 .1 Les sols salins (solontchaks) :

Les sols salins sont localisés dans les dépressions, occupant ainsi les Sebkhas et les chotts et leurs extensions à savoir, Sebkha Tdjenndli, ces dépressions sont inondées surtout en hiver lors des fortes pluies.

Ces sols sont soumis à l'influence d'une nappe salée peu profonde, riche en sels de sodium, la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée est supérieure à 4 ds/m à 25C°, le sel remonte par ascension capillaire et forme souvent des efflorescences blanches en surface. Le profil reste peu différencié de type AC, la floculation des argiles conférant à l'horizon à une structure en agrégats, le PH reste inférieur à 8.5.

En fonction de la composition du complexe d'échange, on peut distinguer également les sols salins à complexe calcique avec un taux de sodium échangeable (ESP) < 15% (bonne perméabilité) et les sols salins à complexe sodique.

Ces derniers ont un ESP compris entre 15 et 30%, malgré l'importance du sodium échangeable, la présence d'une solution fortement concentrée empêche la défloculation des argiles. En effet, les sols salins à complexe sodique sont des sols très instables puisqu'ils peuvent évoluer rapidement vers une alcalinisation sous l'une dilution de la solution du sol (pluie, irrigation à l'eau douce ou très peu salée) le sol devient compact, peu perméable, l'infiltration et la conductivité hydraulique diminuent, l'eau pénètre moins bien dans le sol et circule moins vite, les plantes sont donc moins approvisionnées en eau et tendent à se flétrir.

Toute fois la présence des croûtes, dont l'épaisseur peut attendre plusieurs mètres, entraîne une imperméabilisation totale de la surface du sol, l'eau ne peut plus pénétrer. En plus de l'aspect de surface du sol, les caractéristiques topographiques des terres (plaines et dépression) et l'absence des systèmes de drainage amènent l'eau à s'accumuler surtout en période humide en provoquant l'inondation des terres.

II.2.4.2 les sols alluviaux :

Ces sols sont observés essentiellement aux des Sebkhas occupant des glacis et terrasses, d'une pente variable entre 2 à 4%, ainsi que dans les terrasses alluviales le long des Sebkhas.

Ces sols se localisent généralement dans le lit majeur des oueds souvent rajeunis par les dépôts de matériaux neufs en période d'inondation. Ils sont caractérisés par la présence d'une nappe phréatique, qui circule et n'est donc pas réductrice et qui subit de fortes oscillations.

La perméabilité des sols alluviaux dépend étroitement des caractères des matériaux, de sa granulométrie, ainsi que de la topographie des terres et la profondeur de la nappe. Sur les berges des oueds, se forme un bourrelet qui retient l'eau de moins renouvelée dans les dépressions latérales ainsi isolées, on observe alors la succession dans l'espace :

- Sols alluviaux gris dans les zones inondées coté des oueds.
- Sols bruns alluviaux sur les bourrelets, et les sols hydro morphiques alluviaux dans les dépressions marécageuses.

II.2.4.3 les sols Calcimagnesiques :

- **Sols bruns Calcaires ou Calciques :**

Les sols calcimagnesiques occupent une surface plus importante, ils sont rencontrés dans tout le piémont, dans le versant de Dj Mehmel des sols évolués sur calcaire marneux sols carbonatés.

Sols caractérisés par une texture argileuse, et un taux important en CaCO_3 , les propriétés physiques sont très variable suivant l'épaisseur et la nature de la terre fine et la quantité de Caillaux que contient le profil.

En effet, les sols situés sur des versants sont éloignés d'un risque d'inondation à cause d'un drainage parfait dû aux pentes élèves, toute fois les sols sur glacis ou sur les terrasses sont vulnérables si la texture est argileuse non perméable.

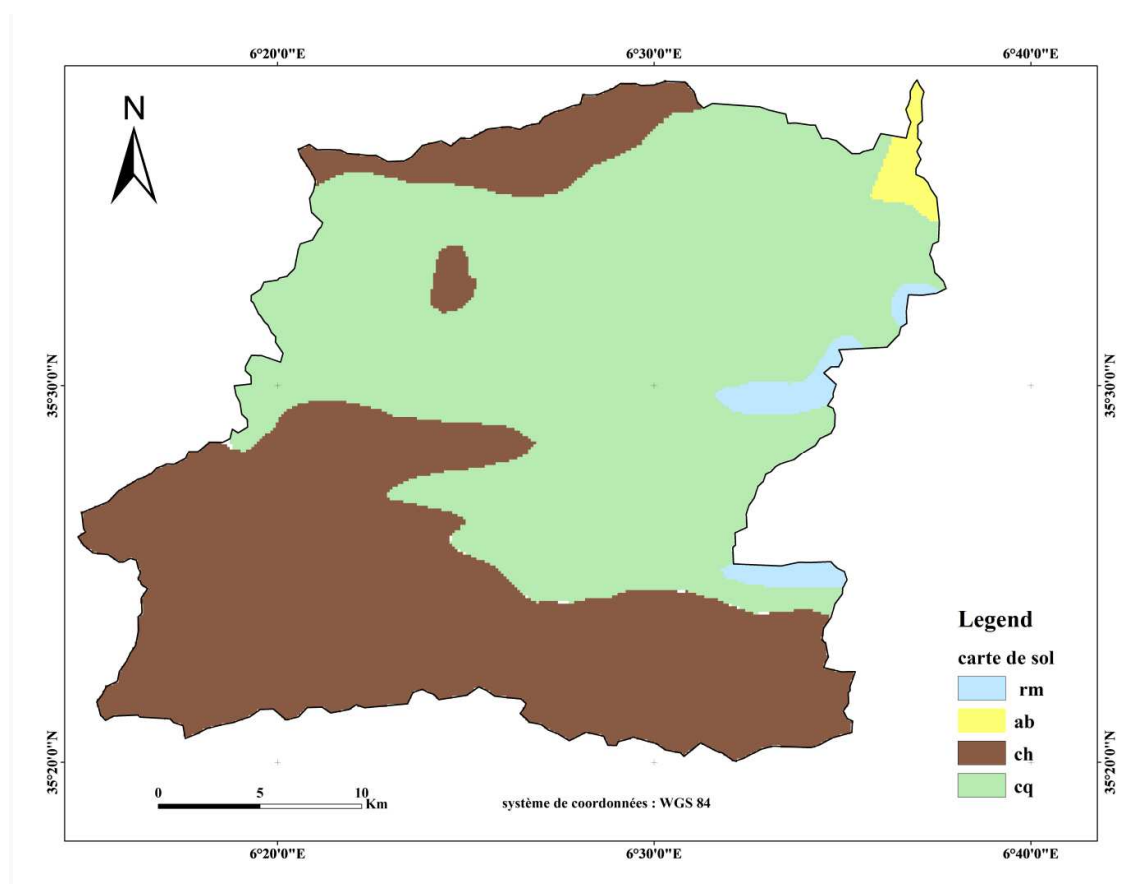


Figure II.3 : Carte d'occupation de sol Bassin Versant Chemora (carte extraite des cartes des sols).

II.2. 5La perméabilité :

Pour décrire les principales formations lithologiques et préciser leurs capacités de rétention, il convient de regrouper en des ensembles lithologiques en tenant compte à la fois de la perméabilité ou de fissures des roches et de leurs extensions. Ainsi on distingue :

II.2. 5.1 Les formations imperméables dans le Bassin Versant Chemora :

Constituées des marnes, marno-calcaires et sols argileux de telles assisesrencontrent dans la formation marno-calcaire turonienne et la formation marneusemiocène, ainsi que sous forme de divers recouvrements quaternaire (sols forestiers). Sur leszones de cette nature, l'infiltration doit être inférieur à 10% des précipitations, s'élève à2et 12% pour les sols à texture moyenne et lourde or ces derniers, plus hétérogènes queles terrains considérés et plus perméables qu'eux.

Ainsi ces assises sont pratiquement imperméables, cependant de la part de leur nature argileuse, elles peuvent emmagasiner par imbibition une importante quantité d'eau.

Ces types de terrains occupent 20 % de Timgad et Reboa ; à cette faible perméabilité vient s'ajouter des conditions morphologiques favorables au ruissellement.

II.2. 5.2 Les formations perméables dans le Bassin Versant Chemora :

Dans le bassin moyen et inférieur, la présence notable des formations perméables, contribue de pair avec des facteurs climatiques et morphologiques défavorables, à limiter les possibilités de l'écoulement de surfaces.

Les conglomérates et les brèches du miocène marin, dont les éléments généralement très grossiers sont soudés entre eux par un ciment calcaire bio détritiques fin, laissant subsister autour d'eux des rives importantes ; ces formations occupent le Nord de Djebel El Mahmel.

II.2.6 Etude de couvert végétal :

Pour le bassin versant chemora, Djebel Fedjoudj représente le principal relief carbonaté de la région sans aucun couvert végétal, tandis que djebel Bouarif est recouvert par des genièvreries oxyacides, les glacis sont recouvert par l'armoïse et l'alfa et constituent des zones pâturages. La plaine reste de domaine de la céréaliculture maraichère, par contre l'arboriculture est pratiquement inexistante.

Les parcours et les terrains dénudés occupent les piedmonts, les vallons, les dépressions, et aussi les massifs montagneux où la forêt a disparait et a laissé place à un maigre matorral, résultat d'une dégradation anthropique qui engendre l'apparition de terrains nus relativement importants.

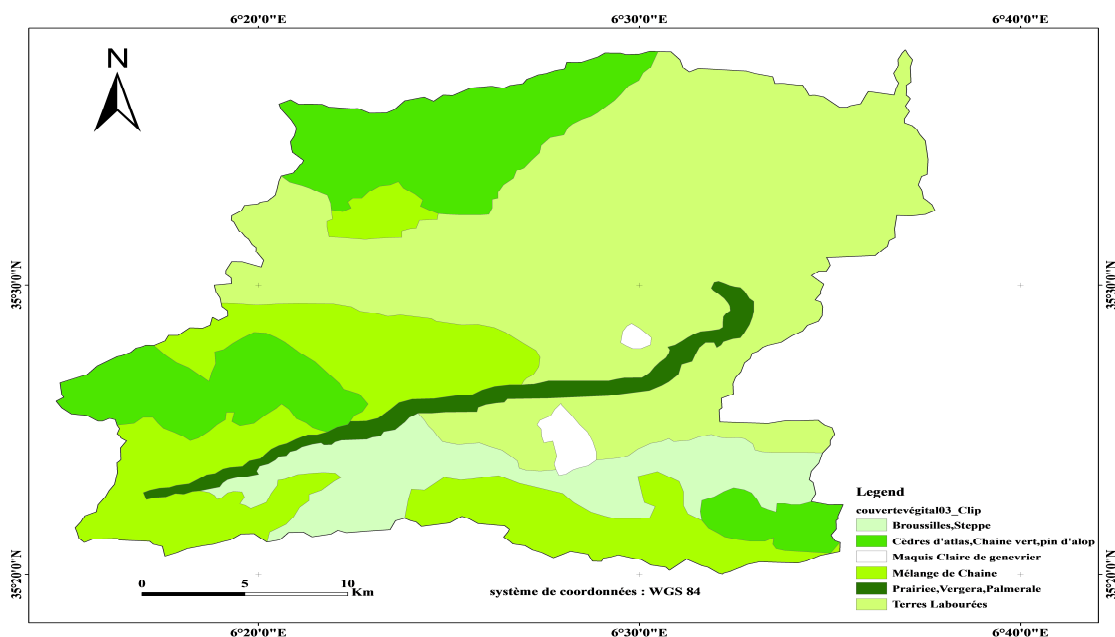


Figure II.4 : Carte de Couverture Végétale du Bassin Versant Chemora

II.3 Etude du réseau hydrographique :

Le bassin versant de Chemora présente un réseau hydrographique très peu développé.

L'oued Chemora résulte de la jonction de deux affluents Oued Reboa et Oued Soudhes qui drainent respectivement une superficie de 280,5 et 189 km², dont la confluence donne naissance à l'oued Chemora qui reçoit sur sa rive gauche les Oueds de Taguedai et Amizraguen.

L'oued Chemora se perd après un trajet d'environ 64 km, dans les lacs salés des hautes plaines constantinoises, il s'agit de Sebkhet Djendlti, Garaât Ank Djemelet Garaât et-tarf.

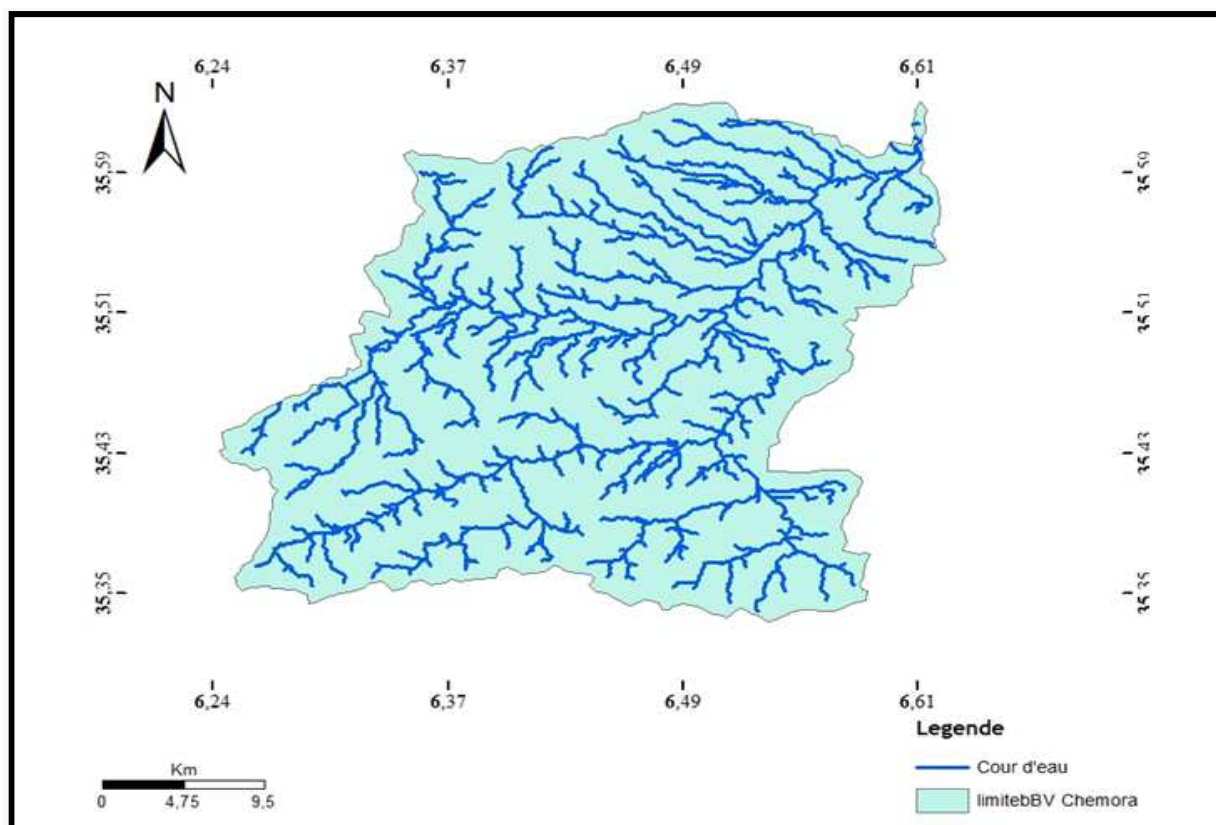


Figure II.5: Carte du Réseau Hydrographique du Bassin Versant Chemora.

II. 3.1 Analyse morphologique :

II. 3.2 Caractéristiques de forme :

La forme d'un bassin a une influence sur l'écoulement et surtout sur l'allure de l'hydrogramme de crue. Ainsi, un bassin très allongé ne réagira pas de même façon qu'un bassin de forme ramassée, si les autres conditions sont égales. On exprime la caractéristique de forme par le coefficient de compacité de Gravelius qui est défini comme étant le rapport du périmètre du bassin considéré et celui d'un cercle ayant la même surface. Plus cet indice se rapproche d'unité et plus le bassin a une forme ramassée et plus le temps de concentration de l'eau sera court.

II. 3.3 Indice de compacité de Gravellius (KG) :

L'indice de compacité se définit comme le rapport du bassin par rapport au périmètre du cercle ayant la même surface, il représente une caractéristique de forme qui nous renseigne sur l'écoulement et l'allure de l'hydrogramme.

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} (\text{II} - 1)$$

Soit :

K_G : Indice de compacité de Gravellius

P : périmètre du bassin versant (Km).

S : surface du bassin versant (Km²).

Si K_G est proche de 1 le bassin versant est de forme circulaire.

Si $K_G \geq 1$ le bassin versant est de forme allongée.

Si $K_G = 1,12$ le bassin versant est carré.

II. 3.4 Le rectangle équivalent :

Afin de faciliter la comparaison entre les bassins versants, les hydrologues ont introduit la notion du rectangle équivalent. C'est une pure transformation géométrique du bassin versant, il est modélisé par un bassin de forme rectangulaire qu'on appelle rectangle équivalent, tels qu'il a les mêmes caractéristiques géométriques : la même superficie, le même périmètre, le même indice de forme et les mêmes caractéristiques climatiques. Les courbes de niveau dans le bassin modèle sont parallèles.

Si (L et I représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent).

Alors le : périmètre du rectangle équivalent vaut : $P = 2(I + L)$. (II -2)

La surface du rectangle équivalent vaut : $S = L \times I$. (II -3)

- La longueur du rectangle équivalent :

$$L = \frac{K_G \sqrt{S}}{1.128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right) \text{ (II -4)}$$

- La largeur du rectangle équivalent :

$$I = \frac{K_G \sqrt{S}}{1.128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right) \text{ (II -5)}$$

Avec:

L : La longueur du rectangle équivalent

I : La largeur du rectangle équivalent

S : La superficie du bassin versant

K_G : Le coefficient de compacité ou de Gravelius.

I-2-3-Les paramètre du relief :

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin, en outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

I-2-3-1-Courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief.

Cette courbe représente la répartition de la surface de la fonction de son altitude.

Bassin versant en, elle porte en abscisse la surface du bassin qui se trouve au-dessus de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou la superficie, au-delà d'une certaine altitude.

(Le tableau I-1) donne la répartition des surfaces en fonction des côtes.

Tableau I-1 : La répartition des surfaces en fonction des altitudes

paramètre	valeurs
A (km ²)	765
P (km)	115
K_G	1.54
L (km)	63.47
I (km)	12.04

II.4 Courbe hypsométrique :

La plupart des phénomènes hydrologiques et climatologiques sont directement liés à l'altitude. La courbe hypsométrique est utilisée pour représenter la répartition des altitudes dans le bassin. La forme de cette courbe donne une certaine idée sur les pentes du bassin et leur variation en altitude, et permet d'apprécier le potentiel érosif du bassin versant.

Pour le bassin versant de Chemora, le relief est caractérisé par une variété de formes géomorphologiques plates occupées par la plaine, sebkha et de relief abrupt. Les fréquences altimétriques sont représentées dans le tableau n°2 et par la courbe hypsométrique correspondante.

On remarque que l'altitude supérieure à 2300 m du secteur d'étude ne représente que 15.60 km

Soit 3.4% de la surface totale, la tranche d'altitude comprise entre 1100m et 950m est très peu étendue, et ne représente que 79.87 km²

Soit environ 17,4% de la surface totale du sous bassin versant tandis que la tranche d'altitude comprise entre 950 m et 800 m couvre presque la totalité du bassin versant, avec 363,53 km² de la 79,2% de la superficie totale.

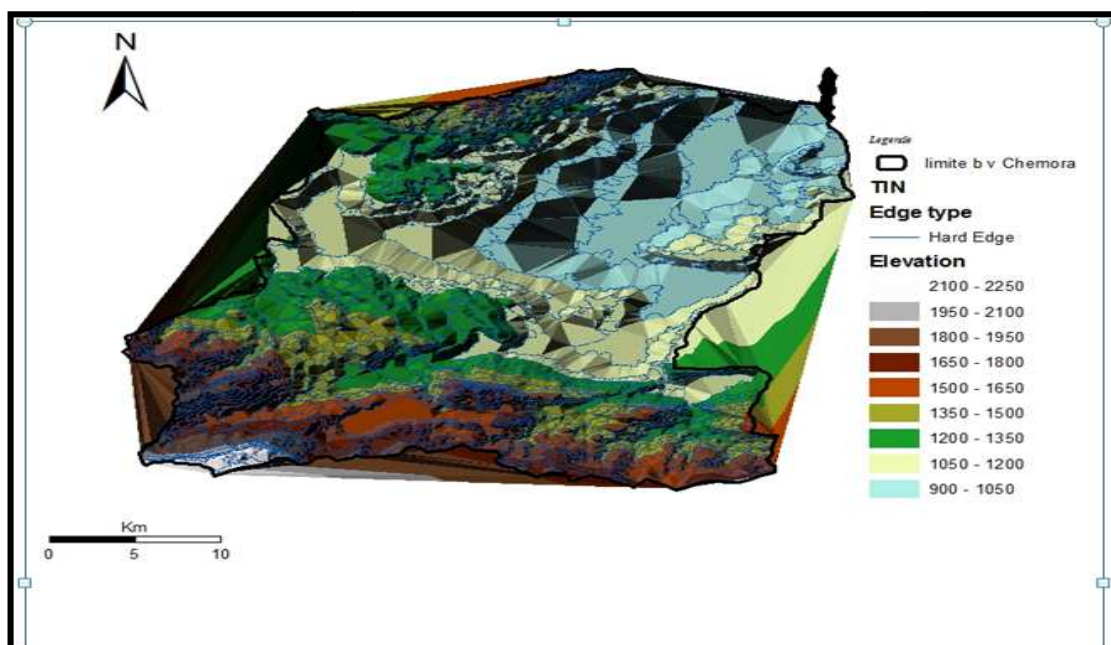


Figure II.6 : Carte Hypsométrique Bassin Versant Chemora

Tableau II. 2 Calculs des surfaces partielles et cumulées.

Altitudes	Bornes sup en (m)	Surface partielles		Surface cumulées	
		En (km ²)	En (%)	En (km ²)	En (%)
850 -950	950	5.43	0.84	5.43	0.84
950-1050	1050	104.2	16.1	109.63	16.94
1050-1150	1150	137.63	21.27	247.26	38.21
1150-1250	1250	137.63	21.27	247.26	38.21
1250-1300	1300	68.16	10.53	425.68	65.78
1250-1350	1350	68.16	17.04	357.52	55.25
1350-1450	1450	56.66	10.53	425.68	65.78
1450-1550	1550	49.2	8.75	482.34	74.53
1650-1750	1750	35.3	7.6	531.54	82.13
1750-1850	1850	22.32	5.45	630.47	97.43
1850-1950	1950	8.46	1.31	638.93	98.74
1950-2050	2050	03	0.46	641.93	99.2
2050-2150	2150	1.8	0.28	643.73	99.48
2150-2250	2250	2.83	0.44	646.56	99.92
2250-2300	2300	0.55	0.08	647.11	100

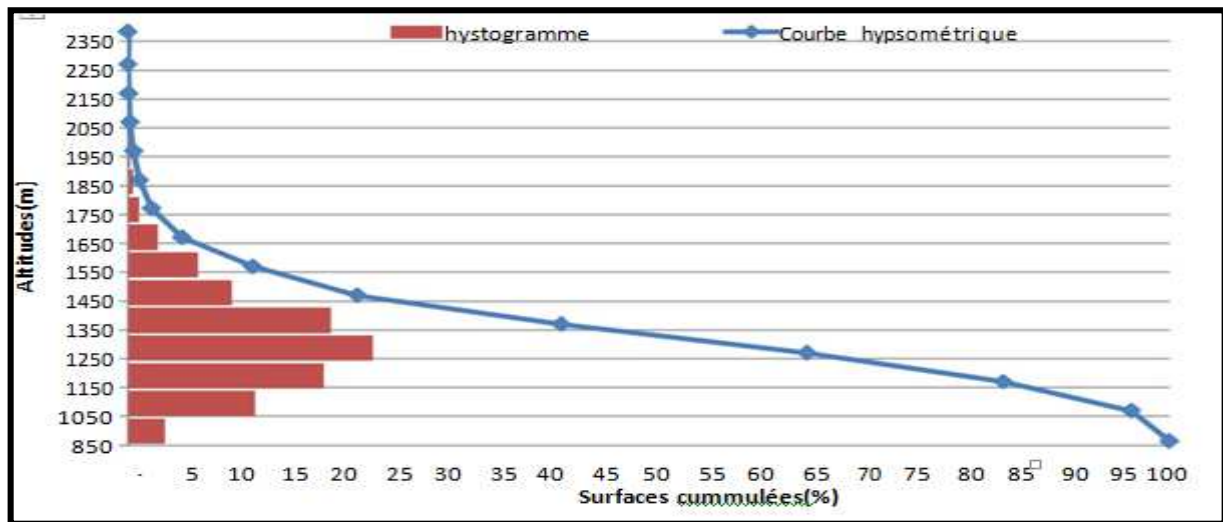


Figure II.7 : Courbe hypsométrique des surfaces cumulées.

I.4.1 L'altitude caractéristique du bassin versant :

a) Les altitudes maximales et minimales :

L'altitude maximale représente le plus élevé du bassin tandis que minimale est celle du point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux deviennent surtout importantes lors du développement de certaines faisant intervenir des variables climatiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de pente.

$$H_{\min} = 850 \text{ m} \quad H_{\max} = 2300 \text{ m}$$

b) L'altitude moyenne :

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i \cdot H_i}{A} \quad (\text{II -6})$$

Avec :

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

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau(Km^2).

H_i : altitude moyenne entre deux courbe du niveau(m).

A : superficie totale du bassin versant(Km^2).

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

Après le calcul on trouve : **$H_{moy} = 1250 \text{ m}$**

II.4.2 Dénivelée simple (D) :

Sur la courbe hypsométrique tracée, on prend la distance verticale en (m), qui sépare les altitudes ayant **5%** et **95%** de surface totale du sous-bassin versant, la dénivelée simple est donc égale à :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 1800 - 950 = \mathbf{850 \text{ m}}$$

II.4.3 Les indices des pentes :

II.4.3.1 Indice de pente globale (I_G) :

L'indice de pente globale est déterminé à partir de la courbe hypsométrique en

Éliminant les valeurs extrêmes, de manière à ne garder que 90% de l'aire du sous-bassin. Cet

Indice est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_G = \frac{D}{L} (II - 7)$$

Avec : D : dénivelée simple en (m). L : longueur du rectangle équivalent (km).

I_G : Indice de pente globale, d'où **$I_G = 13.93$**

II.4.3.2 Indice de pente de Roche (I_p) :

L'indice de pente de roche est calculé par les formules suivantes :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{A_i b_i} (II - 8)$$

Avec : I_G : Indice de pente globale.

I_p : Indice de pente de roche.

L : longueur du rectangle équivalent.

A_i : surface partielle entre deux courbes de niveau par rapport au totale. $\sum A_i$

B_i : l'équidistance entre deux courbes de niveaux.

Nous obtenons alors : **$I_p = 0.317 \text{ m/km}$** .

II.4.4 Dénivelée spécifique (Ds) :

L'indice Ig décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité de l'introduction de la notion de dénivelée spécifique calculée à l'aide de la formule suivante :

$$D_s = \frac{D}{L} \sqrt{A} (II-9)$$

Donc : $D_s = 13.93 \sqrt{765} = 385.28$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre Mer), la dénivelée spécifique du bassin de Chemora, se trouve dans la classe R5 : caractérisée par un relief assez fort (Tableau II.3).

Tableau II. 3 : Classification de L'ORSTOM.

R ₁	Relief très faible	05 <Ds< 10m
R ₂	Relief faible	10 <Ds< 25m
R ₃	Relief assez faible	25 <Ds< 50m
R ₄	Relief modéré	50 <Ds< 100m
R ₅	Relief assez fort	100 <Ds< 250m
R ₆	Relief fort	250 <Ds< 500m
R ₇	Relief très fort	500 <Ds< 750m

II.5 Les caractéristiques du réseau hydrographique :

II.5.1 Densité de drainage (Dd) :

La densité de drainage peut donner un aperçu sur la lithologie du bassin versant et permet de comparer l'écoulement superficiel au niveau de plusieurs bassins. Elle est donnée par la relation suivante :

Li : longueur des talwegs (en km) et A : la superficie du bassin (en km²)

$$Dd = 0.19(\text{km} / \text{km}^2)$$

II.5.2 Temps de concentration :

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti :

$$T_C = \frac{4\sqrt{A} + 1.45 L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (\text{II -10})$$

Avec :

T_C : temps de concentration (heures).

A : superficie du bassin (km²).

L : longueur du thalweg principal (km).

H_{moy} : altitude moyenne (m).

H_{min} : altitude minimale (m).

Tableau II.4 : Caractéristiques physiographiques des bassins versants de Chemora.

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
superficie	A	km ²	765
Périmètre	P	km	153
Indice de compacité	K_c	/	1.17
Longueur du rectangle équivalent	L_R	km	35.14
Largeur du rectangle équivalent	I_R	km	18.07
Indice de pont global	I_g	m/km	13.93
Dénivelée spécifique	D_s	m	385.28
Altitude moyenne	H_{moy}	m	1250
Altitude maximal	H_{max}	m	2300
Altitude minimale	H_{min}	m	850
Altitude a 5%	H_5	m	1800
Altitude a 95 %	H_{95}	m	950
Pente moyenne de l'oued Chemora	I_c	m/km ²	14.86
Temps de concentration	T	heures	9.62

II.6 Etude climatologie :

II.6.1 Les températures :

L'étude des températures moyennes mensuelles et annuelles est primordiale, car c'est elles qui nous permettent d'évaluer le déficit d'écoulement des bassins versants. La station de Batna est choisie pour l'approvisionnement des données climatiques.

Tableau II.5 : Les températures moyennes mensuelles enregistrées.

Mois/Paramètre	sept	oct	nov	déc	janv.	fév	mars	avril	mai	juin	juil	aout
T moy C°	20.51	15.62	10.32	6.69	5.66	7.18	9.4	12.65	17.22	22.46	26.35	26
Tmoy max C°	26.53	21.47	15.62	11.25	10.51	12.74	15.28	19.53	24.69	29.96	34.49	34.13
Tmoy min C°	14.16	9.78	5.02	2.13	0.81	1.62	3.53	5.77	9.76	14.97	18.21	17.87

II.6.2 Les autres facteurs climatiques :

Les facteurs climatiques jouent un rôle important dans le comportement hydrologique des cours d'eau alimentant un bassin versant.

Pour le bassin versant de Chemora les données d'observation des autres paramètres climatiques sont fournies par la station météorologique de Batna pour une période de 10 ans (1975-1984).

Ces données sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.6 : Les facteurs climatiques au niveau du Bassin Versant Chemora

Fréquence mensuelle de gelée											
sept	oct	Nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
0.0	0.3	5.7	8.7	8.2	7.5	4.7	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s)											
sept	oct	Nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
3.1	3.5	3.5	4.5	4.1	4.2	4.1	4.0	4.0	4.0	3.8	4.2

Fréquence mensuelle de sirocco											
sept	oct	Nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
2.0	0.4	0.4	0.1	0.0	0.4	1.9	2.3	1.5	2.8	5.1	2.1
Humidité relative moyenne mensuelle (%)											
sept	oct	Nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
58.6	64.2	72.4	72.9	71.3	7.5	63.2	63.2	59.0	49.9	39.7	44.0
Insolation moyenne mensuelle (heure)											
sept	oct	Nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
327.5	363	197.5	160.5	162.6	148.8	217.3	250.9	382.4	403.7	480.4	402
Evaporation moyenne mensuelle (mm)											
sept	oct	Nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
364.0	229.0	189.0	179.8	189.1	168.0	223.2	237.0	272.8	318.0	350.3	322
Fréquence moyenne mensuelle de neige											
sept	oct	Nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
0.0	0.0	1.1	2.4	4.1	2.9	2.6	1.7	0.6	0.0	0.1	0.1

II.6.3 L'évapotranspiration :

Elle regroupe l'ensemble des processus d'évaporation (transformation de l'eau en gaz) et de transpiration (par les plantes) parce que la distinction entre les deux phénomènes est difficile. On distingue : l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui est le pouvoir évaporant de l'atmosphère sur un sol avec le couvert végétal disposant de l'eau en abondance, et l'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la perte en eau d'un sol quand l'eau vient à manquer où elle est fonction de l'ETP et la quantité d'eau présentée dans le sol.

L'évaporation et la transpiration sont influencées essentiellement par le climat dont les principaux paramètres qui le déterminent sont les précipitations, l'humidité, la température, l'insolation et le vent.

II.6.3.1 Estimation de l'évapotranspiration :

De nombreuses formules ont été établies pour calculer l'ETP à partir de quatre (4) éléments fondamentaux, mais aux pouvoirs évaporatifs distincts. Il s'agit de températures, du déficit de saturation, du vent, et de la radiation globale.

Parmi les dizaines de formules élaborées en ce sens, et pour une raison de disponibilité des données, nous avons retenu celles qui ont acquis une certaine notoriété, et qui sont renommées d'après leurs auteurs :

THORNTHWAITE, TURC, et BELLANY-CRIDDLE.

a. Formule de THORNTHWAITE :

La formule de calcul (1948) s'écrit comme suit :

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^{\alpha} \quad (II.11)$$

Avec :

ETP : l'évapotranspiration potentielle en mm.

t : températures moyennes de la période considérée en °C.

I : Indice thermique annuel obtenu, en sommant les 12 valeurs de $\left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$.

a. Formule de TURC :

Sur la base des bilans hydrologiques observés sur 254 bassins versants situés sous différents climats, et sur la base d'expériences au lysimètre, L. TURC (1961) considère que les principaux éléments qui régissent l'ETP sont essentiellement : La température, la radiation solaire, les précipitations, et la réserve en eau du sol.

TURC distingue entre l'ETR et l'ETP aux pas de temps différents (journaliers, décadaires, mensuels, et annuels) ; En ce sens, il a suggéré pour chaque durée, la formule convenable ; Les plus simples étant celles qui concernent le pas mensuel calculé par :

Si l'humidité relative (hr) est supérieure ou égale 50%, l'ETP selon TURC s'exprime par la formule suivante :

$$ETP = 0.4 \cdot \frac{t}{t + 15} (I_g + 50) \quad (\text{II.12})$$

Exposant en fonction de I, mais généralement est constant sous un climat et un lieu donné.

$$I_g = I_{ga} \cdot \left(0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right) \quad (\text{II.13})$$

Iga : Le rayonnement global à la limite de l'atmosphère pour le mois considéré, qui dépend de latitude ; Il est obtenu à partir de tables.

H : Durée moyenne d'insolation en heures.

H : Durée astronomique du jour en heures, elle dépend de la latitude, et s'obtient à partir de tables.

T : Moyenne mensuelle de la température mesurée sous abri en °C.

Si l'humidité relative (hr) est inférieure à 50%, le résultat obtenu par la précédente formule doit être multiplié par le facteur correctif

$$: 1 + \frac{50 - hr}{70} \quad (\text{II.14})$$

c. Formule de GLANNY-CRIDDLE modifié par la FAO :

En 1945, H. BLANNY et W. CRIDDLE ont établi une formule pour le calcul de l'ETP

$$ETP = K.F.$$

Tel que ETP : L'évapotranspiration mensuelle en mm

K : Coefficient cultural qui varie de 0,50 à 1,20 pour différentes cultures et diverses zonesclimatique.

F : Force évaporant qui dépend de la température moyenne mensuelle et du rapport

H/H, défini comme pour la formule de TURC, mais exprimé en%.

Ensuite les recherches menées pour la F.A.O, ont permis de modifier cette formule, et la suggérer pour les zones aride et semi-aride.

Cette formulation s'effectue en deux temps, le premier concerne uniquement le terme climatique de l'ETP, tandis que le second introduit les coefficients cultureux pour aboutir à l'ETP de cultures.

La formule de l'ETP climatique s'écrit de manière suivante : $ETP_{clim.} = aF + b$; ou :

F : La force évaporant de BLANNY-CRIDDLE, en mm/mois, qui s'obtient par la relation suivante :

$$f = p(0.46t + 8) \quad (II.15)$$

p : Rapport de la durée d'éclairement mensuelle en %.

t : Température moyenne mensuelle en $^{\circ}C$.

a et b : Coefficients de correction en fonction des trois paramètres climatiques : Humidité relative, vitesse de vent, et insolation effective moyenne (rapport des heures d'insolation et de la durée astronomique du jour).

Pour le calcul de l'ETP cul, nous avons adopté pour notre région d'étude, $KC = 0,70$ pour la saison humide, et $KC = 1,1$ pour la saison sèche.

Le tableau (II.7) résume les résultats de calcul :

Tableau II.7 : Valeurs de l'ETP.

ETP/mois	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juil	aout	Anne
thornthw	92.5	56.4	26.0	12.3	10.2	14.2	26.8	45.8	82.1	125.9	164.8	150.9	808.20
turc	117.8	74.3	32	31.1	31.2	43.3	68.2	95.6	125.5	160.7	201.9	170.7	1170.1
Glanny	127.5	94.7	58.9	50.50	58.5	61.6	81.6	97.0	124.3	314.4	350.4	327.9	1747.3

II.6. 4 Les précipitations :

Le terme précipitations englobe toutes les eaux météoriques, la hauteur de la lame d'eau recueillie par le pluviomètre, quel que soit son l'origine de cette eau, pluie, neige, grêle, ou autres formes de condensation. Nous intéresserons dans cette étude uniquement aux précipitations liquides (pluies), qui constituent le facteur principal dans le comportement hydrologique de la région. Elles sont relativement moins importantes, variables et irrégulières d'une autre année.

La moyenne de la pluie annuelle en Algérie est de l'ordre de 68 mm/an, avec une forte variabilité spatio- temporelle. Elle Est Moins de quelques dizaines de mm/an au sud de pays et a 1500 mm/an au nord est sur la cote, cependant elle augmente de 350mm/an a 1000 mm/an en moyenne de l'ouest vers l'est. Pour le cas du bassin versant de Chemora la pluviométrie peut être étudiée en se référant aux quatrestations pluviométrique .il s'agit station pluviométrique

deREBOA,BOUAHMAR,TIMGAD, SIDIMANCAR.

Tableau II.8 : Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées.

Code de la station	Nom de la station	X	Y	Z	Altitude (m)	Série	N'bre d'année
70403	REBOA	848.1	250.25	1002	1010	1970-2000	30
70408	BOUAHMAR	837.15	244	1275	1220	1970-2000	30
70409	TIMGAD	841.75	250.9	1000	1040	1970-2000	30
70410	SIDI MANCAR	833.7	253.25	1112	1112	1970-2000	30

Tableau II.9 : Caractéristiques des échantillons.

	Code de la station	Nom de la station	Pluie moyenne annuelle	écart type	coefficient de variation
	70403	REBOA	261.96	98.98	0.53
	70408	BOUAHMAR	283.94	113	0.40
	70409	TIMGAD	280.85	104.85	0.48
	70410	SIDI MANCAR	289.60	112.34	0.39

II.7 Conclusion :

Le bassin de Chemora s'étale sur une superficie de 765 km^2 , avec un périmètre de 153 km, il est de forme allongée exprimée par l'indice de compacité ($k_G=1.17$) sa forme aide à la réponse rapide de l'écoulement.

Les altitudes varient entre (850m et 2300m) avec une altitude moyenne de 1289 m. Le bassin est de relief modéré dans l'ensemble exprimé par son indice de pente global qui est ($I_g=13.93$), cette pente favorise le ruissellement et le déclenchement des phénomènes érosifs, avec une dénivelée spécifique (385.28).

CHAPITRE III : Description des logiciels Arc-Gis, Hec-Geo-Hms et Hec-Hms

III .1 Introduction:

HEC-HMS est un modèle distribué qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs parties, appelées sous-bassins, qui sont considérées chacune des caractéristiques homogènes. Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique de bassins versants non urbanisés. HEC-HMS permet également de simuler le comportement hydro-sédiment logique du bassin.

La préparation des données nécessaires à la simulation par ce modèle à l'échelle du bassin versant nécessite des outils et des utilitaires de préparation de données GIS (ArcGis) et des outils d'importation et génération de données SIG de sortie HMS (HEC-Geo HMS).

III .2 La description du modèle Arc Gis :

III .2.1 Présentation du logiciel Arc Gis :

De nombreuses définitions du SIG existent mais toutes incluent des expressions communes et de même ensemble de fonctions touchant à la cartographie, aux bases de données et à l'analyse spatiale. On se limite ici à une seule définition qui est la suivante :

« Un système d'information géographique est un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace », cette définition est celle adoptée par le comité scientifique du colloque international : (Intégration de la photogrammétrie et de la télédétection dans les SIG : utilisation et qualité)

L'acronyme SIG signifie :

- Système : est : « Combinaison d'éléments réunis de manière à former un ensemble ».
- Information : est : « élément de connaissance susceptible d'être codé pour être conservé, traité ou communiqué ».
- Géographique est « relatif à la géographie ayant pour objet la description de la surface de la terre ».

Un SIG est donc simplement un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire des synthèses utiles à la décision.

Le rôle du système d'information géographique est de proposer une représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial en se basant sur des primitives géographiques tels que des points, des arcs, des polygones (vecteurs) ou des maillages (raster). A ces primitives sont associées des informations qualitatives ou toute autre information contextuelle.

III .2.2 Mise en œuvre des SIG :

Pour mettre en œuvre un SIG, il est nécessaire de suivre la démarche décrite par les étapes suivantes :

- Définir l'objectif du projet de SIG.
- Acquérir les données pertinentes.
- Géo référencer les données acquises.
- Traiter les données et interpréter les résultats.
- Etablir le rapport final.

L'objectif d'un projet de SIG est lié à son domaine d'application, qui peut être :

Militaire, administratif (urbanisme, transport, télécommunication), économique (ressources naturelles, agriculture, etc.), d'éducation, de recherche (hydrologie, géologie, etc.).

III .2.3 Principe de fonctionnement :

Un SIG stocke l'information sous forme de couches thématiques (Figure III.1) pouvant être reliées les unes aux autres par la géographie. Ce concept, à la fois simple et puissant, a prouvé son efficacité pour résoudre de nombreux problèmes concrets.

L'information géographique contient soit une référence géographique explicite : Latitude et longitude, grille de coordonnées, etc. Ou une référence implicite : adresse, code postal, nom d'une route, etc. Le géocodage, processus automatique, est utilisé pour transformer les références implicites en références explicites et permettre ainsi de localiser les objets et les événements sur la terre afin de les analyser.

Une autre décomposition est souvent utilisée: l'information spatiale qui décrit la localisation et la forme des objets géographiques, et l'information descriptive qui renseigne sur la nature et les caractéristiques des objets géographiques.

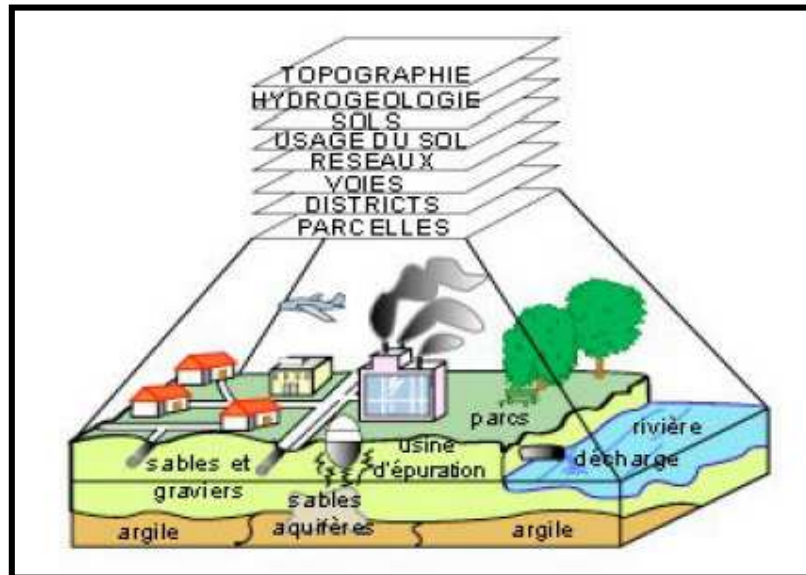


Figure III.1 : SIG un ensemble de couches d'information superposées

III .2.4 Modèles de représentation des données dans un SIG :

On distingue deux modes de représentation des données spatiales par les SIG : Mode Raster et Mode vecteur.

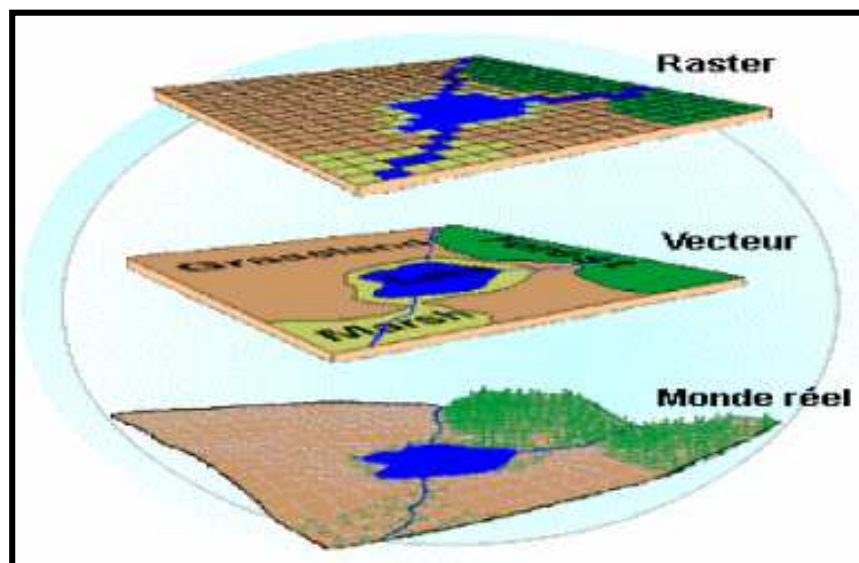


Figure III.2 : Mode de représentation Raster et Vecteur.

III .2.5 Arc Gis Raster :

Le mode Raster correspond à une division régulière de l'espace géographique en cellules élémentaires (carrés ou pixels). Ce découpage correspond à un tableau de valeurs numériques dont chaque cellule (pixel) est référencée en ligne et en colonne par un système de coordonnées. Chaque pixel contient une valeur correspondante à une grandeur numérique (valeur radio

métrique) ou alphanumérique (code descriptif). Les données Raster sont obtenues par le scannage des cartes ou par l'imagerie satellitaire. L'image raster est toujours caractérisée par une taille et une couleur particulière dite la résolution.

III.2.6 Arc Gis vecteur :

Le mode vecteur se rapproche beaucoup de la notion de cartes traditionnelles. Ce mode utilise les objets ponctuels (points), linéaires (arc et lignes) ou surfaciques (figures planes) pour représenter des entités géométriques localisées dans l'espace par des coordonnées géographiques ou dans un référentiel cartésien (x, y) pour le cas d'un levé topographique.

III .2.7 Modèle Numérique de Terrain (MNT) :

La nouvelle technologie de l'information géographique a permis de construire de nouveaux produits dérivés dont le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Celui-ci est une information numérique qui nous renseigne sur le relief et la topographie. Ce produit numérique offre des représentations de terrain variables suivant les données. La demande pour les modèles numériques d'altitudes s'accroît de manière spectaculaire avec l'amélioration de l'information extraite des données d'altitudes (cartographie des zones d'inondation, des zones forestières, de l'érosion, etc.). Le but principal de la modélisation de terrain est de représenter la surface naturelle de la manière la plus exacte et la plus précise possible.

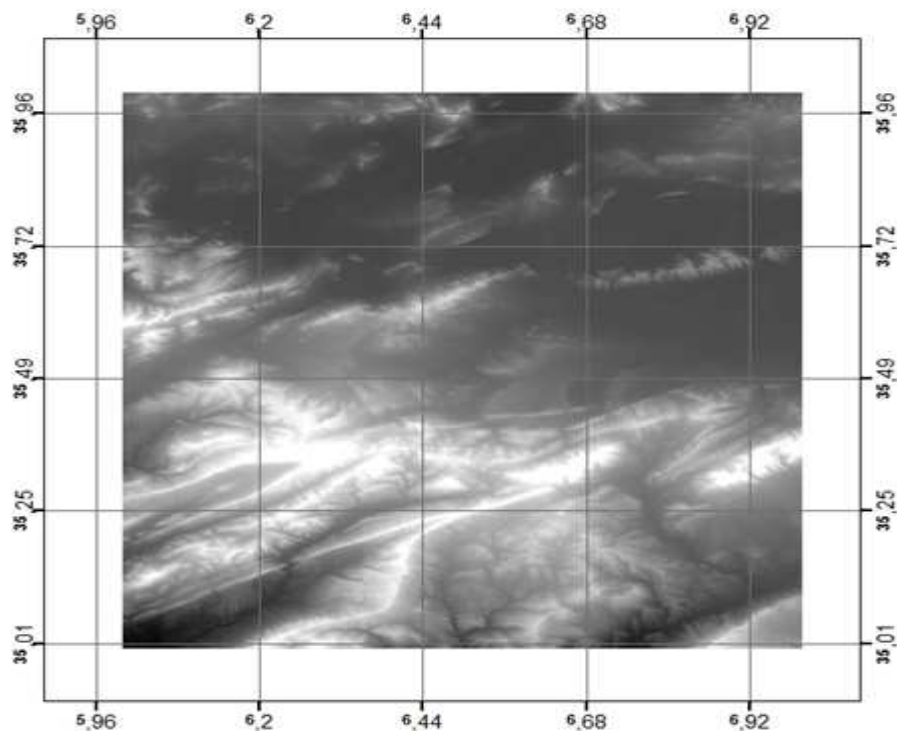


Figure III.3 Carte Digital élévation model (DEM) BV Chemora

III.2 Couplage Arc-GIS – HEC-Geo-HMS :

La schématisation d'un bassin versant en sous bassins est réalisée à l'aide du logiciel HEC-Geo HMS. C'est une extension du système d'information géographique Arc Map et du spatial analyst et qui a été développé comme un outil hydrologique géospatial pour les ingénieurs et hydrologues [HEC-Geo HMS]. Cette extension produit un certain nombre d'entrées hydrologiques qui sont directement employées par HEC –HMS. Il assiste l'utilisation pour l'évaluation des paramètres hydrologiques en fournissant des tables des caractéristiques. Physiques des cours d'eau et des sous bassins elle permet en outre aux utilisateurs de visualiser l'information spatiale, les caractéristiques du bassin versant, de délimiter les sous bassins les réseaux ect.

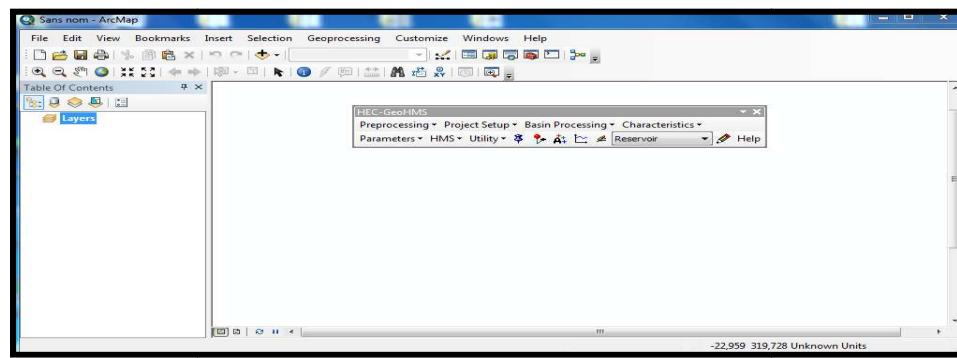


Figure III.4 Extension HEC-Geo HMS sous Arc Map.

Cette extension saisie comme données le MNT du bassin versant, qui parvient de l'Arc Gis ; en sortie de ce module on récupère l'ensemble des informations nécessaires à la modélisation du bassin versant stockées des fichiers ASCII sous le format HEC –HMS.

III .3 La relation entre (Arc Gis, HecGeo HMS et HEC-HMS) :

La relation entre l'Arc Gis, le HEC - Geo HMS et le HEC-HMS est illustrée sur la figure III.5. L'Arc Gis permet la digitalisation des cartes géographiques et topographique et leur traitement de ce traitement il en résulte une base de données hydrologique spatiale qui se compose du MNT, du type du sol, de couverture végétale, ect.

Le HEC-Geo HMS opère le MNT via le logiciel Arc Gis pour réaliser une schématisation en sous bassins du bassin. Les fonctionnalités de l'Arc Gis et du modelé hydrologique sont séparées par la ligne indiquée par des tirets. Le HEC-Geo HMS assure le raccordement entre ces deux domaines, il traduit ainsi l'information spatiale des Arc GIS en une information hydrologique. Si les données radar de précipitation sont utilisées, l'utilisation des grilles de SHG

ou de HRAP peut assurer un plus grand alignement et la compatibilité entre les précipitations et les grilles de chaque sous bassin.

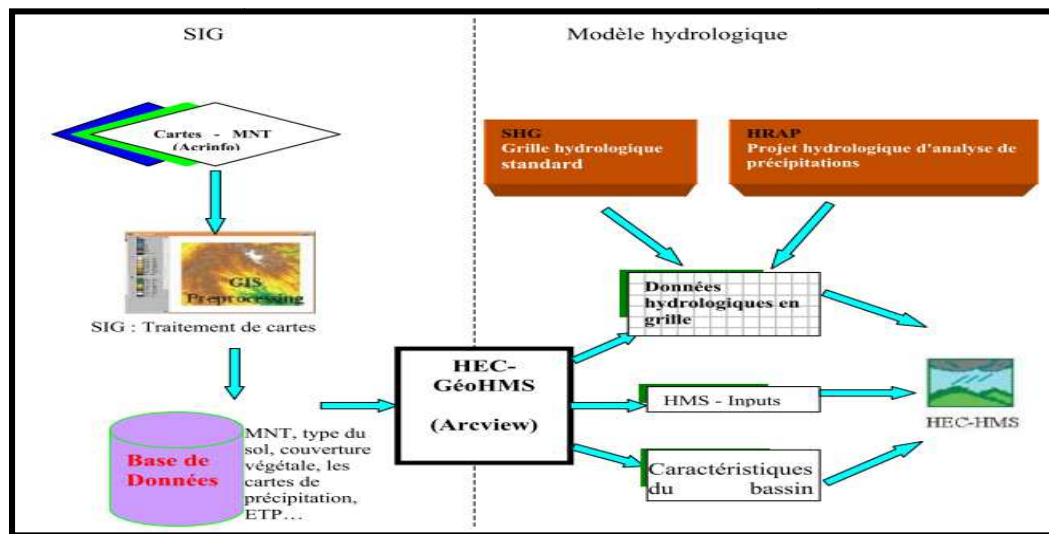


Figure III.5 ensemble de l'Arc Gis et du modèle hydrologique.

III .4 La description du modèle HEC-HMS :

Le HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) est un logiciel qui simule le comportement hydrologique d'un bassin versant suite à des événements pluvieux prédéterminés, développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs. Ce logiciel permet de calculer des hydro grammes de crues pour plusieurs objectifs à savoir les études de drainage urbain, la prévision des crues et leur impact, la conception des réservoirs, la réduction des effets des inondations. Le programme présente une interface graphique, des composantes hydrologiques intégrées, un système spécifique de stockage de données (DSS) et des outils de gestion, etc.

Le logiciel HEC-HMS permet de traiter ou de simuler à la fois les différentes données suivantes :

- **Les précipitations :** Ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique.
- **Les pertes :** (par infiltration, retenue ou évapotranspiration) qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant.
- **Les ruissellements directs :** qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge L'hydrologie fluviale : concernée par l'écoulement de l'eau dans le lit de la rivière. Ces différents paramètres seront ensuite modélisés

mathématiquement par un ensemble de modèles intégrés dans HEC-HMS et qui permettront d'obtenir la réponse du système hydrologique global suite à un changement de conditions hydrométéorologiques.

III .4.1 La Modélisation sous le HEC-HMS :

III .4.1.1 La Modélisation hydrologique sous le HEC-HMS :

Le modèle HEC-HMS utilise différents types de méthodes pour modéliser les phénomènes physiques composants le cycle de mouvement de l'eau dans le bassin versant. Afin de déterminer le comportement hydrologique, le modèle HEC-HMS passe par trois étapes principales de calcul, à savoir :

- La modélisation du bassin.
- La modélisation de la météorologie.
- Les spécifications particulières de contrôle.

Ces trois étapes de calcul permettent donc d'obtenir la réponse du système hydrogéologique global à un changement de conditions hydrométéorologiques.

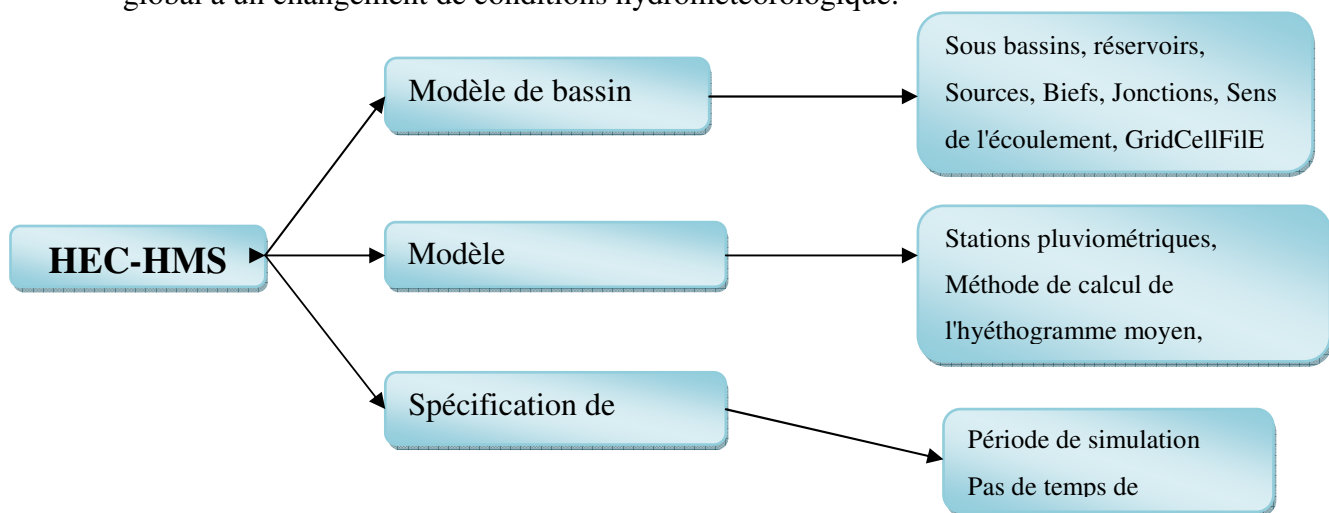


Figure III.6 Etapes de modélisation par HEC-HMS

III .4.1.2 La Modélisation hydro-sédimentologique sous le HEC-HMS :

Le modèle HEC-HMS utilise différents types de méthodes pour modéliser les phénomènes d'érosion, transport solide et des dépôts :

- Erosion : Les modèles disponibles dans le modèle Hec-Hms sont :Build-up Wash-off, LA Debris Method EQ1, Modified USLE, Multi-Sequence Debris Prediction Method et USGS long-Term Debris Model.
- Transport solides : Les modèles disponibles dans le modèle Hec-Hms sont :Ackers-White, Engelund-Hansen, Laursen-Copeland, Meyer-Petar Muller, Toffaleti, Wilcock et Yang.
- Dépôts : Quatre méthodes de vitesse de chute proposées le modèle Hec-Hms : Report 12, Rubey, Toffaleti et Van Rijn.

Pour la présente étude les versions suivantes ont été utilisées :

- ArcGIS 10.3 logiciel de système d'information géographique
- HEC-GeoHMS 10.3 outil hydrologique géo spatial
- HEC-HMS 5.4 modélisation hydrologique et sédimentologique

HEC-GeoHMS a été développé comme un outil hydrologique géo spatial pour les ingénieurs et hydrologues. Il assiste l'utilisateur pour la délimitation en sous bassins versants, ainsi que la détermination des paramètres hydrologiques qui seront directement employées par HEC-HMS (le logiciel de modélisation hydro-sédimentologique).

III.4.2 Les étapes de répartition du bassin en sous bassin par HEC-GeoHMS :

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 (**FillSinks**) 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 de 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 difffluence.
6. Délimitation en sous-bassins (**Catchment Grid Delineation**). Cette étape trace les limites des sous-bassins pour chaque segment de 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 de 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.

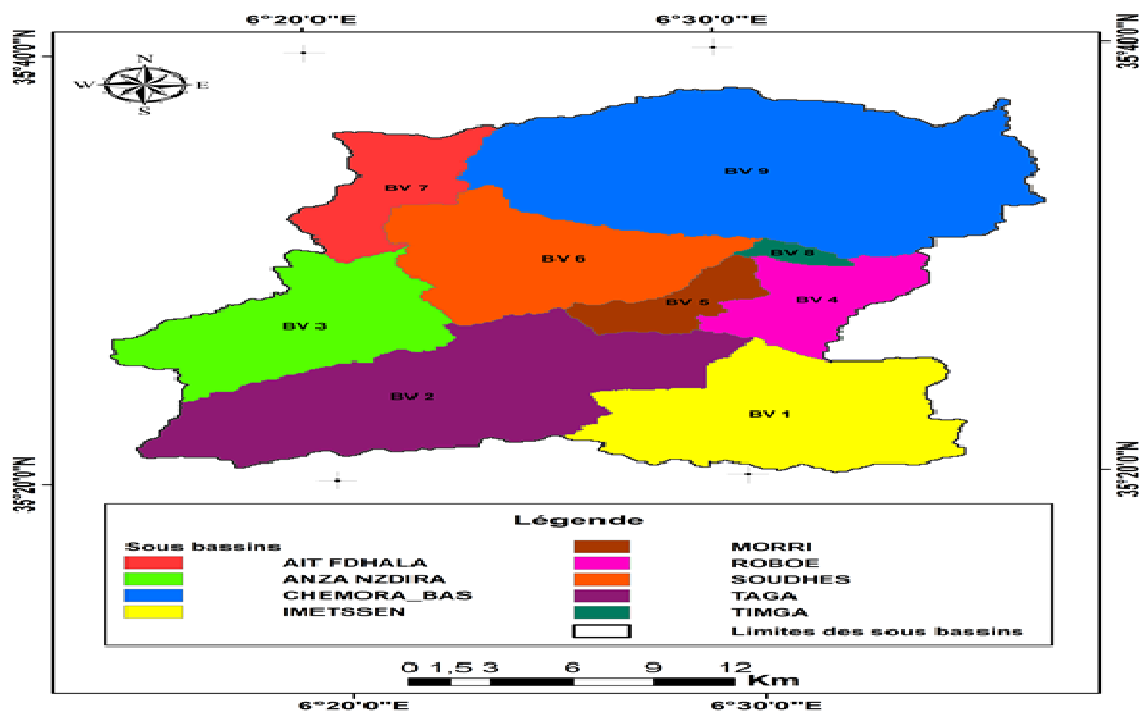


Figure III.7 Découpage en des sous-bassins versants par HEC-GeoHMS

III.4.4 Les caractéristiques générales du modèle :

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie - débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été

lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-1, tous appartenant à la fameuse HEC (HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS ...).

Le HEC-HMS a été largement employé et validé dans plusieurs bassins versants à climats contrastés à travers le monde, il a été utilisé lors pour la prévention contre les dégâts des inondations dans les zones potentielles à cet aléa, ainsi que par les bureaux d'études, sur les bassins de moyenne et grande taille, pour leurs études hydrologiques de détermination des quantiles de débit.

III.4.5 Le processus de fonctionnement :

Comme nous venons de le mentionner ci-dessus, le HEC-HMS attribue à chaque module une étape de la transformation pluie-débit, et c'est la combinaison des résultats des modules les uns aux autres qui donne l'hydrogramme final. En général, dans le cas d'une modélisation hydro-sédimentologique, c'est l'enchaînement schématisé proposé par A. BERGHOUT sur la figure suivante qui est suivi à la lettre pour aboutir au débit et aux quantités des sédiments transportés à l'exutoire :

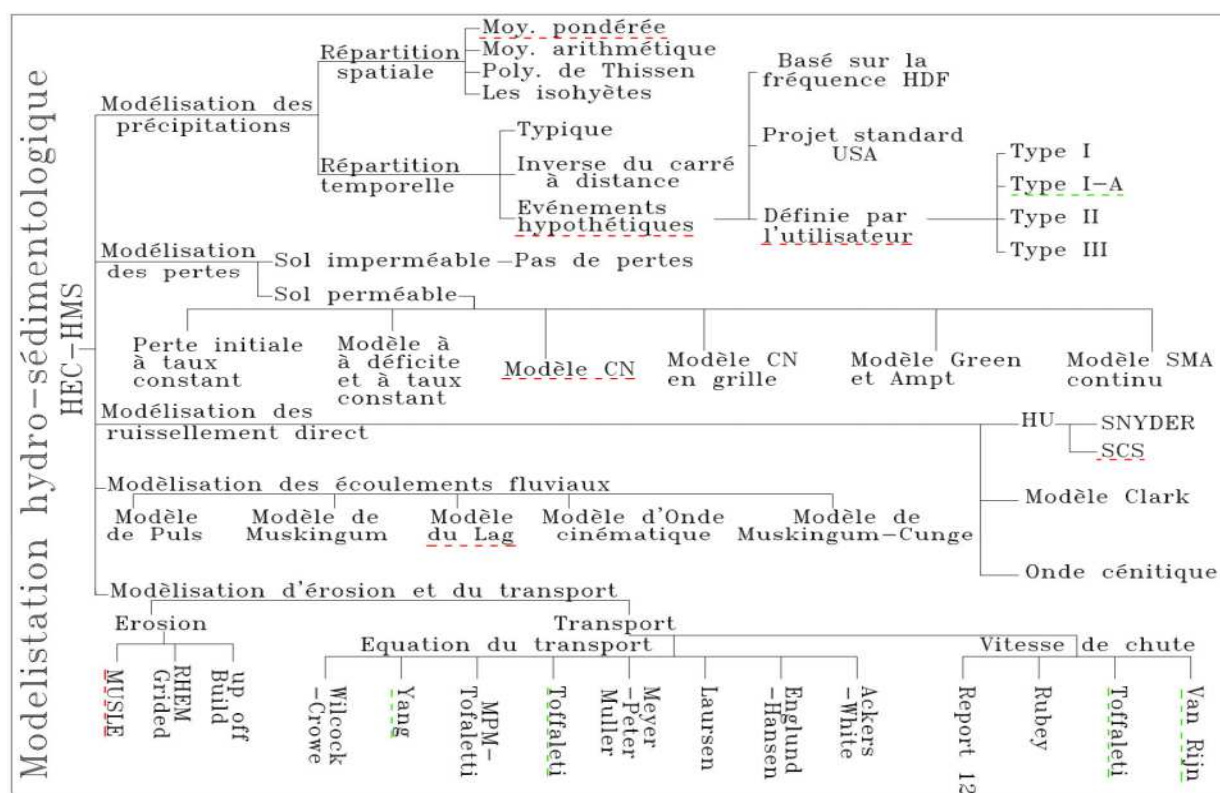


Figure III-8 : Organigramme de la modélisation hydro-sédimentologique par HEC-HMS

Conclusion :

Dans le cadre de l'étude, nous avons besoin d'une cartographie et d'un schéma de la ligne de production de la vallée. Pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser HEC-HMS (Center for Hydrological Engineering - Hydrological Modeling System).

CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS AU B.V CHEMORA

IV.1 Introduction :

Le système de modélisation hydrologique HEC-HMS est un logiciel très flexible employé pour modéliser le processus pluie-débit dans un bassin versant ou une région . Il est conçu pour être utilisé pour de grandes surfaces géographiques afin de résoudre si possible un plus grand nombre de problèmes. Ce logiciel offre une grande liberté dans la modélisation des bassins versants grâce aussi bien aux nombreux éléments proposés pour le bassin versant qu'à la variété des théories proposées pour modéliser le ruissellement, les infiltrations, l'écoulement en rivière ou encore la répartition des pluies.

A l'aide de son interface fonctionnant sous l'environnement Windows le modèle HEC HMS est d'usage très souple. Les informations nécessaires pour les simulations sont groupées sous forme de projet qui peut être sauvé sur disque. Néanmoins, ce logiciel nécessite une étape de préparation des données, qui consiste en une schématisation du bassin versant en dehors de ce logiciel, ce schéma s'appelle modèle du bassin.

IV.2 Fonctionnalités :

Les fonctionnalités du programme sont complètement intégrées dans l'environnement de travail comprenant une base de données, des utilitaires d'introduction de données, ont moteur de calcul et des utilitaires de rédaction des résultats. Une interface graphique permet à l'utilisateur de se déplacer d'une interface du programme à une autre. Les fonctionnalités du programme et son ergonomie sont identiques pour les mêmes plates formes existantes [HEC-HM].

Les données d'entrée peuvent être conçues pour les éléments de bassins versants comme les sous bassins et les tronçons de cours d'eau ou bien simultanément pour des groupes d'éléments analogues. Les tableaux et formulaires pour l'introduction de données nécessaires sont accessibles à partir d'un schéma visuel du bassin versant.

Pour effectuer une première simulation, il est nécessaire de créer une base de données pour caractériser le bassin versant et déterminer les averses qui seront employées comme données d'entrée du modèle. Les principales étapes de la simulation sont :

- ✓ Démarrage d'un nouveau projet.
- ✓ Définition du modèle de bassin versant.
- ✓ Données de la ou des stations météorologiques.
- ✓ Définition du modèle de précipitation.
- ✓ Définition des paramètres de contrôle de la simulation.
- ✓ Création et exécution d'une simulation.
- ✓ Visualisation des résultats.

IV.3 Préparation des entrées du modèle HEC-HMS :

La modélisation de la réponse d'un bassin versant soumis à un phénomène pluvieux sous le logiciel HEC-HMS est découpée en trois parties :

- la modélisation du bassin versant.
- la modélisation de la météorologie.
- les spécifications particulières.

Ce logiciel autorise ainsi d'utiliser différents types de méthodes pour la modélisation du bassin versant et de la pluviométrie. La composante spécification permet de spécifier chaque cas par la date de début et de fin de la simulation et le pas de temps de la simulation.

IV.4 Modélisation du bassin versant :

La première étape 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. Les éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant sont les suivants :

La modélisation proposée a pour objectif d'estimer le débit maximal probable des bassins versants de Chemora, le volume liquide à son exutoire ainsi que le volume des apports solides transportés à l'exécutoire. Ce bassin versant a une superficie d'environ 765 km² et découpé en (09) sous-bassins.

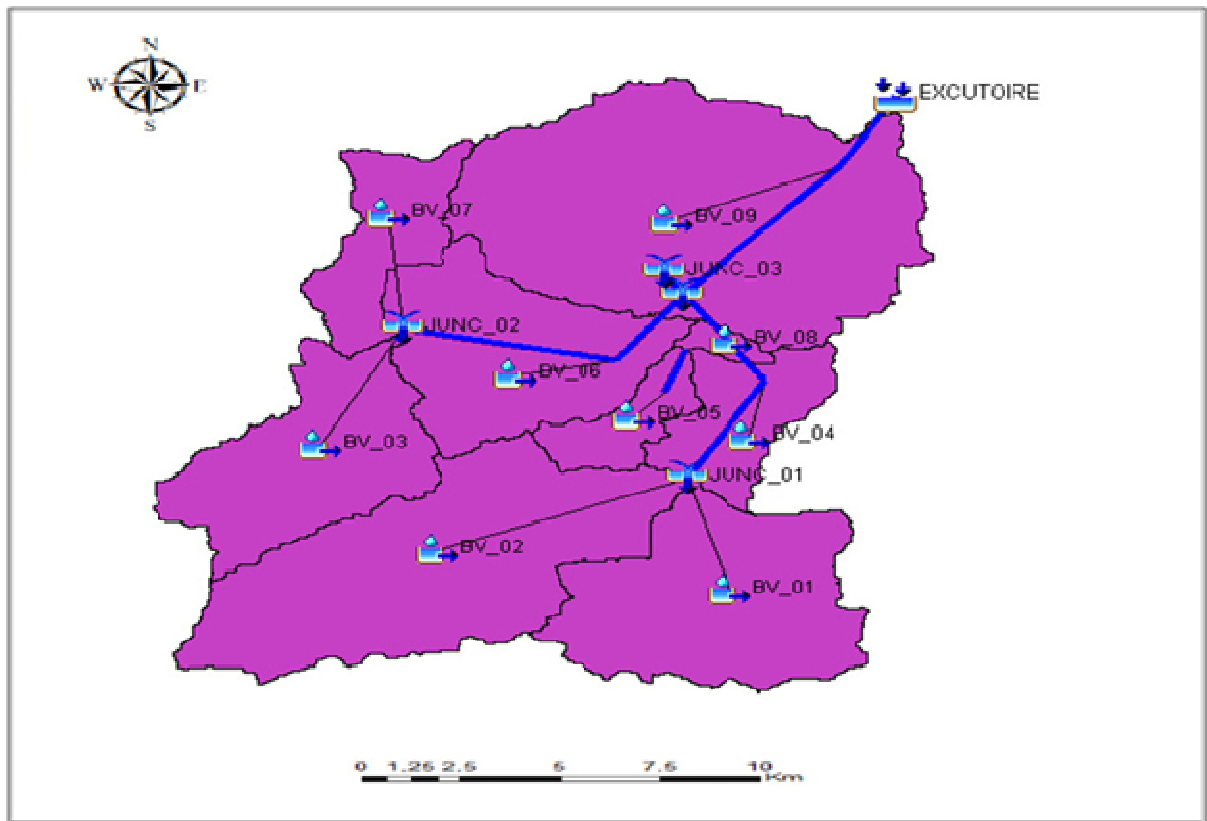


Figure IV.1 : Carte des sous bassins bassin versant Chemora.

IV.5 La structure du modèle HEC-HMS choisie et les données d'entrée du modèle :

Cette description portera sur la combinaison modulaire choisie pour modéliser le bassin versant de Chemora, en citant ses variables et ses paramètres.

IV.5.1 Le type de modélisation :

La modélisation continue est confrontée au problème d'absence des distributions temporelles des pluviographes. C'est la cause pour laquelle nous avons opté pour la modélisation des averses type NRCS. L'averse Type 2 est la mieux appropriée à notre contexte

IV.5.2 Les variables :

a- Découpage des bassins :

A- Division du bassin : Le bassin de chemora, a été divisé en 09 sous bassins de telle sorte à avoir des unités plus ou moins homogènes.

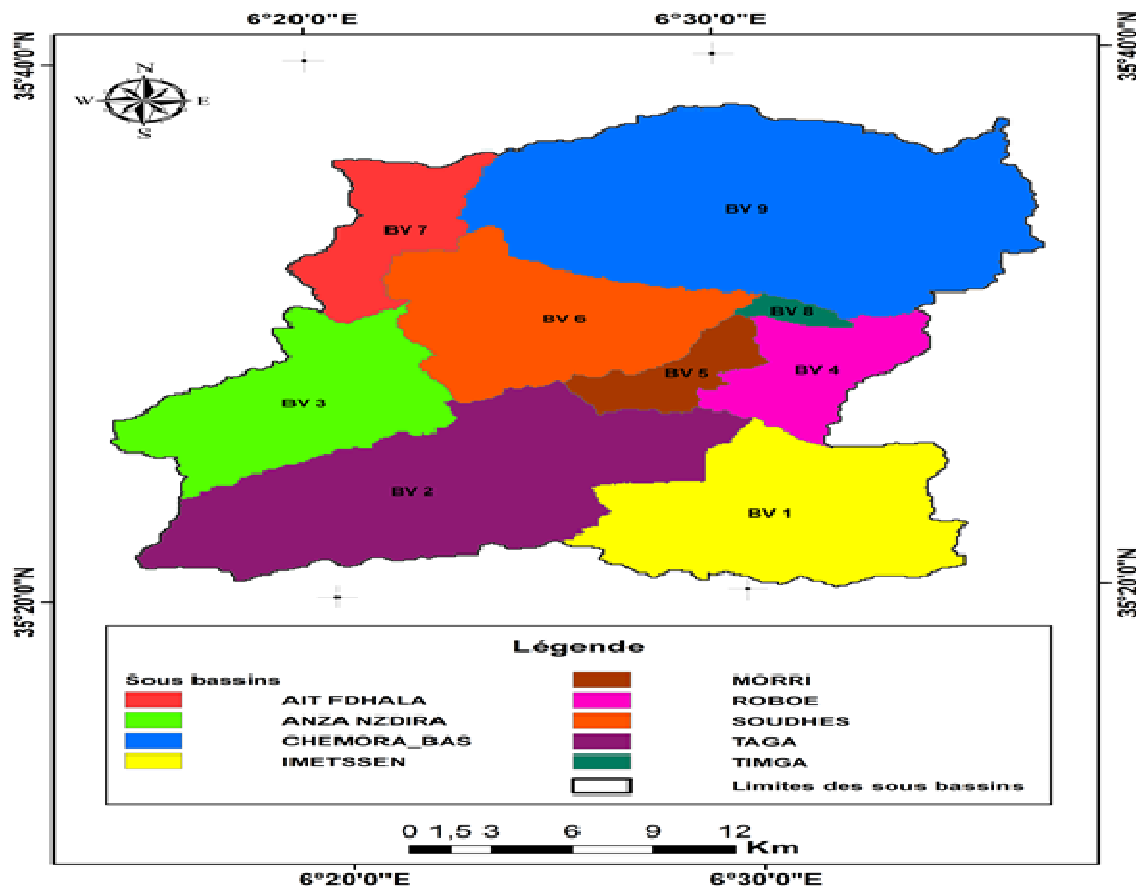


Figure IV.2 : découpage B V Chemora en sous bassins.

b- La carte de sols : Nous avons déterminé les valeurs de CN pour chaque sous bassin. en tenant compte de la classification NRCS qui définit les classes d'occupation du sol en quatre grands groupes.

- Groupe "A" : sols à faible potentiel de ruissellement.
- Groupe "B" : sols présentant une vitesse d'infiltration modérée et une transmissivité moyenne ;
- Groupe "C" : sols à vitesse d'infiltration lente et de transmissivité faible.
- Groupe "D" : sols à fort potentiel de ruissellement.

La carte (Figure IV.3, IV.4) a été dressée en utilisant les données des sols disponibles au site : SoilGrid.org représente la carte de la classification des sols du bassin.

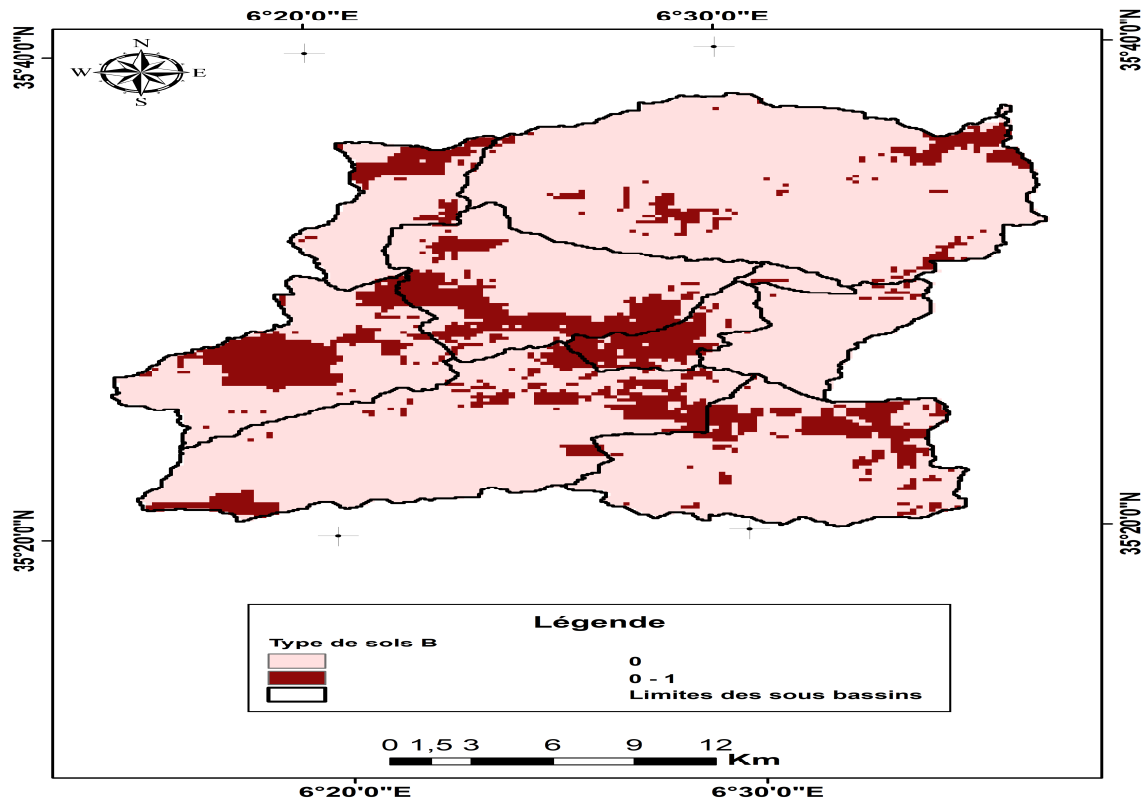


Figure IV.3 : la carte des sols type B NRCS du bassin versant Chemora.

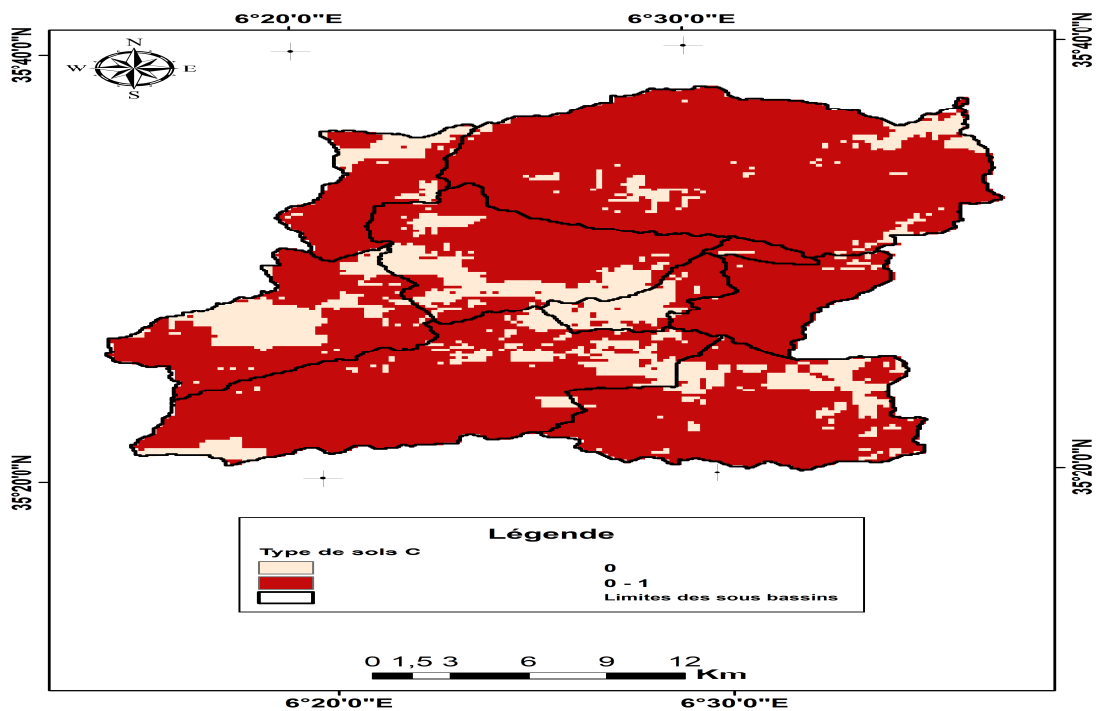


Figure IV.4 : la carte des sols type C NRCS du bassin versant Chemora.

c- La carte d'occupation du sol ou du couvert végétal : On a établi les cartes NDVI élaborées à partir des images satellitaires.

d- Le pourcentage d'imperméable : La carte (Figure IV.5) dressée à partir des données des sols disponible au site : SoilGrid.org représente le pourcentage d'imperméable dans le bassin.

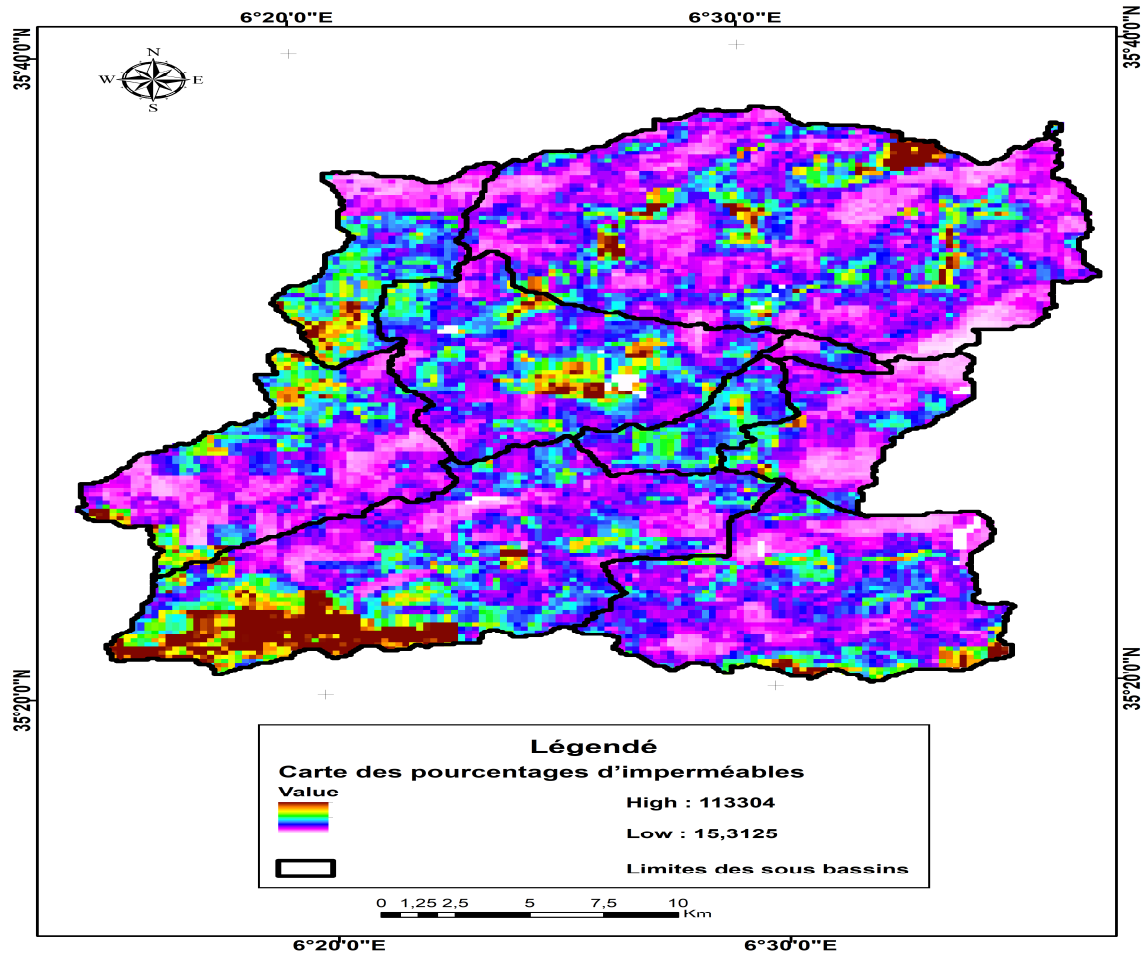


Figure IV.5 : Carte des pourcentages d'imperméables dans le bassin versant Chemora.

IV.6 Les paramètre :

a- Curve number CN :

L'approche utilisée dans cette étude pour le calcul de CN, est de l'estimer à partir de l'indice de végétation normalisé dérivé NDVI déterminé de douze images satellitaires LANDSAT8 réparties sur les mois de l'année adaptées à la classification NRCS. Cette approche a été utilisée pour obtenir des valeurs approximatives du facteur CN, en fait, la valeur du CN dépend de la nature de la végétation, du pourcentage du couvert végétal et de l'occupation du sol.

Pour estimer les valeurs du CN à partir de celle de l'NDVI, nous avons divisé ces dernières en 6 classes : (BERGHOUT A. 2017)

- **Végétation dense** : Cette classe est représentée par des forêts de chêne, le chêne vert (*Quercus ilex*) et le chêne liège (*Quercus suber*), avec la présence des pinèdes généralement des pins d'Alep (*Pinus halepensis*).
- **Végétation dégradée** : Généralement des matorrals qui se caractérisent par la domination des arbustes avec des feuilles persistantes, larges et petites, rigides et épaisses, avec des petits arbres par fois présents avec ou sans sous-bois (Blondel et Aronson, 1999)
- **Végétation très dégradée** : Généralement des maquis dégradés et garrigues qui contiennent une association des végétaux dépassant rarement le stade arbustif.
- **Végétation clairsemée** : Des garrigues dégradées où la végétation arbustive y est moins dense et la strate arborée est absente, dispersée sur toute la zone, ces garrigues sont dominées essentiellement par : le Jujubier sauvage (*Ziziphus lotus*), l'asphodèle (*Asphodelus microcarpus*), le Palmier nain (*Chamaerops humilis*) ...etc.
- **Sols nus** : Cette classe englobe les sols nus des formations à base de thérophytes (herbes).
- **Surface des plans d'eau** : Englobe les surfaces des cours d'eau.

Tableau IV.1 : Les données utilisées pour les corrélations entre l'NDVI et CN pour les différents types des sols NRCS (BERGHOUT A. 2017)

Couvert	NDVI	CN			
		A	B	C	D
Eau	-0.4	100	100	100	100
Sols nus	0.05	77	86	91	94
Végétation clairsemée	0.17	74	83	88	90
Végétation très dégradée	0.29	63	75	83	87
Végétation dégradée	0.38	57	72	81	86
Végétation dense	0.7	35	56	70	77
Végétation très dense	0.85	30	41	61	71

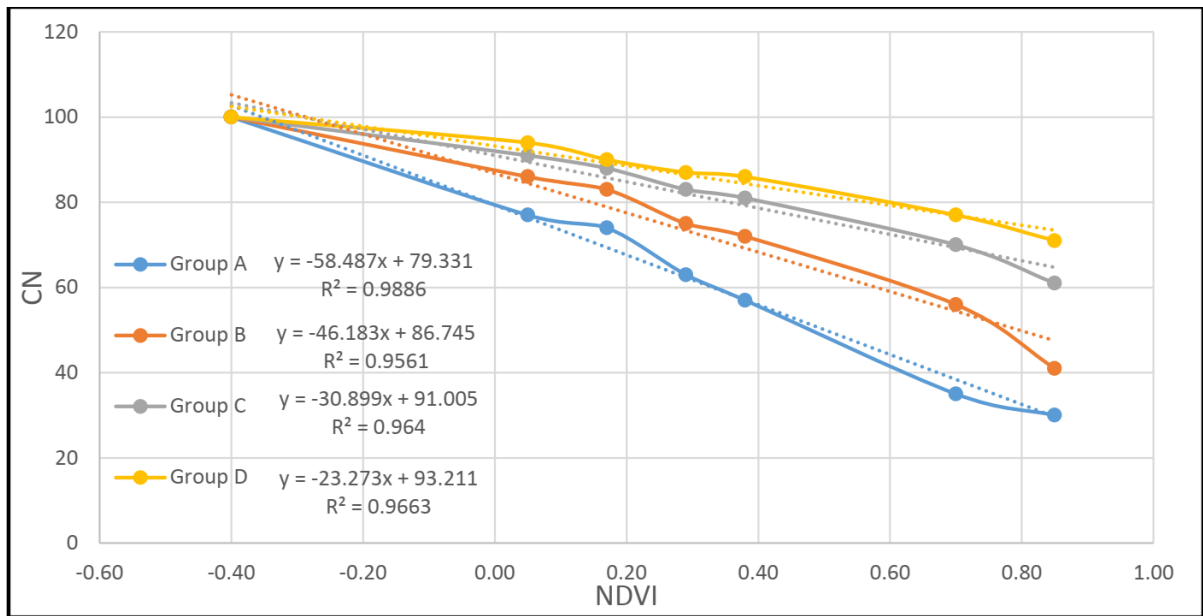


Figure IV.6. Corrélations entre les valeurs de l'NDVI et les valeurs du CN pour les différents types des sols NRCS.

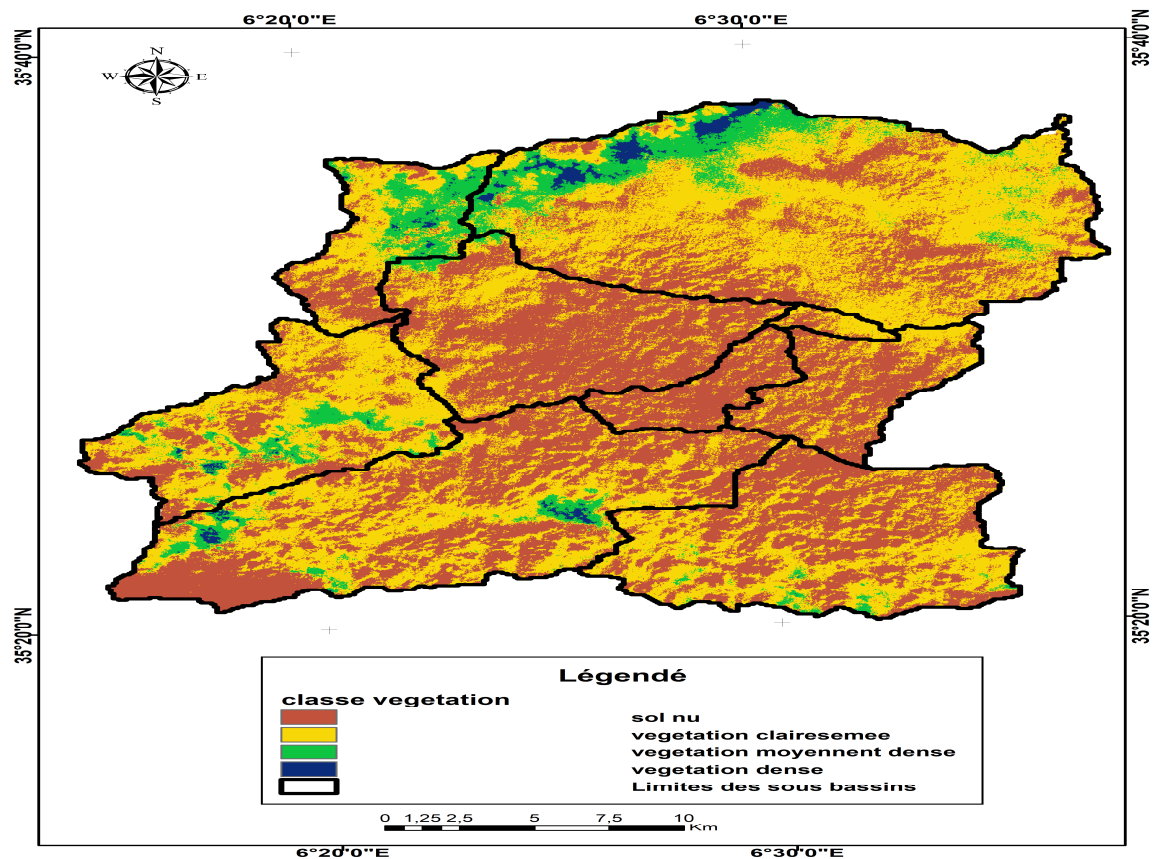


Figure IV.7 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 02 /01/1991

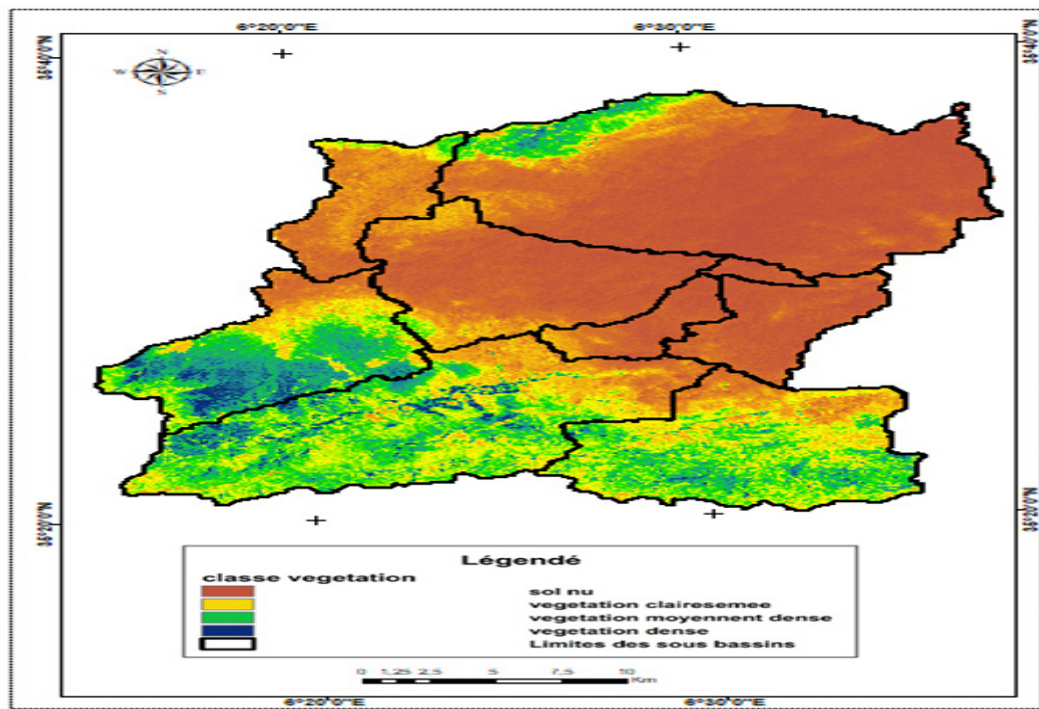


Figure IV.8 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 30/10/1990

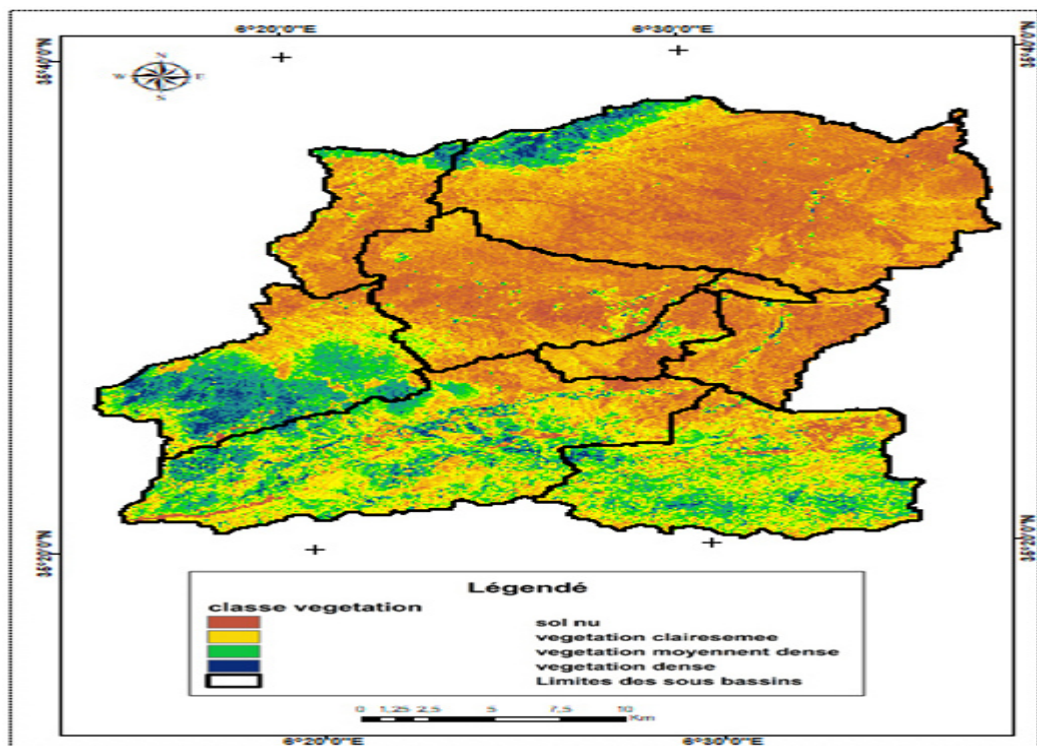


Figure IV.9 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 15/11/1990

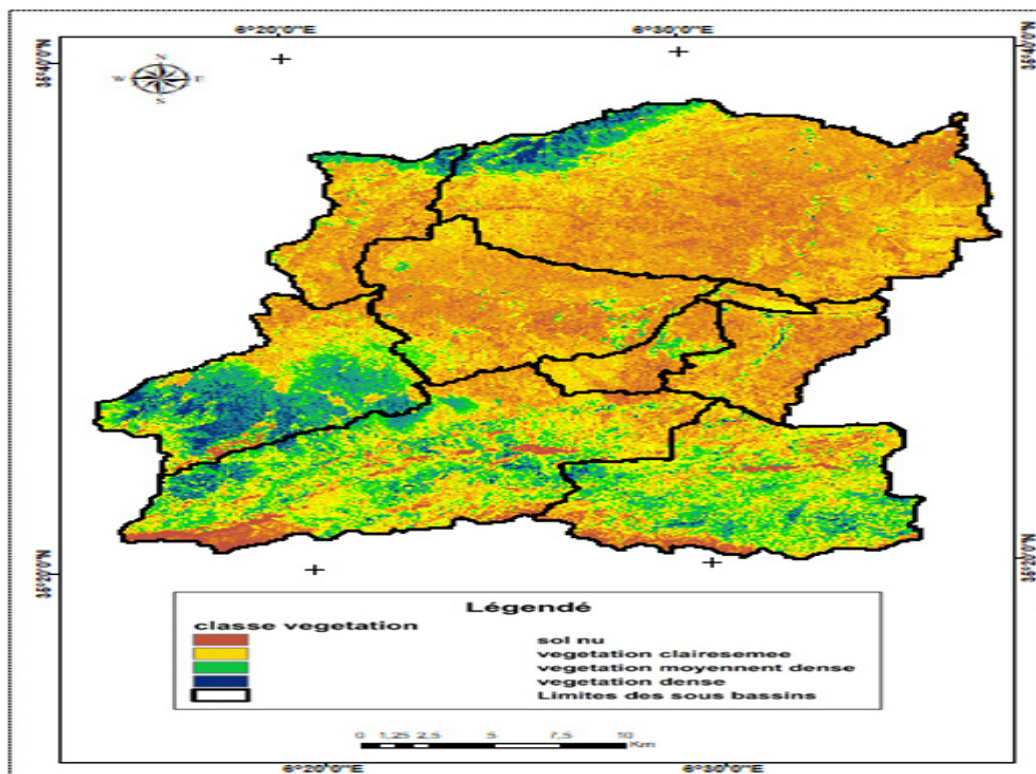


Figure IV.10 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 17/12/1990

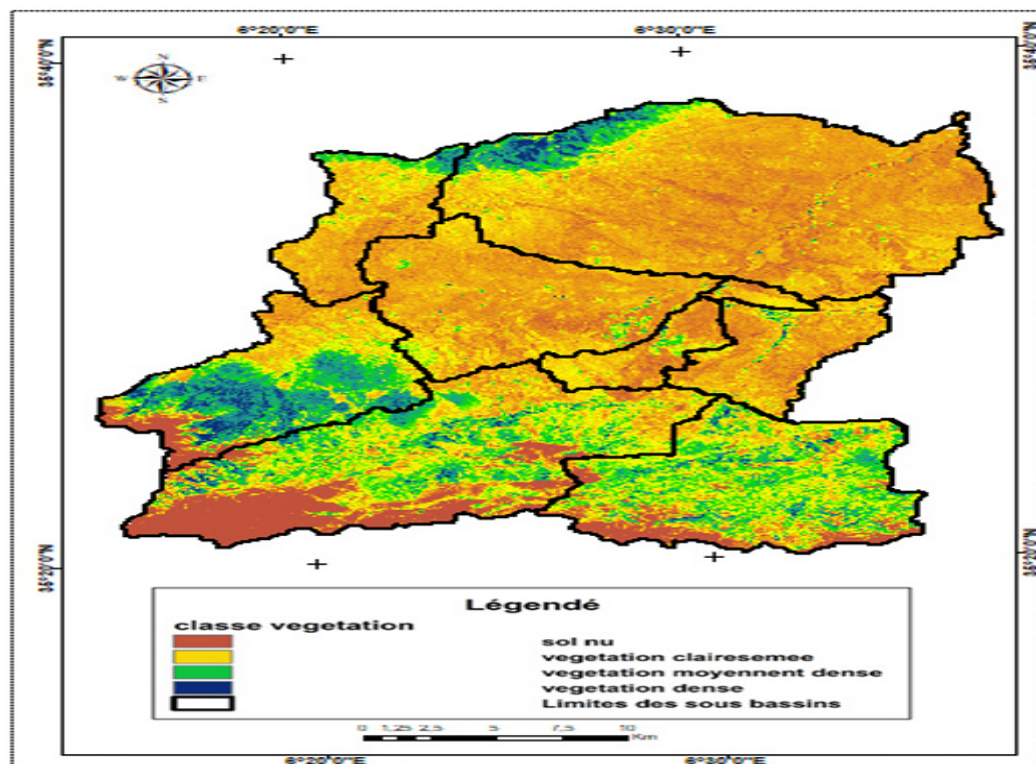


Figure IV.11 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 03/02/1991

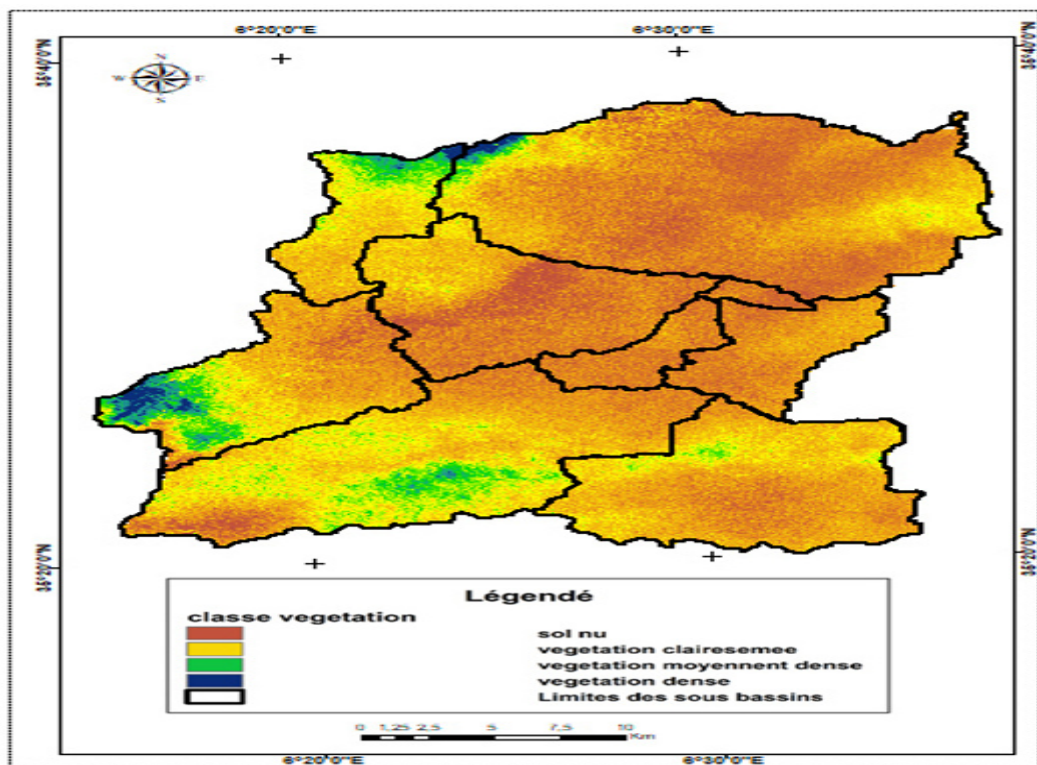


Figure IV.12 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 23/03/1991

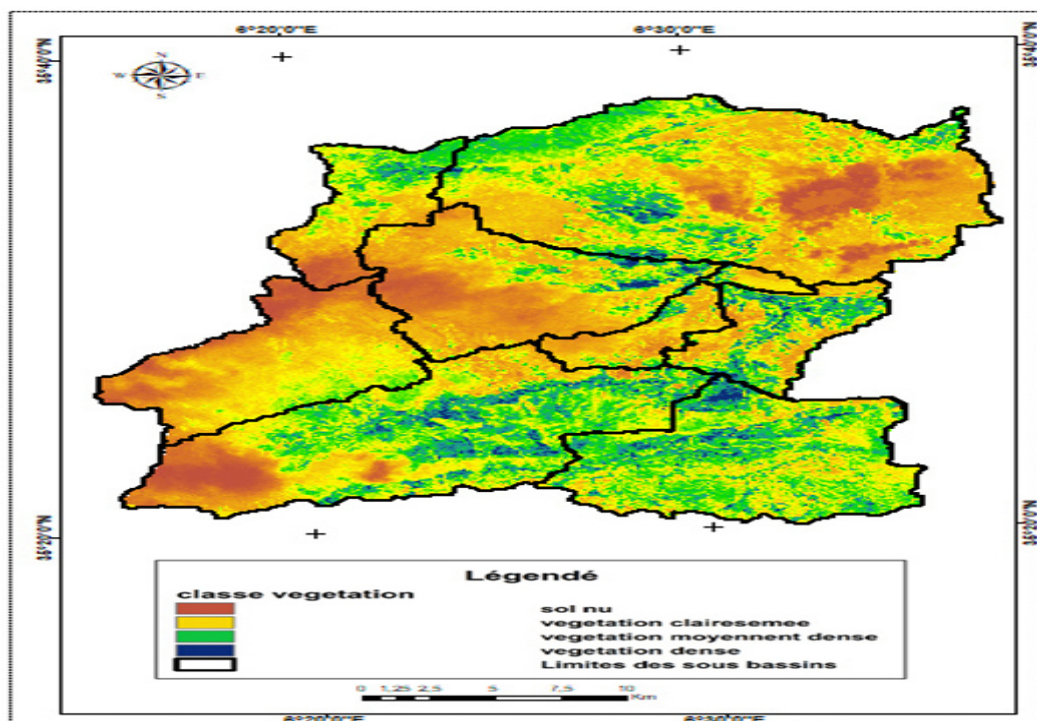


Figure IV.13 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 08/04/1991

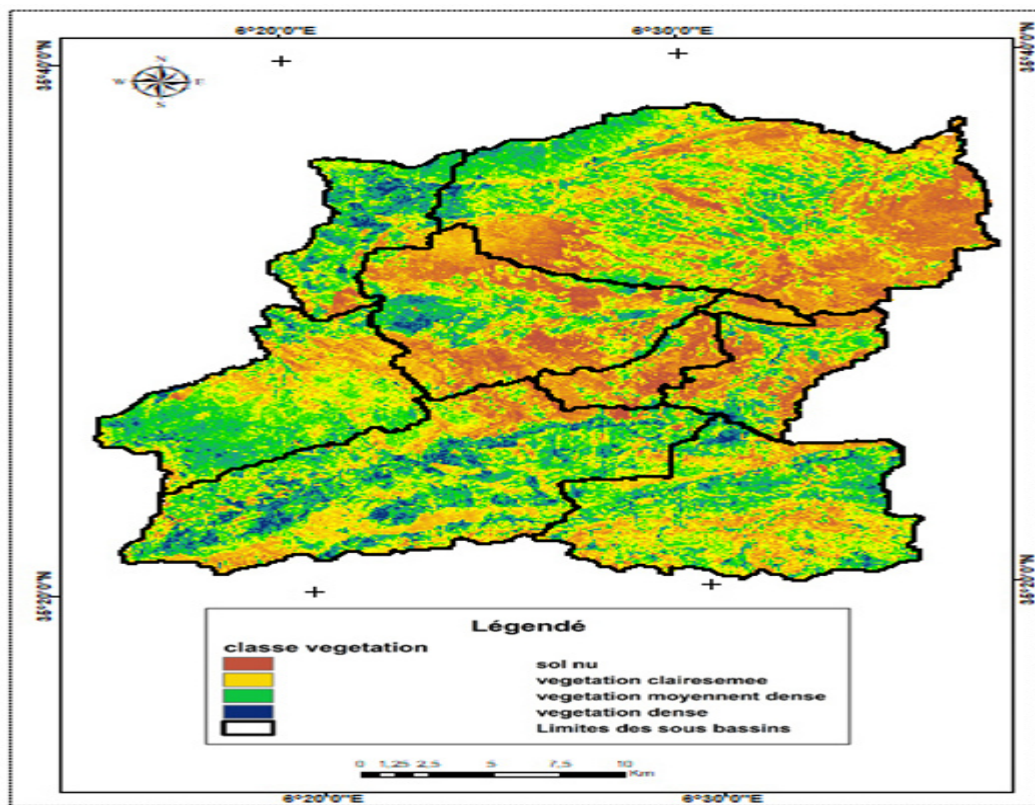


Figure IV.14 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 10/05/1991

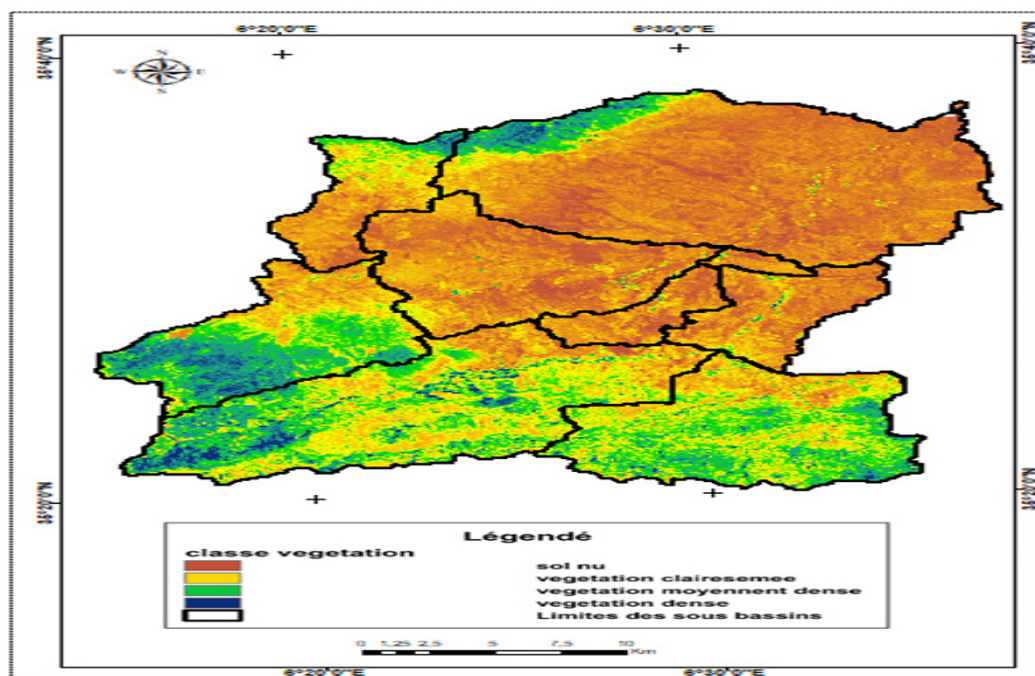


Figure IV.15 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 27/06/1991

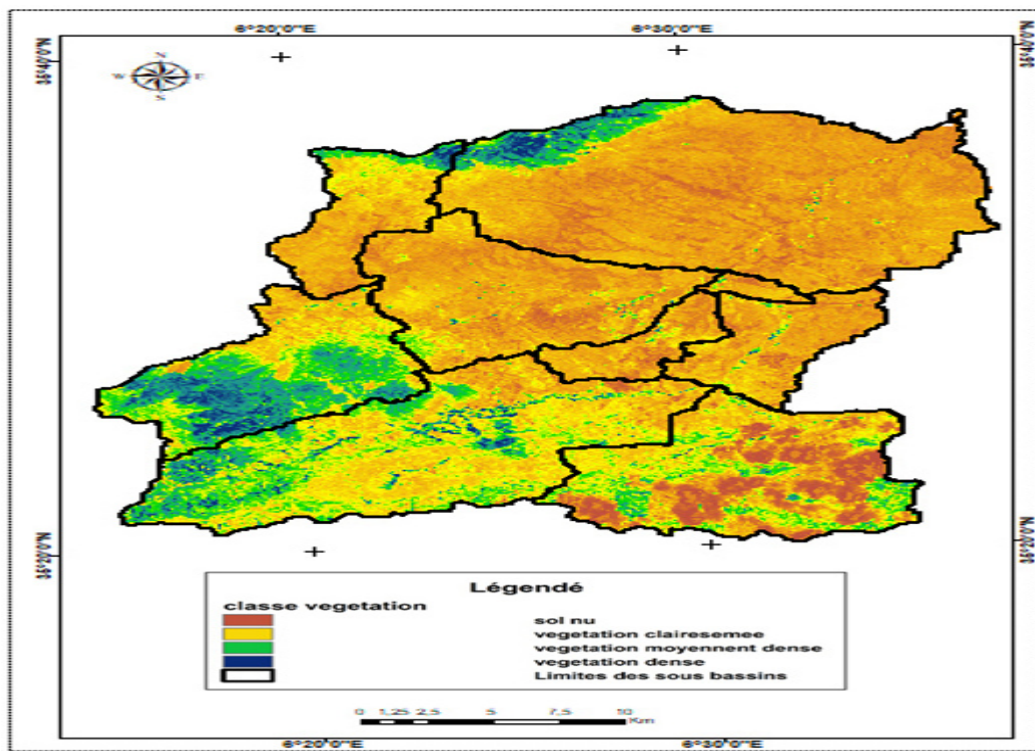


Figure IV.16 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 27/07/1991

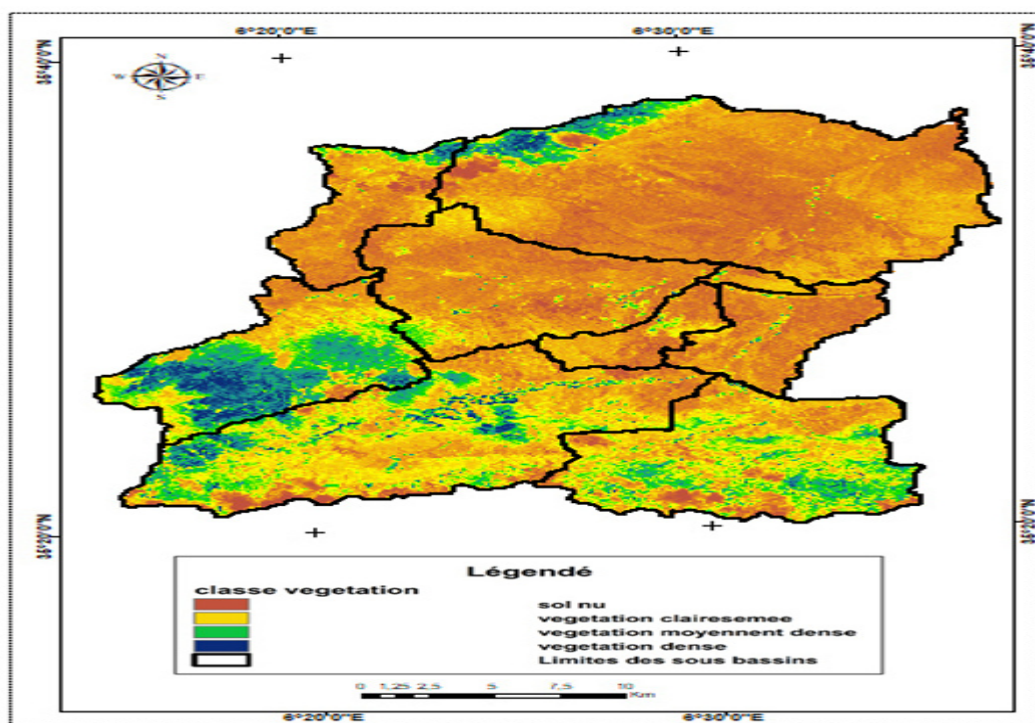


Figure IV.17 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 30/08/1991

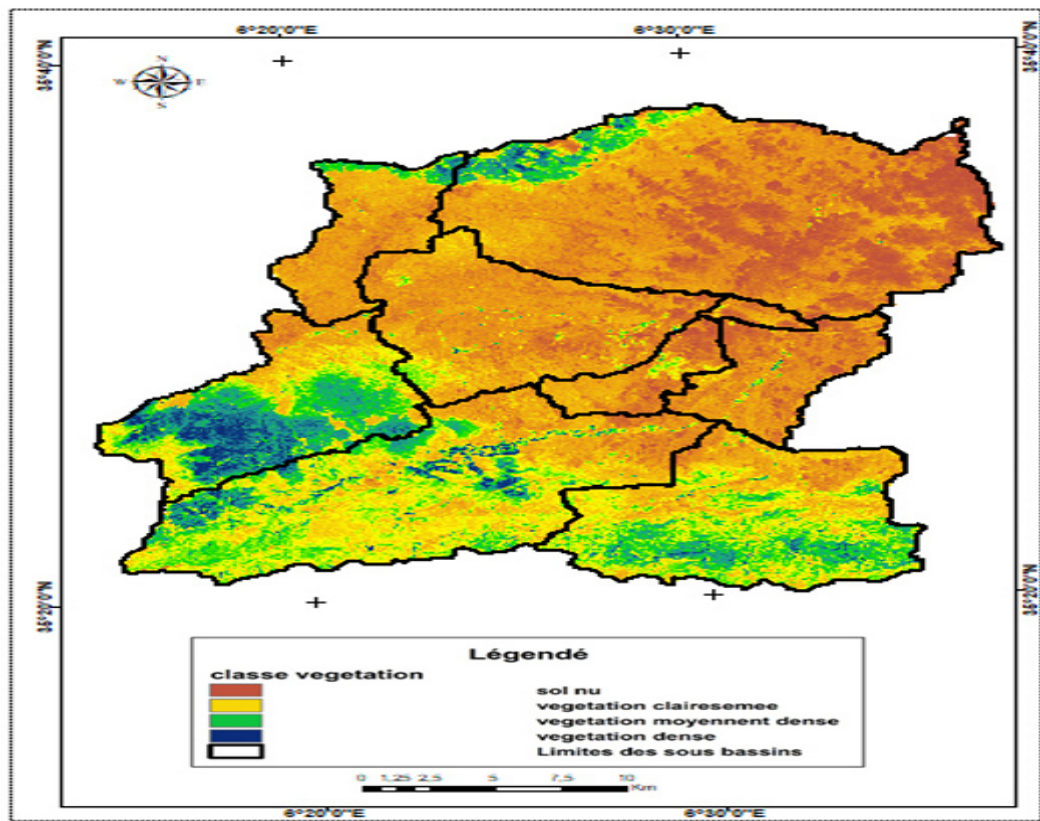


Figure IV.18 : Carte des valeurs de NDVI en sous bassins B V Chemora du 28/09/1990

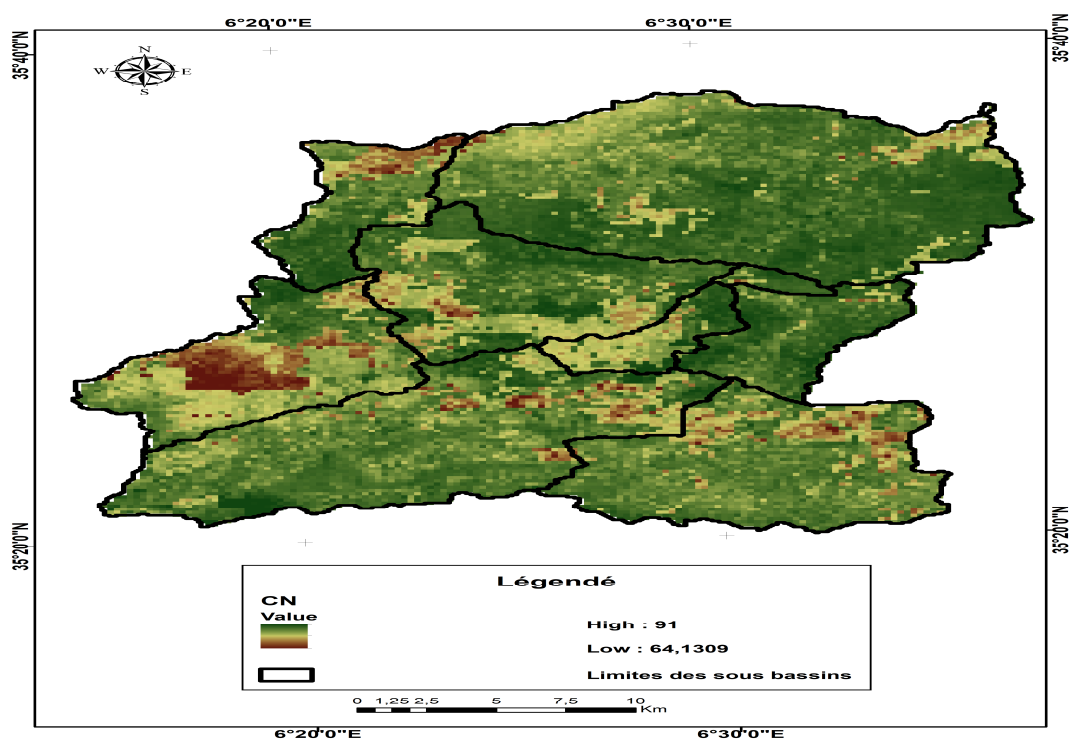


Figure IV.19 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 23/03/1991

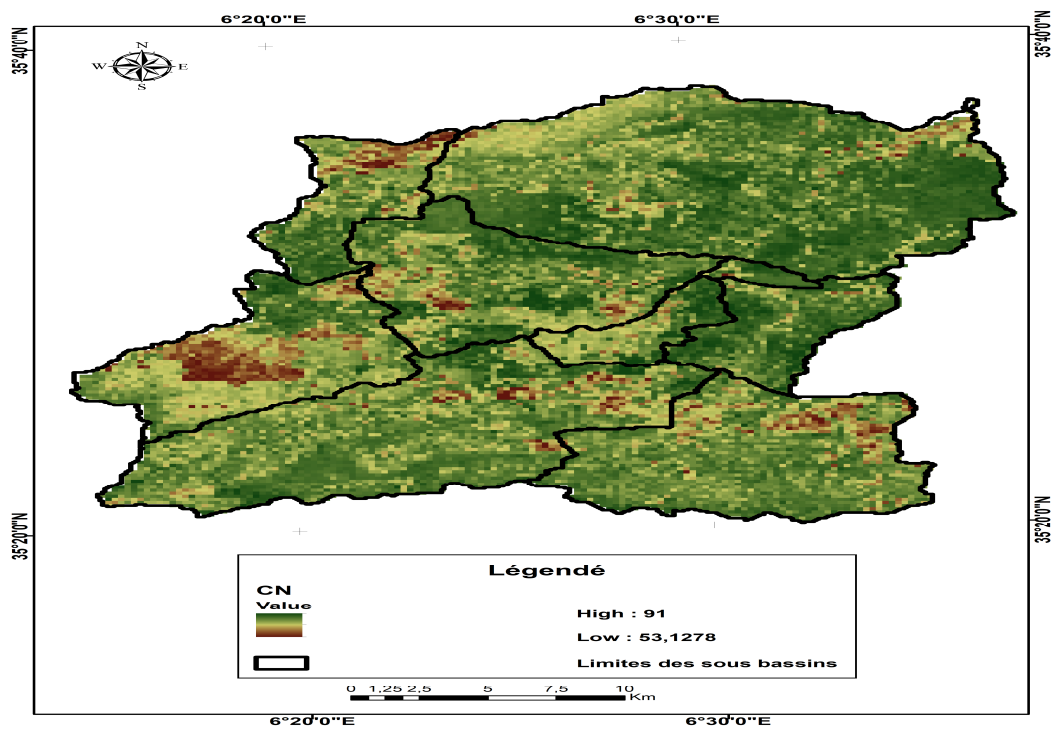


Figure IV.20 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 08/04/1991

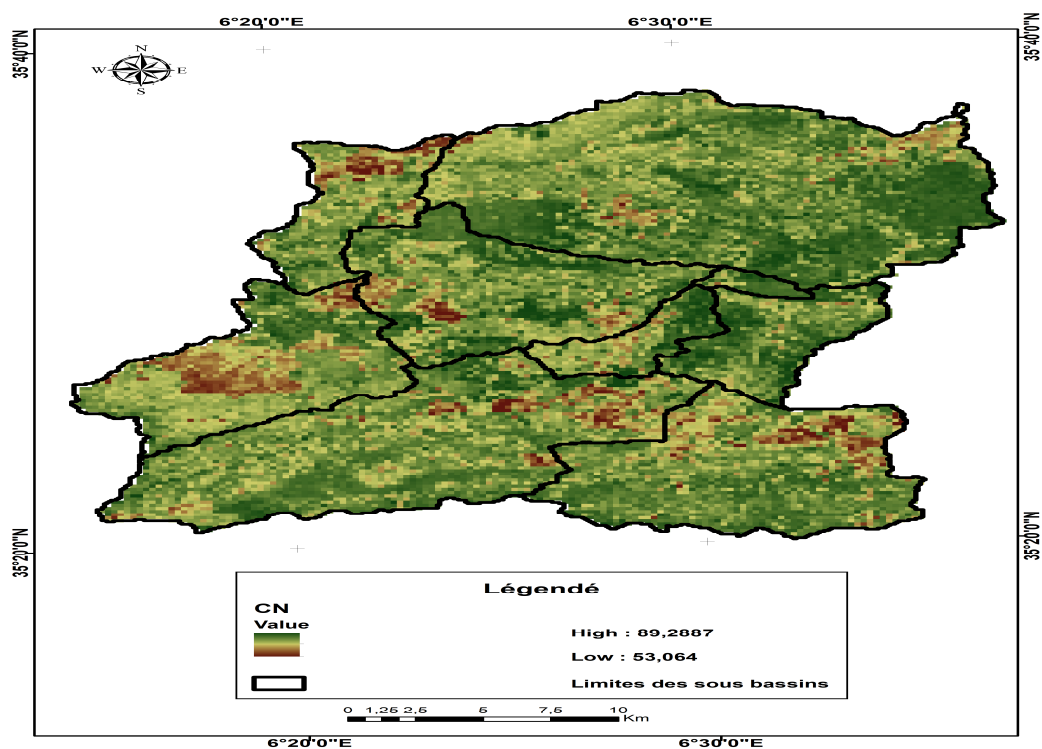


Figure IV.21 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 10/05/1991

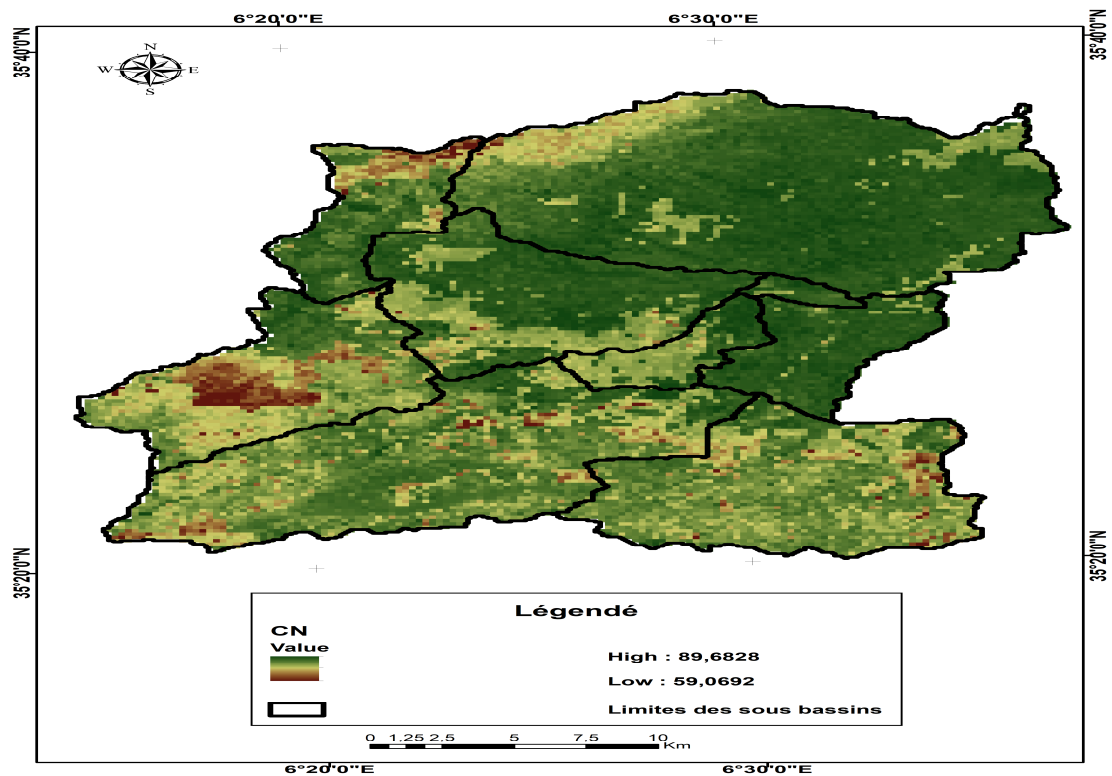


Figure IV.22 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 27/06/1991

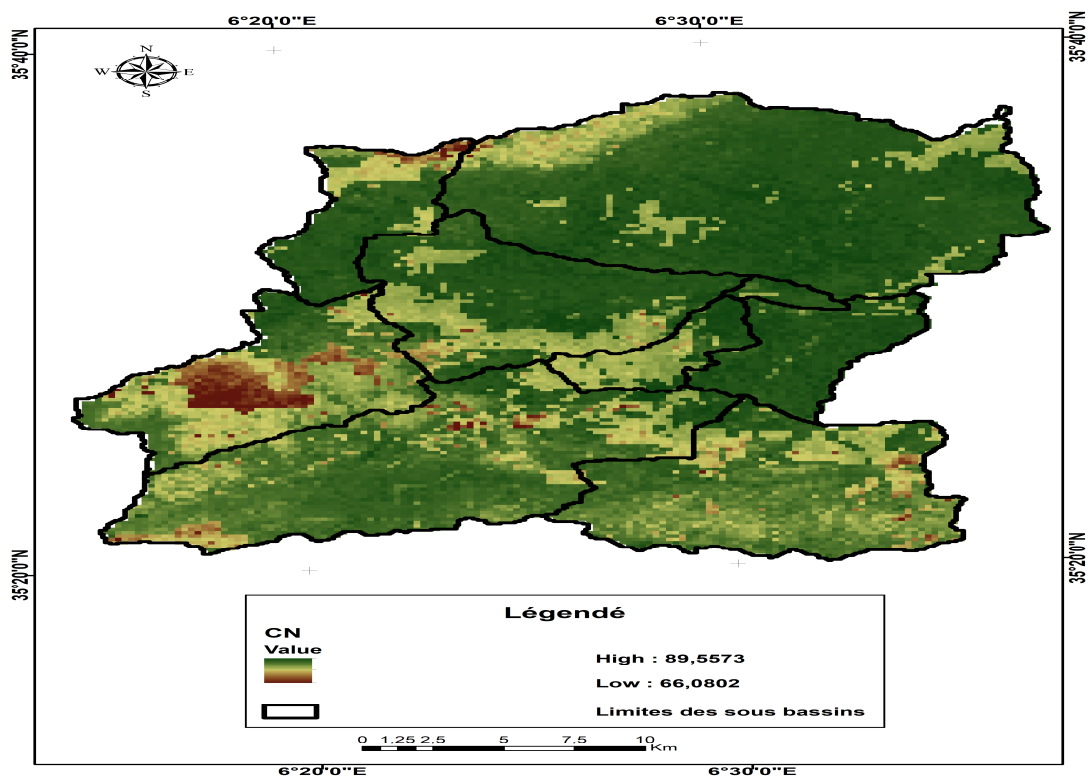


Figure IV.23 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 29/07/1991

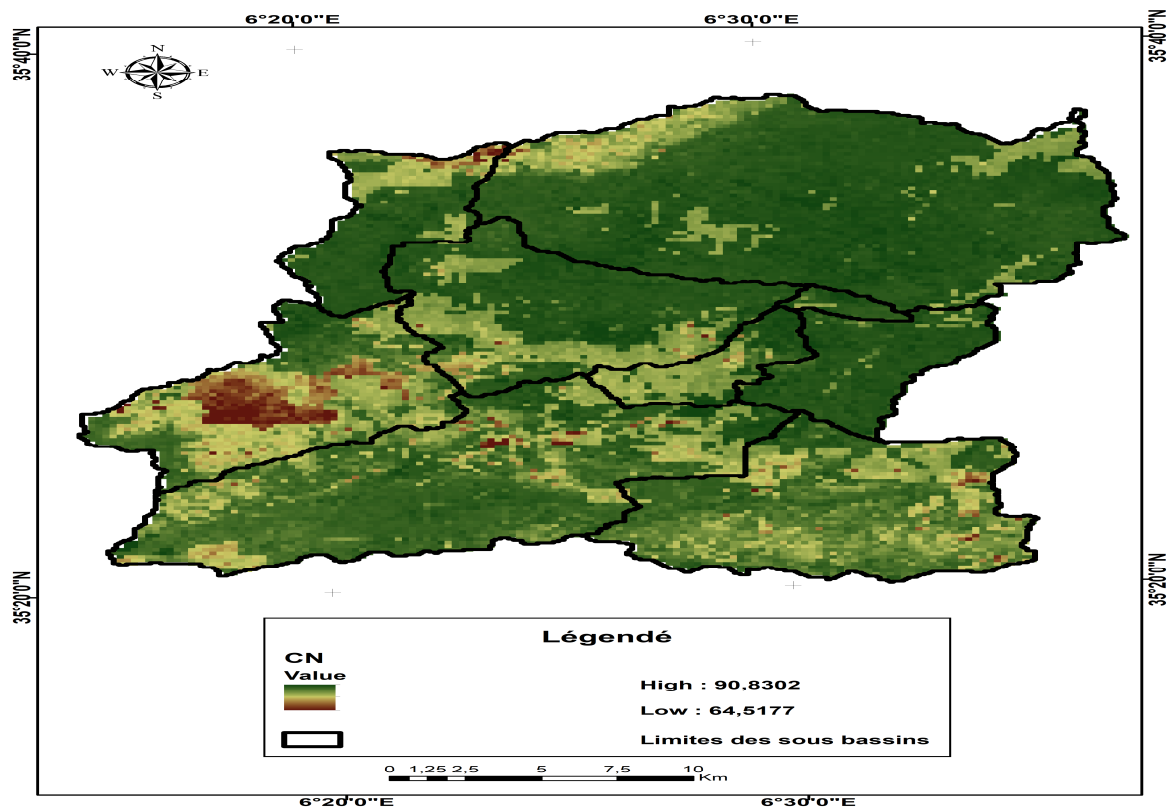


Figure IV.24 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 30/08/1991

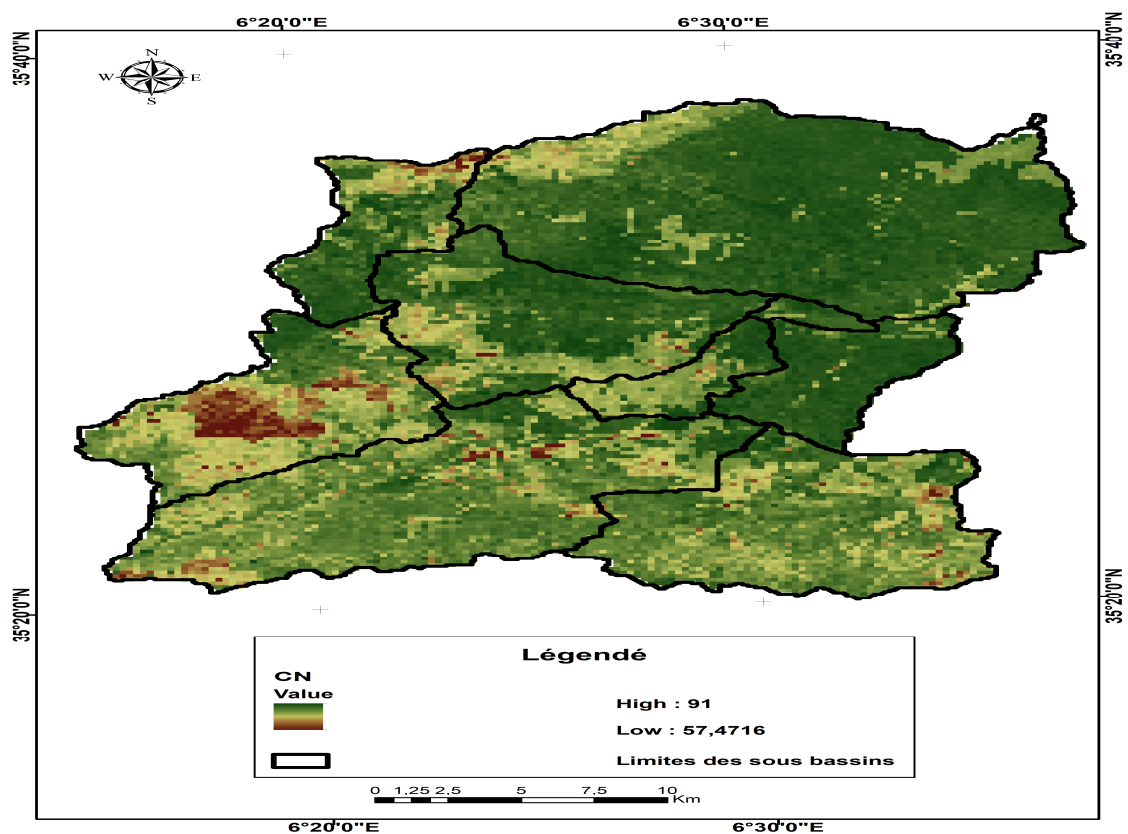


Figure IV.25 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 28/09/1991

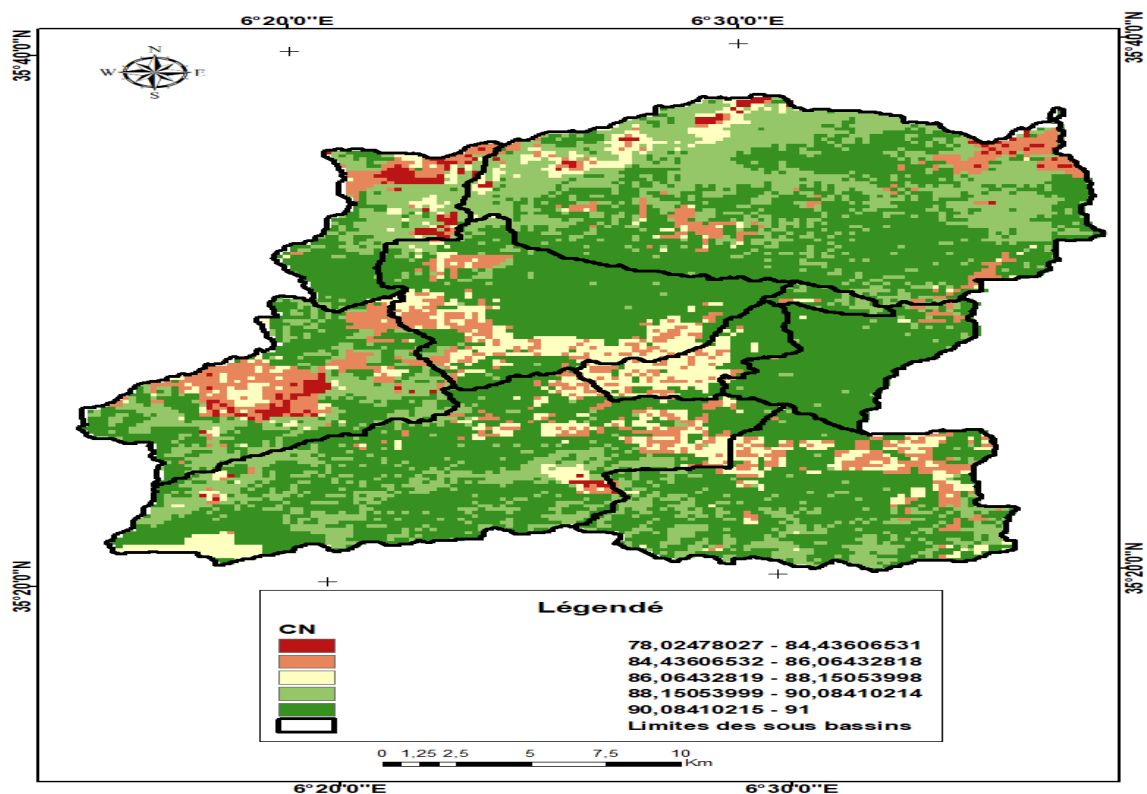


Figure IV.26 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 02/01/1991

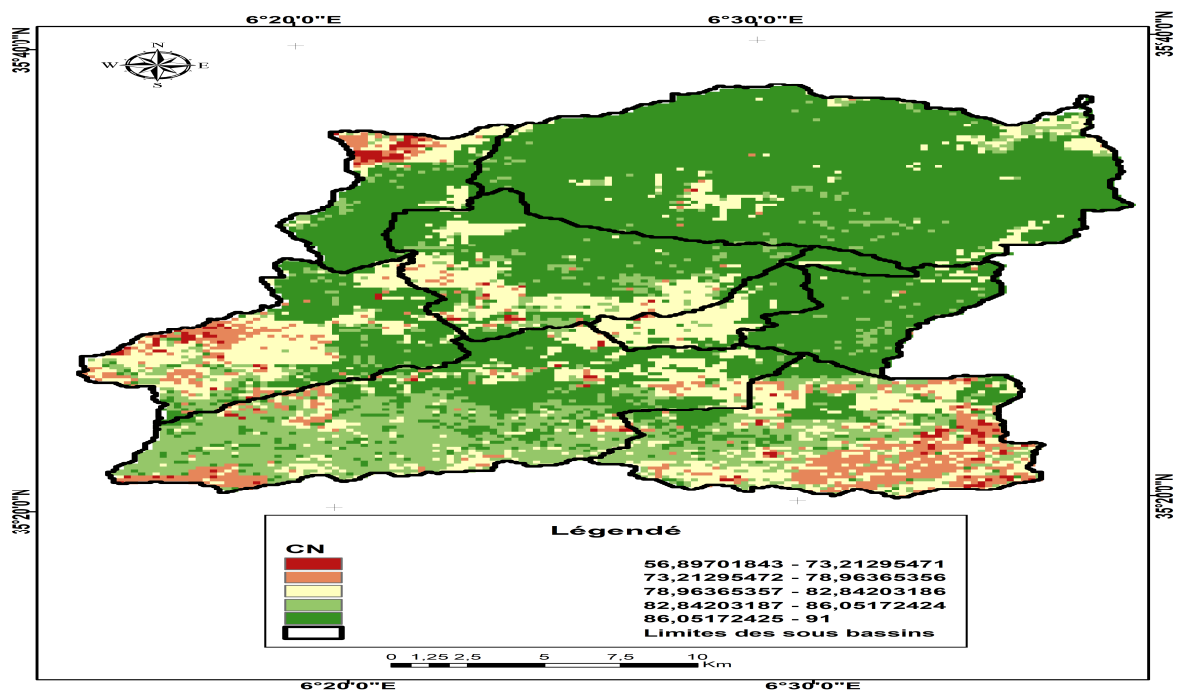


Figure IV.27 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 30/10/1990

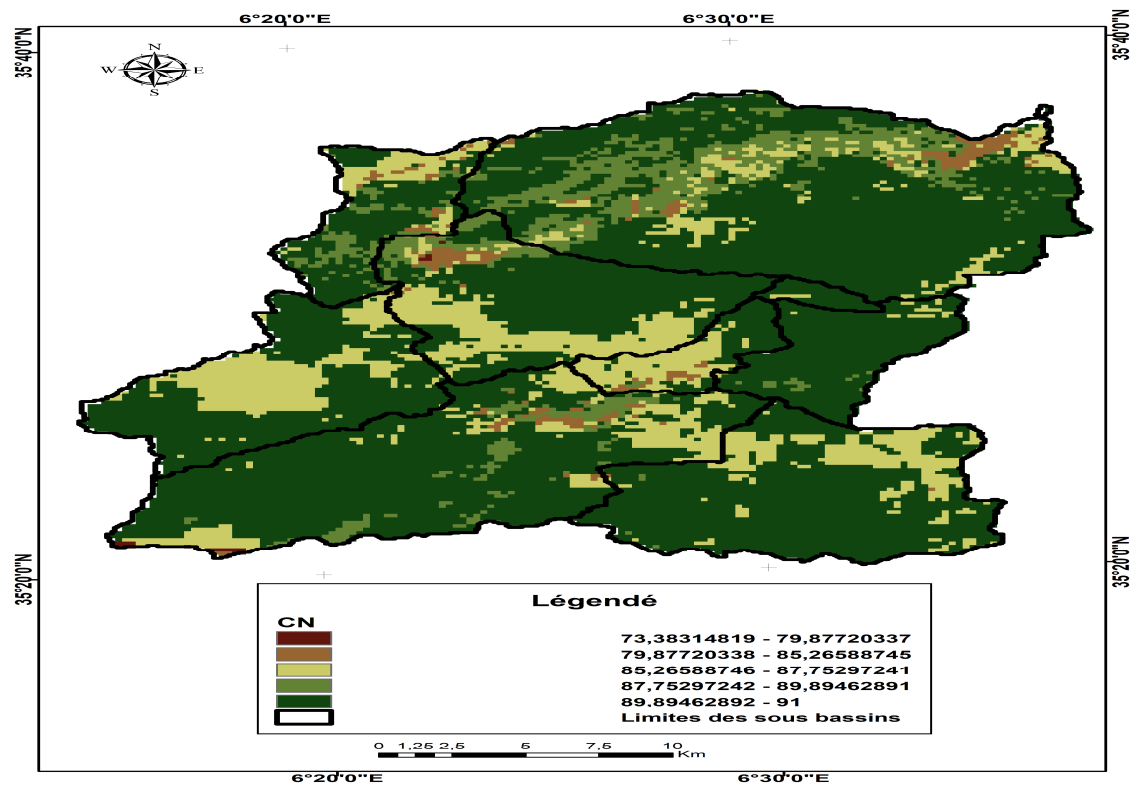


Figure IV.28 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 15/11/1990

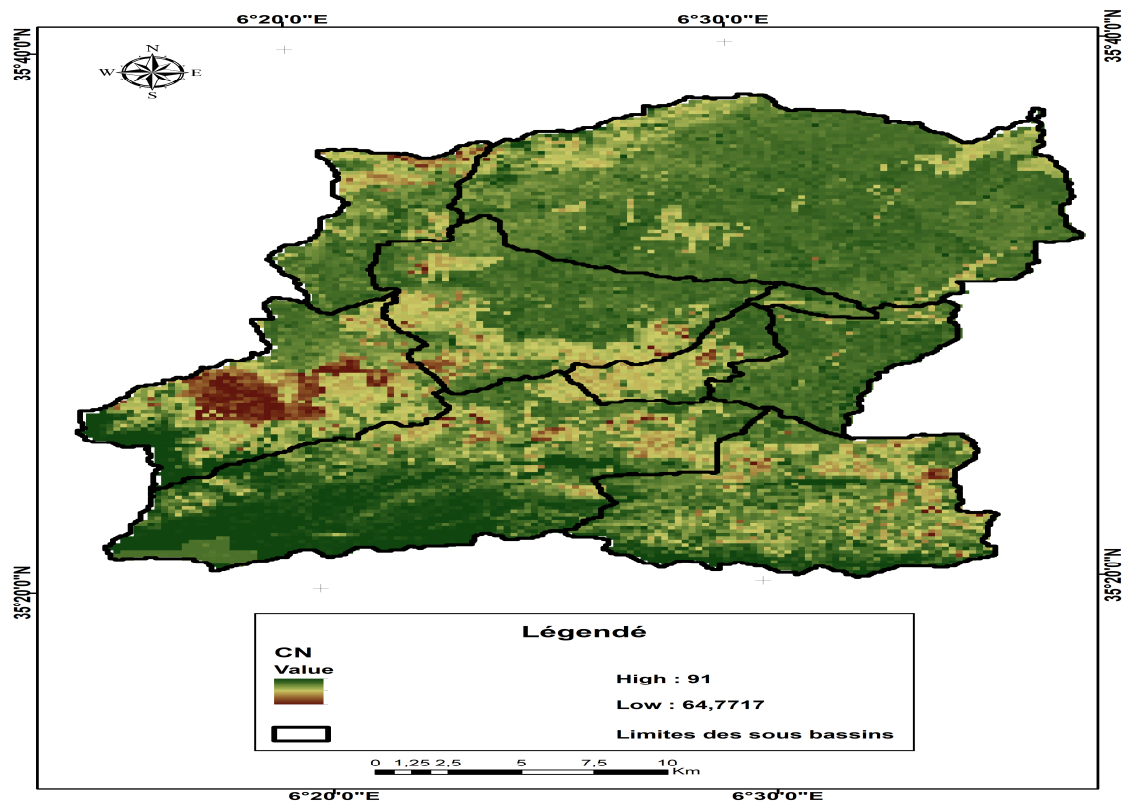


Figure IV.29 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 17/12/1990

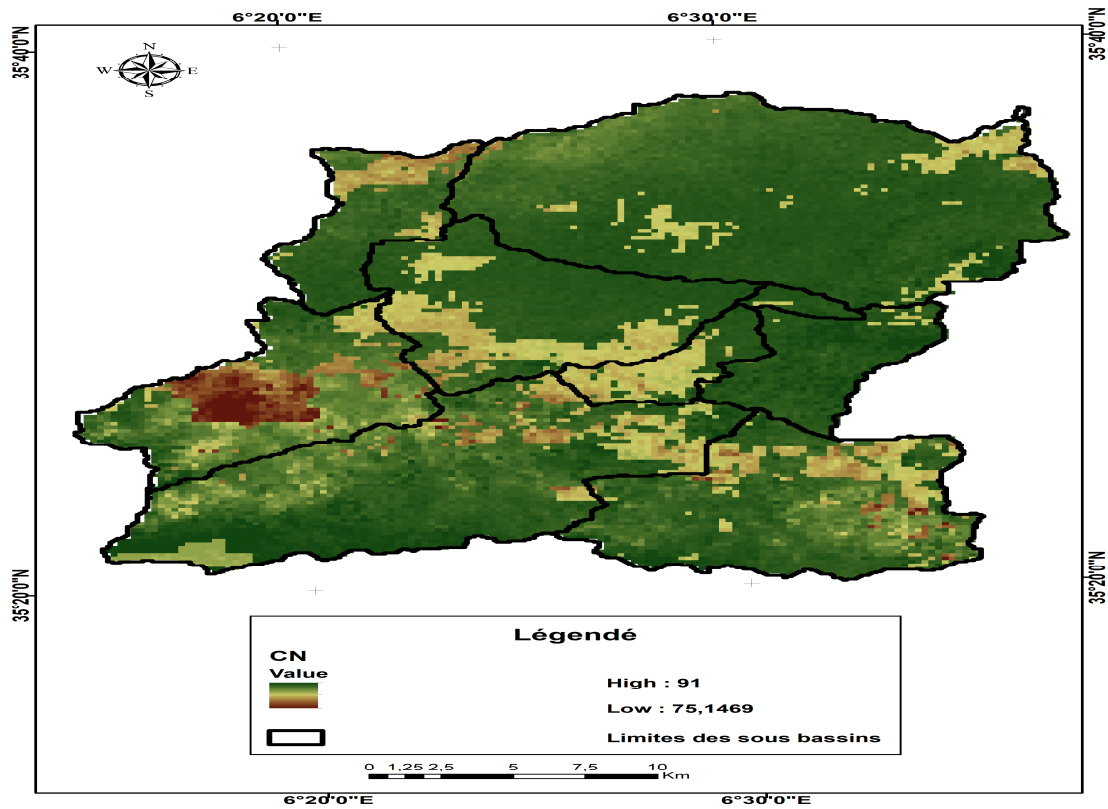


Figure IV.30 : Carte des valeurs de CN en sous bassins B V Chemora du 03/02/1991

Tableau IV.2 : Résultats des valeurs de CN chaque sous bassin 1990 /1991 :

N°S/Bassin	02/01/1991	30/10/1990	15/11/1990	17/12/1990
BV01	89,57	81,82	90,14	84,80
BV02	89,65	84,29	90,00	86,74
BV03	88,65	83,29	89,63	81,49
BV04	90,38	86,78	90,71	86,85
BV05	88,23	83,94	88,36	82,99
BV06	89,18	85,25	89,32	84,56
BV07	88,57	84,57	89,33	84,16
BV08	89,97	86,90	90,58	85,89
BV09	89,53	87,21	89,88	86,05

N°S/Bassin	03/02/1991	23/03/1991	08/04/1991	10/05/1991
BV01	88,29	82,68	80,37	78,17
BV02	88,68	83,41	80,99	78,50
BV03	86,44	80,08	77,73	76,31
BV04	89,94	85,57	83,66	81,26
BV05	87,23	82,88	81,25	79,35
BV06	88,34	83,57	81,19	79,16
BV07	88,18	82,84	79,38	76,28
BV08	89,72	85,09	83,15	81,78
BV09	89,30	84,46	82,36	80,16

N°S/Bassin	27/06/1991	27/07/1991	30/08/1991	28/09/1990
BV01	81,48	84,27	84,29	85,76
BV02	81,92	84,81	85,03	85,74
BV03	79,07	81,56	81,20	83,52
BV04	86,43	87,77	87,74	83,18
BV05	83,38	84,64	84,67	84,26
BV06	84,49	85,88	85,97	78,82
BV07	82,12	85,23	85,52	86,81
BV08	85,86	87,27	87,27	82,24
BV09	85,28	86,80	86,99	82,14

b- Abstraction Initiale Ia : Correspond aux pertes initiales provenant durant la première phase de l'événement pluvieux, dû aux interceptions, au stockage naturel dans les dépressions,...etc..

c- La pluie :

La pluie sous forme d'une hauteur tombée sur le sous bassin pendant le jour de cet événement est survenu, au quelle nous associons la distribution NRCS type 2.

Le nombre d'événements choisis est de 06.

Et les événements sélectionnés sont :

Le 15 Novembre 1990, 23 Mars 1991, 08 Avril 1991, 10 Mai 1991, 27 Juin 1991 et 27 Juillet 1991.

Nous appliquerons la pluviométrie journalière enregistrée aux stations pluviométriques situées dans le bassin aux mêmes dates, comme variable d'entrée pour le modèle HEC-HMS.

Cette dernière est estimée pour chaque sous bassins à partir des cartes des précipitations élaborées à partir des pluies enregistrées aux niveaux des stations pluviométriques du bassin total.

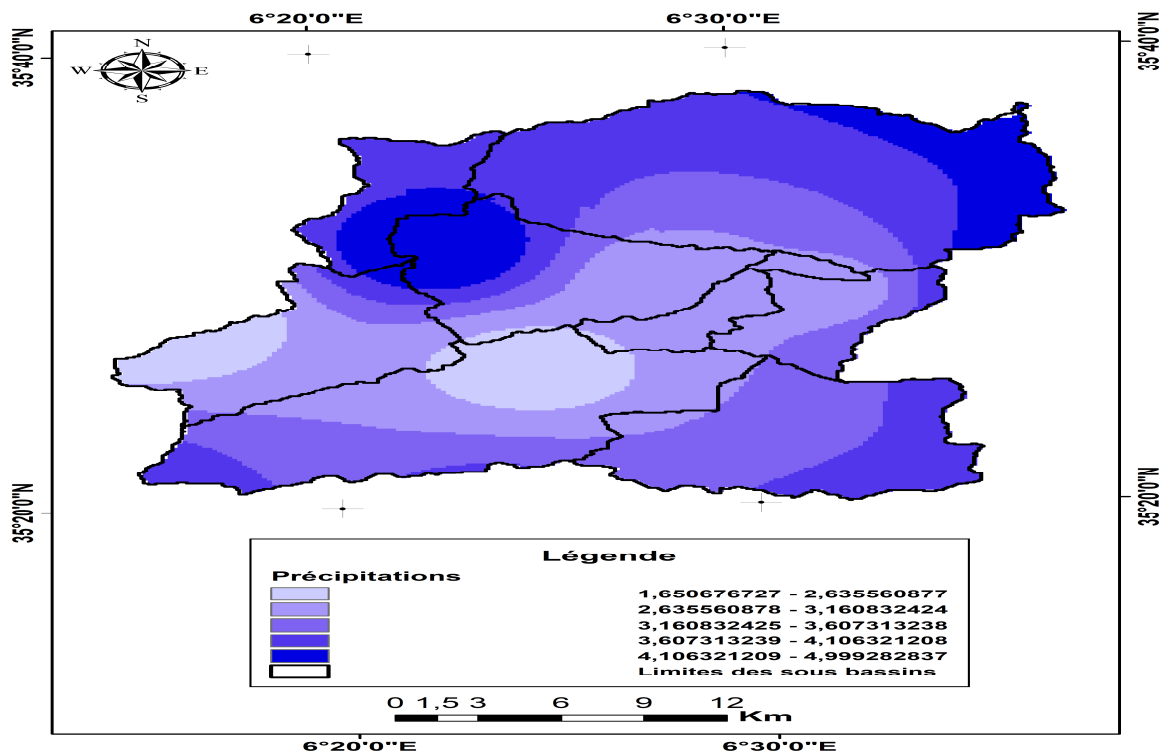


Figure IV.31 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 02 /01/1991

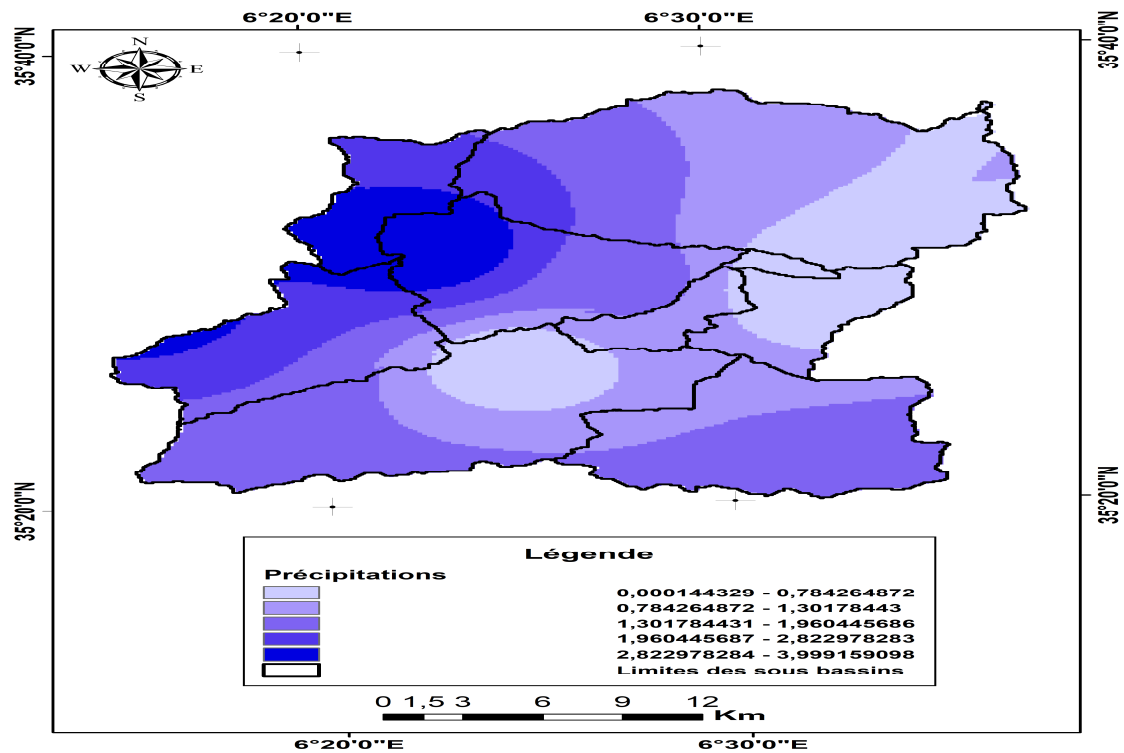


Figure IV.32 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 30/10/1990

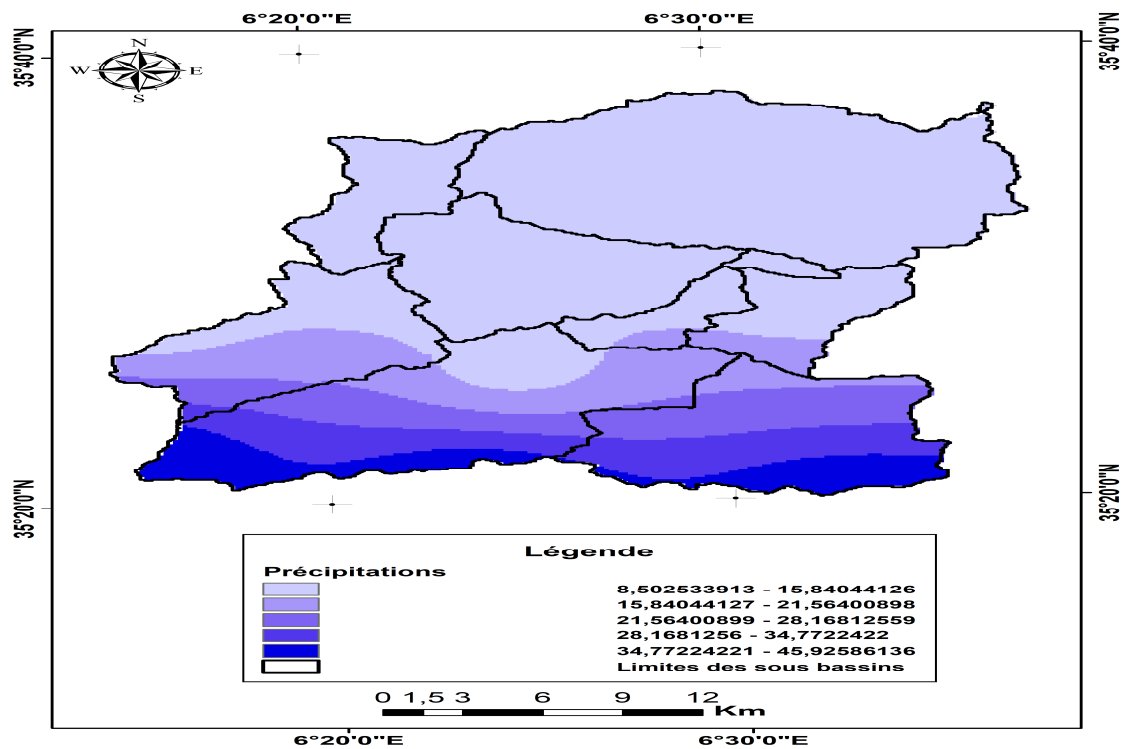


Figure IV.33 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 15/11/1990

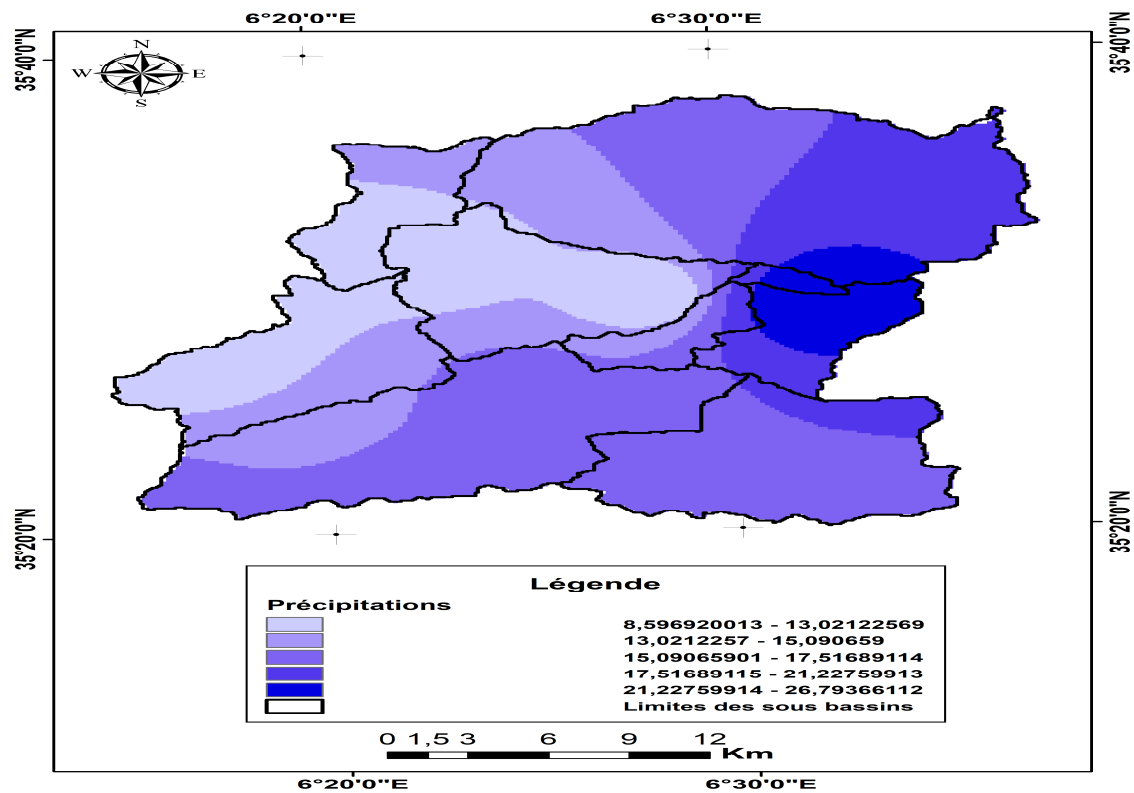


Figure IV.34 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 17/12/1990

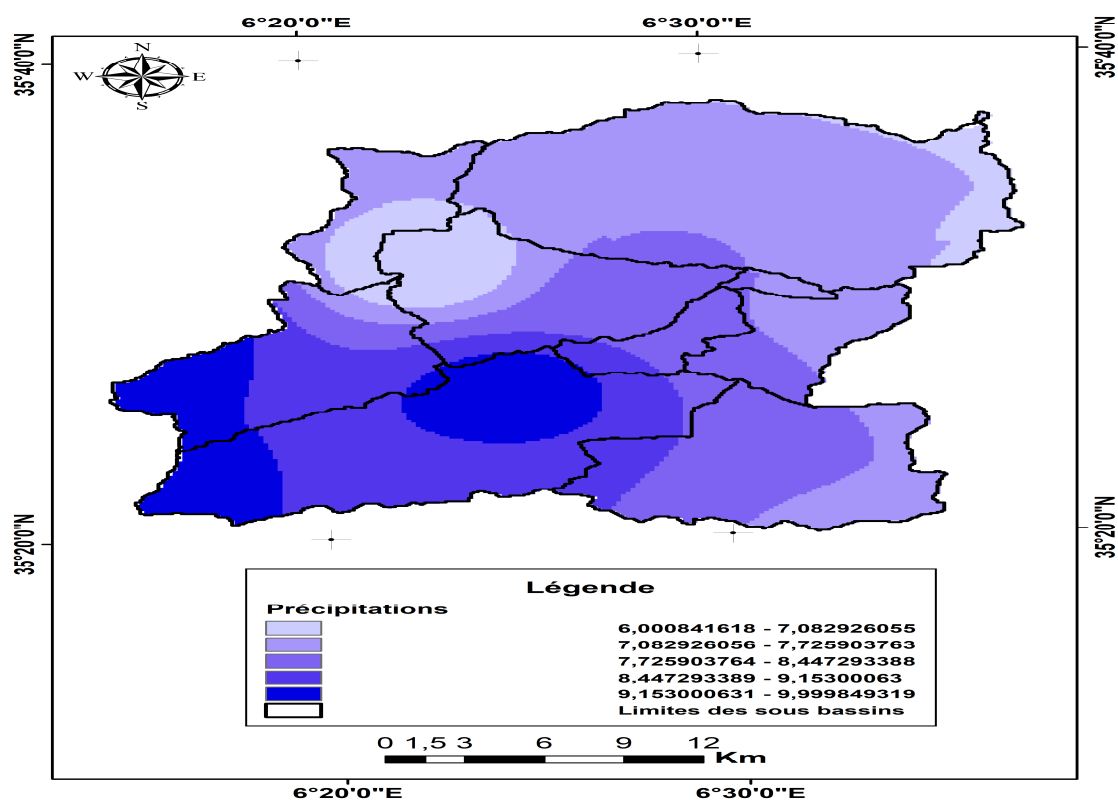


Figure IV.35 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 03/02/1991

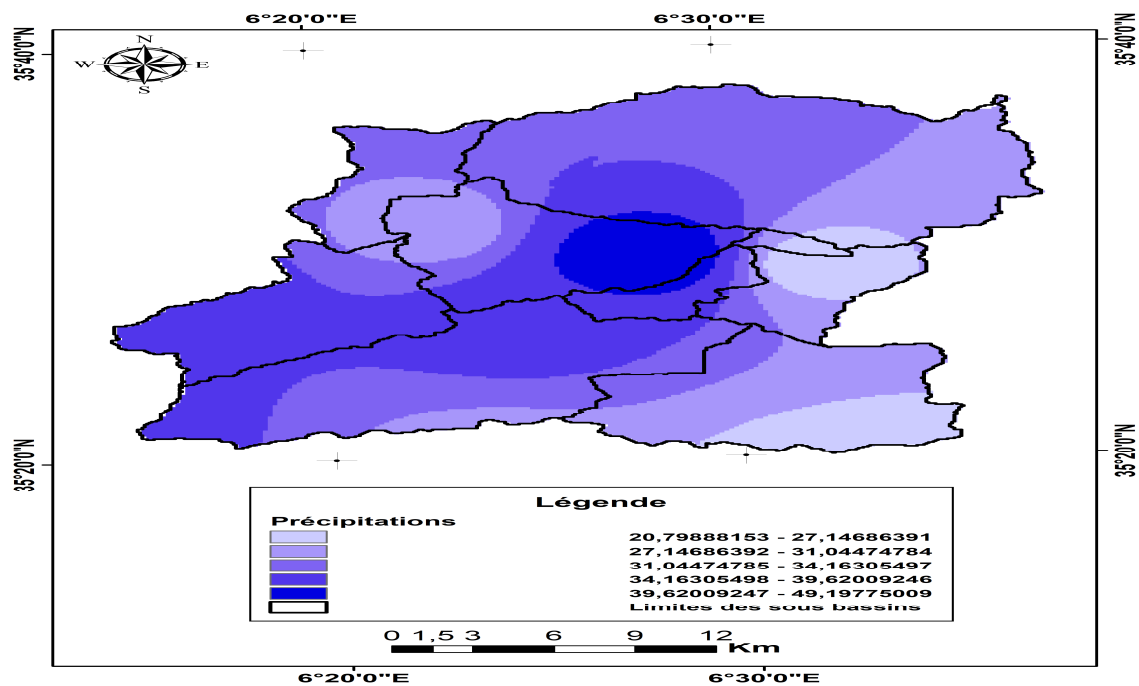


Figure IV.36 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 23/03/1991

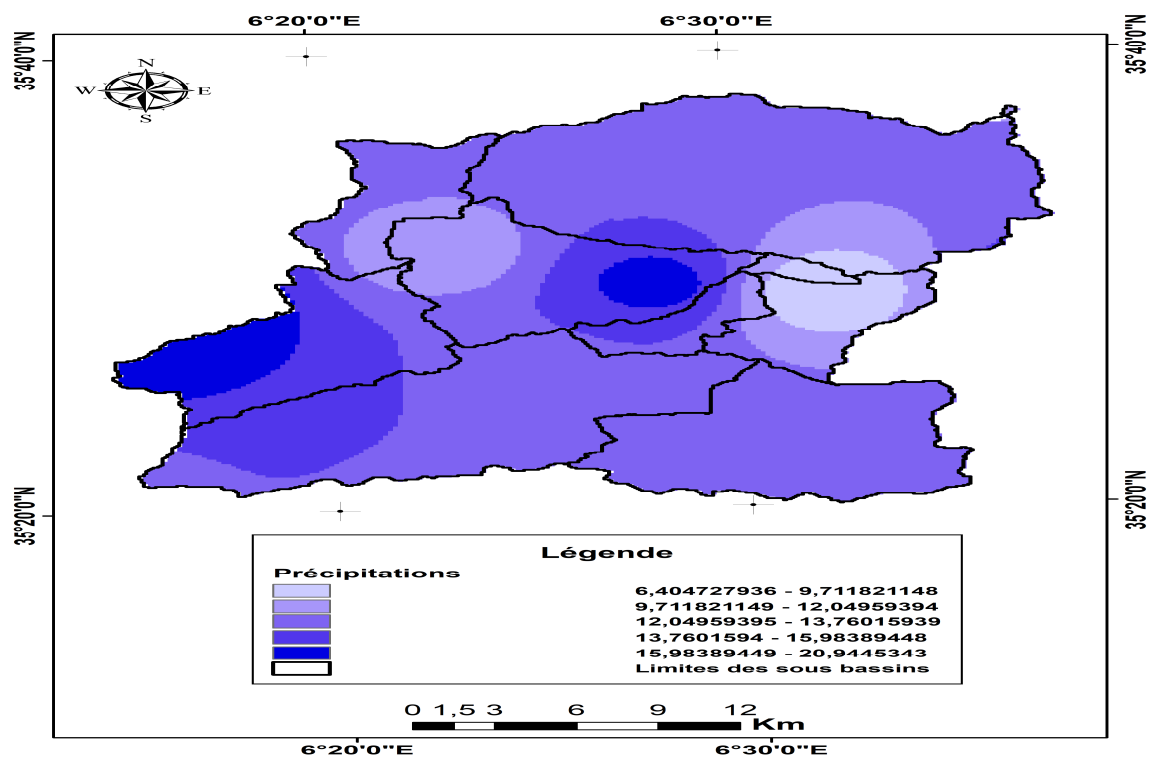


Figure IV.37 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 08/04/1991

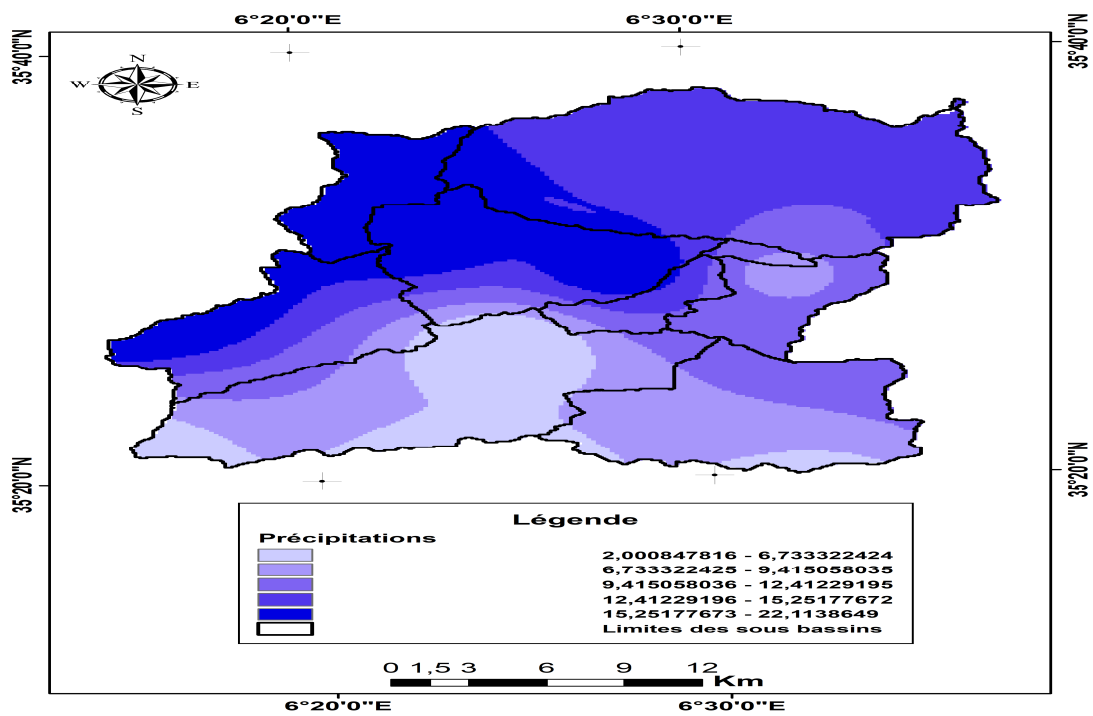


Figure IV.38 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 10/05/1991

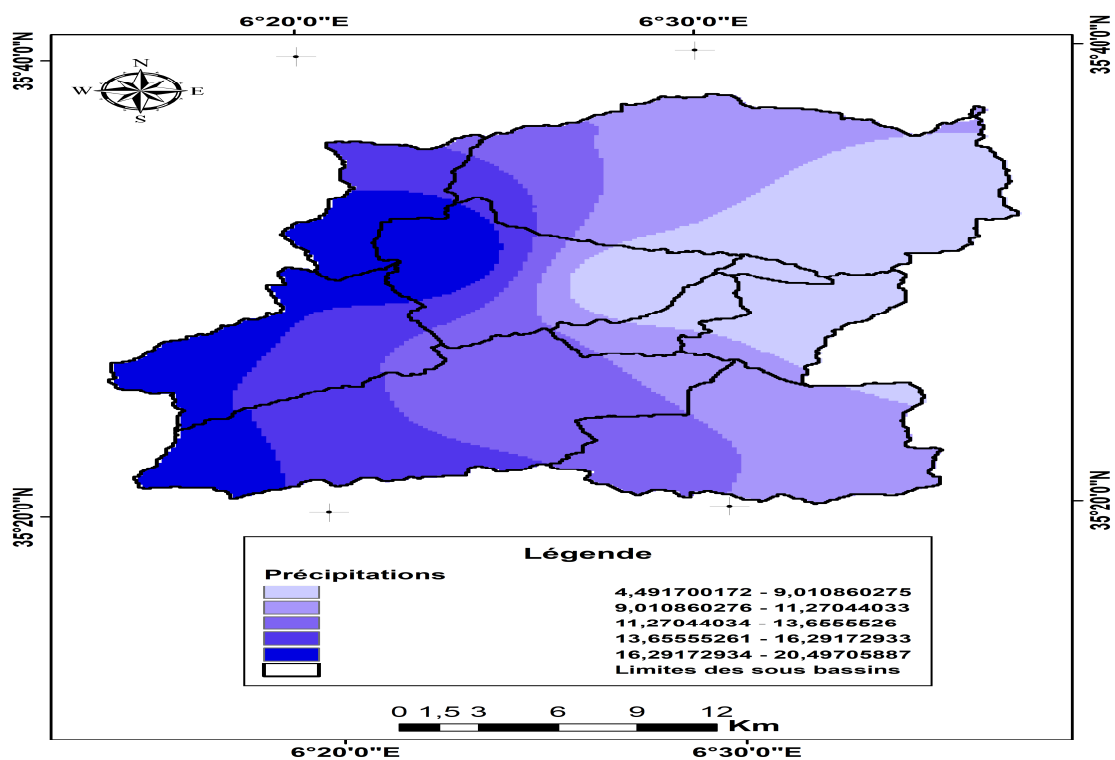


Figure IV.39 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 27/06/1991

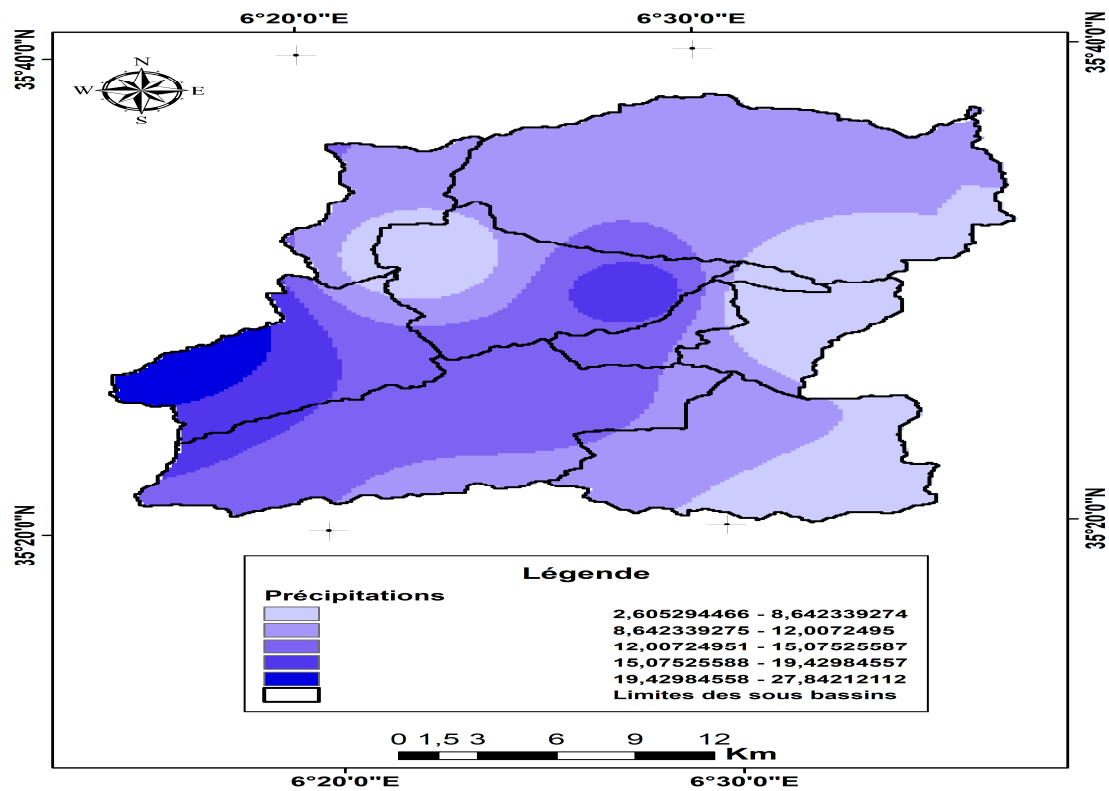


Figure IV.40 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 29/07/1991

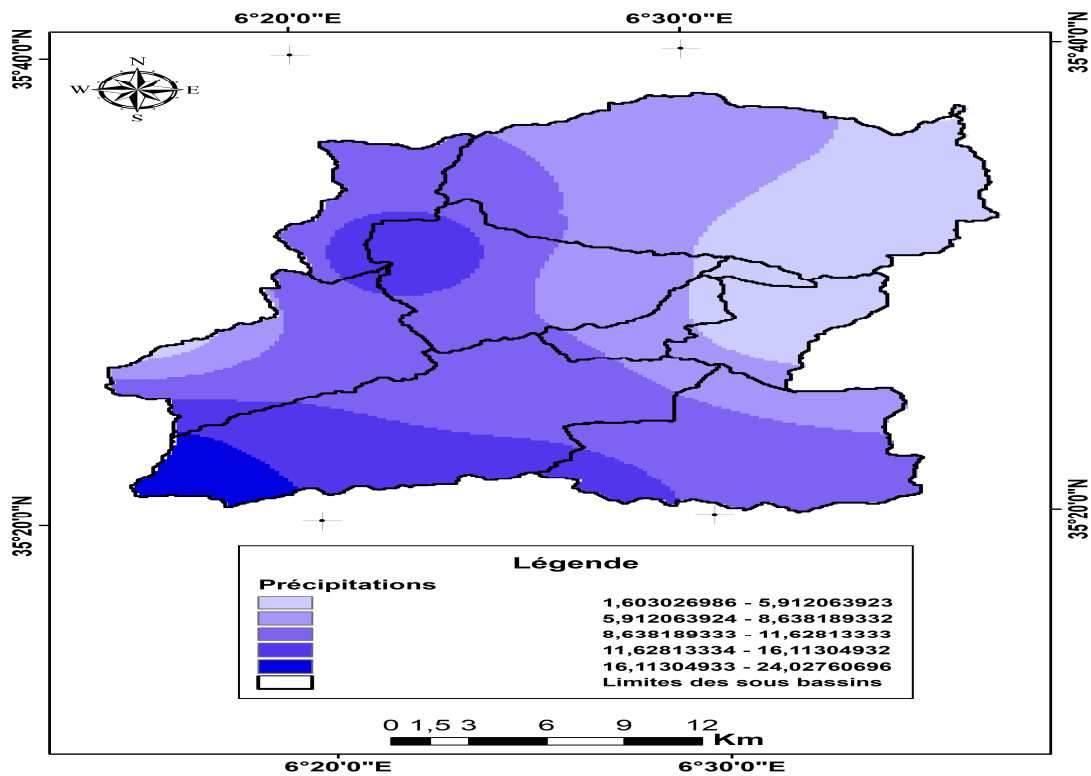


Figure IV.41 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 30/08/1991

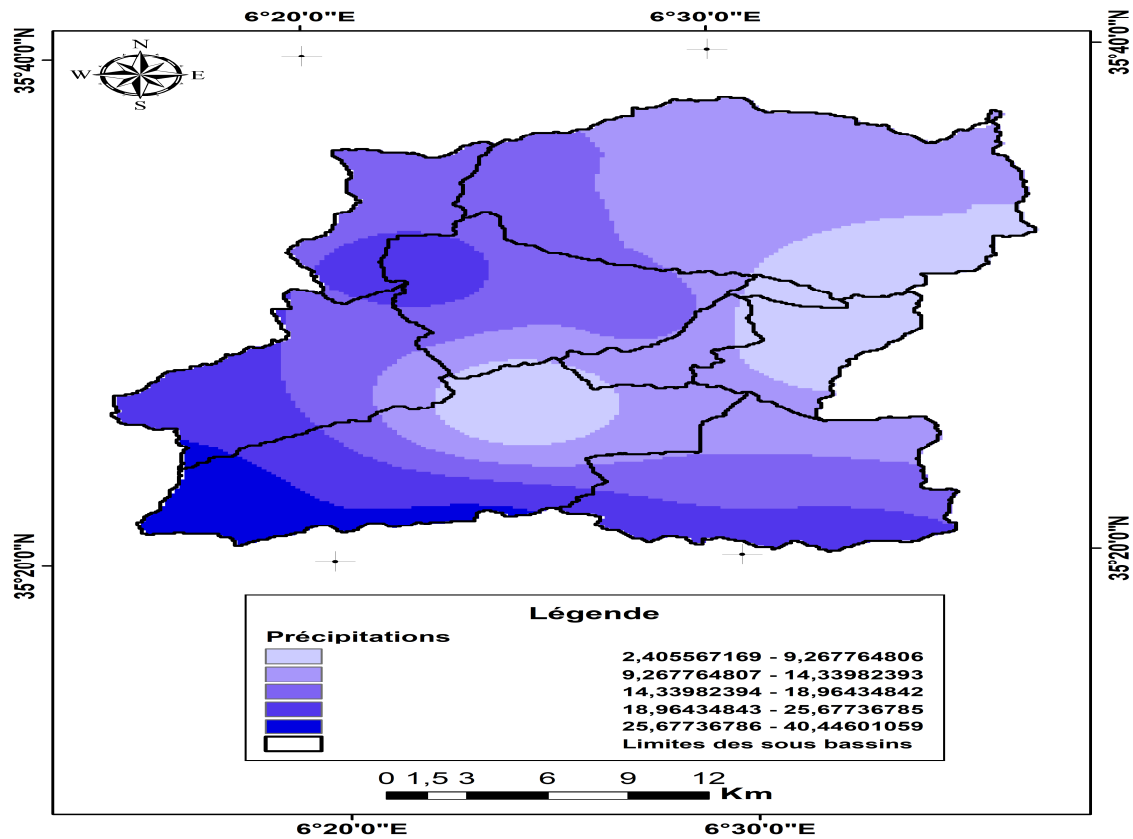


Figure IV.42 : Carte des précipitations Moyenne B V Chemora du 28/09/1991

Tableau IV.3 : Les valeurs de la pluie Moyenne du **1990 / 1991** estimées aux différents sous bassins formant le bassin Chemora.

02/01/1991		08/04/1991	
N°S/Bassin	P moy	N°S/Bassin	P moy
BV01	3,50	BV01	13,17
BV02	3,01	BV02	13,55
BV03	2,89	BV03	15,38
BV04	3,20	BV04	9,91
BV05	2,88	BV05	13,39
BV06	3,54	BV06	13,42
BV07	4,08	BV07	12,36
BV08	3,03	BV08	8,80
BV09	3,80	BV09	12,55

30/10/1990		10/05/1991	
N°S/Bassin	P moy	N°S/Bassin	P moy
BV01	1,40	BV01	8,53
BV02	1,13	BV02	6,76
BV03	2,20	BV03	13,93
BV04	0,51	BV04	10,34
BV05	1,01	BV05	11,93
BV06	2,17	BV06	15,21
BV07	2,85	BV07	16,39
BV08	0,35	BV08	10,13
BV09	1,15	BV09	14,03

15/11/1990		27/06/1991	
N°S/Bassin	P moy	N°S/Bassin	P moy
BV01	29,50	BV01	10,92
BV02	25,63	BV02	13,88
BV03	17,26	BV03	16,11
BV04	14,66	BV04	8,31
BV05	15,20	BV05	9,34
BV06	12,83	BV06	13,05
BV07	11,69	BV07	16,50
BV08	13,18	BV08	8,21
BV09	13,60	BV09	9,57

17/12/1990		27/07/1991	
N°S/Bassin	P moy	N°S/Bassin	P moy
BV01	16,72	BV01	8,76
BV02	15,55	BV02	13,38
BV03	12,62	BV03	16,77
BV04	22,09	BV04	6,49
BV05	15,99	BV05	12,26
BV06	12,74	BV06	11,58
BV07	12,70	BV07	9,88
BV08	23,33	BV08	5,59
BV09	17,23	BV09	10,06

03/02/1991		30/08/1991	
N°S/Bassin	P moy	N°S/Bassin	P moy
BV01	7,99	BV01	9,91
BV02	9,13	BV02	12,65
BV03	8,80	BV03	9,85
BV04	7,70	BV04	4,19
BV05	8,29	BV05	7,11
BV06	7,60	BV06	9,71
BV07	7,08	BV07	10,74
BV08	7,67	BV08	3,16
BV09	7,36	BV09	6,47

23/03/1991		28/09/1990	
N°S/Bassin	P moy	N°S/Bassin	P moy
BV01	28,28	BV01	11,83
BV02	34,18	BV02	5,57
BV03	34,93	BV03	18,02
BV04	27,57	BV04	11,07
BV05	37,01	BV05	15,87
BV06	36,63	BV06	18,80
BV07	31,27	BV07	6,71
BV08	26,70	BV08	16,95
BV09	32,19	BV09	18,04

VI.7. La fonction de transfert : l'hydrogramme unitaire de la NRCS :

La fonction de transfert choisie dans cette étude est l'hydrogramme unitaire de la NRCS.

a- Le concept de base :

Cet hydrogramme développé par le NRCS exprime le débit U_t comme proportionnel au débit de pointe U_p , pour chaque temps t , fraction du temps de pointe T_p .

$$U_p = C \times A/T_p \quad (\text{VI.1})$$

Avec, A : surface du bassin versant ;

C : constante de conversion (2.08 pour le système international).

Le temps de pointe T_p est relié à la durée de la pluie nette par la formule :

$$T_p = T_{\text{lag}} \times \Delta t/2 \quad (\text{VI.2})$$

Où : Δt : la durée de la pluie nette (c'est le pas de temps de simulation) ;

T_{Lag} : le Lag du bassin (différence entre le pic de la pluie nette et le pic de l'hydrogramme).

Une fois le T_{Lag} calculé, le modèle résout l'équation (VI.1), puis (VI.2) pour trouver successivement le temps et le débit de pointe de l'hydrogramme, qui vont permettre de concevoir l'hydrogramme de simulation en reposant sur le principe de linéarité de la réponse.

b- Les paramètres :

Le seul paramètre de cette méthode est le T_{Lag} , il sera calculé directement par la formule NRCS définie comme suit :

$$T_{lag} = L^{0,8} \times \left(\left(\left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \right) + 1 \right)^{0,7} / (1900 \times \sqrt{Y}) \quad (VI.3)$$

Avec, T_{Lag} : le lag en heures ;

L : la longueur depuis l'exutoire jusqu'à l'amont du plus grand cours d'eau en pied ;

CN : le curve number composite du bassin ;

Y : pente du bassin en %.

IV.8 Le débit de base : la récession exponentielle :

IV.8.1 Le concept de base :

Ce formalisme donne la possibilité de simuler la contribution du réservoir souterrain au débit avant et après le pic ou les pics de l'événement de crue, et ceci en établissant une relation exponentielle entre le débit à deux temps consécutifs, cette relation est formalisée par l'équation :

$$Q_t = Q_0 \times k^t \quad (VI.4)$$

Où, Q_t : le débit au temps t ;

Q_0 : le débit initial ;

K : la constante de décroissance exponentielle.

IV.8.2 La variable :

La seule variable d'entrée est le débit initial pour chaque événement de crue, issu de la lecture son hydrogramme.

IV.8.3 Les paramètre :

Les deux paramètres du module sont :

a- La constante de récession RC : Ce paramètre dépend des propriétés hydrogéologiques du réservoir souterrain. Elle varie entre 0 et 1. Si sa valeur vaut 1, la contribution du module sera constante avec $Q_t = Q_0$. Puisque, on n'a pas d'informations permettant d'attribuer une valeur initiale à ce paramètre, et que sa valeur peut être calibrée, on se contentera de la valeur 0,1 en attendant sa calibration.

b- Le seuil Td : lui aussi varie entre 0 et 1. Il est lié au débit de pointe sous forme de rapport. De même que le RC, on se contentera de la valeur 0,1 en attendant sa calibration.

c- Le lag des rivières : Pour le calcul des lag des rivières, nous avons opté pour la formule de [hantaway\(1945\)](#) proposée par le service NRCS :

$$T_c = 0.6061 N^{0.47} L^{0.47} S^{-0.234} \quad (\text{VI.5})$$

Tableau IV.4: Rugosité des matériaux

Description	N
Pavement	0.02
Smooth, bare packed soil	0.10
Poor grass, cultivated row crops or moderately rough bare surfaces	0.20
Pasture, average grass	0.40
Deciduous forest	0.60
Dense grass, coniferous forest, or deciduous forest with deep litter	0.80

VI.9. Modèle hydro-sédimentologique (Erosion - Transport solide) :

Le modèle que nous avons opté pour notre étude l'approche ([Williams, 1976](#)) Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) pour calculer l'érosion dans le bassin versant, et sept fonctions de transport pour calculer le transport dans les rivières.

MUSLE est une approche largement appliquée et très empirique pour estimer les transports solides de chaque averse. Il ne tient plus compte de l'érosivité de la pluie comme pour USLE et RUSLE, mais du débit de pointe et du volume ruisselé. L'équation MUSLE, se présente sous la forme suivante pour un événement pluvieux donné sur un bassin versant :

$$SY = 11,8. (Q \cdot qp)^{0,56} \cdot K \cdot C \times P \times LS \times Lv \quad (VI.6)$$

SY : production en sédiments d'un événement particulier (tonnes)

Q : volume de ruissellement consécutif à l'averse (m^3) au niveau du bassin versant

Qp : débit de pointe (m^3/s)

Lv : longueur du versant

Les autres termes, K, C, P et LS sont les mêmes que ceux de l'USLE où (RUSLE).

K = indice d'érodibilité des sols à l'érosion hydrique (tonne. heure / Newton. hectare)

LS = facteur topographique dépendant de la pente et sa longueur

C = facteur de culture, incluant le couvert végétal (occupation du sol) ;

P = facteur de conservation et d'aménagement.

Pour déterminer les différents paramètres de ce modèle, nous avons suivi l'organigramme suivant en utilisant l'Arc-Gis.

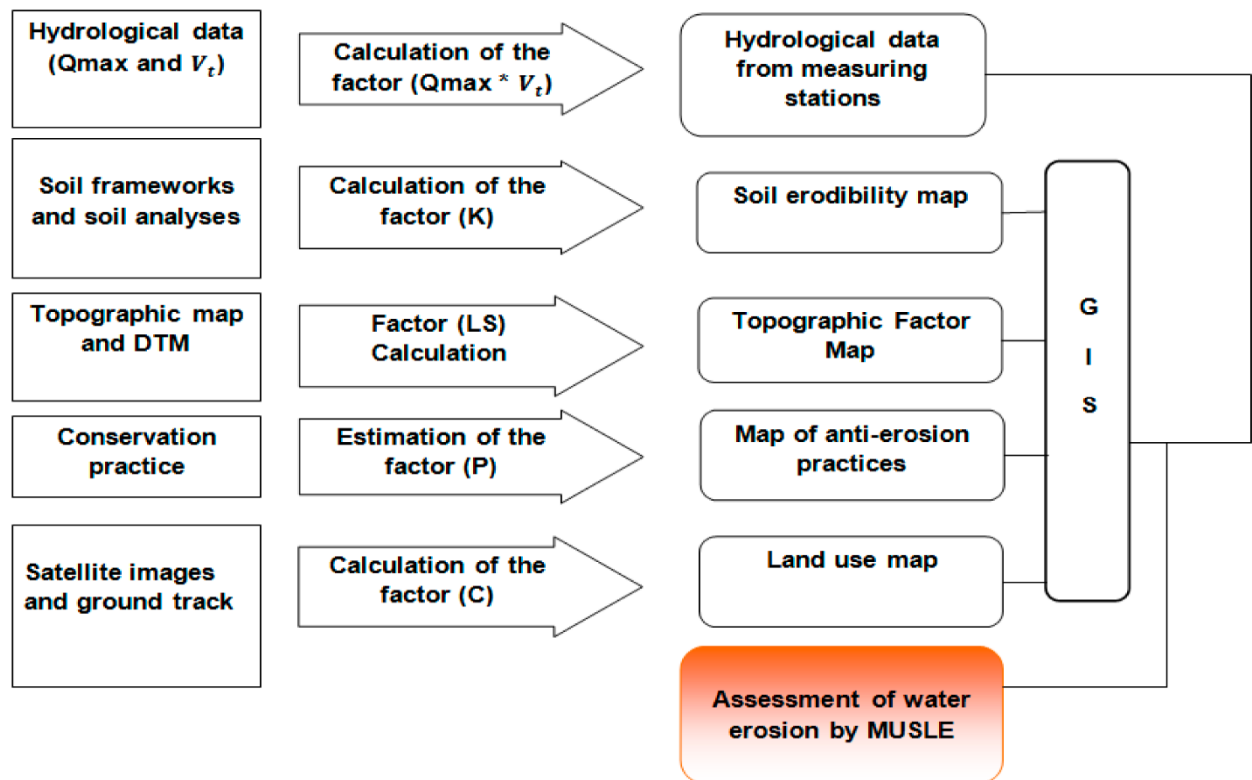


Figure IV.43 : Organigramme

VI.9.1. Facteur de l'érodabilité des sols (K) :

Le facteur d'érodabilité (K) d'un sol définit la résistance du sol au détachement et au transport. Il s'agit d'un indice important pour mesurer la sensibilité des sols à l'érosion hydrique et un paramètre essentiel nécessaire à la prévision de l'érosion des sols. Il dépend des caractéristiques du profil du sol telles que la texture du sol, la stabilité des agrégats, la résistance au cisaillement, la capacité d'infiltration, le contenu organique et chimique sur la perte de sol.

Il se détermine pour un sol donné par la relation de [WISHMEIER W.H. et SMITH D.D. \(1978\)](#) :

$$K = 10^{-4} [2.1 \times M^{1.14} \times 10^{-4}(12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)] \times 13.17 \quad (\text{VI.7})$$

Où :

K : Erodabilité annuelle moyenne du sol en (ton ha h/MJ ha mm)

M : est calculé par la formule : $M = (\% \text{ sable fin} + \% \text{ limon}) \times (100 - \% \text{ argile})$;

a : est le pourcentage de matière organique dans le sol = $CO \times 1,724$;

b : est le code de la structure ;

c : est le code de la perméabilité.

Cette équation comprend 6 paramètres de sol et de profil de sol: pourcentage de l'argile (0,000-0,002 mm), pourcentage de limon (0,002-0,050 mm), pourcentage de sable très fin (0,05-0,1 mm), pourcentage de matière organique (a), code de la classe de structure (b) du sol et code de perméabilité du sol (c).

Pour calculer M, nous avons extraie les cartes des pourcentages du sable, du limon et de l'argile à partir du site (<ftp:soilgrids.org>).

En utilisant la formule de Bernard C ([Bernard, C. 1990](#)).

$$\% \text{ de sable très fin [0,05 à 0,10]} = (\% \text{ de sable [0,05 à 2,00]})^{0,576} \times (\% \text{ argile [0,000 à 0,002]})^{0,06} \quad (\text{VI.8})$$

La carte du pourcentage de contenu organique dans le sol est extraie également à partir du même site.

Pour la détermination des codes de structure du sol, le triangle de texture tel qu'illustré à la figure **IV.53**) qui est identique à la pyramide de texture du sol produit par l'USGS est utilisé en suivant l'algorithme Tableau (**IV.10**).

Egalement lors de la détermination des codes de perméabilité des sols, nous avons utilisé le triangle de perméabilité (IV.51) selon l'algorithme (IV.8).

Un diagramme schématisant la procédure globale pour déterminer la valeur du facteur K est donné à la figure IV.44. Les valeurs du facteur K qui ont été déterminées pour toutes les séries de sols dans le bassin versant sont indiquées dans la carte (figure IV. 55).

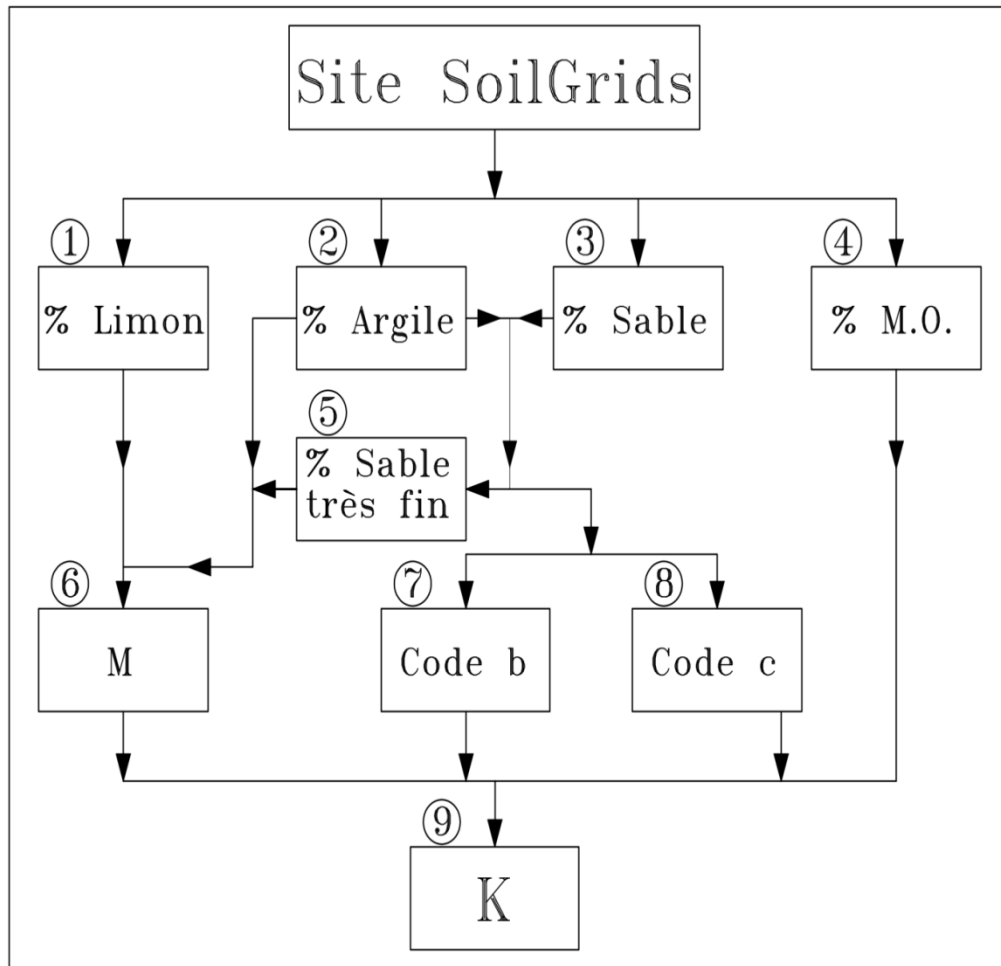


Figure IV.44 : *Organigramme*

a- Pourcentage de limon Li (0,002-0,050 mm) :

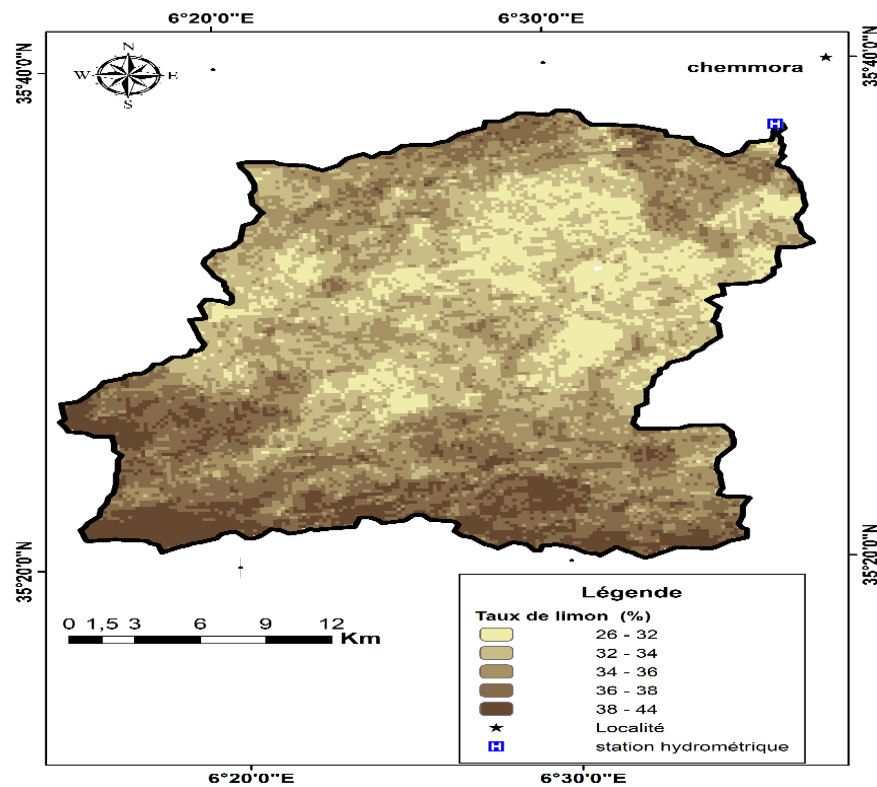


Figure IV.45 : Carte limon

b- Pourcentage d'argile Ar (0,000 - 0,002 mm) :

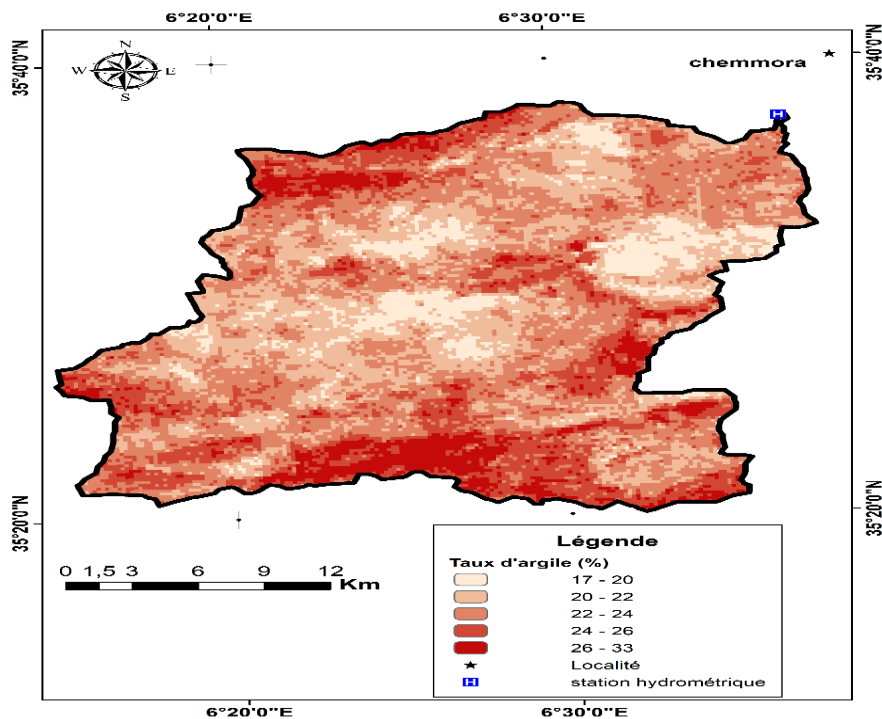


Figure IV. 46. : Carte d'argile

c- Pourcentage de sable Sa (0,05 - 2,00 mm) :

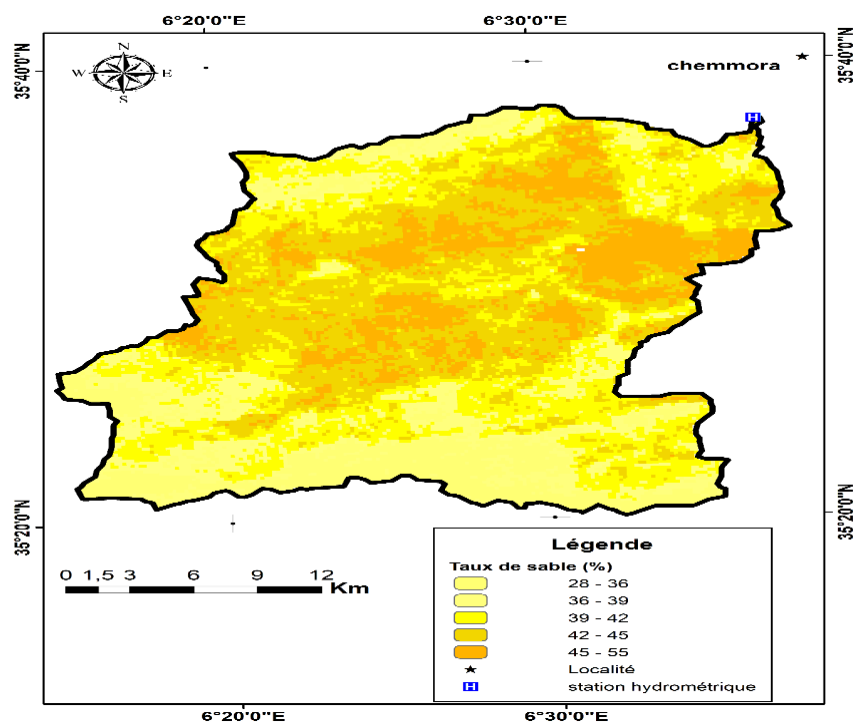


Figure IV.47 : Carte sable

d- Pourcentage de matière organique (a) :

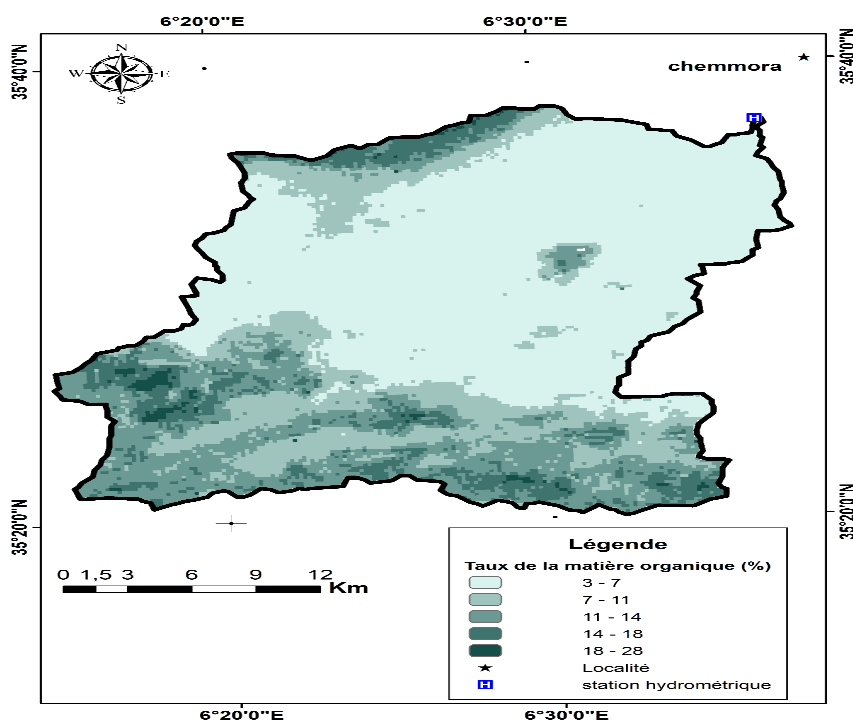


Figure IV.48 : Carte da matière organique

e- Pourcentage de sable très fin S_{fin} (0,05 - 0,10 mm) :

Lorsque le pourcentage de sable très fin (STF') d'une série de sol n'est pas disponible directement à partir des rapports pédologiques, il peut être estimé à l'aide d'une relation similaire à la suivante (Bernard1990b)

$$S_{fin} = Sa^{0,576} \times Ar^{0,06} \quad (VI.9)$$

Où :

Sa = % de sable du sol(s) [0,05 à 2,000 mm],

Ar = % de l'argile du sol(s) [0,000 à 0,002 mm],

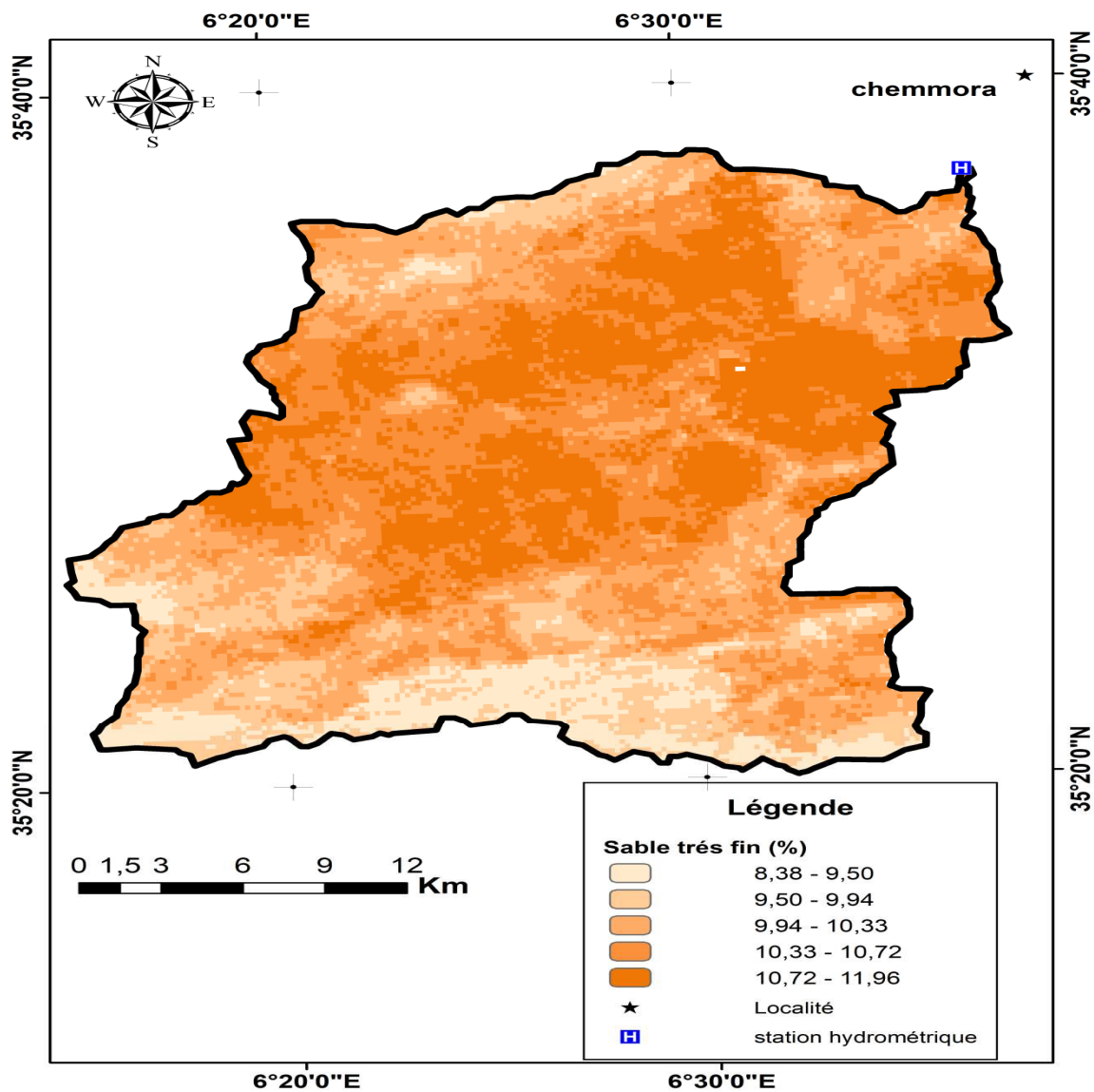


Figure IV.49 : Carte sable fin

f- La carte M

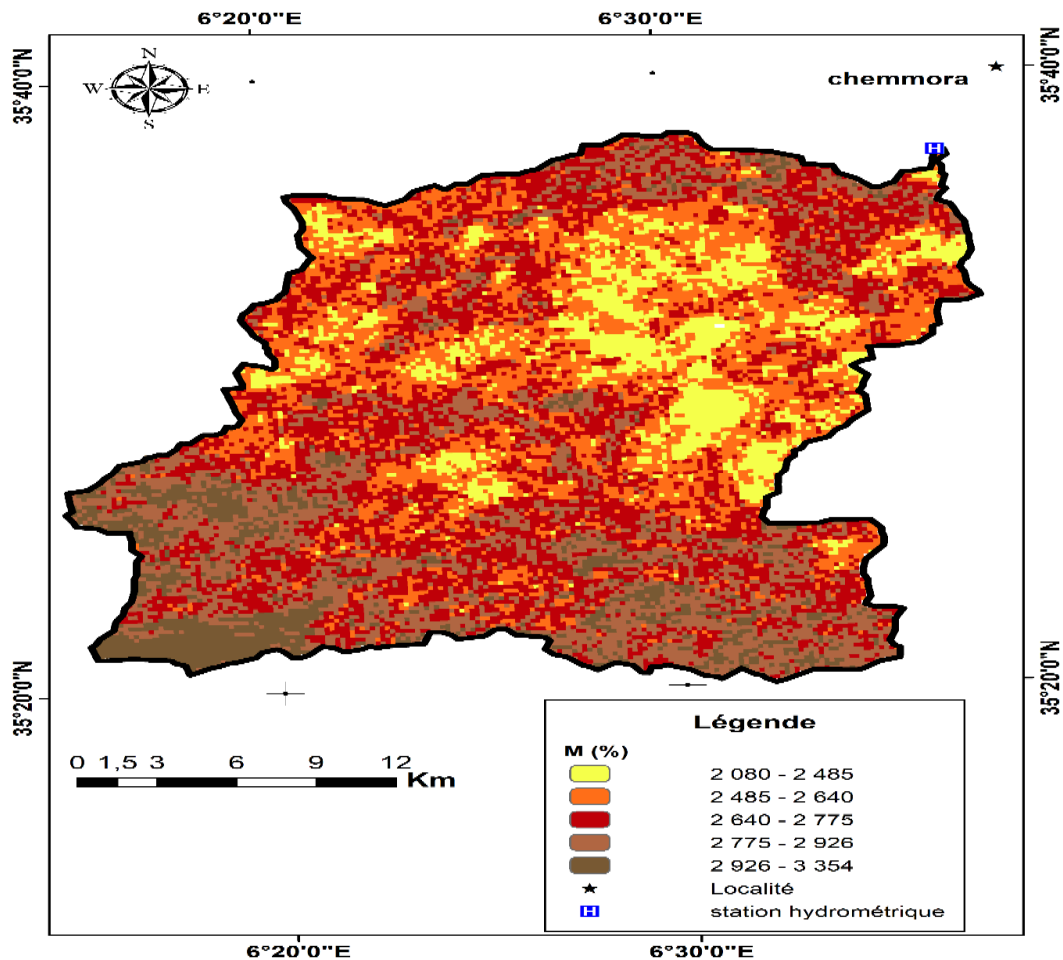


Figure IV.50 : Carte M

g- Code de la classe de perméabilité (b) du sol

Le tableau (IV.5) donne les informations sur les différentes couches de sol à prendre en compte dans la détermination du facteur K pour un site particulier. En règle générale, les valeurs de K pour la couche A sont utilisées lorsque le sol est à l'état naturel et n'est pas perturbé, tandis que les valeurs respectives des couches de sol B et C sont utilisées pour déterminer la perte de sol sur les chantiers de construction car ces couches sont normalement laissées exposées, après action mécanique.

Tableau IV.5 : couche de sol pour les séries de sols en Malaisie

Couche de texture	Profondeur de la couche de sol
A (sole de surface)	0.00 – 0.50
B (sous-sol)	0.51 – 1.00
C (substrat)	1.01 – 1.50

Tableau IV.6 : code de perméabilité du sol basé sur la classe de texture du sol

Texture du sol	Code de perméabilité ²	Groupe de sol hydrologie ¹
Argile lourde, Argile	6	D
Limon argileux limoneux, Argile sableuse	5	C - D
Limon argileux sableux, loam argileux	4	C
Loam, limon limoneux	3	B
Sable limoneux, loam sableux	2	A
Le sable	1	A+

Remarque: 1- National Soil Handbook (SCS, 1983)

2- National Engineering Handbook (SCS, 1972)

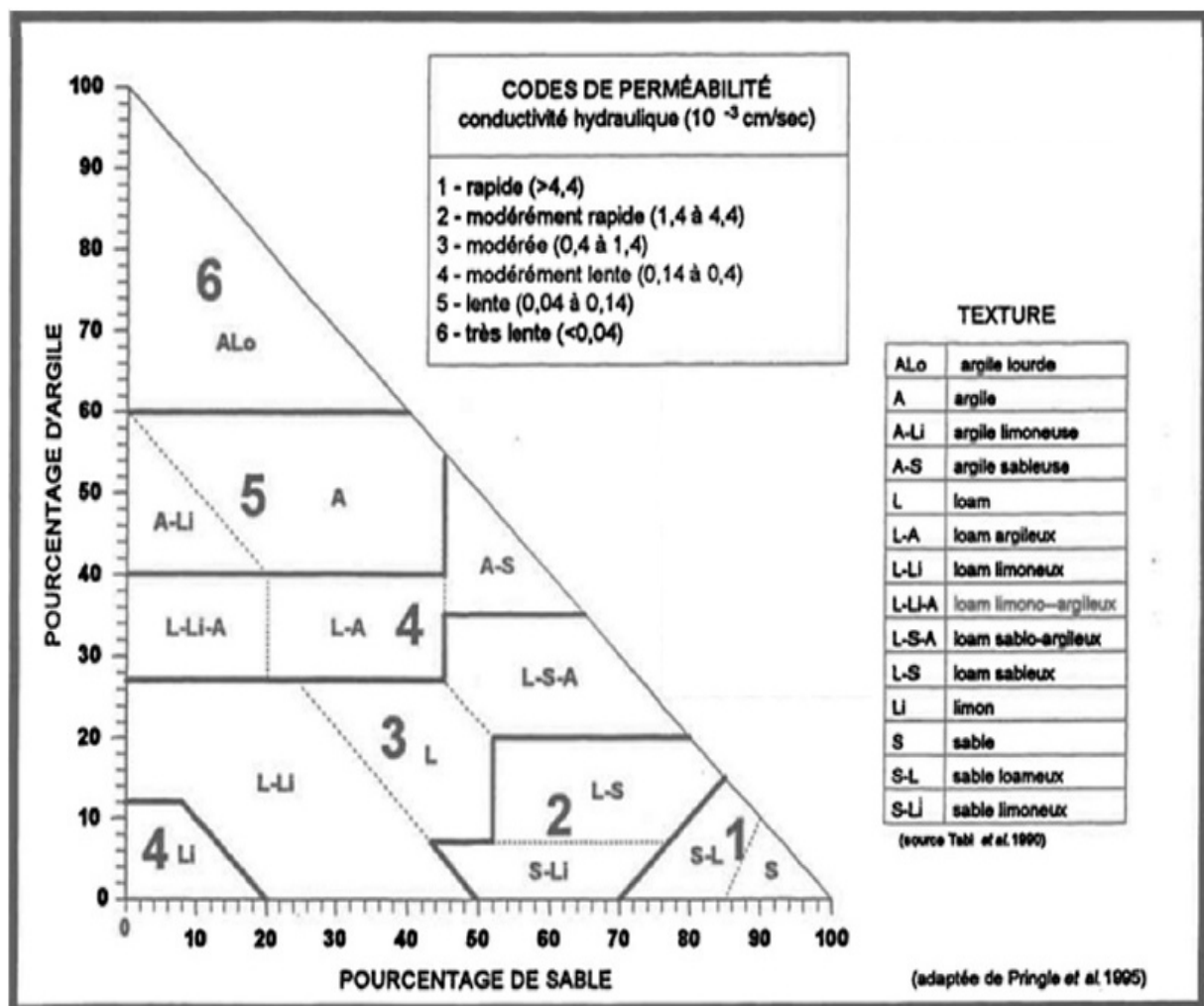


Figure IV.51 : codes de perméabilité basés sur la classification des textures (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

Tableau IV.7 : Codification de la perméabilité du sol (b_p) (Wischmeier et Smith, 1978)

Degré de perméabilité	Code de perméabilité b_p
Rapide	1
Modérée à rapide	2
Modérée	3
Modérée à lente	4
Lente	5
Très lente	6

Tableau IV.8 : algorithme pour détermine de la perméabilité du sol (b_p) (Berghout A. 2020)

Cas	Classe	% Sable	% Argile	condition	Code Perméabilité
1	1_1	$X < 7$	$Y < 13$		4
2	1_2	$X < 7$	$13 < Y < 27$		3
3	1_3	$X < 7$	$27 < Y < 40$		4
4	1_4	$X < 7$	$40 < Y < 60$		5
5	1_5	$X < 7$	$Y > 60$		6
6	2_1_1	$7 < X < 20$	$Y < 13$	$X+Y < 20$	4
7	2_1_2	$7 < X < 20$	$Y < 13$	$X+Y > 20$	3
8	2_2	$7 < X < 20$	$13 < Y < 27$		3
9	2_3	$7 < X < 20$	$27 < Y < 40$		4
10	2_4	$7 < X < 20$	$40 < Y < 60$		5
11	2_5	$7 < X < 20$	$Y > 60$		6
12	3_1	$20 < X < 25$	$Y < 27$		3
13	3_2	$20 < X < 25$	$27 < Y < 40$		4
14	3_3	$20 < X < 25$	$40 < Y < 60$		5
15	3_4	$20 < X < 25$	$Y > 60$		6
16	4_1	$25 < X < 43$	$Y < 27$		3
17	4_2	$25 < X < 43$	$27 < Y < 40$		4
18	4_3	$25 < X < 43$	$40 < Y < 60$		5
19	4_4	$25 < X < 43$	$Y > 60$		6
20	5_1_1	$43 < X < 45$	$Y < 7$	$X+Y < 50$	3
21	5_1_2	$43 < X < 45$	$Y < 7$	$X+Y > 50$	2
22	5_2	$43 < X < 45$	$7 < Y < 27$		3

Cas	Classe	% Sable	% Argile	condition	Code Perméabilité
23	5_3	$43 < X < 45$	$27 < Y < 40$		4
24	5_4	$43 < X < 45$	$Y > 40$		5
25	6_1_1	$45 < X < 50$	$Y < 7$	$X+Y < 50$	3
26	6_1_2	$45 < X < 50$	$Y < 7$	$X+Y > 50$	2
27	6_2	$45 < X < 50$	$7 < Y < 37$		3
28	6_3	$45 < X < 50$	$Y > 37$		4
29	7_1	$50 < X < 53$	$Y < 7$		2
30	7_2	$50 < X < 53$	$7 < Y < 37$		3
31	7_5	$50 < X < 53$	$Y > 37$		4
32	8_1	$53 < X < 70$	$Y < 20$		2
33	8_2	$53 < X < 70$	$20 < Y < 37$		3
34	8_3	$53 < X < 70$	$Y > 37$		4
35	9_1_1	$70 < X < 85$	$Y < 15$		1
36	9_1_2	$70 < X < 85$	$Y < 15$		2
37	9_2	$70 < X < 85$	$15 < Y < 20$		2
38	9_3	$70 < X < 85$	$Y > 20$		3
39	10	$X > 85$			1

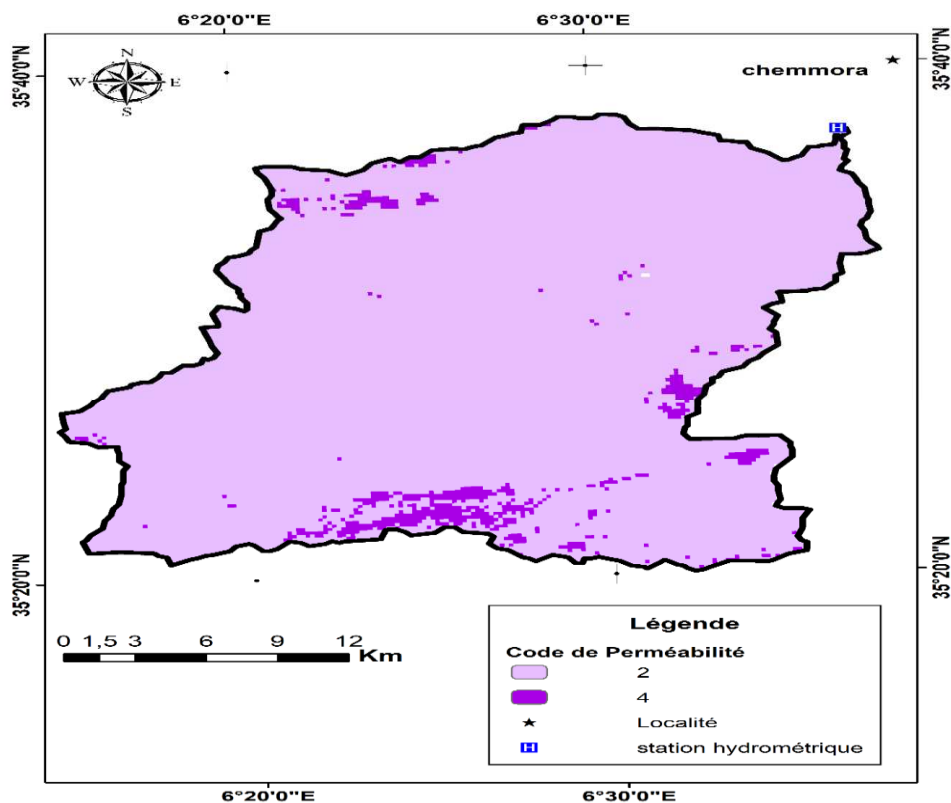
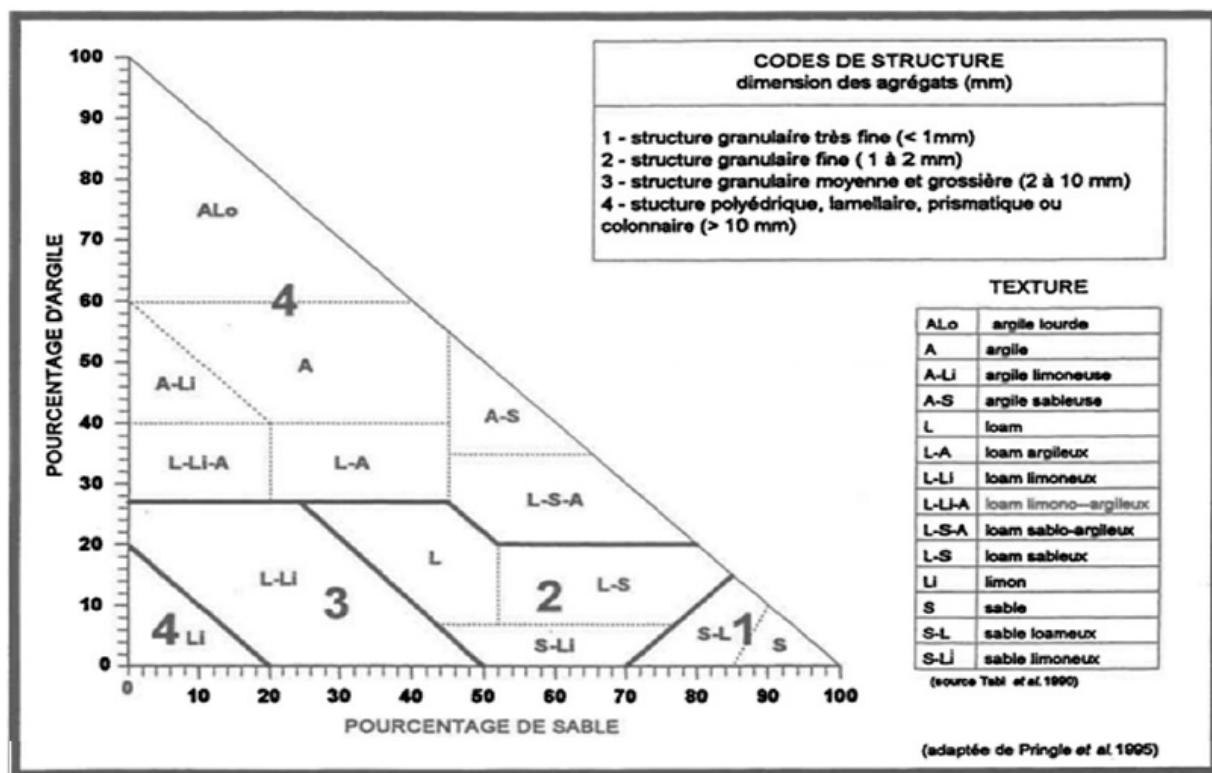


Figure IV.52 : Carte code de perméabilité**h- Code de la classe de structure (c) du sol****Tableau IV.9** : Codification de la structure des sols (c_s) (Wischmeier et Smith, 1978)

Nature de la structure	Code de la structure C_s
Très structuré ou particulaire	1
Assez structuré	2
Peu structuré	3
Non structuré	4

**Figure IV.53** : Code Structure basée sur la texture (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)**Tableau IV.10** : algorithme pour détermine la structure des sols (c_s) (Berghout A. 2020)

Cas	Classe	% Sable	% Argile	condition	Code Structure
1	1_1_1	$X < 20$	$Y < 20$	$X+Y < 20$	4

2	1_1_2	$X < 20$	$Y < 20$	$X+Y > 20$	3
3	1_2	$X < 20$	$20 < Y < 27$		3
4	1_3	$X < 20$	$Y > 27$		4
5	2_1	$20 < X < 24$	$Y < 27$		3
6	2_2	$20 < X < 24$	$Y > 27$		4
7	3_1_1	$24 < X < 45$	$Y < 27$	$X+Y < 50$	3
8	3_1_2	$24 < X < 45$	$Y < 27$	$X+Y > 50$	2
9	3_2	$24 < X < 45$	$Y > 27$		4
10	4_1_1	$45 < X < 50$	$Y < 20$	$X+Y < 50$	3
11	4_1_2	$45 < X < 50$	$Y < 20$	$X+Y > 50$	2
12	4_2_1	$45 < X < 50$	$20 < Y < 27$	$0,75 X + Y < 59,75$	2
13	4_2_2	$45 < X < 50$	$20 < Y < 27$	$0,75 X + Y > 59,75$	4
14	4_3	$45 < X < 50$	$Y > 27$		4
15	5_1	$50 < X < 53$	$Y < 20$		2
16	5_2_1	$50 < X < 53$	$20 < Y < 27$	$0,75 X + Y < 59,75$	2
17	5_2_2	$50 < X < 53$	$20 < Y < 27$	$0,75 X + Y > 59,75$	4
18	5_3	$50 < X < 53$	$Y > 27$		4
19	6_1	$53 < X < 70$	$Y < 20$		2
20	6_2	$53 < X < 70$	$Y > 20$		4
21	7_1_1	$70 < X < 85$	$Y < 15$	$-X + Y < 70$	1
22	7_1_2	$70 < X < 85$	$Y < 15$	$-X + Y > 70$	2
23	7_2	$70 < X < 85$	$15 < Y < 20$		2
24	7_2	$70 < X < 85$	$Y > 20$		4
25	8_1	$X > 85$			1

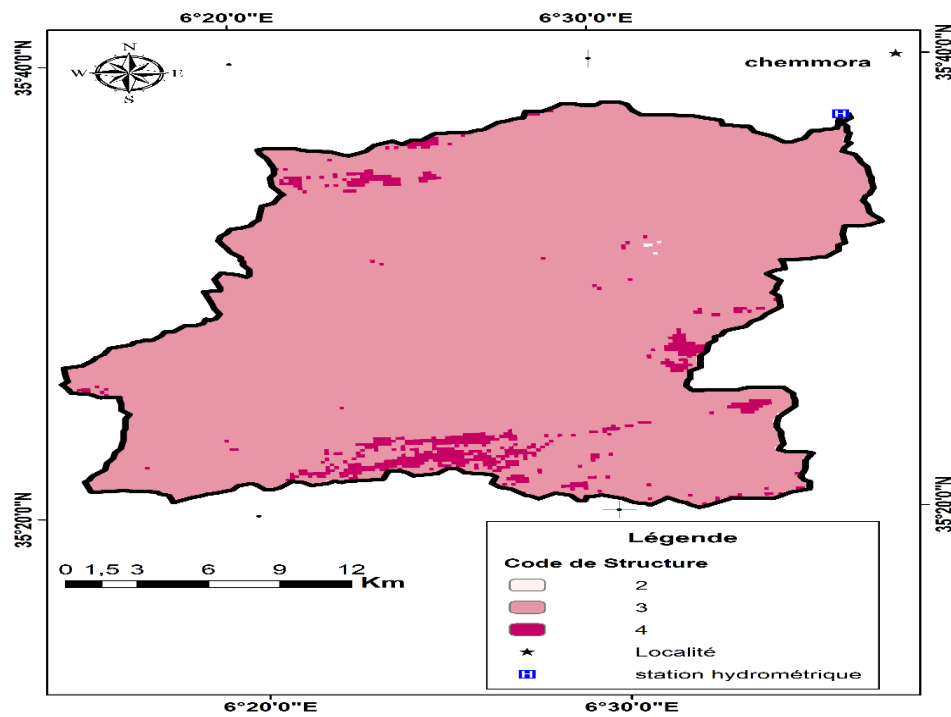


Figure IV.54 : Carte code de structure

i- carte du Facteur de l'érodabilité des sols

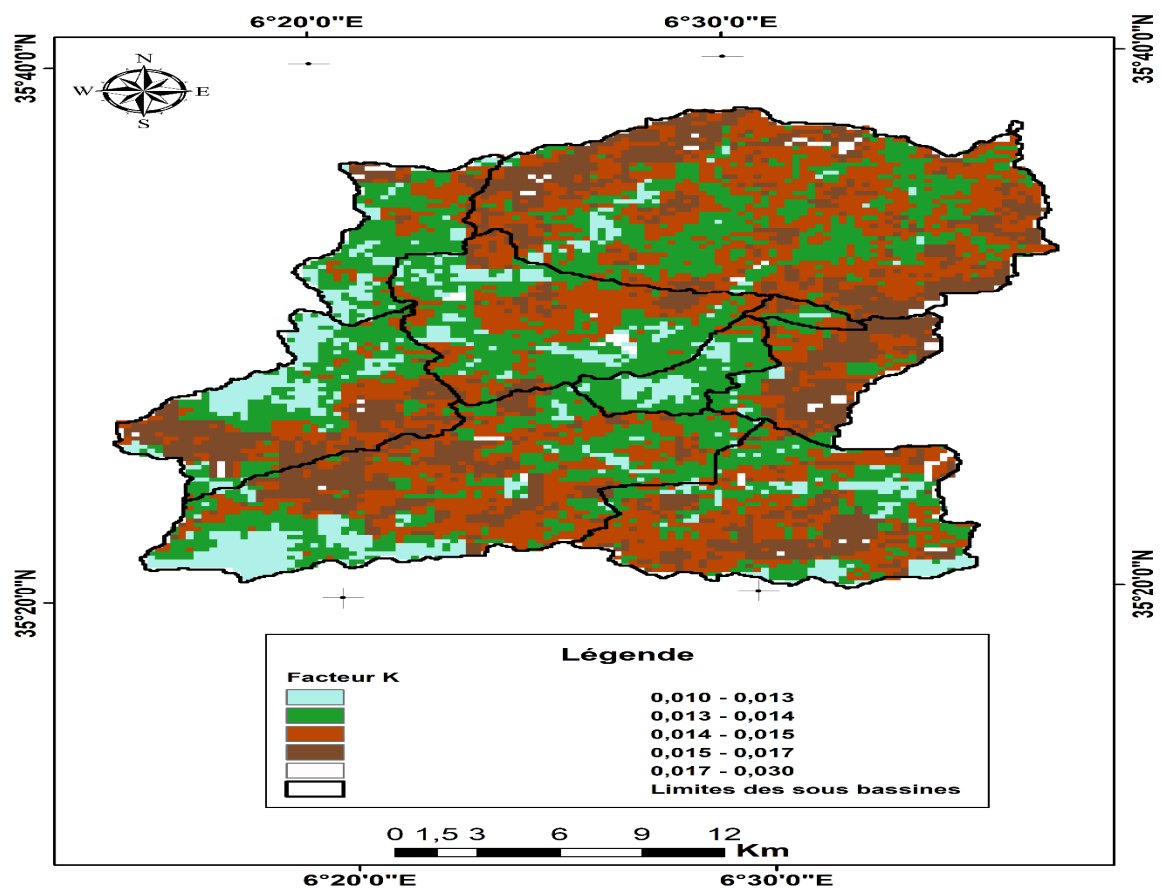


Figure IV. 55 : Carte du facteur K

VI.9.2 Facteur topographique (LS)

Est un indice topographique qui représente la morphologie du terrain. Où intervient dans les processus de détachement, de transport et de sédimentation, Ce facteur topographique sans dimension représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m). 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 m, une pente de 9° et un LS de valeur égale à 1.

Il est calculé à partir de la carte de l'inclinaison des pentes et de leur longueur obtenues à partir de traitements sous SIG du MNT de la zone d'étude à une résolution de 30 m par application de la formule établies par WISCHMEIER :

$$LS = (1/22.13)^m \times (0.065 + 0.0456 s + 0.006541 s^2) \quad (VI.10)$$

Où :

L : Facteur de la pente,

S : Facteur de l'inclinaison,

l : est la longueur de pente en (m) avec l = Ecoulement accumulé x résolutions,

S : est l'inclinaison de la pente en (%),

22,13 : longueur de la parcelle standard (m),

m : Un paramètre qui varie en fonction de la pente,

m = 0,5 si la pente est > 5%,

m = 0,4 si la pente varie entre 3,5 et 4,5 %,

m = 0,3 si la pente varie entre 1 à 3 %,

m = 0,2 si la pente est < 1,

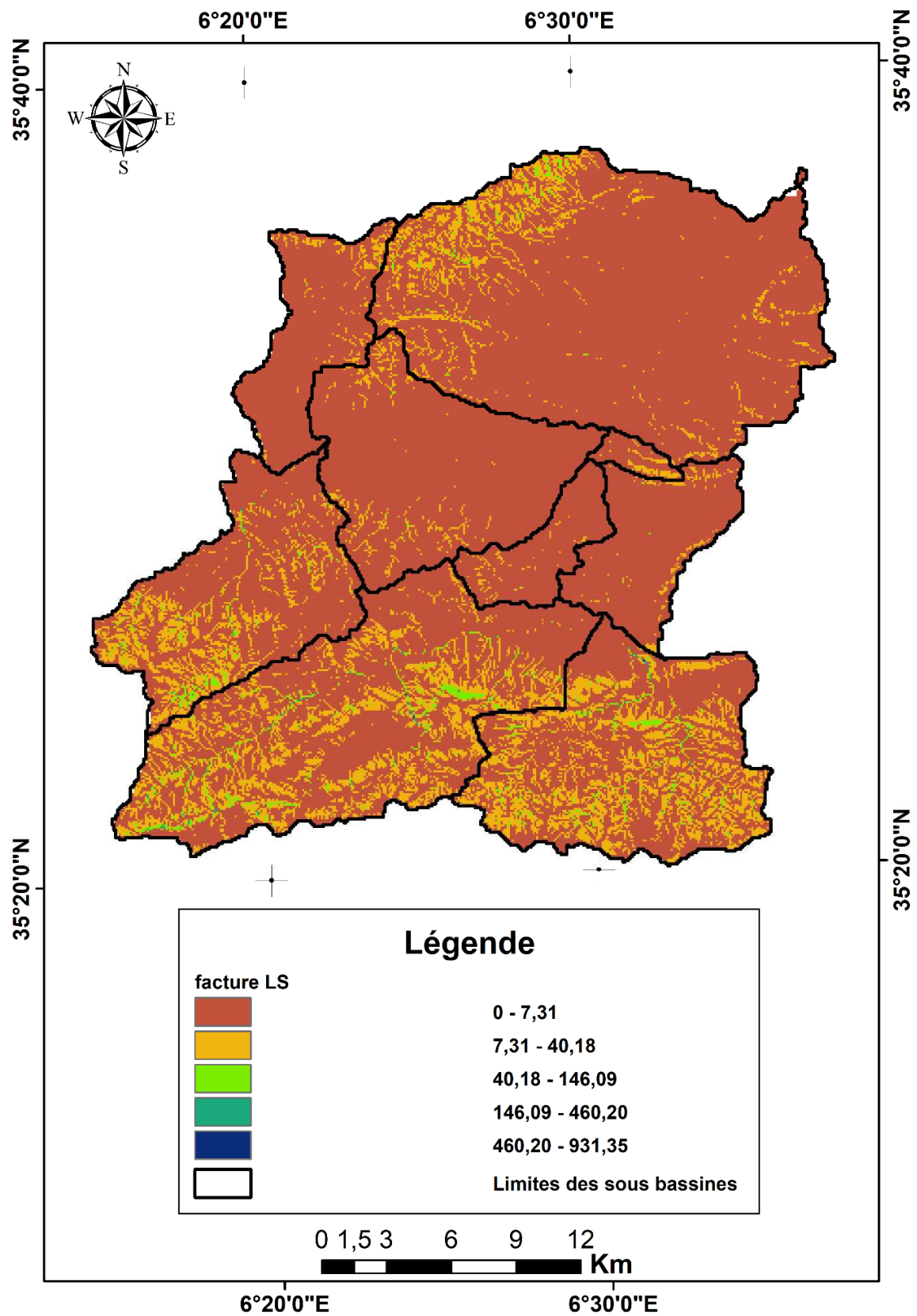


Figure IV.56 : Carte de Le facteur topographique (LS) bassin versant Chemora

VI.9.3 : Le couvert végétal (occupation du sol C)

Ce facteur estimé à partir de l'indice de végétation normalisé dérivé NDVI à partir de l'imagerie satellitaire du LANDSAT 5.

La classification de la végétation est réalisée suivant les conditions de seuillage suivantes (Tidjani, Khorsi et Ziani2010) :

$NDVI < -0,1$: 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

Afin d'estimer les valeurs du facteur C dans la zone d'étude, on a utilisé la régression entre 5 couples de valeurs. Ces valeurs sont tirées du diagramme expérimental représenté dans la figure VIII-33 (Gitas, 2009).

L'équation de la courbe polynomiale issue de la régression est :

$$C = 1,1119NDVI^2 - 2,0976 \cdot NDVI + 0,9944 \quad (VI.11)$$

Les cartes du facteur C sont générées en utilisant l'équation polynomiale de régression citée auparavant ; pour les valeurs du NDVI négatives, donc le facteur C est considéré comme nul car dans ces surfaces, il n'y a pas de couvert végétal (eau).

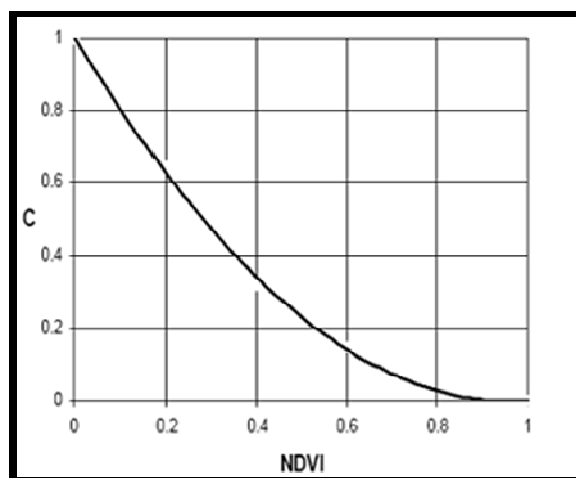


Figure IV.57 : relation entre le facteur « C » et le NDVI.

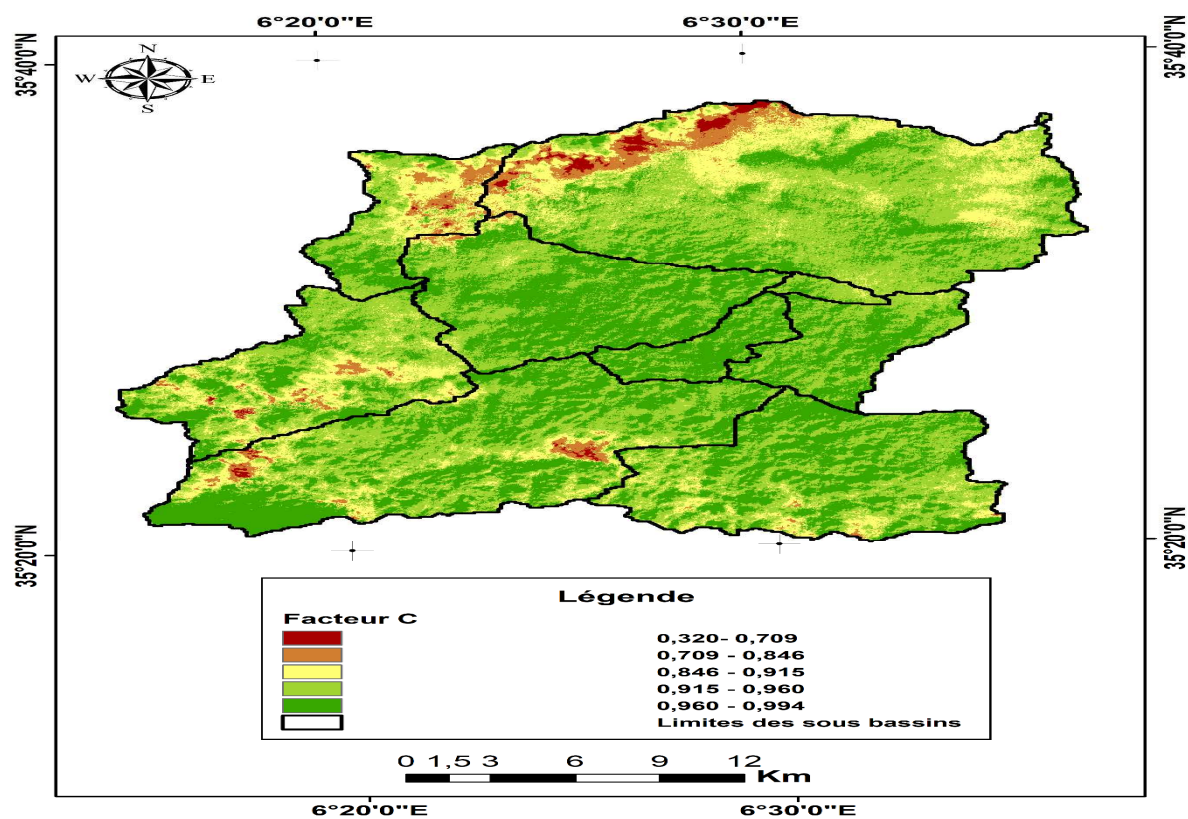


Figure IV.58 : Carte de facteur C du 02 /01/1991

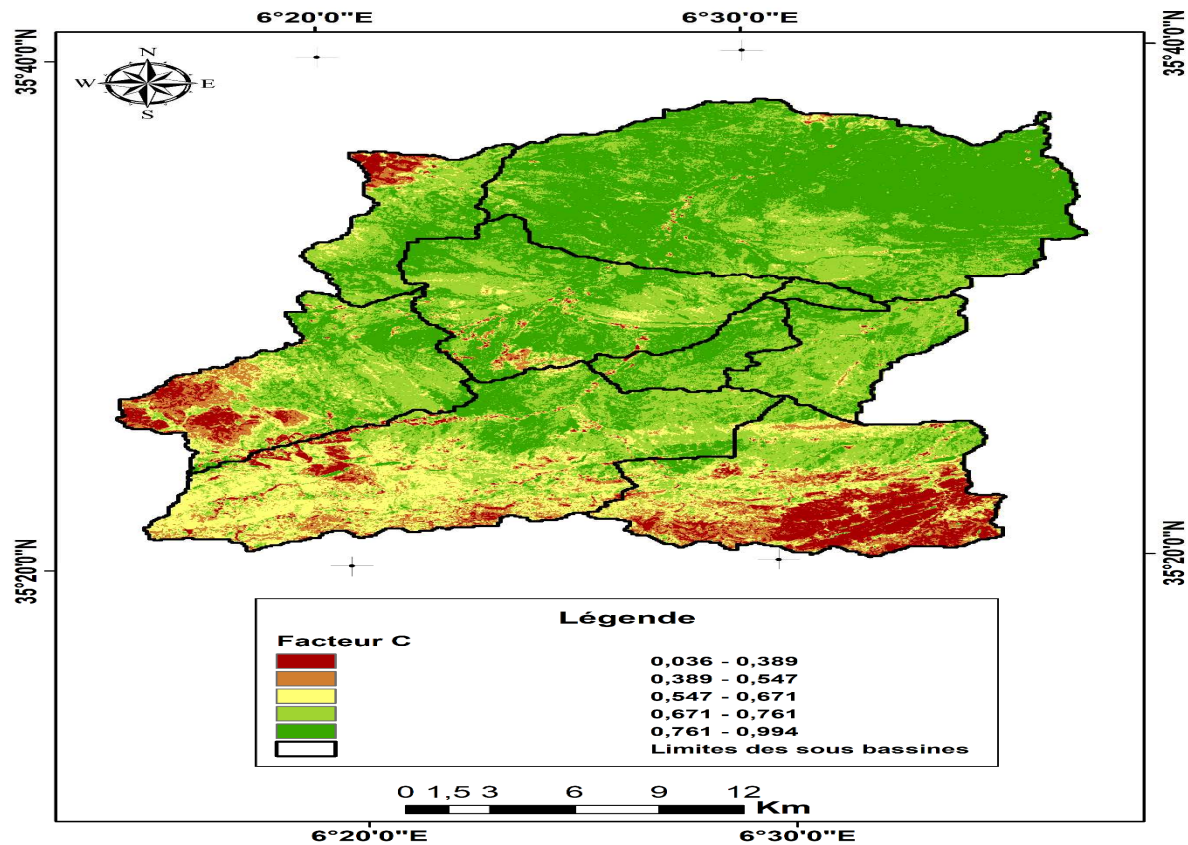


Figure IV.59 : Carte de facteur C du 30/10/1990

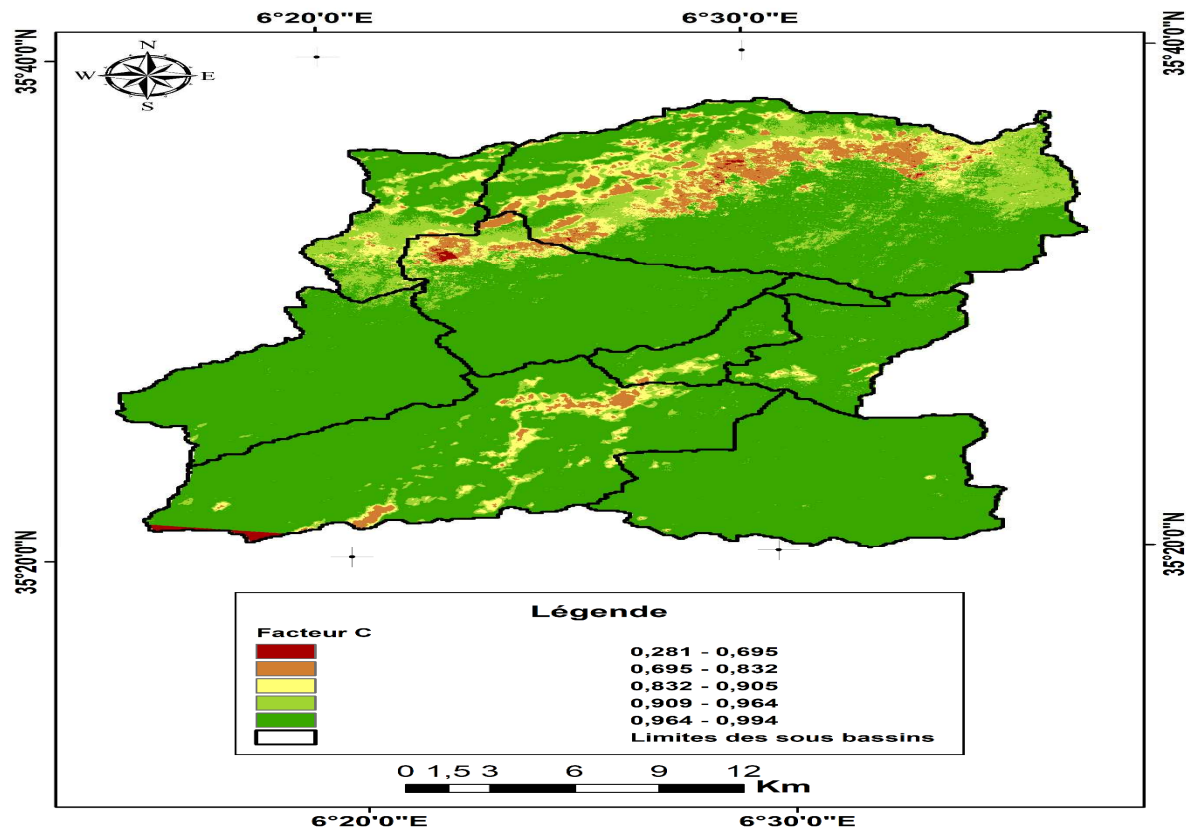


Figure IV.60 : Carte de facteur C du 15/11/1990

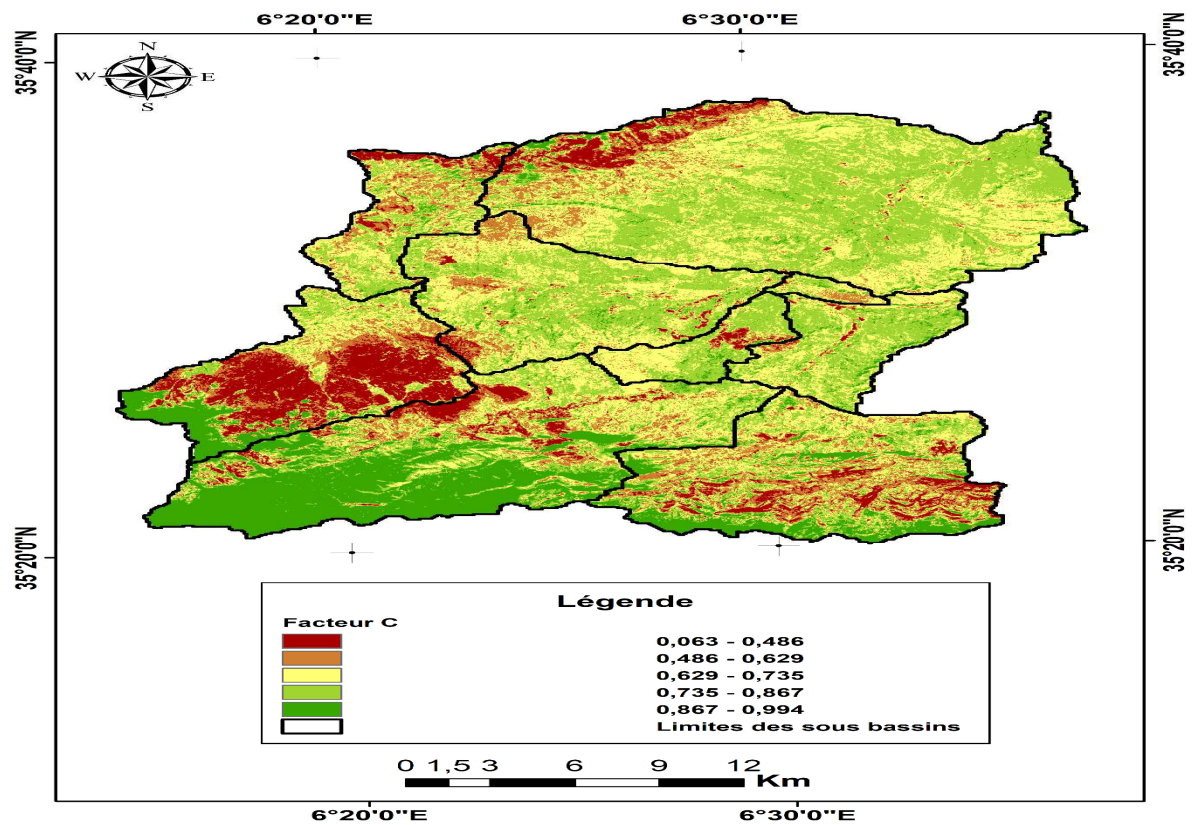


Figure IV.61 : Carte de facteur C du 17/12/1990

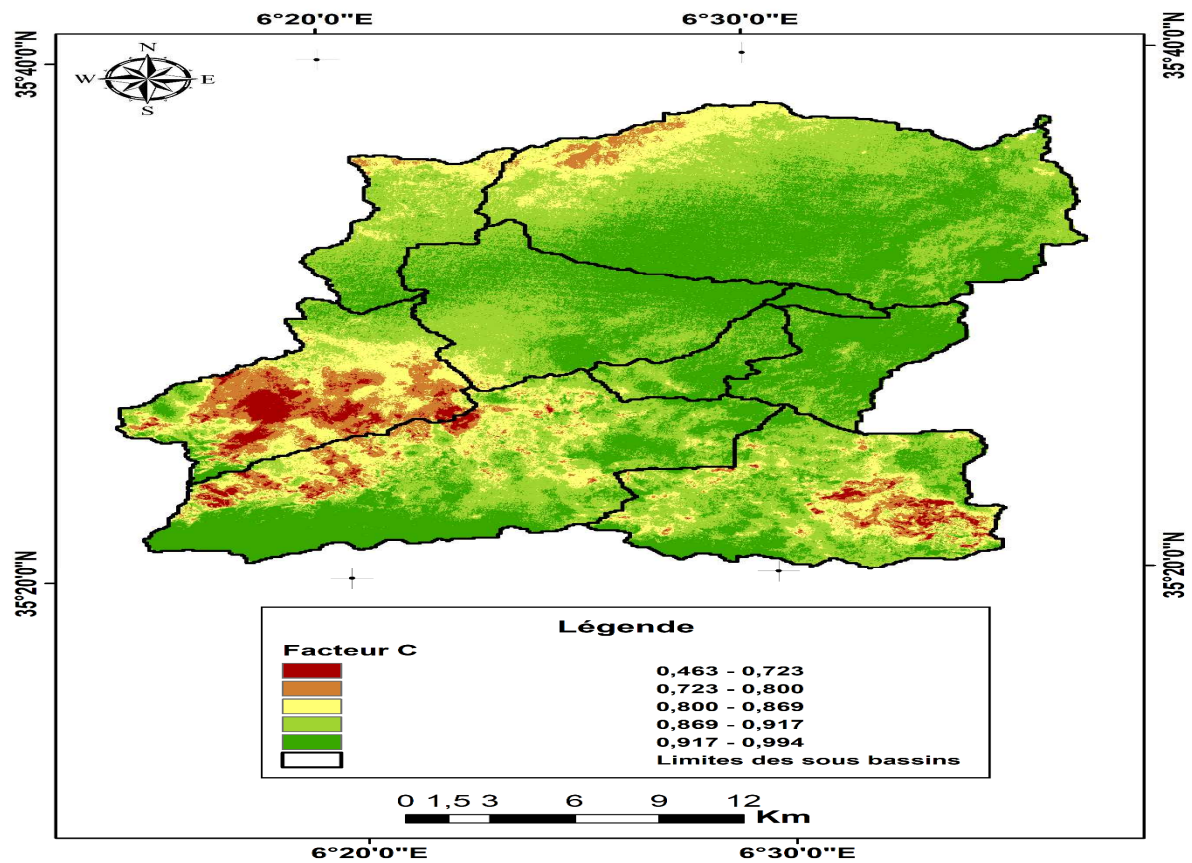


Figure IV .62: Carte de facteur C du 03/02/1999

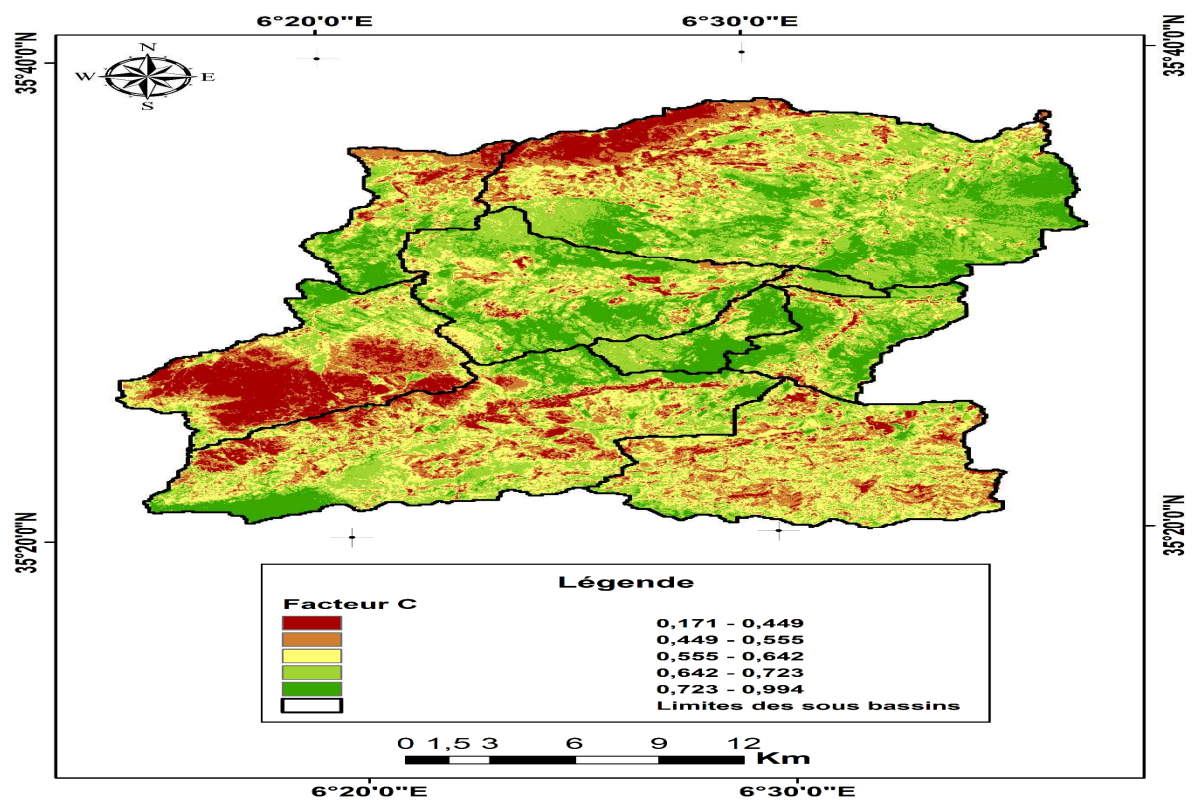


Figure IV.63 : Carte de facteur C du 23/03/1991

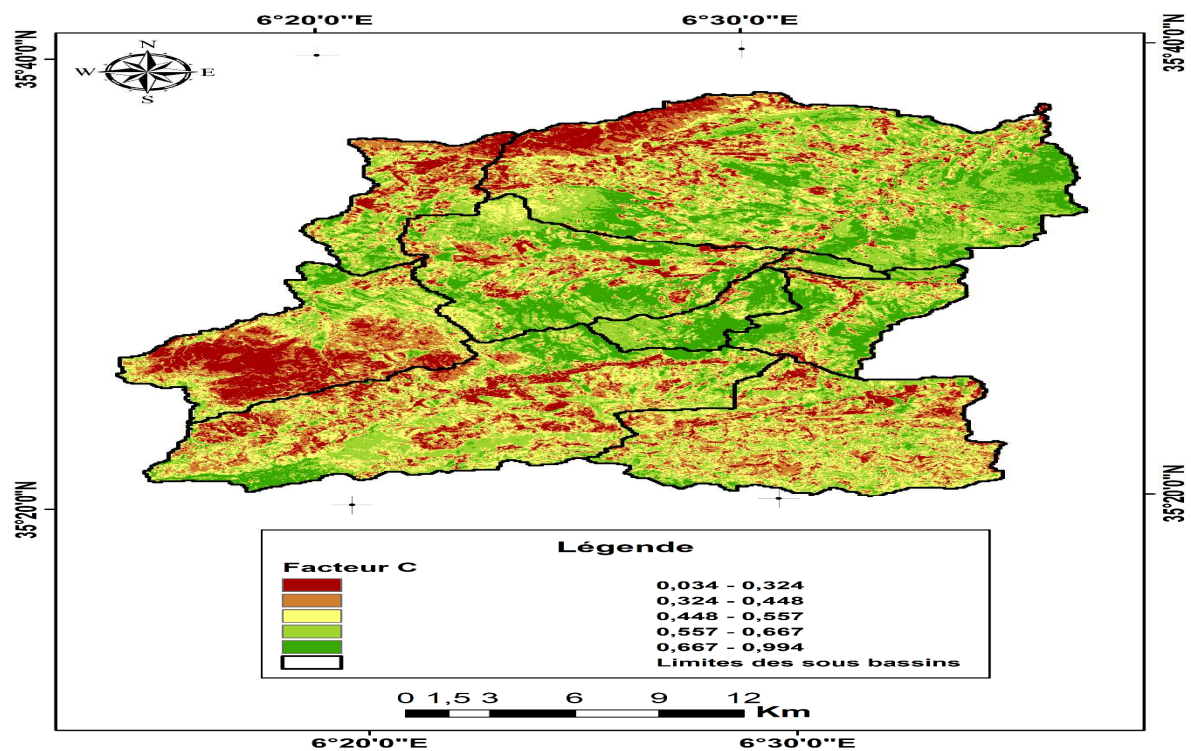


Figure IV.64 : Carte de facteur C du 08/04/1999

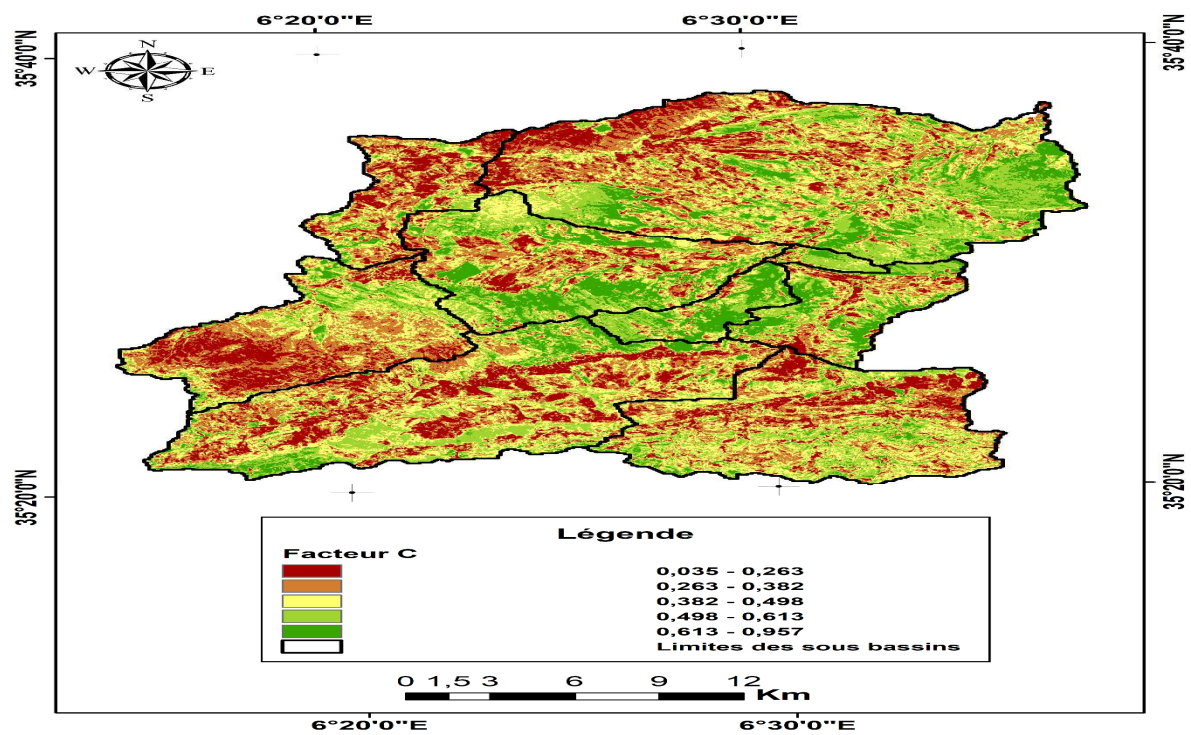


Figure IV.65 : Carte de facteur C du 10/05/1991

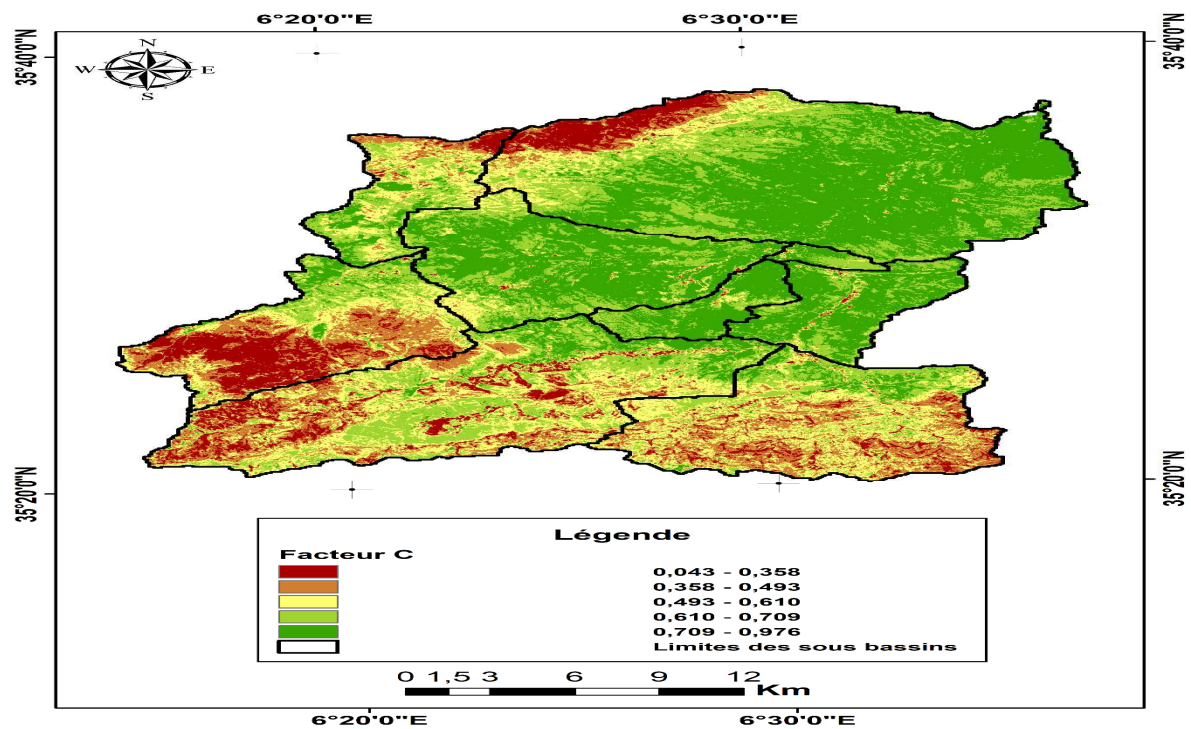


Figure IV.66 : Carte de facteur C du 27/06/1991

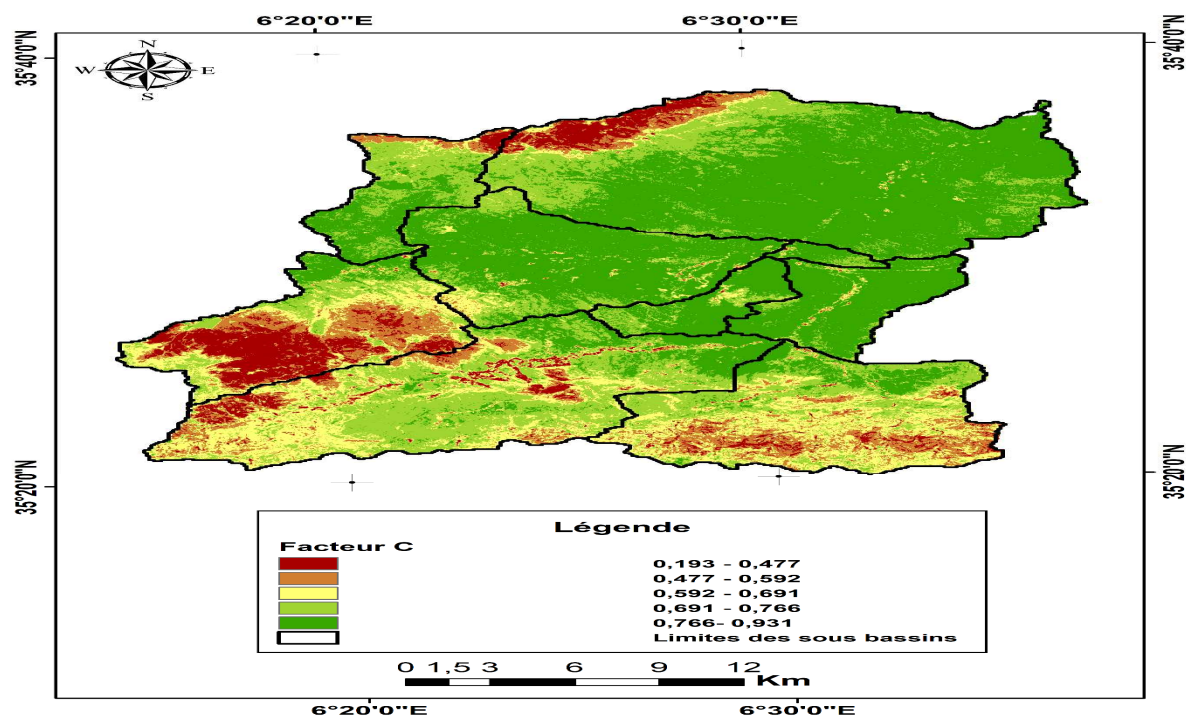


Figure IV.67 : Carte de facteur C du 29/07/1991

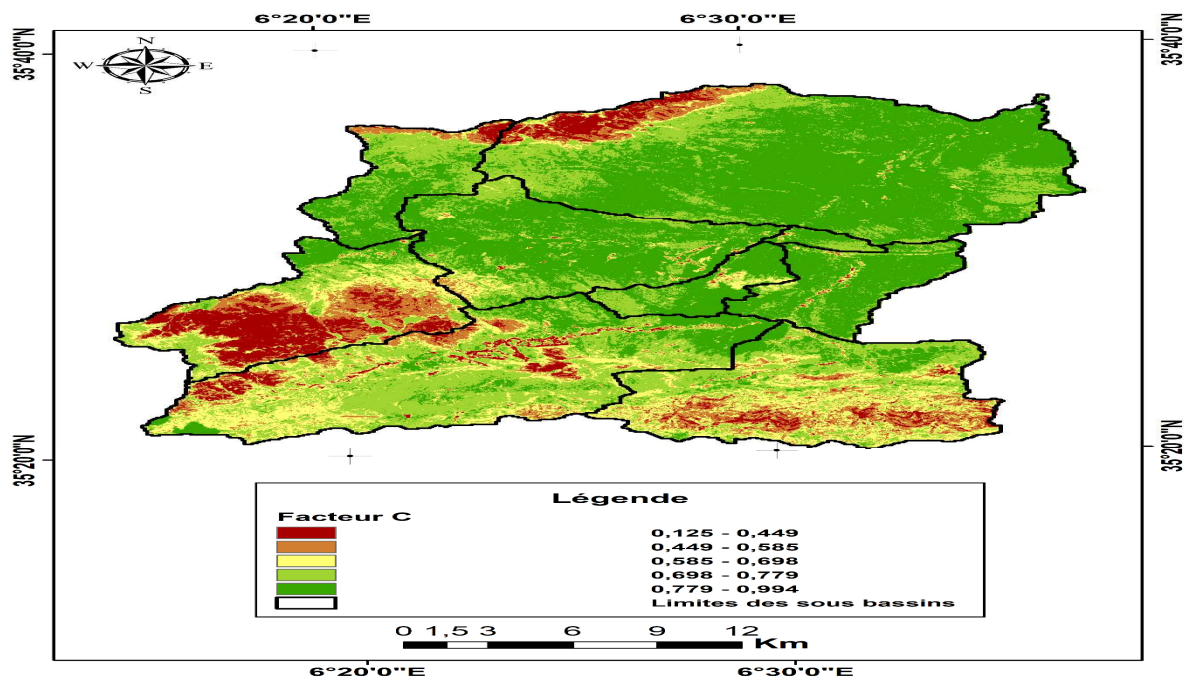


Figure IV.68 : Carte de facteur C du 30/08/1991

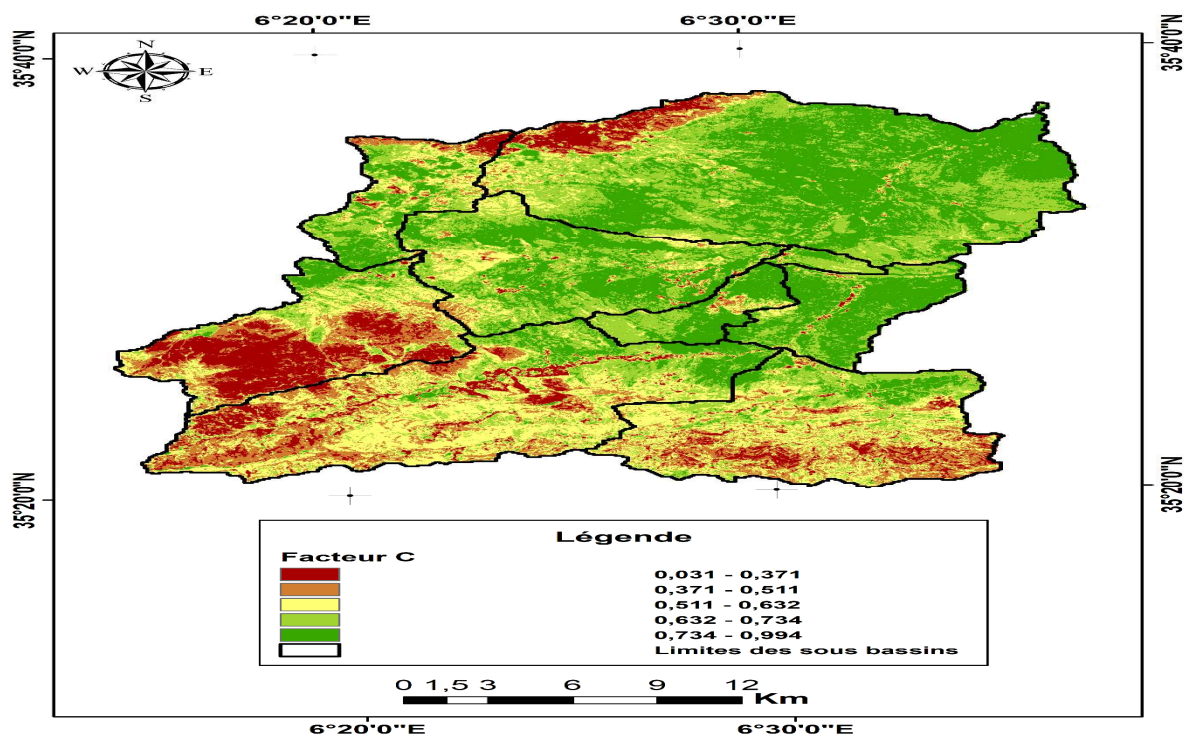


Figure IV.69 : Carte de facteur C du 28/09/1991

VI.9.4 : Pratiques culturales (P) :

Les valeurs de ce facteur varient généralement selon les classes des pentes, le tableau ci-après présente la répartition des valeurs de ce facteur en fonction de la pente selon Shin.

Tableau III.11 : 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

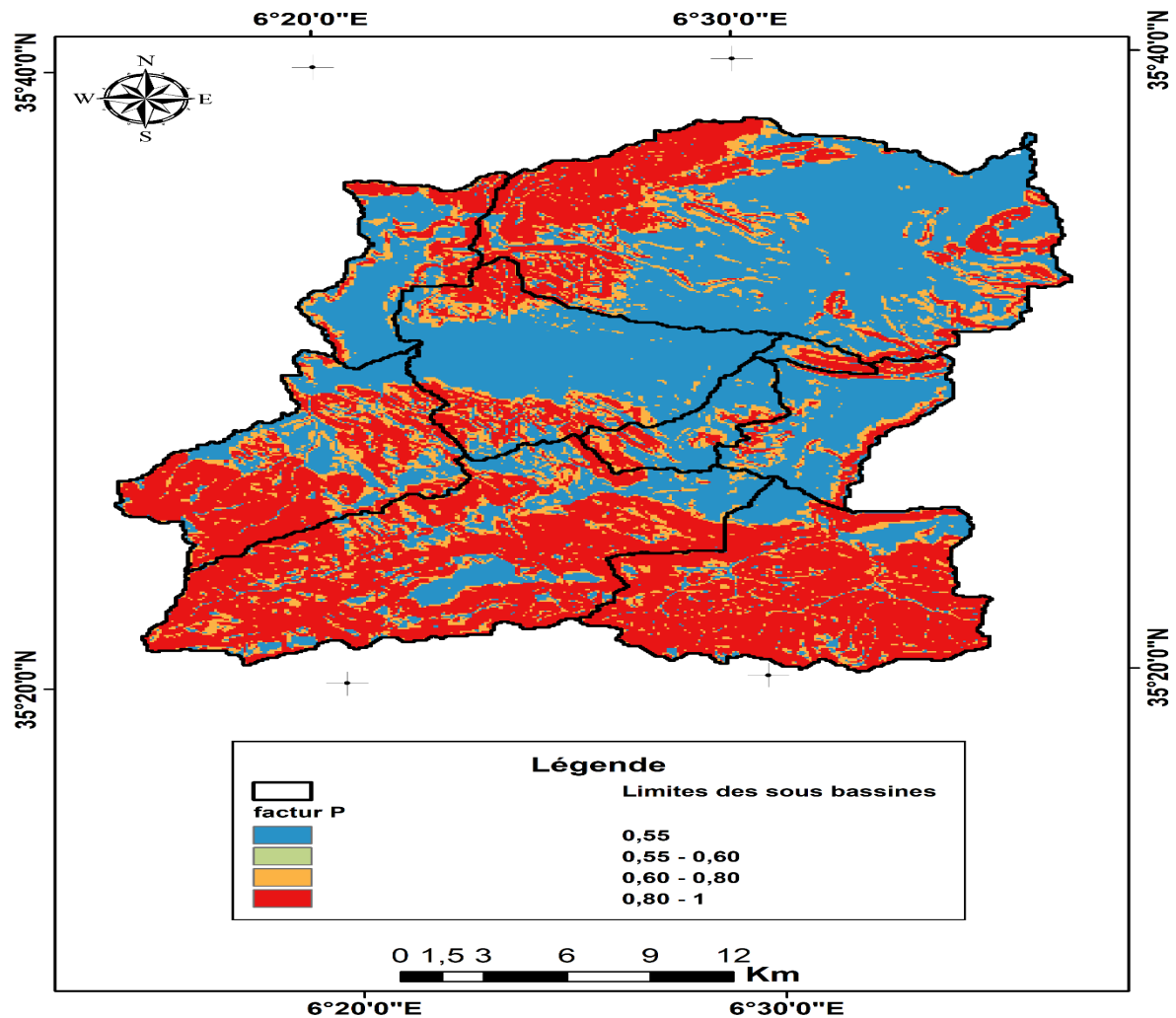


Figure IV 70 : Carte de Le Facteur P ou indice des aménagements antiérosifs bassin versant Chemora

IV.10. La calibration et validation du modèle hydrologique :

La calibration du modèle a été effectuée à partir de deux fichiers élaborés pour les trois premiers événements pour chaque sous bassin, en prenant en compte le type d'averses NRCS II.

Pour chacun des 03 fichiers de simulation, on aura les données suivantes :

Tableau IV.12 : Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation

Module du modèle	Entrée	Unité
Module bassin	La surface du sous bassin	km ²
	Le talweg : Longueur,	m
	pente, coef de Maning	m/m, -
	La forme de la section moyenne	-
	Les dimensions de la section	m
Module météorologique	Pluie	mm
	Le type d'averse	-
	Affectation des pluies aux sous bassins	-
Contrôle spécifications	Date et heure du début et la fin de l'événement	-
Séries de données pluviométriques et hydrométriques	Pluie enregistrée ou estimée pour chaque sous bassin	mm
	Débit enregistré (existant) au nœud	m ³ /s
Module de la fonction de production CSCN	Abstraction initiale « Ia »	mm
	Curve Nombre « CN »	-
	Le pourcentage d'imperméable	-
SCS unit hydrographe	Lag time	mm
Débit de base	Débit initial	m ³ /s
	Récession	-
	Ratio	-

Après la calibration, nous pouvons ressortir les conclusions suivantes : Les résultats satisfaisants en matière de la restitution des débits de pointe et du volume.

La validation effectuée sur les trois derniers événements en appliquant les jeux de données résultats de la calibration pour chaque bassin, nous arrivons aux résultats suivants :

* Pour tous les événements, l'hydrogramme simulé était de même forme que celui observé.

IV.11. Résultats de l'application HEC HMS :

IV.11.1. flux exutoire et courbe de simulation de volume :

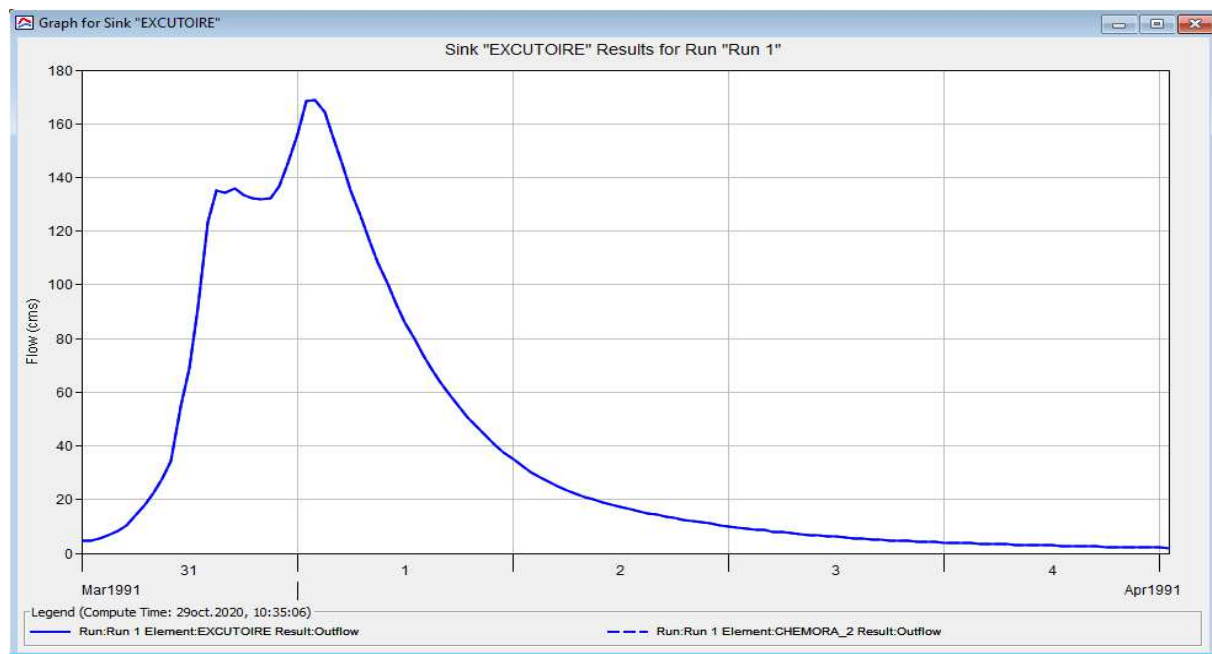


Figure IV 71 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Mar 1991)

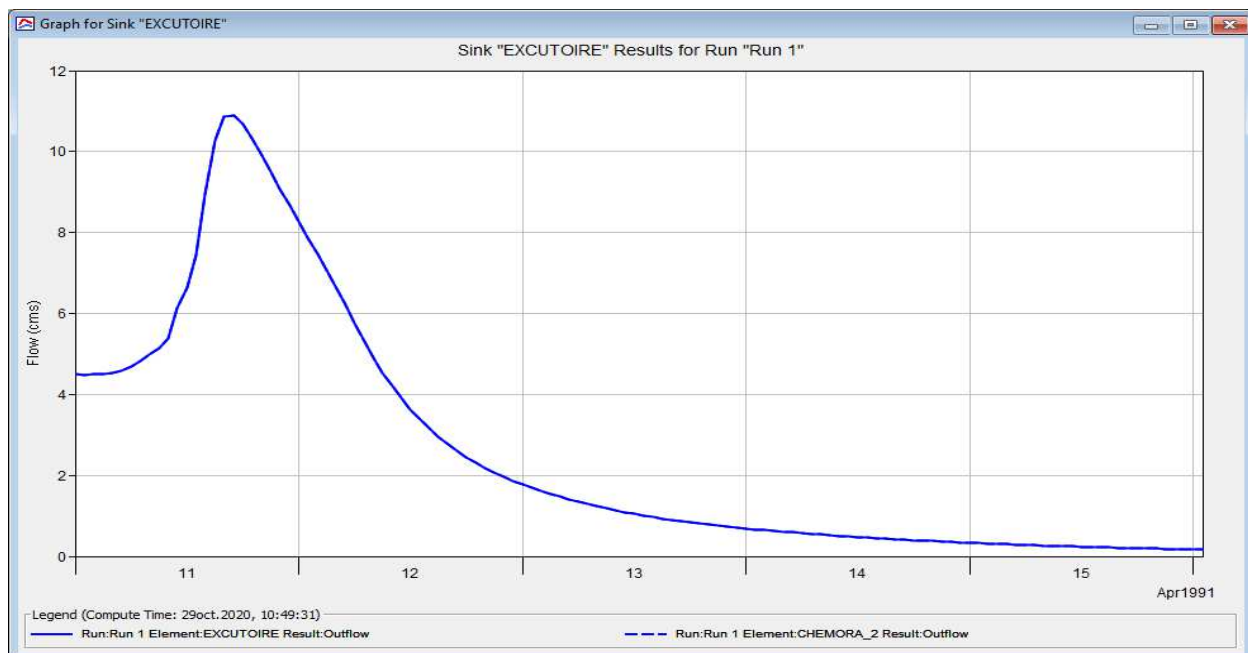


Figure IV 72 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Avr 1991)

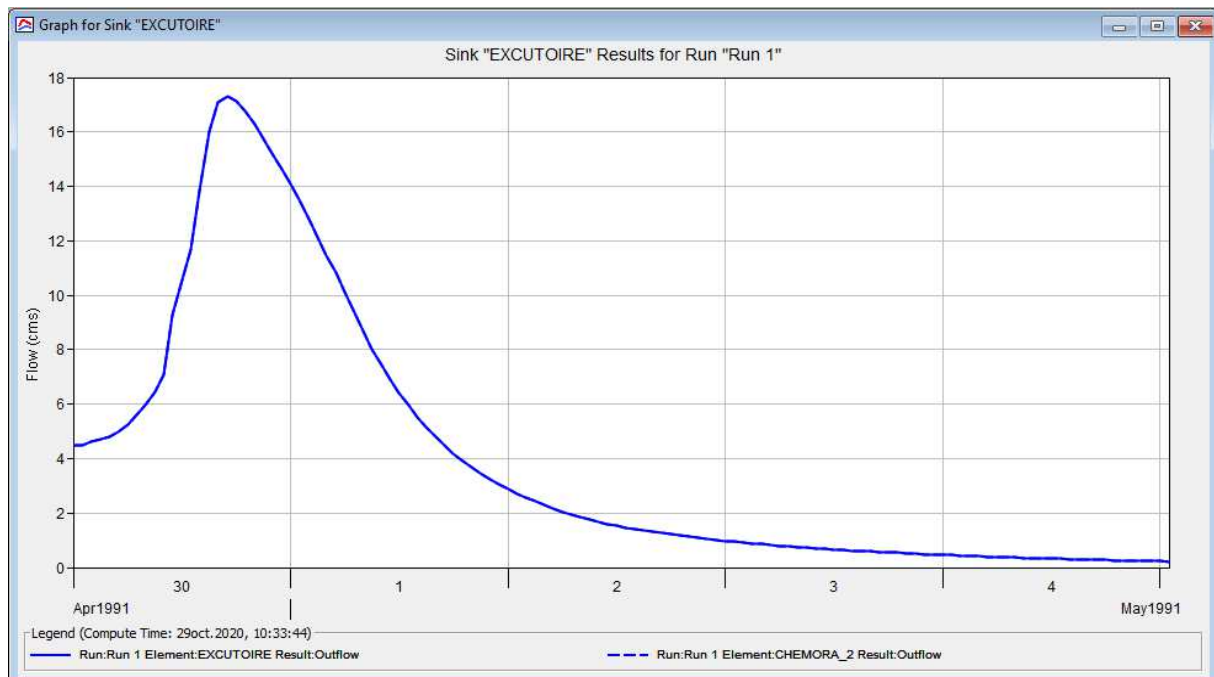


Figure IV 73 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (May 1991)

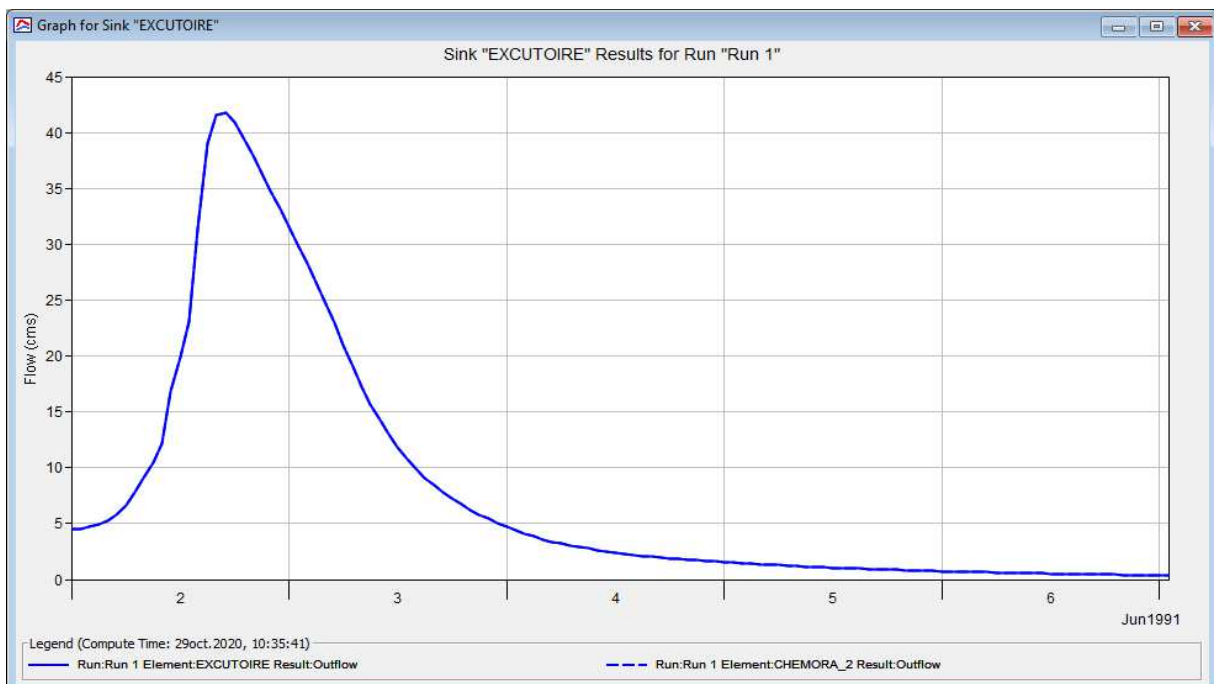


Figure IV 74 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Jun 1991)

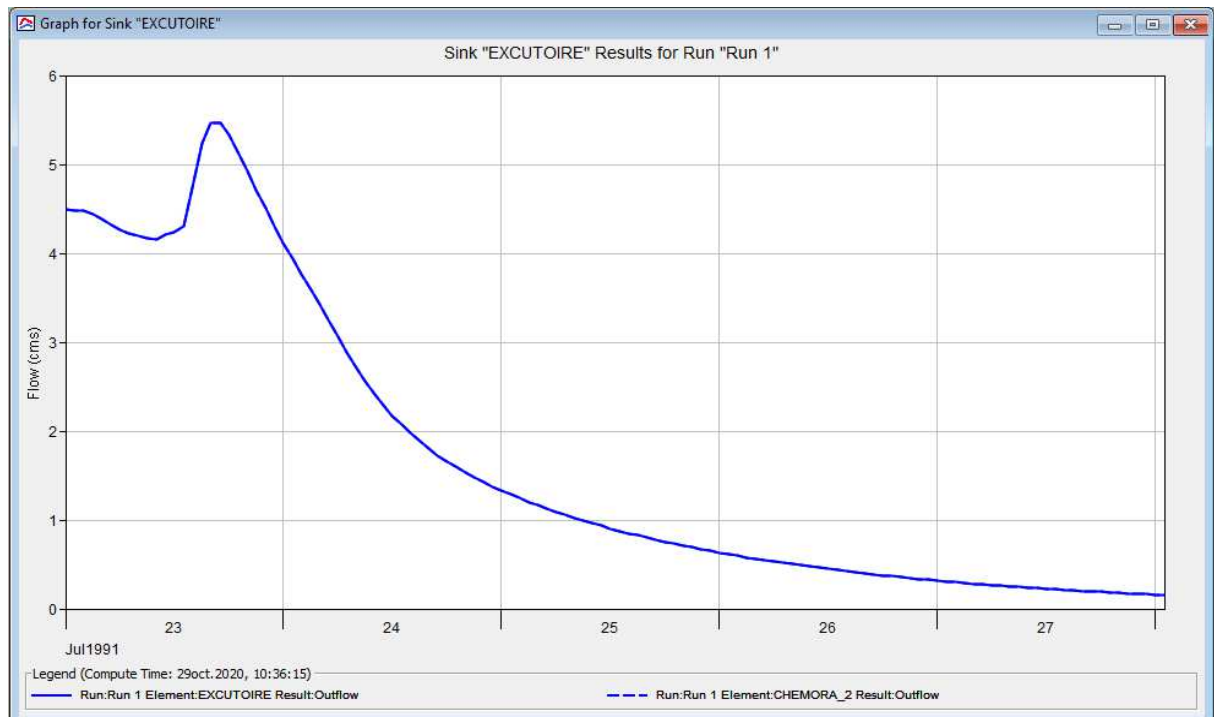


Figure IV 75 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Jul1991)

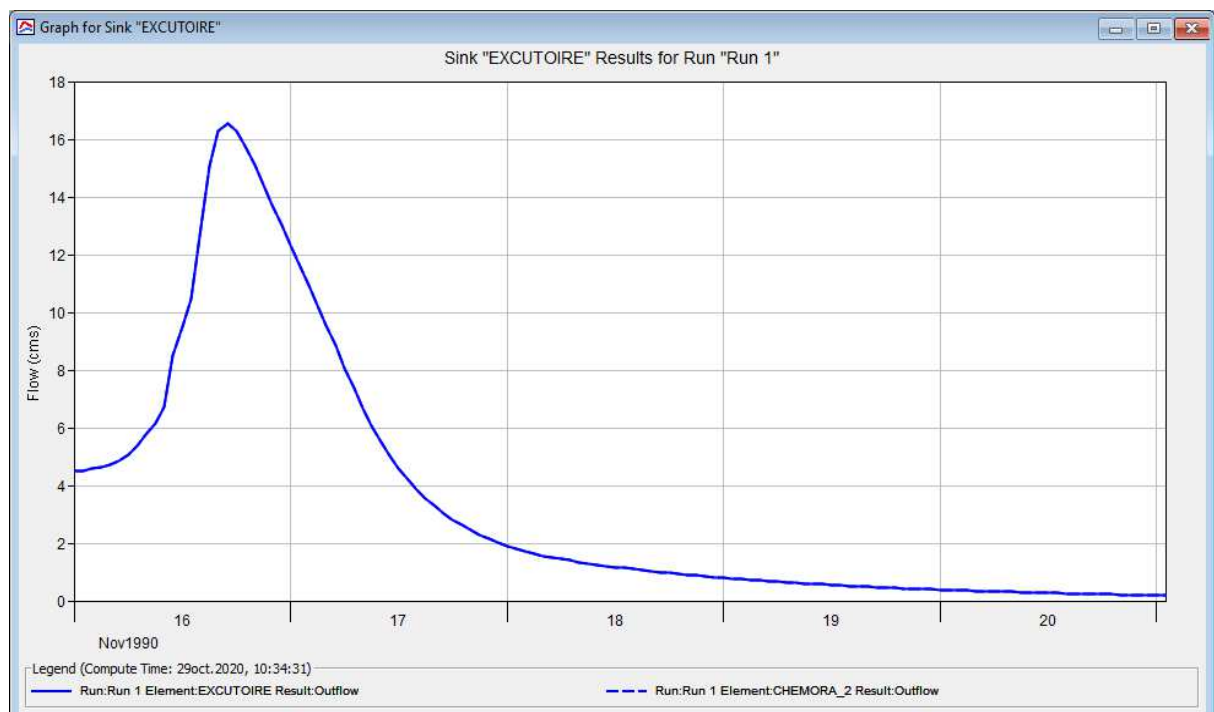


Figure IV 76 : flux exutoire et courbe de simulation de volume (Nov 1991)

IV.11.2 débits et volumes simulés exécutoire :

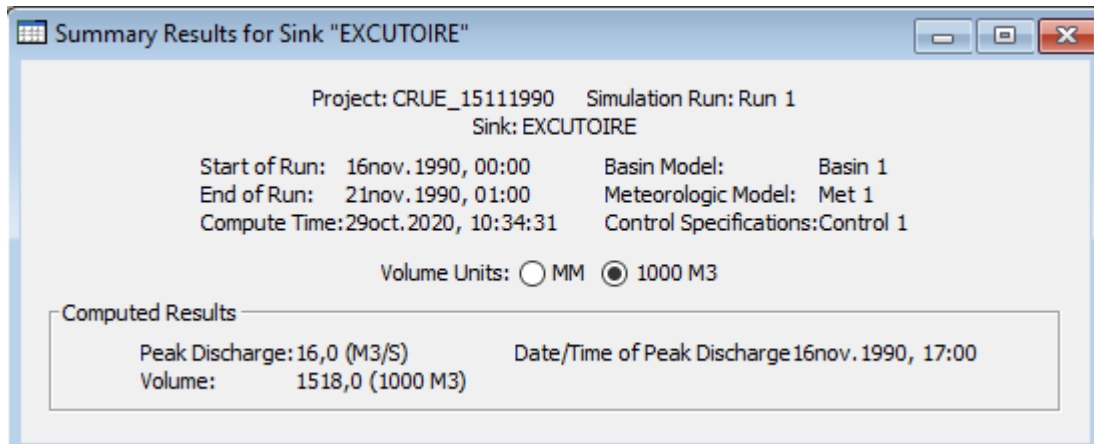


Figure IV 77 : Débits et volumes simulés EXCUTOIRE (NOV 1990)

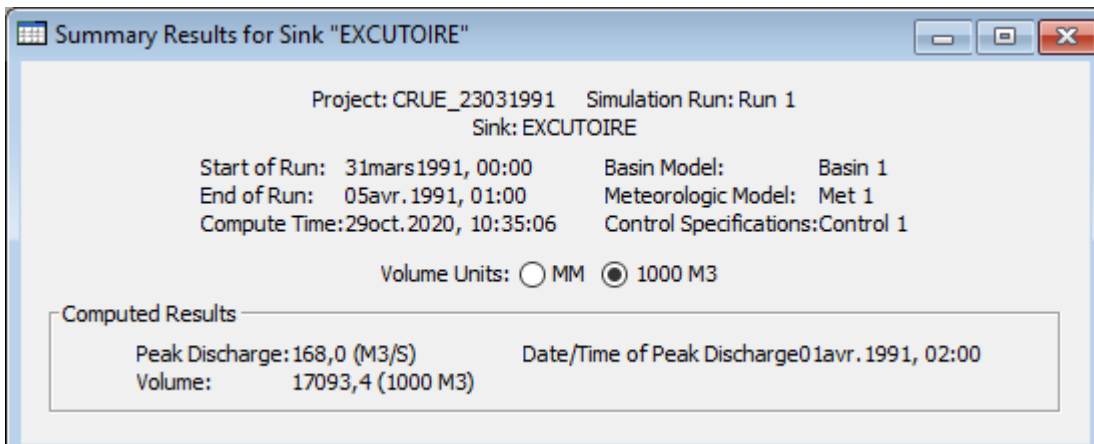


Figure IV 78 : Débits et volumes simulés EXCUTOIRE (MARS 1991)

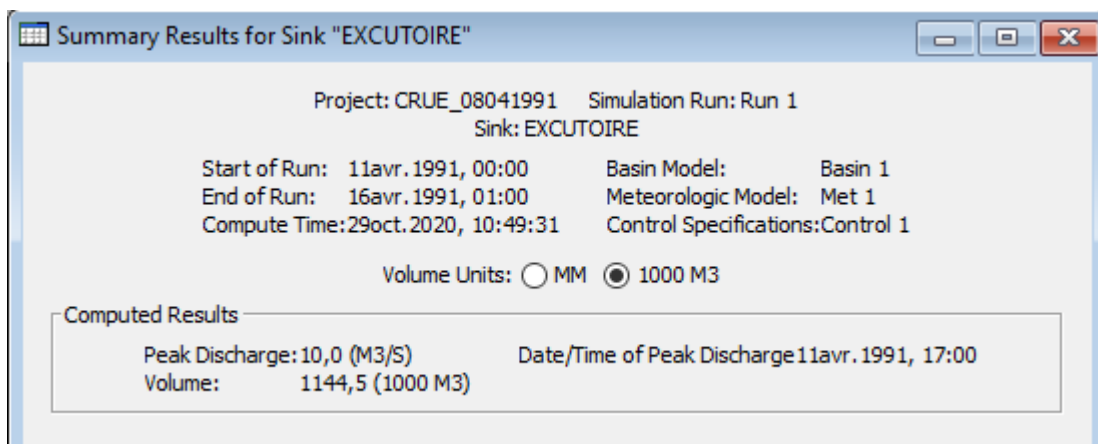


Figure IV 79 : Débits et volumes simulés EXCUTOIRE (AVR 1991)

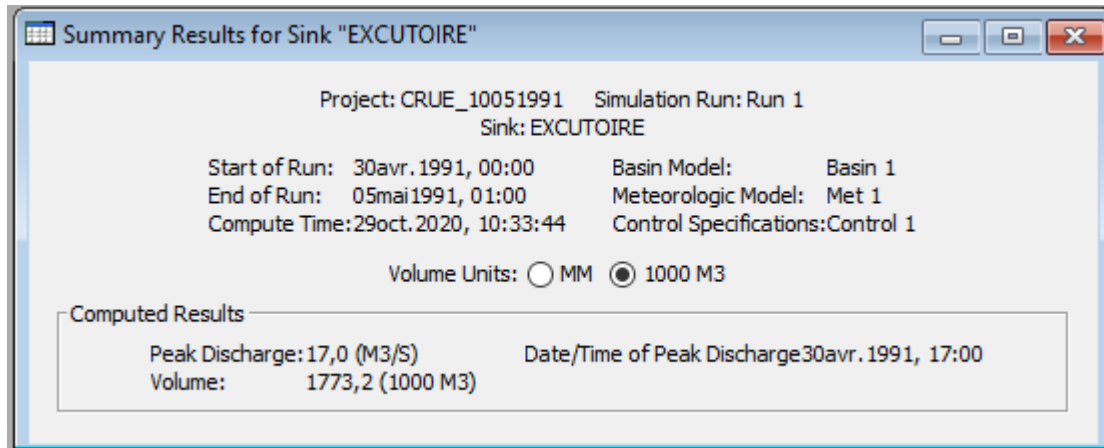


Figure IV 80 : débits et volumes simulés exutoire (May 1991)

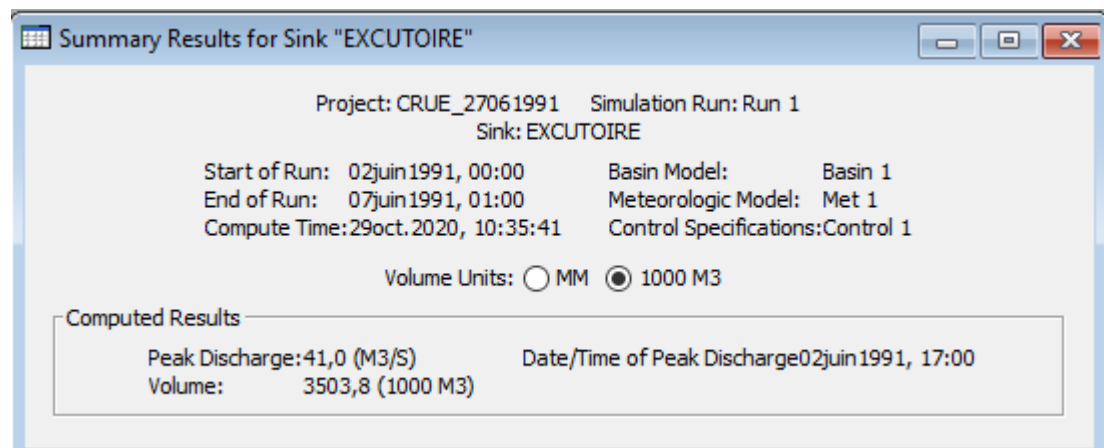


Figure IV 81 : débits et volumes simulés exutoire (Jun 1991)

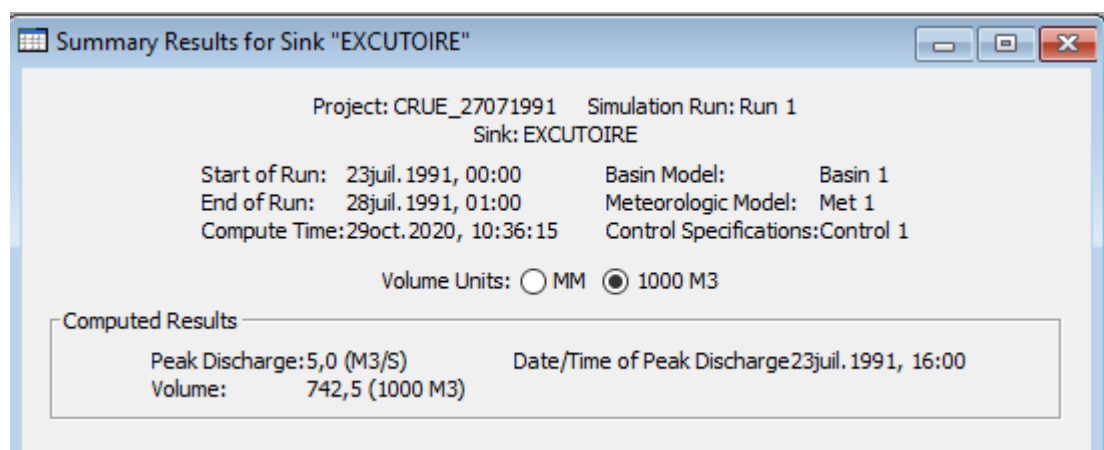


Figure IV 82 : Débits et volumes simulés EXUTOIRE (JUL 1991)

IV.11.3 Débits et volumes simulés :

Global Summary Results for Run "Run 1"

Project: CRUE_15111990 Simulation Run: Run 1

Start of Run: 16nov.1990, 00:00 Basin Model: Basin 1
End of Run: 21nov.1990, 01:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 29oct.2020, 10:34:31 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
BV_03	84	1,0	16nov.1990, 14:00	138,2
BV_07	42	0,0	16nov.1990, 13:00	82,6
JUNC_02	126	2,0	16nov.1990, 14:00	220,9
BV_02	154	4,0	16nov.1990, 14:00	368,0
BV_01	107	3,0	16nov.1990, 12:00	219,0
JUNC_01	262	8,0	16nov.1990, 13:00	586,9
ROBOE_0	262	8,0	16nov.1990, 15:00	592,7
BV_04	40	0,0	16nov.1990, 13:00	82,1
ROBOE_1	303	9,0	16nov.1990, 14:00	674,9
SODHES_1	126	1,0	16nov.1990, 17:00	231,2
JUNC_03	303	9,0	16nov.1990, 14:00	674,9
ROBOE_2	303	9,0	16nov.1990, 15:00	676,4
BV_06	90	0,0	16nov.1990, 16:00	111,0
SODHES_2	217	2,0	16nov.1990, 17:00	342,4
BV_05	22	0,0	16nov.1990, 00:00	70,5
MORRI	22	0,0	16nov.1990, 00:00	71,8
BV_08	5	0,0	16nov.1990, 00:00	69,1
JUNC_04	547	12,0	16nov.1990, 15:00	1159,7
CHEMORA_1	547	12,0	16nov.1990, 17:00	1196,0
BV_09	218	4,0	16nov.1990, 14:00	321,3
CHEMORA_2	765	16,0	16nov.1990, 17:00	1518,0
EXCUTOIRE	765	16,0	16nov.1990, 17:00	1518,0

Figure IV 83 : Débits et volumes simulés (NOV 1991)

Global Summary Results for Run "Run 1"

Project: CRUE_23031991 Simulation Run: Run 1

Start of Run: 31mars1991, 00:00 Basin Model: Basin 1
End of Run: 05avr.1991, 01:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 29oct.2020, 10:35:06 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
BV_03	84	22,0	31mars1991, 16:00	2057,1
BV_07	42	5,0	31mars1991, 14:00	457,0
JUNC_02	126	27,0	31mars1991, 15:00	2514,1
SODHES_1	126	27,0	31mars1991, 17:00	2522,3
BV_02	154	40,0	31mars1991, 14:00	3058,1
BV_01	107	3,0	31mars1991, 12:00	188,8
JUNC_01	262	43,0	31mars1991, 14:00	3246,9
ROBOE_0	262	43,0	31mars1991, 15:00	3251,3
BV_04	40	9,0	01avr.1991, 01:00	759,6
ROBOE_1	303	50,0	31mars1991, 15:00	4011,2
BV_05	22	4,0	01avr.1991, 01:00	474,8
MORRI	22	4,0	01avr.1991, 02:00	476,1
JUNC_03	325	54,0	31mars1991, 15:00	4487,2
BV_06	90	41,0	01avr.1991, 01:00	4520,0
SODHES_2	217	63,0	01avr.1991, 01:00	7042,5
BV_08	5	1,0	31mars1991, 15:00	176,7
JUNC_04	547	107,0	01avr.1991, 01:00	11709,3
CHEMORA_1	547	107,0	01avr.1991, 02:00	11733,9
BV_09	218	64,0	01avr.1991, 01:00	5358,6
ROBOE_2	325	54,0	31mars1991, 15:00	4490,1
CHEMORA_2	765	168,0	01avr.1991, 02:00	17093,4
EXCUTOIRE	765	168,0	01avr.1991, 02:00	17093,4

Figure IV 84 : Débits et volumes simulés (MARS 1991)

Global Summary Results for Run "Run 1"

Project: CRUE_08041991 Simulation Run: Run 1

Start of Run: 11avr.1991, 00:00 Basin Model: Basin 1
End of Run: 16avr.1991, 01:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 29oct.2020, 10:49:31 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
BV_03	84	1,0	11avr.1991, 15:00	136,5
BV_07	42	0,0	11avr.1991, 13:00	75,5
JUNC_02	126	1,0	11avr.1991, 15:00	212,0
SODHES_1	126	1,0	11avr.1991, 18:00	222,3
BV_02	154	1,0	11avr.1991, 14:00	172,7
BV_01	107	3,0	11avr.1991, 12:00	188,8
JUNC_01	262	4,0	11avr.1991, 13:00	361,5
ROBOE_0	262	4,0	11avr.1991, 14:00	366,8
BV_04	40	0,0	11avr.1991, 13:00	78,6
ROBOE_1	303	5,0	11avr.1991, 14:00	445,5
BV_05	22	0,0	11avr.1991, 00:00	71,1
MORRI	22	0,0	11avr.1991, 00:00	72,4
JUNC_03	325	5,0	11avr.1991, 14:00	517,9
ROBOE_2	325	5,0	11avr.1991, 14:00	519,8
BV_06	90	1,0	11avr.1991, 12:00	105,2
SODHES_2	217	2,0	11avr.1991, 15:00	327,7
BV_08	5	0,0	11avr.1991, 00:00	64,4
JUNC_04	547	8,0	11avr.1991, 14:00	911,8
CHEMORA_1	547	8,0	11avr.1991, 17:00	947,8
BV_09	218	2,0	11avr.1991, 15:00	196,0
CHEMORA_2	765	10,0	11avr.1991, 17:00	1144,5
EXCUTOIRE	765	10,0	11avr.1991, 17:00	1144,5

Figure IV 85 : débits et volumes simulés (Avr 1991)

Global Summary Results for Run "Run 1"

Project: CRUE_10051991 Simulation Run: Run 1

Start of Run: 30avr.1991, 00:00 Basin Model: Basin 1
End of Run: 05mai1991, 01:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 29oct.2020, 10:33:44 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
BV_03	84	2,0	30avr.1991, 16:00	233,9
BV_07	42	0,0	30avr.1991, 14:00	87,1
JUNC_02	126	2,0	30avr.1991, 15:00	321,0
SODHES_1	126	2,0	30avr.1991, 18:00	330,3
BV_02	154	2,0	30avr.1991, 15:00	244,1
BV_01	107	3,0	30avr.1991, 12:00	225,8
JUNC_01	262	6,0	30avr.1991, 13:00	469,9
ROBOE_0	262	6,0	30avr.1991, 14:00	475,2
BV_04	40	0,0	30avr.1991, 13:00	84,4
ROBOE_1	303	7,0	30avr.1991, 14:00	559,7
BV_05	22	0,0	30avr.1991, 14:00	79,4
MORRI	22	0,0	30avr.1991, 14:00	80,7
JUNC_03	325	7,0	30avr.1991, 14:00	640,5
ROBOE_2	325	7,0	30avr.1991, 14:00	642,4
BV_06	90	0,0	30avr.1991, 19:00	151,3
SODHES_2	217	3,0	30avr.1991, 18:00	481,8
BV_08	5	0,0	30avr.1991, 00:00	65,9
JUNC_04	547	11,0	30avr.1991, 15:00	1190,1
CHEMORA_1	547	11,0	30avr.1991, 17:00	1226,0
BV_09	218	6,0	30avr.1991, 15:00	546,5
CHEMORA_2	765	17,0	30avr.1991, 17:00	1773,2
EXCUTOIRE	765	17,0	30avr.1991, 17:00	1773,2

Figure IV 86 : débits et volumes simulés (May 1991)

Global Summary Results for Run "Run 1"

Project: CRUE_27061991 Simulation Run: Run 1

Start of Run: 02juin1991, 00:00 Basin Model: Basin 1
End of Run: 07juin1991, 01:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 29oct.2020, 10:35:41 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
BV_03	84	7,0	02juin1991, 16:00	692,0
BV_07	42	1,0	02juin1991, 14:00	118,6
JUNC_02	126	8,0	02juin1991, 15:00	810,6
SOUDHES_1	126	8,0	02juin1991, 17:00	820,1
BV_06	90	1,0	02juin1991, 19:00	235,8
BV_02	154	5,0	02juin1991, 14:00	419,4
BV_01	107	14,0	02juin1991, 12:00	758,6
JUNC_01	262	19,0	02juin1991, 13:00	1178,0
ROBOE_0	262	19,0	02juin1991, 14:00	1184,0
BV_04	40	1,0	02juin1991, 14:00	106,7
ROBOE_1	303	20,0	02juin1991, 14:00	1291,0
BV_05	22	1,0	02juin1991, 15:00	132,7
MORRI	22	1,0	02juin1991, 16:00	134,0
JUNC_03	325	21,0	02juin1991, 14:00	1424,9
ROBOE_2	325	21,0	02juin1991, 14:00	1427,0
SOUDHES_2	217	10,0	02juin1991, 17:00	1056,2
BV_08	5	0,0	02juin1991, 13:00	79,0
JUNC_04	547	31,0	02juin1991, 15:00	2562,1
CHEMORA_1	547	31,0	02juin1991, 17:00	2599,4
BV_09	218	10,0	02juin1991, 15:00	903,7
CHEMORA_2	765	41,0	02juin1991, 17:00	3503,8
EXCUTOIRE	765	41,0	02juin1991, 17:00	3503,8

Figure IV 87 : débits et volumes simulés (Jun 1991)

Global Summary Results for Run "Run 1"

Project: CRUE_27071991 Simulation Run: Run 1

Start of Run: 23juil. 1991, 00:00 Basin Model: Basin 1
End of Run: 28juil. 1991, 01:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 29oct.2020, 10:36:15 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units: ☐ MM ☒ 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
BV_03	84	0,0	23juil. 1991, 00:00	62,7
BV_07	42	0,0	23juil. 1991, 00:00	62,1
JUNC_02	126	1,0	23juil. 1991, 00:00	124,8
SOUDHES_1	126	1,0	23juil. 1991, 02:00	134,0
BV_06	90	0,0	23juil. 1991, 00:00	63,6
BV_02	154	1,0	23juil. 1991, 14:00	109,0
BV_01	107	1,0	23juil. 1991, 12:00	129,5
JUNC_01	262	2,0	23juil. 1991, 13:00	238,4
ROBOE_0	262	2,0	23juil. 1991, 14:00	243,5
BV_04	40	0,0	23juil. 1991, 00:00	62,2
ROBOE_1	303	3,0	23juil. 1991, 14:00	305,9
BV_05	22	0,0	23juil. 1991, 00:00	62,0
MORRI	22	0,0	23juil. 1991, 00:00	63,2
JUNC_03	325	3,0	23juil. 1991, 14:00	369,1
ROBOE_2	325	3,0	23juil. 1991, 14:00	371,0
SOUDHES_2	217	1,0	23juil. 1991, 00:00	197,8
BV_08	5	0,0	23juil. 1991, 00:00	61,2
JUNC_04	547	5,0	23juil. 1991, 14:00	630,1
CHEMORA_1	547	4,0	23juil. 1991, 17:00	666,3
BV_09	218	0,0	23juil. 1991, 13:00	75,6
CHEMORA_2	765	5,0	23juil. 1991, 16:00	742,5
EXCUTOIRE	765	5,0	23juil. 1991, 16:00	742,5

Figure IV 88 : débits et volumes simulés (Jul 1991)

Tableau IV.13 : les résultats de calibration et de la validation du modèle

Evénement	Q p Observe (m3/s)	Q p simulé (m3/s)	Différence %
15-nov-90	22.8	16.0	0,28
23-mars-91	183,4	168	0,08
08-avr-91	24,04	10	0,58
10-mai-91	17,88	17	0,04
27-juin-91	44,25	41	0,07
27-juil-91	5,64	5	0,11

IV.11.4. La calibration et validation du modèle hydro-sédimentologique :

Avant la validation de la partie hydrologique du modèle, nous avons préparé les fichiers de simulations concernant les sédiments des trois premiers événements testés et calibrés déjà dans la première partie du modèle (pluie - débit liquide) pour chaque bassin. En prenant en compte les sept formules de transport solide et les quatre méthodes de calcul de vitesse utilisées par HecHms, pour analyser la sensibilité du modèle aux différentes combinaisons. Ainsi, nous avons 84 fichiers de simulation. Et pour chacun de ces fichiers de simulation, on aura les données suivantes :

Tableau IV.14 : Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation

Module du modèle	Entrée	Unité
Module bassin	Densité des matériaux du lit d'oued	-
	Le poids volumique du sable et gravier	Kg/m ³
	Le poids volumique de l'argile	Kg/m ³
	Le poids volumique du limon	Kg/m ³
Module érosion	Facteur d'érodabilité K	ton. h/ N. ha
	Facteur topographique LS	-
	Facteur de culture C	-
	Facteur de conservation et d'aménagement P	-
	Débit initial	m ³ /s
	Exposant de forme	-
données appariées	Granulométrie du lit d'oued	-

Après la calibration et la validation du modèle hydro-sédimentologique; La combinaison de l'équation de Engeluand Hansen avec la méthode de calcul de vitesse de Rubay avec une couche active des lits des oueds moyenne de 15 cm était plus compatible avec les conditions naturelles du bassin oued Chemora.

La récapitulatif des données dans les deux tableaux suivants :

Tableau IV.15 : les tableaux caractéristiques des différents affluents.

		02/01/1991	30/10/1990	15/11/1990
BV1	C	0,95	0,54	0,99
	TLAG (min)	29,71	39,25	29,02
	CN	89,57	81,82	90,14
	P	3,50	1,40	29,50
BV2	C	0,95	0,65	0,97
	TLAG (min)	35,92	43,83	35,40
	CN	89,65	84,29	90,00
	P	3,01	1,13	25,63
BV3	C	0,93	0,66	0,99
	TLAG (min)	25,98	31,52	24,99
	CN	88,65	83,29	89,63
	P	2,89	2,20	17,26
BV4	C	0,96	0,74	0,98
	TLAG (min)	43,86	50,47	43,25
	CN	90,38	86,78	90,71
	P	3,20	0,51	14,66
BV5	C	0,97	0,76	0,98
	TLAG (min)	72,19	84,32	71,85
	CN	88,23	83,94	88,36
	P	2,88	1,01	15,20
BV6	C	0,96	0,75	0,97
	TLAG (min)	39,83	46,14	39,63
	CN	89,18	85,25	89,32
	P	3,54	2,17	12,83
BV7	C	0,91	0,71	0,95
	TLAG (min)	22,38	25,91	21,72
	CN	88,57	84,57	89,33
	P	4,08	2,85	11,69
BV8	C	0,95	0,76	0,99
	TLAG (min)	6,97	7,85	6,79
	CN	89,97	86,90	90,58
	P	3,03	0,35	13,18
BV9	C	0,92	0,78	0,94
	TLAG (min)	27,14	29,69	26,76
	CN	89,53	87,21	89,88
	P	3,80	1,15	13,60

		27/07/1991	30/08/1991	28/09/1990
BV1	C	0,66	0,66	0,56
	TLAG (min)	36,16	36,14	38,71
	CN	84,27	84,29	85,76
	P	8,76	9,91	11,83
BV2	C	0,68	0,69	0,55
	TLAG (min)	43,05	42,72	47,10
	CN	84,81	85,03	85,74
	P	13,38	12,65	5,57
BV3	C	0,58	0,57	0,47
	TLAG (min)	33,37	33,76	36,37
	CN	81,56	81,20	83,52
	P	16,77	9,85	18,02
BV4	C	0,80	0,80	0,74
	TLAG (min)	48,65	48,69	50,42
	CN	87,77	87,74	83,18
	P	6,49	4,19	11,07
BV5	C	0,79	0,79	0,73
	TLAG (min)	82,32	82,23	86,51
	CN	84,64	84,67	84,26
	P	12,26	7,11	15,87
BV6	C	0,78	0,79	0,70
	TLAG (min)	45,12	44,98	47,76
	CN	85,88	85,97	78,82
	P	11,58	9,71	18,80
BV7	C	0,73	0,75	0,65
	TLAG (min)	25,32	25,06	26,86
	CN	85,23	85,52	86,81
	P	9,88	10,74	6,71
BV8	C	0,78	0,79	0,70
	TLAG (min)	7,74	7,74	8,18
	CN	87,27	87,27	82,24
	P	5,59	3,16	16,95
BV9	C	0,76	0,77	0,70
	TLAG (min)	30,14	29,93	31,30
	CN	86,80	86,99	82,14
	P	10,06	6,47	18,04

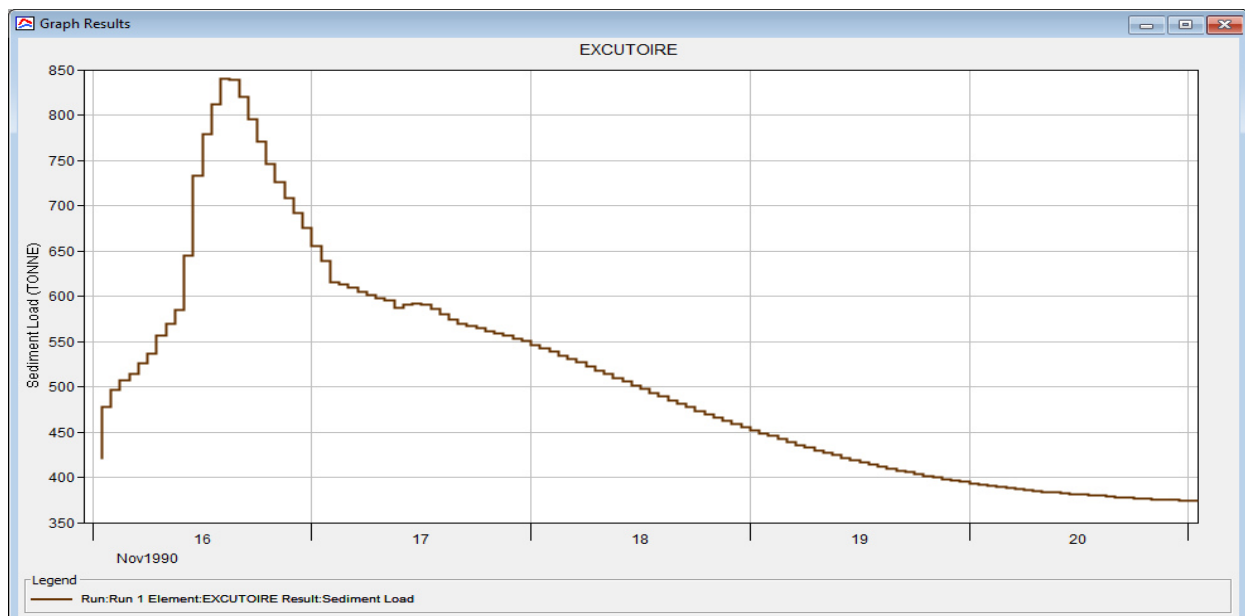
		17/12/1990	03/02/1991	23/03/1991
BV1	C	0,70	0,88	0,58
	TLAG (min)	35,50	31,25	38,15
	CN	84,80	88,29	82,68
	P	16,72	7,99	28,28
BV2	C	0,80	0,89	0,61
	TLAG (min)	40,17	37,32	45,16
	CN	86,74	88,68	83,41
	P	15,55	9,13	34,18
BV3	C	0,60	0,82	0,52
	TLAG (min)	33,45	28,23	34,98
	CN	81,49	86,44	80,08
	P	12,62	8,80	34,93
BV4	C	0,75	0,94	0,67
	TLAG (min)	50,35	44,65	52,74
	CN	86,85	89,94	85,57
	P	22,09	7,70	27,57
BV5	C	0,72	0,92	0,72
	TLAG (min)	87,06	74,98	87,38
	CN	82,99	87,23	82,88
	P	15,99	8,29	37,01
BV6	C	0,72	0,91	0,67
	TLAG (min)	47,27	41,17	48,91
	CN	84,56	88,34	83,57
	P	12,74	7,60	36,63
BV7	C	0,68	0,89	0,62
	TLAG (min)	26,28	22,72	27,47
	CN	84,16	88,18	82,84
	P	12,70	7,08	31,27
BV8	C	0,71	0,93	0,67
	TLAG (min)	8,14	7,04	8,38
	CN	85,89	89,72	85,09
	P	23,33	7,67	26,70
BV9	C	0,72	0,91	0,63
	TLAG (min)	30,97	27,39	32,76
	CN	86,05	89,30	84,46
	P	17,23	7,36	32,19

		08/04/1991	10/05/1991	27/06/1991
BV1	C	0,49	0,40	0,53
	TLAG (min)	41,10	43,99	39,67
	CN	80,37	78,17	81,48
	P	13,17	8,53	10,92
BV2	C	0,50	0,40	0,54
	TLAG (min)	48,89	52,82	47,45
	CN	80,99	78,50	81,92
	P	13,55	6,76	13,88
BV3	C	0,43	0,37	0,48
	TLAG (min)	37,59	39,21	36,09
	CN	77,73	76,31	79,07
	P	15,38	13,93	16,11
BV4	C	0,58	0,47	0,72
	TLAG (min)	56,35	61,00	51,13
	CN	83,66	81,26	86,43
	P	9,91	10,34	8,31
BV5	C	0,65	0,57	0,73
	TLAG (min)	92,14	97,82	85,93
	CN	81,25	79,35	83,38
	P	13,39	11,93	9,34
BV6	C	0,56	0,48	0,71
	TLAG (min)	52,88	56,36	47,38
	CN	81,19	79,16	84,49
	P	13,42	15,21	13,05
BV7	C	0,47	0,35	0,59
	TLAG (min)	30,70	33,69	28,14
	CN	79,38	76,28	82,12
	P	12,36	16,39	16,50
BV8	C	0,58	0,52	0,70
	TLAG (min)	8,95	9,36	8,15
	CN	83,15	81,78	85,86
	P	8,80	10,13	8,21
BV9	C	0,54	0,44	0,68
	TLAG (min)	35,16	37,74	31,85
	CN	82,36	80,16	85,28
	P	12,55	14,03	9,57

Tableau IV.16 : les tableaux caractéristiques des différents affluents.

	Area m	Leng m	LAG-min-	Ls	K	P	BasinSlope	Slp riv	KS
BV1	107987953,95	16565,52	87,14	7,90	0,01	0,81	18,76	0,008	0,11
BV2	154701887,16	19268,49	107,75	7,26	0,01	0,76	16,24	0,002	0,18
BV3	84244270,56	11404,67	68,11	5,61	0,01	0,74	14,52	0,008	0,12
BV4	40346240,13	14779,85	53,95	1,40	0,01	0,61	6,71	0,023	0,09
BV5	22031614,99	25828,66	83,48	1,45	0,01	0,61	7,19	0,023	0,14
BV6	90754636,08	11985,87	46,64	1,38	0,01	0,61	6,41	0,022	0,14
BV7	42065817,64	6543,50	33,96	1,83	0,01	0,63	8,10	0,015	0,16
BV8	5293895,43	2005,38	18,93	3,26	0,01	0,68	11,27	0,006	0,09
BV9	218236139,52	9346,72	53,89	2,49	0,01	0,65	9,03	0,009	0,11

IV.11.5 Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée :

**Figure IV 89 :** Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée

B .V .Chemora 15/11/1990

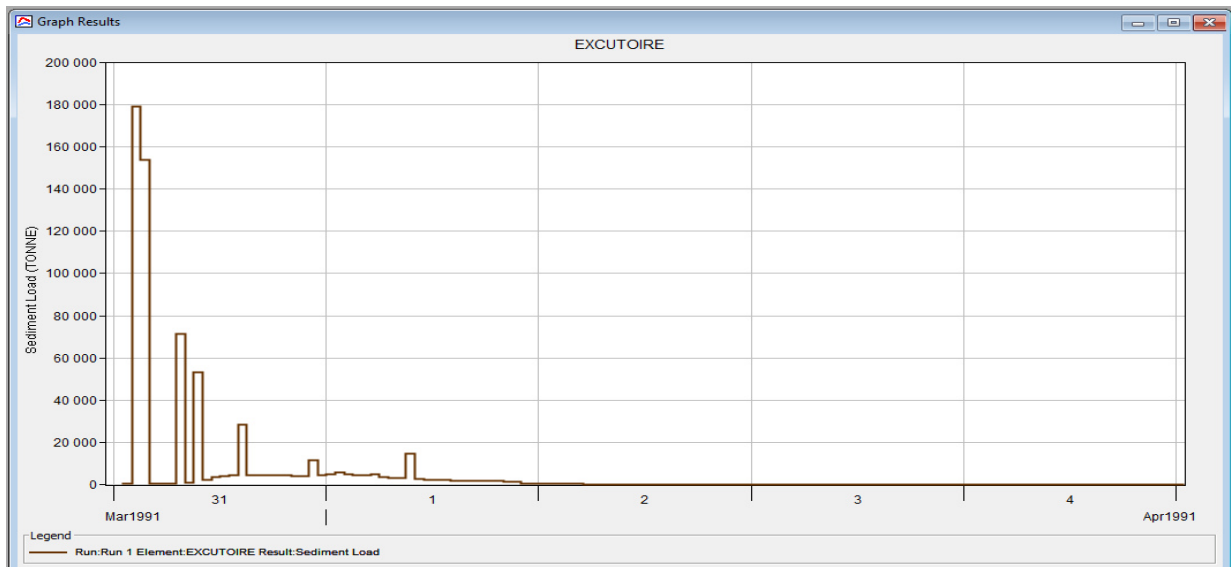


Figure IV 90 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée

B .V .Chemora 23/03/1991

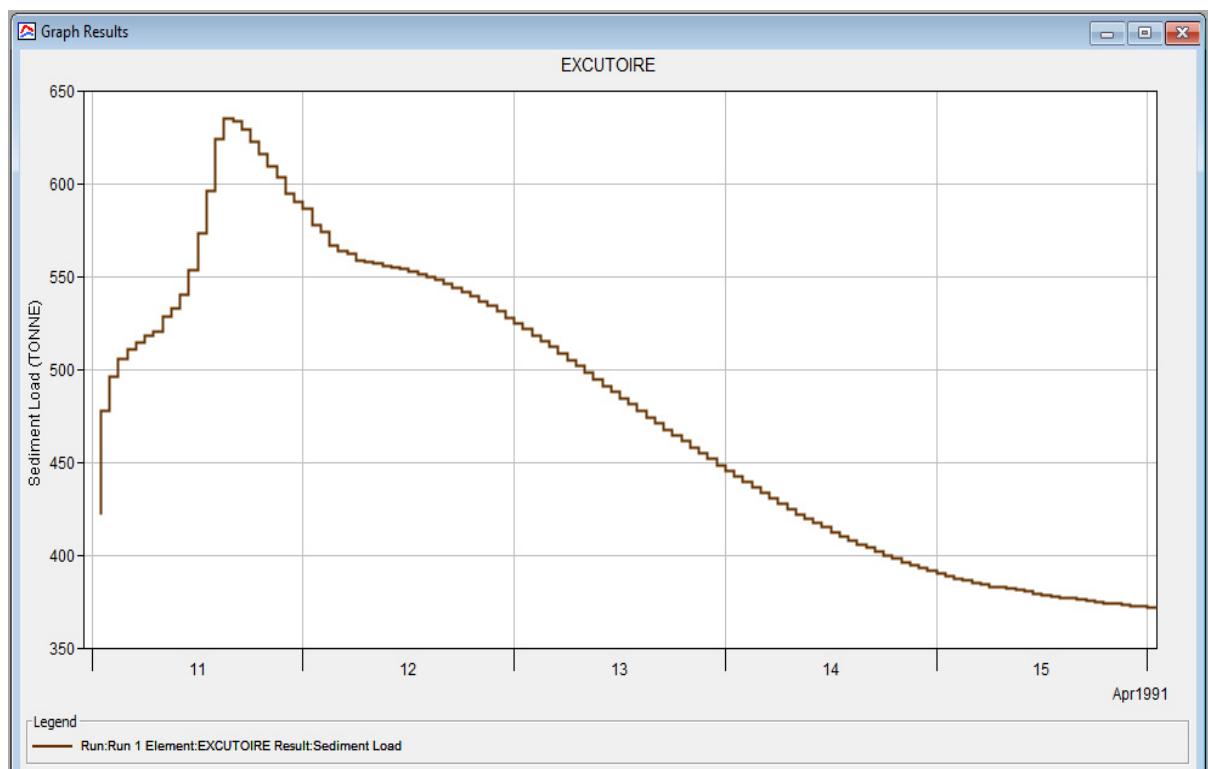


Figure IV 91 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée

B .V .Chemora 08/04/1991

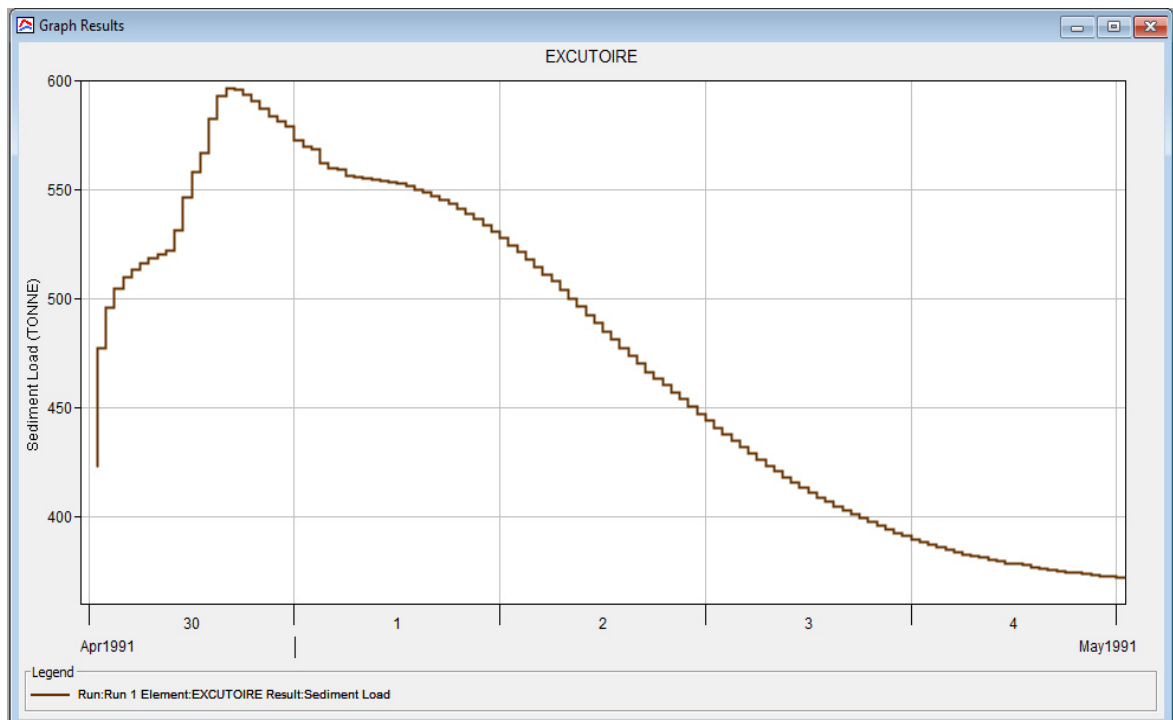


Figure IV 92 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée

B. V. Chemora 10/05/1991

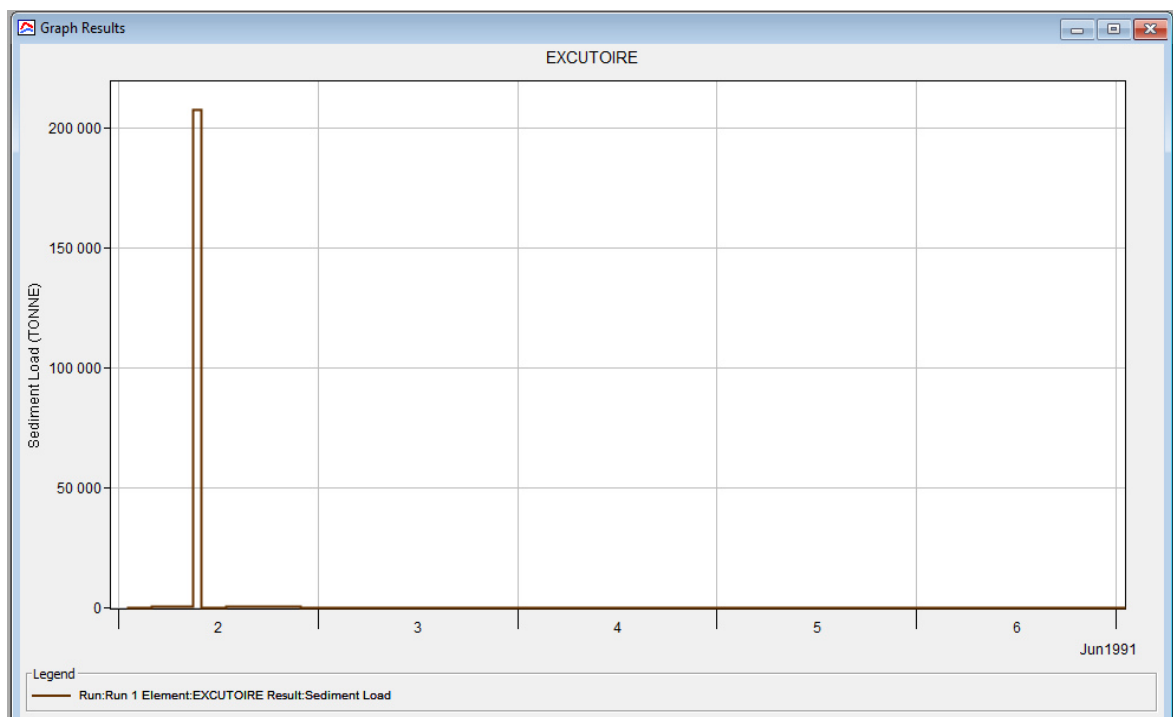


Figure IV 93 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée

B. V. Chemora 27/06/1991

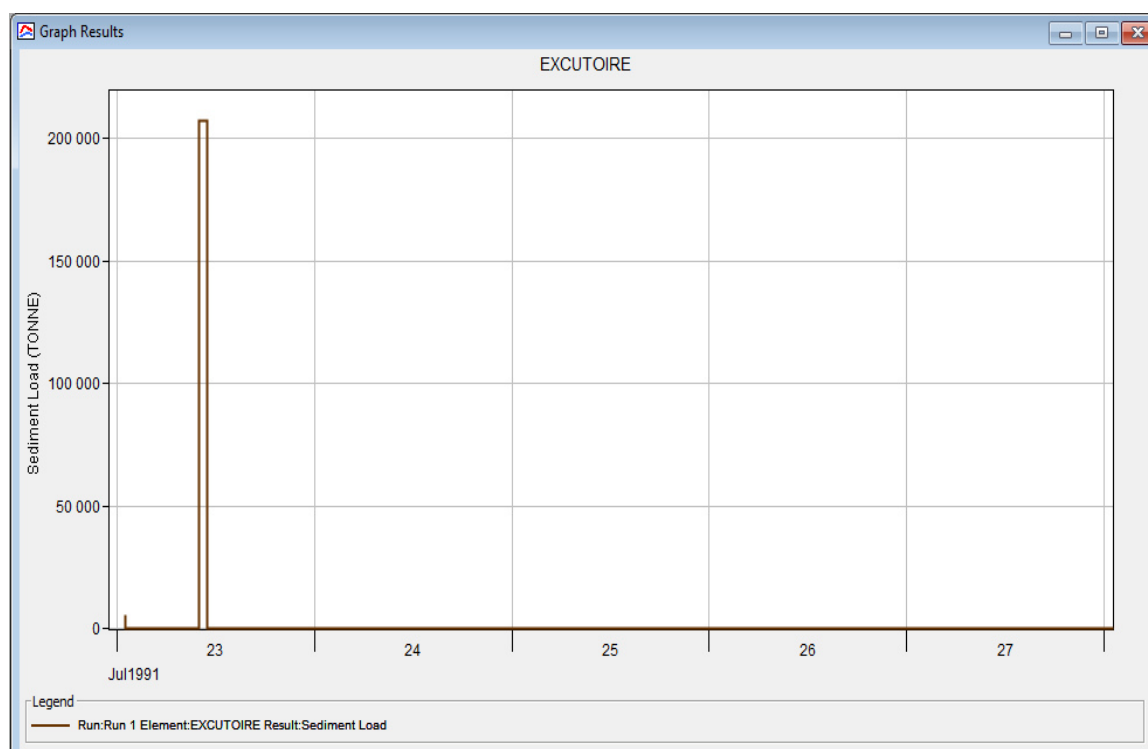


Figure IV 94 : Courbe montrant le volume de sédiments chargés à la sortie de la vallée

B .V. Chemora 27/07/1991

Tableau IV.17 : Les résultats de la validation et la calibration du modèle hydro-sédimentologique

Événement	A.S. o b s (Tonnes)	A .S. s i m (Tonnes)	Différence %
15-nov-90	13058,4	12299,94	5,81
23-mars-91	227129,7	218938,73	3,61
08-avr-91	32678,4	28918,8	11,50
10-mai-91	6539,7	5741,64	12,50
27-juin-91	73119,8	64759,75	11,43
27-juil-91	14897,8	12951,95	13,06

IV. 13 Conclusion

L'adéquation de bassin versant d'Oued chemora en termes de production de sédiments est examinée à travers le modèle MUSLE dans l'environnement du HEC-HMS.

Et l'application du programme Hec- Hms , utilisé pour estimer la charge solide qu'il transporte. Ensuite, il change en fonction des propriétés physiques et dynamiques de l'érosion dans les cours d'eau et le bassin versant.

La combinaison de l'équation du transport de Engelund Hansen avec la méthode de calcul de la vitesse de Van Rubey, pour une couche active moyenne de 15 cm des lits des oueds, était plus compatible avec les conditions naturelles du bassin d'oued Chemora.

Conclusion générale

Le bassin oued Chemora qui est confronté au problème de dégradation des sols, l'objet de notre travail est la simulation du phénomène d'érosion à l'échelle de la crue, ainsi que la quantification des totaux exportés hors ce bassin,.

Ce bassin offre des conditions très favorables à la mobilisation et au transport des matériaux, les précipitations agressives s'abattent sur un ensemble morphologique très sensible à l'érosion.

Les transports solides en suspension varient d'une année à l'autre, d'une saison à une autre et d'une crue à une autre ;ils mettent en évidence l'irrégularité des précipitations et de l'hydraulicité.

La concentration est maximale en automne et au printemps, lors des violentes crues. Elles sont faibles en année de faible hydraulicité, en saison sèche, et en hiver et en absence de crues.

La modélisation du transport solide à différentes échelles a été étudiée , en commençant par l'application de l'équation universelle des pertes de sol modifiée (MUSLE) pour prédire le potentiel d'érosion durant les crues, suivi d'une modélisation du transport solide dans les cours d'eau en testant les différentes formules du transport solide dans les cours d'eau disponibles dans le modèle Hec-Hms ainsi que leurs capacités de transport, pour trouver à la fin la quantité des sédiments arrivant à l'exécutoire.

La calibration du modèle hydrologique HEC HMS a été effectuée pour les 10 fichiers de simulations en tenant compte des averses de type II et en utilisant le débit de pointe, elle a conduit aux résultats :

- Pour tous les événements, l'hydrogramme simulé était de même forme que celui observé.

Les valeurs des débits simulés des crues par le modèle hydrologique Hec Hms sont proches de celles mesurées à la station hydrométrique Chemora.

La combinaison de l'équation du transport de Engelund Hansen avec la méthode de calcul de la vitesse de Van Rubey, pour une couche active moyenne de 15 cm des lits des oueds, était plus compatible avec les conditions naturelles du bassin d'oued Chemora.

Références bibliographiques

- [1] Bouanani .A , 2004 , Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW— Algérie), doctorat d'état en géologie appliquée : Option hydrogéologie; université de Tlemcen,
- [2] M.Henri PELLERAY, Etude sommaire des transports solides dans un petit bassin du nord — cameron, Service Hydrolqgique de l'ORSTOM au Cameroun
- [3] Benaicha .A, Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages, Mémoire de Magister en Hydraulique, Option : Simulation Numérique Des Ecoulements Polyphasiques, université de Batna.
- [4] FREY.P , ,1991 Etude expérimentale et simulation numérique du transport turbulent de particules solides dans un décanteur, Docteur, spécialité :Mécanique, L'ecole centrale de Lyon.
- [5] Bouchelkia .A , 2009, Etude du transport solide dans un bassin versant et son impact sur l'envasement des barrages —cas du bassin versant de chellif- doctorat en Hydraulique, université de Tlamcen.
- [6] Baloul D, 2012, Développement, interprétation et évaluation de la précision de la relation entre la concentration des sédiments en suspension et le débit liquide. Etude de cas: sous bassin versant de l'Oued Tafna et d'Oued Isser, Magister : Option Ecoulement et transport solide, université de Tlemcen.
- [7] Komercu. M, Onsoy. H, Kankal. M, Karasu. S, Etude des transports solides en vue de gestion des ouvrages hydrauliques dans la région de la mer noire, Est en Turquie.
- [8] Gestion intégrée des crues: aspects sociaux et participation des parties prenantes, politiques de gestion des crues.
- [9] Jean, Paul GRANIER, , Juin1993, la mesure in situ du débit solide des cours d'eau, ORSROM Service hydrologique.
- [10] Alain RECKING, Janvier 2012, Cours d'hydraulique et de transport solide, Master II Paris 6.

Références bibliographiques

- [11] Belagoune. F, , 2012, Etude et modélisation des crues des cours d'eaux en milieu semi – aride «Cas des grands bassins versants 05, 06 et 07 », Magister en Hydraulique Option : Aménagement hydraulique en zones arides, université de Ouargla.
- [12] Bachi .M ,2011, Problématique du risque inondation en milieu urbain ; cas de l'agglomération de sidi Bel Abbes, Magister en Hydraulique : Option Ecoulement et Transport solide, université de Tlemcen.
- [13] Achite .M ,Ouillon .S, Suspended sediment transport in a semiarid American Society of Civil Engineers
- [14] Berghout, A, 2017 ; Modélisation du transport solide dans certains bassins versants du nord-est de L'ALGERIE. Thèse de doctorat Béjaia 2017.
- [15] Gitas, I.Z., K., Douros, C., Minakou, G.N., Silleos, et C.G., Karydas, 2009. Multitemporal soil erosion risk assessment in n. Chalkidiki using a modified usle raster model. EARSeLe Proceedings 8, 1/2009. pp 40-53.
- [16] Hathaway, G.A., 1945. Design of drainage facilities. Transactions of American Society of Civil Engineers.
- [17] Hjulström F. (1935). Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the riverHua Luab, Christopher Morana, Ian Prossera and MurugesuSivapalanc, Modelling Sediment Delivery Ratio Based on Physical Principles, a CSIRO Land and Water, Canberra, ACT 2601, Australia.
- [18] Laffite R. 1939 – Etude de géologie de l'Aurès. Doctorat ès Sciences Paris, Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, 1re série, n° 15, 484 p., 26 fig., 35 cartes, 1 carte au 1/200000e.
- [19] Le site : <ftp.soilgrids.org>.
- [20] 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.
- [21] Tidjani Ahmed et Ali Khorsi et Ziani. Detection de la végétation à partir d'une image satellitaire ; Mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme licence LMD En électronique Filière: Electronique Option : Licence (STR). Universite Amar Thelidjilaghout, Algérie.

Références bibliographiques

[22] Turc, L.: Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date (in French), Annual Agronomy, 1961.

[23] watershed, WadiAbd, Algeria (1973-1995), Journal of Hydrology (2007)

[24] Wischmeier, W.H. and smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses—a guide for conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, Washington.

[25] Berghout, A, 2020. Méthodologie pour l'élaboration des cartes de facteur d'érodabilité K. Note de cours Université de M'sila 2020.