

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

THÈSE

Présentée par

BERGHOUT Ali

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Filière : Hydraulique

Option : Hydraulique Générale

Thème

**MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS CERTAINS
BASSINS VERSANTS DU NORD EST DE L'ALGERIE**

Soutenue publiquement le : 29/04/2017

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr : ALLOUACHE Atmane	MCA	Univ. de Bejaia	Président
Mr : MEDDI Mohamed	Prof	ENSH Blida	Rapporteur
Mr : BERREKSI Ali	MCA	Univ. de Bejaia	Examinateur
Mr : HABI Mohammed	Prof	Univ. de Tlemcen	Examinateur
Mr : MERZOUK Belkacem	Prof	Univ. de M'sila	Examinateur
Mr : REMINI Boualem	Prof	Univ. de Blida	Examinateur

Année Universitaire : 2016/2017

Table des matières

Table des matières	i
Dédicaces	viii
Remerciements	ix
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xviii

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Première partie (A)

Introduction	05
Chapitre I : Erosion hydrique	
I-1- Introduction	06
I-2- Origine et mécanisme de l'érosion hydrique	06
I-2-1- Impacte de la goutte de pluie	06
I-2-2- Ruissellement	08
I-2.3- Etat hydrique initial	09
I-3- Facteurs influençant l'érosion	09
I-3- a- Le climat	09
I-3.b. La nature du sol	10
I-3.c. La végétation	10
I-3.d. La topographie	11
I-4- Les formes de l'érosion hydrique	11
I-4-1- L'érosion en nappe ou "sheet érosion"	11
I-4-2- L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill érosion)	12
I-4-3- L'érosion en masse	14
I-4.4 L'érosion dans les cours d'eau	14
I-4.5 Une classification pratique	14
I-5- Quantification de l'érosion hydrique	15
a- Equation universel des pertes en sols (USLE)	15
a-1- Historique	15
a-2- Description des différents termes de l'équation-de WISCHMEIER	16
a-2-1- Le facteur d'agressivité climatique (R)	16
a-2-2- Le facteur sol (K)	17
a-2-3- Le facteur topographique (L.S)	20
a-2-4- Le facteur C ou indice de culture	21
a-2-5- Le Facteur P ou indice des aménagements antiérosifs	22
b- L'équation Universelle des pertes en terre modifiée : MUSLE (Williams 1975)	22
c- L'équation Universelle des pertes en terre révisée (Renard et al, 1991)	23
d- Formule de Henin "1950"	24
e- Formule de Gavrilovic (1960)	24
f- Formule de L' A.N.R.H (1970)	25
g- Formule de Tixeront (1960)	25
h- Formule de Fournier (1960)	26
i- Formule de Poliakov	27
j- Formule de Meddi (2016)	27

I-6- L'impact et conséquence de l'érosion	27
Chapitre II : Transport solide dans les cours d'eau	
II-1- Introduction	29
II-2- Les types du transport solide	29
a- Transport solide par charriage	30
b- Transport solide en suspension	31
c- Le transport solide en dissolution	33
II-3- Méthodes de calculs	33
II-3-1- modélisation mathématique	34
II-3-1-1-Le modèle mathématique	34
II-3-1-2- Phase liquide : équations de Saint-Venant	34
II-3-1-3- Conservation de la masse des sédiments et déformation du lit	35
II-3-1-4- Equation dynamique : débit solide et capacité de transport	35
II-3-1-5- Lois de chargement	37
II-3-1-6- Formulation des lois de chargement	37
II-3-1-7- Inertie des particules en mouvement	38
II-3-1-8- Inertie de la structure du fond	39
II-3-1-9- Comparaison des différentes approches	41
II-3-1-10- Transport solide en crue	41
II-3-2- Le modèle physique	43
II-3-3- Méthodes empiriques	43
II-3-4- Méthodes approchées basées sur les mesures de terrain	50
II-3-4-1- Transport par charriage	50
II-3-4-2- Transport en suspension	50
II-3-4-3- La mesure du taux de remplissage des retenues	51
II-4 - Erosion du fond, transport et dépôt dans un cours d'eau naturel	51
Synthèse de la première partie	52

Deuxième partie (B)

Introduction	53
CHAPITRE III : Description physiographique du milieu d'étude	
III-1- Aperçu géographique	
III-2- Description physiographique	54
III-2-1- Orographie	55
III-2-1-1- Bassin versant Oued Labiod	55
A- Les montagnes	55
B- Les piedmonts	55
III-2-1-2- Bassin versant Oued Chemora	55
A- La montagne	57
B- Le piedmont	57
C- La plaine	57
III-2-2- Lithologie	57
III-2-2-1- Bassin versant d'Oued Labiod	57
III-2-2-2- Bassin versant Oued Chemora	57
	59

III-2-3- Les pentes	61
III-2-4- Occupation du sol	62
III-2-4-1- Classification de la végétation	63
A- Les surface bien protégées	63
B- Les surfaces incomplètement protégées.	63
C- Les surfaces mal protégées ou nues	63
III-2-4-2- Bassin versant Oued Labiod	64
III-2-4-3- Bassin versant Oued Chemora	65
III-3- Caractéristiques morphométriques et réseau hydrographique des bassins versants	67
A- Présentation	67
1- Bassin Oued Labiod	67
2- Bassin Chemora	68
B- Profils en long	70
1- Bassin Oued Labiod	70
2- Bassin Chemora	71
C- Le temps de concentration	72
1- Bassin Oued Labiod	72
2- Bassin Chemora.	73
D- Récapitulatif	73
III-4- Conclusion	75

CHAPITRE IV : Les caractéristiques climatiques

IV-1- Températures	76
IV-2- L'humidité relative de l'air	77
IV-3- Régime des vents	77
IV-4- La neige	78
IV-5- L'évaporation	78
IV-6- Les précipitations	79
IV-6-1- Le réseau pluviométrique et les séries d'observation	79
IV-6-2- Les précipitations annuelles et leur variabilité	80
A. Le secteur sub-humide	82
B. Le secteur aux précipitations moyennes	83
C. Le Secteur sec	83
IV-6-3. Les pluies journalières maximales	84
IV.6.4-Estimation des pluies journalières maximales et leur fréquence	85
IV-7. Combinaison des facteurs thermique et pluviométrique : les zones bioclimatiques	86
IV-8. L'évapotranspiration potentielle (E.T.P.)	87
IV-9. Conclusion	88

CHAPITRE V : Etude des écoulements superficiels

V-1- Introduction	89
V-2- Etude des apports liquides	89
V-2-1- Estimation des apports liquides moyens interannuelles en utilisant les mesures existantes	89
V-2-2- Estimation des lames d'eau écoulées	89
V-3- Etude des débits extrêmes	91

V-3-1-La période froide	92
V-3-2- La période chaude	92
V-3-3- Les différentes méthodes d'estimation des débits des crues	93
V-3-3-1- Formules empiriques régionales de Drouhin, Mallel et Paquant	93
V-3-3-2- Formules empiriques régionales de Meddi	94
V-3-3-3- Par traitement statistique des données d'observation (données de mesure)	95
V-3-3-4- Méthode faisant intervenir les pluies Méthode du Gradex	97
V-4- Conclusion	99

CHAPITRE VI : Etude des apports solides

VI-1- Origine et ampleur du phénomène	100
VI-2- Evaluation des transports solides basée sur les données de mesures	100
VI-2-1- Méthode basée sur la mesure de la turbidité au niveau de réseau hydrométrique	100
VI-2-2- Méthode basée sur la mesure du taux de remplissage des retenues	101
VI-2-3- Evaluation des transports par charriage	101
VI-3- Evaluation des apports solides dans les deux bassins en utilisant les mesures de la turbidité au niveau des stations hydrométriques	101
VI-3-1- Variabilité interannuelles des apports	103
VI-3-2- Variabilité mensuelle des apports	107
VI-3-3- La relation entre le débit liquide et le débit solide	110
VI-3-4- Contribution des crues aux apports solides moyens annuels	112
VI-4- Evaluation des apports solides dans le bassin d'oued Labiod en utilisant les mesures du taux de remplissage de la retenue	112
VI-5- Conclusion	114
Conclusion de la deuxième partie	115

Troisième partie (C)

Introduction	116
CHAPITRE VII : Présentation des modèles HEC-HMS & HEC RAS	
VII-1- Modèle HEC-HMS	118
VII-1-1- Modèle hydrologique HEC-HMS	118
VII-1-1-1- Modélisation des précipitations	118
VII-1-1-1-1- Répartition temporelle	118
VII-1-1-1-2- Répartition spéciale	118
VII-1-1-1-3- Evènements pluvieux hypothétiques.....	119
VII-1-1-2- Modélisation de l'Evapo-Transpiration (ETP).....	122
VII-1-1-3- Modélisation des pertes	122
VII-1-1-3-1- Concept de base	122
a- Le modèle de pertes initiales et à taux constant	123
b- Le modèle du Curve Number (CN)	123
c- La méthode CN en grille	124
d- Le modèle de Green & Ampt	125
e- Le modèle continue SMA (Sol-Moisture Accounting).....	125

VII-1-1-3-2- Application et limitation des modèles de ruissellement utilisés avec le HEC-HMS	126
VII-1-1-4- Modélisation du ruissellement direct	126
VII-1-1-4-1- Les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire (HU) ...	126
a- Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur	127
b- Hydrogramme unitaire paramétrique	127
VII-1-1-4-2- Modèles d'hydrogrammes unitaires synthétiques	127
a- Le modèle de SNYDER	127
b- La méthode du SCS (Soil Conservation Service)	128
VII-1-1-4-3- La méthode de CLARK	129
VII-1-1-4-4- Modèle de l'onde cinématique	129
VII-1-1-5- Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC-HMS	131
a- Équation de continuité	131
b- Equation de quantité de mouvement	131
VII-1-1-5-1- Modèle de Puls (modified puls)	131
VII-1-1-5-2- Modèle de Muskingum	132
VII-1-1-5-3- Le modèle du décalage (lag model)	133
VII-1-1-5-4- Le modèle de l'onde cinématique	133
VII-1-1-5-5- Le modèle Muskingum-Cunge	133
VII-1-2- Modèle hydro-sédimentologique HEC-HMS : Érosion et transport des sédiments	135
VII-2- Modèle HEC-RAS	135
VII-2-1- Modèle hydraulique HEC-RAS	136
VII-2-2- Modèle hydrau-sédimentologique HEC-RAS	136
VII-2-2-1- Hydrodynamique	139
VII-2-2-2- Calculs de transport :	139
VII-2-2-3- Contraintes physiques à l'érosion et au dépôt	139
VII-2-2-4- Modificateurs temporels	141
VII-2-2-5-Tri et Armoring	141
VII-3- Intégration du HEC HMS avec HEC-RAS.....	142
VII-3-1- Grain de classe Modification	143
VII-3-2- Modèle Connection	144
VII-3-3- ADH	145
VII-4- Conclusion	146

CHAPITRE VIII : Estimation de l'érosion des sols d'après le modèle RUSLE

VIII-1- Introduction	148
VIII-2- Agressivité climatique (R)	150
VIII-3- Facteur de l'érodabilité des sols (K)	158
VIII-4- Facteur topographique (LS)	162
VIII-5- Le couvert végétal (occupation du sol C)	164
VIII-6- Pratiques culturales (P)	174
VIII-7- Conclusion : érosion potentielle (A)	175

CHAPITRE IX : Application du modèle HEC HMS

IX-1- Modèle hydrologique Précipitations - débits liquides	186
IX-1-1- La structure du modèle HEC-HMS choisie et les données d'entrée du modèle	186
IX-1- 1-1- Le type de modélisation	186
IX-1-1-2- Le module météorologique	186
IX-1-1-3- La fonction de production : la NRCS CN	188
IX-1-1-3-1- Le concept de base	188
IX-1-1-3-2- Les variables	189
a- Découpage des bassins :	189
b- La carte de sols	193
c- La carte d'occupation du sol ou du couvert végétal	193
d- Le pourcentage d'imperméable	194
IX-1-1-3-3- Les paramètres	195
a- Curve number CN	195
b- Abstraction initiale Ia	203
c- La pluie	204
IX-1-1-4- La fonction de transfert : l'hydrogramme unitaire de la NRCS	209
a. Le concept de base	209
b. Les paramètres	210
IX-1-1-5- Le débit de base : la récession exponentielle	211
IX-1-1-5-1- Le concept de base	211
IX-1-1-5-2- La variable	212
IX-1-1-5-3- Les paramètres	212
a- La constante de récession RC	213
b- Le seuil Td.....	213
IX-1-1-6- Les avantages de la combinaison modulaire choisie	213
IX-1-1-7- Justification du choix du modèle	213
IX-1-2- L'élaboration du modèle (pluie - débit liquide)	214
IX-1-3- La calibration du modèle	214
IX-1-4- La validation du modèle	217
IX-1-5- Synthèse sur la modélisation hydrologique	219
IX-2- Modèle hydro-sédimentologique - MUSLE (Apports solide)	221
IX-2-1- L'élaboration du modèle MUSLE (Apports solide)	221
IX-2-2- La calibration du modèle (MUSLE et du transport solide)	223
IX-2-3- La validation du modèle (MUSLE et du transport solide).....	225
IX-2-4- Synthèse sur la modélisation hydro-sédimentologique	227
IX-3 Estimation des débits liquides et solides des averses de différentes périodes de retour par HEC HMS.....	228
IX-3-1- Les données d'entrée	228
IX-3-2- Les résultats de la simulation	230
IX-4- Conclusion	249

CHAPITRE X : Application du modèle hydrau-sédimentologique HEC-RAS

X-1- Introduction	250
X-2- Données	250

X-2-1- Données géométriques	251
X-2-2- Données d'écoulement (débits liquides)	254
X-2-3- Données des sédiments (débits solides)	254
X-3- Étalonnage du modèle	255
X-3-1- Calibrage du modèle hydraulique	255
X-3-2- Calibrage de modèle de sédiments	256
X-4- Application du modèle	256
X-5- Conclusion	267
Conclusion de la troisième partie	269
Conclusion générale et perspectives	271
Références bibliographiques	275
Annexes	
A- Cas bassin Oued Labiod : Crue centennale	294
B- Cas bassin Oued Chemora : Crue centennale	337

Dédicaces

Je dédie cette thèse à :

- *TINHINENE*

- *BADIS*

- *IDIR*

- *MASSIL*

A tous les enfants de leur génération.

Remerciements

En premier lieu, je remercie mon dieu Allah qui m'a donné la volonté, le courage et les moyens pour la réalisation de cette thèse.

Je tiens à exprimer ensuite mes remerciements au président et aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse : Mr ALLOUACHE Atmane, Mr BERREKSI Ali, Mr HABI Mohamed, Mr MERZOUK Belkacem et Mr REMINI Boualem. Je remercie également le chef de département Hydraulique Mr CHENAFI Azzedine, le chef de département adjoint chargé de la post-graduation et recherche Mr BERREKSI Ali, le président et les membres du comité scientifique du département, le président et les membres du conseil scientifique de la faculté de technologie et le vice-recteur de la formation supérieure de troisième cycle, l'habilitation universitaire, la recherche scientifique et la formation supérieure de post-graduation pour tous leurs efforts et leur contribution au bon déroulement des procédures administratives aboutissant à la soutenance de cette thèse.

Cette thèse n'aurait pas vu le jour sans l'aide et la patience de mon directeur de thèse, Monsieur MEDDI Mohamed, professeur à l'ENSH, que je veux particulièrement remercier. Je voudrais aussi le remercier pour les conseils qu'il m'a procurés tout au long de la rédaction et tout au long de ces années, me facilitant grandement la tâche et me permettant la finalisation de cette thèse.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mes collègues et amis Mr MERZOUK Belkacem, Mr MOKHTARI El-Hadj, Mr HADJI Tayeb, Mr NEBAR Mohamed Lakhder et Mr HAMIDOU Mohamed. Ils ont toujours répondu à mes sollicitations lorsque le besoin s'en faisait sentir.

Je tiens à remercier mes frères Smail et Belkacem pour leurs conseils tout au long de ces années. Je pense ici en particulier à ma nièce Karima, qui m'a bien aidé à finaliser cette thèse. Je n'oublierais pas les étudiants MANSOUR Choyeb, MAME Samir, SEDKA Zakaria et BOUDJLIDA Hamza, qui m'ont bien aidé également à finaliser cette thèse.

Enfin, je remercie tous les membres de ma petite famille, ma mère, ma femme et mes enfants Tinhinene, Badis, Idir et Massil, pour la patience qu'ils ont consentie devant les changements d'humeur occasionnés par ce travail.

Liste des figures

Figure I-1 : Effet Splash	7
Figure I-2 Rugosité d'un canal enherbé ("bermuda grass" de longueur moyenne) possédant une pente de 5% (adapté de Ree, 1949).	11
Figure I-3 : L'érosion en nappe.....	12
Figure I-4 : L'érosion linéaire	13
Figure I-5 : Schéma de l'érosion en masse	14
Figure I-6 :Nomogramme de détermination de l'indice d'érodabilité du sol K.....	18
Figure I-7: Code Structure basée sur la texture	19
Figure I-8: Code de la perméabilité basé sur la texture	19
Figure I-9: Facteur topographique d'après Wischmeier et Smith,	21
Figure II-1: Mode de transport solide.....	29
Figure II-2: Equilibre d'un grain posé sur le fond d'un canal	30
Figure II-3 : Critères de suspension (Van Rijn, 1984)	33
Figure II-4 : Particules exposées en noir et particules non-exposées en blanc.....	39
Figure III-1 (a) Bassins versants Algériens	56
Figure III-1 (b) Les bassins versants O. Labiod et O. Chemora dans l'ensemble du Chott Melghir (06) et des Hauts Plateaux Constantinois (07) extraite de la carte des bassins versants de l'ANRH	56
Figure III-2 : Bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora	58
Figure III-3 : Carte lithologique des Bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora...	60
Figure III-4 : Carte des pentes des Bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora ..	62
Figure III-5 : Carte d'occupation des Bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora.	66
Figure III-6 : Carte des réseaux hydrographiques des Bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora	69
Figure III-7 : Profils en long du Oued Labiod	71
Figure III-8 : Profils en long du Oued Chemora	72
Figure IV-1 : Les précipitations moyennes dans le massif de l'Aurès (1913-1963)	81
Figure IV-2 : Carte <i>des zones bioclimatiques</i>	84
Figure IV-3 : <i>Carte des précipitations annuelles moyennes</i>	85
Figure IV-4 : <i>Carte d'E.T.P. annuelles moyennes</i>	88
Figure VI-1: Variation interannuelle des apports solides (oued Labiod)	107
Figure VI-2: Variation interannuelle des apports solides (oued Chemora).....	107
Figure VI-3: Variabilité mensuelle des apports solides(oued Labiod)	109

Figure VI-4 : Variabilité mensuelle des apports solides (oued Chemora)	110
Figure VII-1 : Illustration de la méthode de l'inverse du carré de la distance	120
Figure VII-2 : Facteurs de réduction des hauteurs données par les courbes HDF.....	121
Figure VII-3 : Exemple de la distribution de la Pluie basée sur la fréquence.....	122
Figure VII-4 : Répartition de la précipitation au cours de l'évènement.....	122
Figure VII-5 : Schéma conceptuel de l'algorithme du modèle SMA	126
Figure VII-6 : Modélisation d'un modèle de bassin pour le modèle d'onde cinématique.....	131
Figure VII-7 : Sédiments éditeurs de rendement à HEC-HMS.....	136
Figure VII-8 : Flow et la sortie des sédiments (des séries chronologiques par classe de grain) d'un élément sous-bassin HEC-HMS.....	137
Figure VII-9 : Organigramme de modélisation par Hec-Hms	138
Figure VII-10 : Schéma de la division quasi-stationnaire d'écoulement.....	140
Figure VII-11 : Schéma de 3 couches utilisées dans Exner méthode de tri et armoring	142
Figure VII-12 : Sections HEC-RAS mis à jour lors d'un événement de dépôt.....	143
Figure VII-13 : Temps-série de dépôt épisodique et l'érosion calculée par HEC-RAS	143
Figure VII-14 : Editeur de classe de grain dans HEC-RAS version 4.1 avec (a) valeurs et (b) quatre grandes classes de grains par défaut.....	144
Figure VII-15 : Expérimentation numérique démontrant l'influence de régler la profondeur (De) sur la forme de l'avant depositional pour bien le dépôt de sable dans un réservoir. De plus petits de générer plus raides fronts dépositionnels.....	145
Figure VII-16 : Sédiments éditeur de la série de charge HEC-RAS. sortie de sédiments HEC-HMS est utilisé comme condition à la limite amont de HEC- RAS.....	146
Figure VII-17 : Simulation du changement de lit en réponse à des structures de navigation (Tate et Berger, 2006)	146
Figure VII-18 : Organigramme de modélisation par Hec-Ras	147
Figure VIII-1 : Concept du modèle de Wischmeier (1975)	149
Figure VIII-2 : Précipitations annuelles (mm)	152
Figure VIII-3 : Précipitations mensuelles du mois de Septembre (mm)	153
Figure VIII-4 : Précipitations mensuelles du mois d'Octobre (mm).....	153
Figure VIII-5 : Précipitations mensuelles du mois de Novembre (mm).....	153
Figure VIII-6 : Précipitations mensuelles du mois de Décembre (mm).....	153
Figure VIII-7 : Précipitations mensuelles du mois de Janvier (mm)	153

Figure VIII-8 : Précipitations mensuelles du mois de Février (mm)	153
Figure VIII-9 : Précipitations mensuelles du mois de Mars (mm)	154
Figure VIII-10 : Précipitations mensuelles du mois d'Avril (mm)	154
Figure VIII-11 : Précipitations mensuelles du mois de Mai (mm)	154
Figure VIII-12 : Précipitations mensuelles du mois de Juin (mm)	154
Figure VIII-13 : Précipitations mensuelles du mois de Juillet (mm)	154
Figure VIII-14 : Précipitations mensuelles du mois d'Aout (mm)	154
Figure VIII-15 : Facteur R annuel de l'érosivité de pluie R (Mj mm/ha/an)	155
Figure VIII-16 : Facteur R du mois de Septembre (Mj mm/ha/Mois)	156
Figure VIII-17 : Facteur R du mois d'Octobre (Mj mm/ha/Mois)	156
Figure VIII-18 : Facteur R du mois de Novembre (Mj mm/ha/Mois)	156
Figure VIII-19 : Facteur R du mois de Décembre (Mj mm/ha/Mois)	156
Figure VIII-20 : Facteur R du mois de Janvier (Mj mm/ha/Mois)	156
Figure VIII-21 : Facteur R du mois de Février (Mj mm/ha/Mois)	156
Figure VIII-22 : Facteur R du mois de Mars (Mj mm/ha/Mois)	157
Figure VIII-23 : Facteur R du mois d'Avril (Mj mm/ha/Mois)	157
Figure VIII-24 : Facteur R du mois de Mai (Mj mm/ha/Mois)	157
Figure VIII-25 : Facteur R du mois de Juin (Mj mm/ha/Mois)	157
Figure VIII-26 : Facteur R du mois de Juillet (Mj mm/ha/Mois).....	157
Figure VIII-27 : Facteur R du mois d'Aout (Mj mm/ha/Mois).....	157
Figure VIII-28 : Nomogramme de l'érodibilité des sols	159
Figure VIII-29 : Code Structure basée sur la texture	160
Figure VIII-30 : Code de la perméabilité basé sur la texture Figure	160
Figure VIII-31 : Carte lithologique des bassins versants	161
Figure VIII-32 : Carte du facteur K (SI) à partir des données K interpolées du nomogramme de l'érodibilité des sols	162
Figure VIII-33 : Carte du facteur LS	164
Figure VIII-34 : Diagramme expérimental d'estimation du facteur C de Gitas <i>et al.</i>	166
Figure VIII-35 : Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT5 du 25 Janvier 2011	167
Figure VIII-36 : Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT5 du 11 Mars 2011	168
Figure VIII-37 : Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT5 du 18 Juin 2011.	169

Figure VIII-38 : Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT5 du 21 Octobre 2011	170
Figure VIII-39 : Carte de distribution spatiale du facteur C dans les deux bassins du 25 Janvier 2011	171
Figure VIII-40 : Carte de distribution spatiale du facteur C dans les deux bassins du 11 Mars 2011	172
Figure VIII-41 : Carte de distribution spatiale du facteur C dans les deux bassins du 18 Juin 2011	173
Figure VIII-42 : Carte de distribution spatiale du facteur C dans les deux bassins du 21 Octobre 2011	174
Figure VIII-43 : Variation des taux d'érosion moyens annuels et des apports solides moyens annuels érodés (bassin oued Labiod)	176
Figure VIII-44 : Variation des taux d'érosion moyens annuels et des apports solides moyens annuels érodés (bassin oued Chemora)	177
Figure VIII-45 : Variation des apports solides érodés simulés et mesurés moyens annuels (bassin oued Labiod)	179
Figure VIII-46 : Variation des apports solides érodés simulés et mesurés moyens annuels (bassin oued Chemora)	180
Figure VIII-47 : Carte du taux d'érosion calculé par RUSLE.....	182
Figure VIII-48 : Taux d'érosion du mois de Septembre (ton/ha/mois)	183
Figure VIII-49 : Taux d'érosion du mois d'Octobre (ton/ha/mois)	183
Figure VIII-50 : Taux d'érosion du mois de Novembre (ton/ha/mois)	183
Figure VIII-51 : Taux d'érosion du mois de Décembre (ton/ha/mois)	183
Figure VIII-52 : Taux d'érosion du mois de Janvier (ton/ha/mois)	183
Figure VIII-53 : Taux d'érosion du mois de Février (ton/ha/mois)	183
Figure VIII-54 : Taux d'érosion du mois de Mars (ton/ha/mois)	184
Figure VIII-55 : Taux d'érosion du mois d'Avril (ton/ha/mois)	184
Figure VIII-56 : Taux d'érosion du mois de Mai (ton/ha/mois)	184
Figure VIII-57 : Taux d'érosion du mois de Juin (ton/ha/mois)	184
Figure VIII-58 : Taux d'érosion du mois de Juillet (ton/ha/mois)	184
Figure VIII-59 : Taux d'érosion du mois d'Aout (ton/ha/mois)	184
Figure VIII-60 : Carte du taux d'érosion calculé par RUSLE selon la classification établie aux Etats-Unis fondée sur la tolérance des sols aux pertes	185
Figure IX-1 : Les distributions temporelles 24h des quatre averses de projet de la NRCS	187
Figure IX-2 : Découpage du bassin versant oued Chemora.....	190

Figure IX-3 : Découpage du bassin versant oued Labiod.	191
Figure IX-4 : la carte des sols type NRCS des bassins versants	194
Figure IX-5 : Carte des valeurs de CN du 25 Janvier 2011	198
Figure IX-6 : Carte des valeurs de CN du 11 Mars 2011	199
Figure IX-7 : Carte des valeurs de CN du 18 Juin 2011	200
Figure IX-8 : Carte des valeurs de CN du 21 Octobre 2011	201
Figure IX-9 : Carte des valeurs moyenne de CN	202
Figure IX-10 : L'illustration de la méthode de la récession exponentielle, d'après	212
Figure IX-11 : Station de M'chouneche: Comparaison entre l'hydrogramme de la crue simulée et la crue observée du 02 Septembre 1979	215
Figure IX-12 : Station de M'chouneche: Comparaison entre l'hydrogramme de la crue simulée et la crue observée du 10 Novembre 1982	216
Figure IX-13 : Station de Chemora: Comparaison entre l'hydrogramme de la crue simulée et la crue observée du 20 Juin 1989	216
Figure IX-14 : Station de Chemora: Comparaison entre l'hydrogramme de la crue simulée et la crue observée du 31 Mars 1991	217
Figure IX-15 : Station de M'chouneche: Comparaison entre l'hydrogramme de la crue simulée et la crue observée du 19 Juin 1989	218
Figure IX-16 : Station de Chemora: Comparaison entre l'hydrogramme de la crue simulée et la crue observée du 12 Mars 1995	218
Figure IX-17 : Station de M'chouneche: Histogramme des apports solide de la crue simulée du 02 Septembre 1979	223
Figure IX-18 : Station de M'chouneche: Histogramme des apports solide de la crue simulée du 10 Novembre 1982	224
Figure IX-19 : Station de Chemora: Histogramme des apports solide de la crue simulée du 20 Juin 1989	224
Figure IX-20 : Station de Chemora: Histogramme des apports solide de la crue simulée du 31 Mars 1991	225
Figure IX-21 : Station de M'chouneche: Histogramme des apports solide de la crue simulée du 19 Juin 1989	226
Figure IX-22 : Station de Chemora: Histogramme des apports solide de la crue simulée du 12 Mars 1995	226
Figure IX-23 : Station de M'chouneche: Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée	231
Figure IX-24 : Station de M'chouneche: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 10 ans simulée	231
Figure IX-25 : Barrage Foug El-Gherza: Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée	232

Figure IX-26 : Barrage Foug El-Gherza: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 10 ans simulée	232
Figure IX-27 : Station de M'chouneche: Hydrogramme de la crue de période de retour 50 ans simulée	233
Figure IX-28 : Station de M'chouneche: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 50 ans simulée	233
Figure IX-29 : Barrage Foug El-Gherza: Hydrogramme de la crue de période de retour 50 ans simulée	234
Figure IX-30 : Barrage Foug El-Gherza: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 50 ans simulée	234
Figure IX-31 : Station de M'chouneche: Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée	235
Figure IX-32 : Station de M'chouneche: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 100 ans simulée.....	235
Figure IX-33 : Barrage Foug El-Gherza: Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée	236
Figure IX-34 : Barrage Foug El-Gherza: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 100 ans simulée	236
Figure IX-35 : Station de M'chouneche: Hydrogramme de la crue de période de retour 1000 ans simulée	237
Figure IX-36 : Station de M'chouneche: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 1000 ans simulée	237
Figure IX-37 : Barrage Foug El-Gherza: Hydrogramme de la crue de période de retour 1000 ans simulée	238
Figure IX-38 : Barrage Foug El-Gherza: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 1000 ans simulée	238
Figure IX-39 : Station de Chemora: Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée	239
Figure IX-40 : Station de Chemora: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 10 ans simulée.....	239
Figure IX-41 : Barrage Koudiet Medouer: Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée	240
Figure IX-42 : Barrage Koudiet Medouer: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 10 ans simulée	240
Figure IX-43 : Station de Chemora: Hydrogramme de la crue de période de retour 50 ans simulée	241
Figure IX-44 : Station de Chemora: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 50 ans simulée.....	241

Figure IX-45 : Barrage Koudiet Medouer: Hydrogramme de la crue de période de retour 50 ans simulée	242
Figure IX-46 : Barrage Koudiet Medouer: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 50 ans simulée	242
Figure IX-47 : Station de Chemora: Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée	243
Figure IX-48 : Station de Chemora: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 100 ans simulée	243
Figure IX-49 : Barrage Koudiet Medouer: Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée	244
Figure IX-50 : Barrage Koudiet Medouer: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 100 ans simulée	244
Figure IX-51 : Station de Chemora: Hydrogramme de la crue de période de retour 1000 ans simulée	245
Figure IX-52 : Station de Chemora: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 1000 ans simulée	245
Figure IX-53 : Barrage Koudiet Medouer: Hydrogramme de la crue de période de retour 1000 ans simulée	246
Figure IX-54 : Barrage Koudiet Medouer: Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 1000 ans simulée	246
Figure X-1 : Système d'oued Chemora (oued Chemora et ses affluents) avec ses stations hydrométriques	250
Figure X-2 : Conception schématique du système d'oued Chemora par Hec-Ras.....	252
Figure X-3 : Conception d'une section par Hec-Ras.....	253
Figure X-4 : Conception d'une section par Hec-Ras avec ses données topographiques..	253
Figure X-5 : Evènement 06/03/1986 : Débits liquides mesurés aux stations de : Rbôe, Morri et Timgad.....	257
Figure X-6 : Evènement 06/03/1986 : Volumes des sédiments mesurés aux stations de : Rboe, Morri et Timgad.....	257
Figure X-7 : Evènement 06/03/1986 : Débits liquides mesurés et calculés par Hec-Ras aux différentes stations.....	260
Figure X-8 : Evènement 06/03/1986 : Débits liquides mesurés et calculés par Hec-Ras à la station de Chemora.....	260
Figure X-9 : Evènement 06/03/1986 : Volumes des sédiments mesurés et calculés par Hec-Ras à la station de Chemora.	261
Figure X-10 : Evènement 06/03/1986 : Débits solides mesurés et calculés par Hec-Ras à la station de Chemora.....	261

Figure X-11 : Evènement 06/03/1986 : Concentrations mesurées et calculées par Hec-Ras à la station de Chemora	262
Figure X-12 : Evènement 06/03/1986 : Cumul des volumes mesurés et calculés par Hec-Ras à la station de Chemora.....	262
Figure X-13 : Profil d'oued Chemora avant et après le passage de la crue 06/03/1986 ..	264
Figure X-14 : Poids cumulatif des sédiments à la fin de la crue 06/03/1986.....	265
Figure X-15 : Vitesse d'écoulement à t = 17:30.....	266
Figure X-16 : Sédiments produits à t = 17:30.....	267

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Quelques valeurs du paramètre K	10
Tableau I-2 : Quelques valeurs du paramètre C	22
Tableau II-1 : Plage de valeurs d'entrée pour les fonctions de transport des sédiments (Manuel de l'utilisateur Sam, 1998)	44
Tableau II-2 : Valeurs des vitesses de chute Toffaleti ,1968.....	51
Tableau III-1 : Répartition des classes des pentes dans le bassin versant Oued Labiod.	62
Tableau III-2 : Répartition des classes des pentes dans le bassin versant Oued Chemora	62
Tableau III-3 : Les principales caractéristiques physiographiques du bassin O. Labiod..	75
Tableau III-4 : Les principales caractéristiques physiographiques du bassin O. Chemora.	75
. Tableau IV-1 : Températures moyennes mensuelles interannuelles	77
Tableau IV-2 : L'humidité relative	78
Tableau IV-3 : Le régime des vents	79
Tableau IV-4 : L'évaporation	79
Tableau IV-5 : Coordonnées et codes des stations pluviométriques.....	81
Tableau IV-6 : Répartition saisonnière des pluies dans le massif de l'Aurès (période 1913-1938)	82
Tableau IV-7 : Pluies maximales journalières des différentes stations	87
Tableau IV-8 : Pluies maximales journalières fréquentielles des différentes stations...	88
Tableau V-1 : Variation interannuelle des débits, les apports et les lames d'eau écoulées de la station de M'CHOUNECHE.....	92
Tableau V-2 : Variation interannuelle des débits, les apports et les lames d'eau écoulées de la station de CHEMORA.	93
Tableau V-3 : Crues enregistrées durant la période (1977/2006) - Oued Labiod ($Q_{max} > 200 \text{ m}^3/\text{s}$)	94
Tableau V-4 : Crues enregistrées durant la période (1977/2006) - d'Oued Chemora ($Q_{max} > 200 \text{ m}^3/\text{s}$)	94
Tableau V-5 : Calcul des débits des crues maximums par la formule empirique issue des lois de Gilbert-Galton-Gauss	95
Tableau V-6 : Valeurs des u_i	96
Tableau V-7 : Valeurs de $q(F)$ en fonction des périodes de retour pour les trois régions du Nord Algérie.....	96
Tableau V-8 : Valeurs des débits des crues maximums par la formule empirique regionale de Meddi.....	96
Tableau V-9 : Débits des crues maximums estimés par la loi de GUEMBEL	98
Tableau V-10 : Application de la méthode du Gradex.....	100

Tableau V-11 : Débits de crue moyens estimés par la méthode de Gradex	101
Tableau V-12 : Débits de crue maximums estimés par la méthode de Gradex	101
Tableau VI-1 : Les apports solides, liquides, la lame d'eau et la dégradation spécifiques au niveau de la station de M'chouneche.....	106
Tableau VI-2 : Les apports solides, liquides, la lame d'eau et la dégradation spécifiques du sol au niveau de la station de Chemora.....	107
Tableau VI-3 : Variabilité mensuelle des apports solides, liquides et la lame d'eau et la dégradation spécifique bassin Oued Labiod (Période 1979/96).....	109
Tableau VI-4 : Variabilité mensuelle des apports solides, liquides et la lame d'eau et la dégradation spécifique bassin Oued Chemora (Période 1971/96),.....	110
Tableau VI-5 : Valeurs mensuelles de la turbidité en g/l.(oued Labiod)	112
Tableau VI-6 : Valeurs mensuelles de la turbidité en g/l. (oued Chemora)	112
Tableau VI-7 : Recherche de relations saisonnières : Débit liquide débit solide au pas de temps journalier.....	113
Tableau VI-8 : Variation de la capacité, la vase au niveau du barrage Foum El-Gherza et celle mesurée au niveau de la station de M'chouneche.....	115
Tableau VIII-1 : Codification de la structure des sols (<i>cs</i>).....	158
Tableau VIII-2 : Codification de la perméabilité du sol (<i>bp</i>).....	158
Tableau VIII-3 : Valeurs du paramètre (<i>mp</i>) en fonction de la variation de la pente.....	163
Tableau VIII-4 : Variabilité mensuelle des taux d'érosion et des quantités des apports solides érodées du bassin d'Oued Labiod.	176
Tableau VIII-5 : Variabilité mensuelle des taux d'érosion et des quantités des apports solides érodées du bassin Oued Chemora.....	177
Tableau VIII-6 : Variabilité mensuelle des quantités des apports solides érodées simulées et mesurées cas du bassin versant d'Oued Labiod (St de M'CHOUNECHÉ)	179
Tableau VIII-7 : Variabilité mensuelle des quantités des apports solides érodées simulées et mesurées cas du bassin versant d'Oued Chemora (barrage de KOUDIET MEDAOUER)	180
Tableau IX-1 : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN ..	189
Tableau IX-2 : Bassin Chemora: Caractéristiques topographiques des sous bassins	190
Tableau IX-3 : Bassin Chemora: Caractéristiques topographiques du réseau hydrographique	191
Tableau IX-4 : Bassin Labiod: Caractéristiques topographiques des sous bassins	192
Tableau IX-5 : Bassin Labiod: Caractéristiques topographiques du réseau hydrographique	192
Tableau IX-6 : Tables NRCS des valeurs de CN	196

Tableau IX-7 : Bassin Chemora: Les valeurs du CN	202
Tableau IX-8 : Bassin Labiod: Les valeurs du CN	202
Tableau IX-9 : Bassin Chemora: Les valeurs de l'abstraction initiale Ia	203
Tableau IX-10 : Bassin Labiod: Les valeurs de l'abstraction initiale Ia	203
Tableau IX-11 : Bassin Chemora: Les valeurs des poids des différentes stations pluviométriques.....	204
Tableau IX-12 : Bassin Labiod: Les valeurs des poids des différentes stations pluviométriques.....	205
Tableau IX-13 : Bassin Chemora: Les valeurs de la pluies-du 20 Juin 1989 aux différentes stations pluviométriques et aux différents sous bassins.....	205
Tableau IX-14 : Bassin Chemora: Les valeurs de la pluies du 31 Mars 1991 aux différentes stations pluviométriques et aux différents sous bassins.....	206
Tableau IX-15 : Bassin Chemora: Les valeurs de la pluies-du 12 Mars 1995 aux différentes stations pluviométriques et aux différents sous bassins.....	206
Tableau IX-16 : Bassin Labiod: Les valeurs de la pluies du 02 Septembre 1979 aux différentes stations pluviométriques et aux différents sous bassins.....	207
Tableau IX-17 : Bassin Labiod: Les valeurs de la pluies du 10 Novembre 1982 aux différentes stations pluviométriques et aux différents sous bassins.....	207
Tableau IX-18 : Bassin Labiod: Les valeurs de la pluies du 19 Juin 1989 aux différentes stations pluviométriques et aux différents sous bassins.....	208
Tableau IX-19: Bassin Chemora: Les valeurs des longueurs des cours d'eau, CN moyens, pentes des sous bassins et des T_{lag} calculé et T_{lag} calibré par Hec Hms.....	209
Tableau IX-20: Les valeurs des longueurs des cours d'eau, CN moyens, pentes des sous bassins et des T_{lag} calculé et T_{lag} calibré par Hec Hms.....	210
Tableau IX-21 : Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation	213
Tableau IX-22 : les résultats de calibration	216
Tableau IX-23 : les résultats de validation du jeu de paramètre optimal de la calibration.	218
Tableau IX-24 : Les entrées à saisir pour chaque fichier de simulation	220
Tableau IX-25 : Les valeurs du facteur d'éordabilité (K), du facteur topographique (LS) et du facteur de couverture du sol (C) pour le bassin d'oued chemora	221
Tableau IX-26 : Les valeurs du facteur d'éordabilité (K), du facteur topographique (LS) et du facteur de couverture du sol (C) pour le bassin d'oued Labiod	221
Tableau IX-27 : les résultats de calibration	224
Tableau IX-28 : les résultats de validation du jeu de paramètre optimal de la nouvelle calibration	227

Tableau IX-29 : Les valeurs des pluies maximales journalières fréquentielles, du facteur CN moyen et du facteur de couverture du sol C moyen pour le bassin Chemora	228
Tableau IX-30 : Les valeurs des pluies maximales journalières fréquentielles, du facteur CN moyen et du facteur de couverture du sol C moyen pour le bassin Labiod	228
Tableau IX-31 : les valeurs simulées du débit de pointe et du volume d'eau et des sédiments aux stations hydrométriques (M'chouneche et Chemora) et aux sites des barrages (F. Gherza et K. Medaouer) pour les averses quantiles	229
Tableau IX-32 : les valeurs simulées du débit de pointe et du volume d'eau et des sédiments aux différents sites pour les averses quantiles	246
Tableau X-1 : Caractéristiques topographiques des affluents non jaugés de l'amont vers l'aval et de la droite vers la gauche.	258
Tableau X-2 : Caractéristiques hydrauliques des affluents non jaugés de l'amont vers l'aval et de la droite vers la gauche.	259

Introduction générale

Introduction générale

Les sédiments qui arrivent à l'exutoire sont produits dans le bassin versant par les agents naturels et par les processus qui dégradent les roches et les transforment en sols, et transportés par les cours d'eau. Dans ce sens, [Einstein \(1950\)](#) affirme que chaque particule qui passe dans une section de mesures doit être érodée à un endroit quelconque des versants à l'amont, et doit être transportée par le ruissellement de l'endroit d'érosion vers l'exutoire du bassin. Ce processus se résume en :

PROCESSUS = ARRACHEMENT → TRANSPORT → SÉDIMENTATION

Par conséquent, la quantité des sédiments arrivant à l'exutoire dépend de deux éléments principaux ; le premier élément est la disponibilité des sédiments sur les versants (érosion) et le second est la capacité du transport des cours d'eau (transport solide).

Le premier élément (érosion) apparaît sous plusieurs formes ; hydrique, aratoire ou mécanique sèche, thermique et chimique, causé par les êtres vivants.

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules du sol. Elle dépend de plusieurs facteurs, le type de climat, les précipitations, la topographie et la couverture végétale ; ces facteurs agissent sur les sols provoquant le déplacement de leur couche superficielle et causant une diminution des niveaux des terrains.

Le deuxième élément (transport solide) se manifeste sous plusieurs formes. Il relève essentiellement du ruissellement. La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par les cours d'eau dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie ([Roche, 1963](#)).

La région méditerranéenne classiquement considérée comme susceptible à l'érosion ([Henin et Gobillot, 1950](#); [Auzet, 1987](#); [De Ploey, 1989](#)).

Le phénomène d'érosion est devenu un grand problème dans la région du Maghreb dont les potentialités en eau et en sol sont sérieusement menacées ([Heush et al., 1971](#) ; [Demmak, 1982](#); [Meddi, 1992](#) ; [Lahlou, 1994](#) ; [Touaibia et al., 2001](#) ; [Terfous et al., 2003](#) ; [Achite et al., 2005](#)).

En Algérie, son intensité varie d'une région à une autre. Elle est plus ressentie à l'ouest du pays avec un taux de 47% suivie de la région centre avec 27% et l'Est avec 26% (Manser).

L'Algérie dispose d'un parc de 64 barrages en exploitation, leur capacité globale (initiale) est de 7745 hm³. Le levé bathymétrique des barrages en 2004 a montré que la capacité de stockage a été réduite à 6736 hm³ du fait de l'envasement (Manser).

De nombreux chercheurs ont développé des relations liant le transport solide aux facteurs géomorphologiques et climatologiques pour certains bassins algériens (Kassoul, 1997 ; Touaibia *et al.*, 2001; Benkhaled et Remini, 2003; Terfous *et al.*, 2003; Bouanani 2005; Achite et Meddi, 2005). Par contre, Demmak (1982) et Meddi *et al.* (1998) ont développé des modèles d'estimations de la dégradation spécifique pour l'Algérie septentrionale. A l'échelle du Maghreb, nous retenons les travaux de Heusch et Milliès-Lacroix (1971), de SOGREAH (1983) et de Probst et Amiotte-Suchet (1992).

Le but principal de cette thèse est la modélisation de l'érosion dans les deux bassins versants bassin Oued Labiod appartenant au bassin Chott Melghir et bassin Oued Chemora du bassin Haut plateaux constantinois ayant des surfaces 1317 km² et 741 km² respectivement, en appliquant le modèle de Wischmeier révisé (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE-) à l'échelle annuelle et mensuelle d'une part, et d'autre part, la modélisation hydro-sédimentologique à l'échelle de la crue dans les deux bassins cités auparavant, en utilisant le modèle Hec-Hms basé sur le modèle Wischmeier modifié (Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE-) en premier lieu et la modélisation hydrau-sédimentologie en utilisant Hec-Ras en deuxième lieu afin d'analyser les effets d'échelle temporelle et spatiale des processus érosifs dans le cours d'eau principal d'oued Chemora.

Ce travail est structuré de la façon suivante :

La première partie (Partie A) est consacrée à la description générale du phénomène d'érosion et du transport solide, elle se compose de deux chapitres (I et II).

Le premier chapitre sera consacré à l'érosion hydrique dans un bassin versant. Nous présenterons quelques notions sur l'origine, le mécanisme de l'érosion hydrique, les facteurs influençant ce phénomène, ses formes ainsi que les différentes méthodes de sa quantification, son impact et ses conséquences sur le milieu de production et de réception.

Le second chapitre sera consacré au transport solide dans les cours d'eau. Nous analyserons l'interaction entre les sédiments et l'écoulement dans les cours d'eau à savoir les différents types des transports solides, ainsi que ses différentes méthodes de calcul et d'estimation suivi d'une présentation du mécanisme d'érosion, du transport et du dépôt dans ce milieu de transport (cours d'eau).

La deuxième partie (Partie B) se compose de quatre chapitres (III, IV, V et VI)

Le chapitre III est consacré à une description générale des deux bassins versants Bassin d'Oued Labiod et d'Oued Chemora, ainsi que les différents sous bassins analysés afin de donner les indications géographiques, physiographiques et leurs réseaux hydrographiques.

Le chapitre IV présente une analyse des caractéristiques climatiques des deux bassins versants qui sont la base de l'étude des comportements et des réponses hydrologiques de leurs cours d'eau.

Le chapitre V sera réservé à l'évaluation des écoulements superficiels et de leur variabilité qui passe par la prise en compte des débits moyens annuels et bilans hydrologiques, régimes fluviaux et variations saisonnières des débits, débits moyens journaliers et intensités des débits extrêmes des crues et des étiages ainsi que leur fréquence.

Le chapitre VI sera dédié à la présentation des différentes méthodes classiques d'estimation des apports solides, ainsi que les résultats dans les deux bassins à différentes échelles, de l'échelle de la crue jusqu'à l'échelle interannuelle.

La troisième partie (Partie C) sera consacrée à la modélisation, elle se compose de quatre chapitres (VII, VIII, IX et X)

Le chapitre VII sera consacré à une présentation du modèle hydrologique Hec Hms, hydro-sédimentologique Hec Hms et du modèle hydrau-sédimentologique Hec Ras ainsi que la connexion Hec Hms - Hec Ras.

Le chapitre VIII présentera la modélisation de l'érosion en appliquant le modèle de Wischmeier révisé (Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE-) à l'échelle annuelle et mensuelle dans les deux bassins.

Le chapitre IX sera consacré à la modélisation hydrologique (pluie - débit), et hydro-sédimentologique basée sur le modèle Wischmeier modifié (Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE-), à l'échelle de la crue dans les deux bassins cités auparavant, en utilisant le modèle Hec Hms.

Le chapitre X présentera la modélisation hydrau-sédimentologie en utilisant Hec Ras afin d'analyser les effets d'échelle temporelle et spatiale des processus érosifs dans le cours d'eau principal (oued Chemora).

On termine par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus, suivie de quelques perspectives pour des recherches futures.

Première partie : Erosion, transport solide et dépôt

Introduction

Les sédiments qui arrivent aux cours d'eau sont produits en amont dans le bassin versant par les agents naturels, transportés vers l'exutoire du bassin. Donc les sédiments produits dépendent de la disponibilité de sédiments sur les versants et de la capacité de transport des cours d'eau.

L'analyse de ces deux points présente cette partie du travail divisée en deux chapitres : en premier lieu, le premier chapitre est consacré à l'érosion hydrique dans le bassin versant, dans lequel on présente quelques notions sur l'origine, le mécanisme de l'érosion hydrique, les facteurs influençant ce phénomène, ses formes ainsi que les différentes méthodes de sa quantification et son impact et ses conséquences sur le milieu de production de réception.

Ensuite en deuxième lieu, le second chapitre est consacré au transport solide dans les cours d'eau, dans ce dernier on analyse l'interaction entre les sédiments et l'écoulement dans les cours d'eau à savoir les différents types du transport solide ainsi que ses différentes méthodes de calcul et d'estimation suivi d'une présentation du mécanisme d'érosion, du transport et du dépôt dans ce milieu de transport (cours d'eau).

Chapitre I : Erosion hydrique

I-1- Introduction

Le terme érosion vient du latin “Erodere” qui signifie “Ronger” (Roose, 1994). L'érosion est le détachement des particules du sol de leur milieu, pour les transportées par un agent de transport (l'eau, l'air) et les déposées en un autre milieu.

Ce processus se résume :

PROCESSUS = ARRACHEMENT → TRANSPORT → SÉDIMENTATION

L'érosion apparaît sous plusieurs formes :

- * L'érosion hydrique.
- * L'érosion aratoire ou mécanique sèche
- * L'érosion thermique
- * L'érosion chimique
- * L'érosion causée par les êtres vivants

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules du sol. Elle se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt (Touré, 2004).

I-2- Origine et mécanisme de l'érosion hydrique

La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt du sol enlevé. Le détachement est dû à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et au ruissellement qui assure le transport (Touré, 2004).

I-2-1- Impacte de la goutte de pluie

Les sols subissent un martèlement considérable causé par les gouttes de pluie. Les premières gouttes s'infiltrant dans le sol d'autant plus aisément qu'il est meuble et que sa porosité est élevée. Cette première phase s'accompagne d'un déplacement des particules et d'un tassement du sol. Lorsque la couche superficielle s'humidifie, trois processus se développent simultanément (Touré, 2004) :

- * La dégradation de la structure.
- * La formation d'une pellicule de battance.
- * L'érosion par rejaillissement ou érosion par splash.

L'énergie cinétique des gouttes (Figure I-1) est généralement utilisée comme paramètre pour déterminer le pouvoir érosif des pluies. Cette énergie cinétique (E_c) peut être très élevée dans les régions humides ou semi-arides.

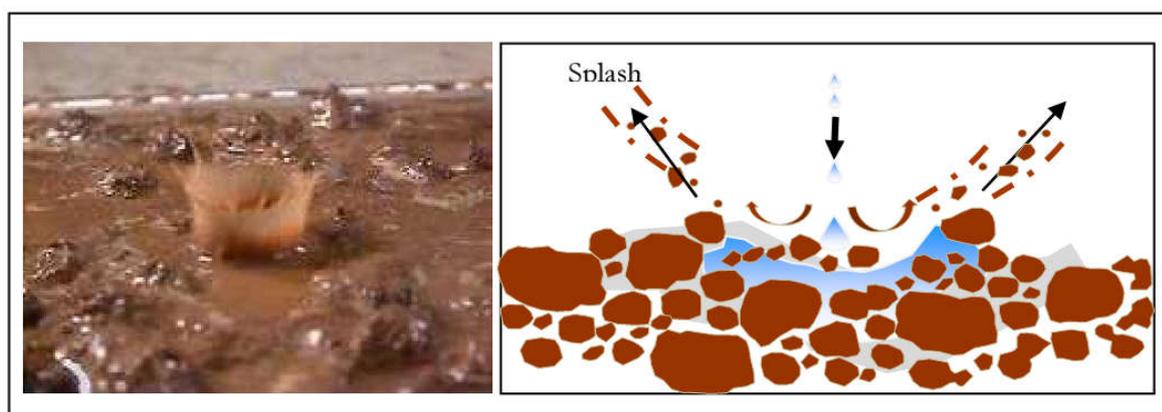


Figure I-1 : Effet Splash (Gourfi, 2014)

L'énergie cinétique des gouttes E_c s'écrit :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (\text{I-1})$$

Où :

E_c : l'énergie cinétique (J)

m : la masse de la goutte (kg)

v : la vitesse (m/s)

Elle peut s'écrit également par la relation empirique reliant l'intensité d'une pluie et son énergie cinétique (Remy, 1998).

$$E_c = 11.9 + 8.73 \log I_p \quad (\text{I-2})$$

Avec :

E_c : l'énergie cinétique ($J/m^2/mm$)

I_p : intensité de pluie (mm/h)

L'impact direct des gouttes de pluie provoque non seulement le délitage et la fragmentation des agrégats du sol, mais également l'entraînement et la projection des particules dans toutes les directions. Ce rejaillissement peut être important. Plusieurs chercheurs ont essayé de quantifier cette masse de sol détachée (D_p) expérimentalement. Les relations obtenues sont en général de la forme (Poessen, 1984).

$$D_p = a \cdot E_c \cdot b \quad (I-3)$$

Avec :

D_p : la masse détachée (kg)

a , b : coefficients dépendent essentiellement de la texture et de la structure du sol.

I-2-2- Ruissellement

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il est nettement plus élevé sur sol nu que sous cultures.

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ruissellent sur la parcelle en détachant les particules de terre (Type Hortonien).

Les facteurs qui régissent le ruissellement sont principalement :

- * L'infiltration.
- * Détention superficielle et rugosité du sol
- * Le relief.
- * Le couvert végétal.

D'une manière générale, il est admis que la vitesse du ruissellement est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel.

Meyer (1965) a proposé la relation suivante pour évaluer cette vitesse :

$$V_R = (I^{0.33} \cdot Q_R^{0.33}) / n^{0.66} \quad (I-4)$$

Où

V_R : vitesse de ruissellement

I : pente du terrain

Q_R : Débit du ruissellement

n : rugosité du sol.

Les facteurs qui régissent le ruissellement sont principalement :

- L'infiltration
- Détention superficielle et rugosité du sol
- Pente et longueur de pente
- Le couvert végétal

I-2-3- Etat hydrique initial

L'état hydrique du sol au moment d'une pluie a une très forte influence sur la dégradation, la formation des croûtes et la réduction de l'infiltrabilité résultante (Le bissonais, 1996). Les agrégats secs sont plus sensibles à l'éclatement. En effet l'intensité de ce processus croît avec le volume d'air piégé (Le Bissonnais, 1996) en particulier sous des pluies de forte intensité qui peuvent former des croûtes très rapidement.

L'état hydrique initial influence aussi la succion exercée à la surface du sol par les couches sous-jacentes et donc l'infiltration au travers de cette surface. Lorsque le sol en surface est argileux sensible à la dispersion par l'effet de l'impact des gouttes de pluie à la désagrégation mécanique par l'alternance des cycles de dessiccation et d'humectation, il y a mobilisation des particules argileuses sous l'action de l'impact des pluies (Chibbani, et al. 1997). En effet, l'humectation des sols argileux entraîne un gonflement qui est une forme analogue de désagrégation. Cette argile mobilisée migre dans l'eau de l'infiltration, couvre la périphérie des agrégats et colmate les interstices intra-agrégats ou bien se dépose à la surface du sol pour former une croûte. La formation des croûtes ou organisation pelliculaire de surface, entraîne une réduction de l'infiltrabilité, accroît les risques de ruissellement et d'érosion.

I-3- Facteurs influençant l'érosion

I-3-a- Le climat

Le climat est un facteur important qui influe sur l'érosion hydrique par la nature des précipitations et des températures. Un climat agressif comme celui des régions aride et semi-arides est caractérisé par des pluies de grandes intensités pendant un temps court et des longues périodes de sécheresse. Les deux éléments accentuent l'érosion, les températures élevées

permettent d'assécher et de fissurer le sol ce qui augmente sa vulnérabilité à l'érosion et les fortes pluies viennent avec des énergies cinétiques élevées pour détacher et emporter un maximum de sol ([Université de Nice 2008](#)).

I-3-b- La nature du sol

Le facteur sol le plus important est la résistance (stabilité) des agrégats à l'impact des gouttes de pluie. Cette résistance ou cette stabilité est influencée positivement par la présence d'agents liants tels que les argiles, la matière organique et le calcium. Ainsi, les sols de texture limoneuse sont généralement plus sensibles que les sols argileux à cause de leur faible stabilité structurale. Au niveau de la stabilité des agrégats, la matière organique est l'un des facteurs les plus importants.

En saison sèche l'humidité du sol est presque nulle, dans cet état le sol perd toute sa cohésion, il présente à cet effet une texture détachée des grains. Ce qui favorisera l'érosion hydrique lors des premières pluies. Il influe de même sur le ruissellement par ses capacités d'infiltration et de rétention ([Université de Nice 2008](#)).

I-3-c- La végétation

Il s'agit du facteur primordial dans la lutte contre l'érosion, la présence du couvert végétal sur le sol augmente sa résistance contre l'érosion.

Sur un sol nu, ce sont les particules de sol qui absorbent directement l'énergie des gouttes de pluie. Par contre, un couvert végétal peut absorber une partie importante de l'énergie de la pluie.

La partie racinaire maintient le sol stable et permet aux plantes d'augmenter le facteur de friction de Manning et de freiner le ruissellement, ce qui limite l'arrachage et le transport des sédiments ([Université de Nice 2008](#)).

L'apport en matière organique permet d'améliorer la structure du sol et sa cohésion (Figure I-2).

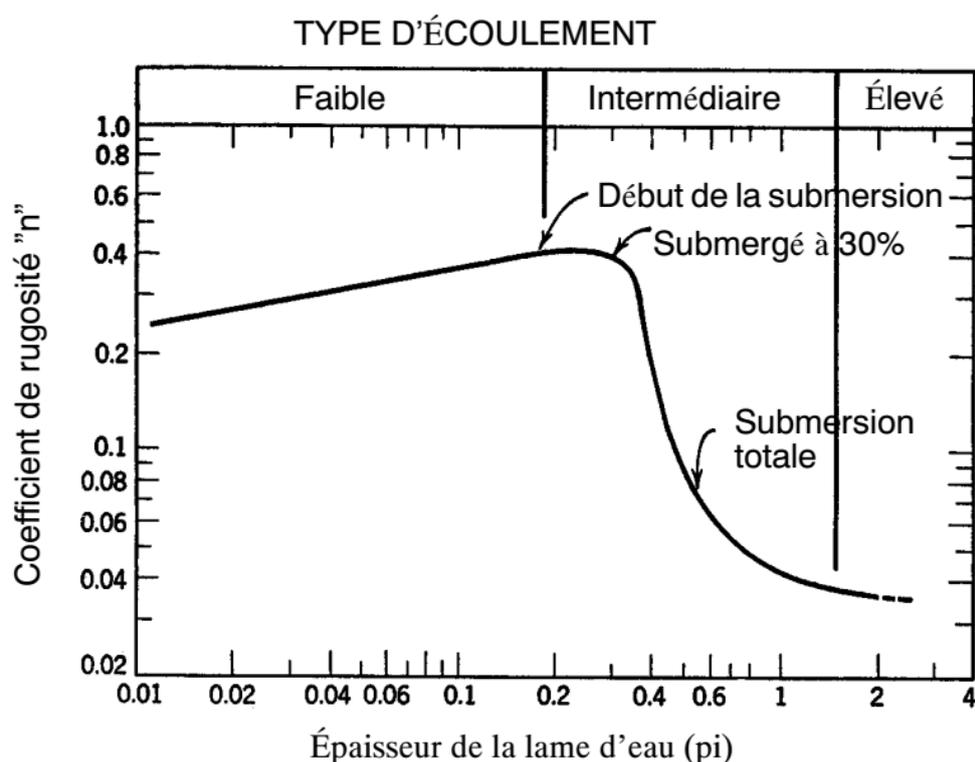


Figure I-2 Rugosité d'un canal enherbé ("bermuda grass" de longueur moyenne) possédant une pente de 5% (adapté de Ree, 1949).

I-3-d- La topographie

La pente du terrain est le facteur topographique le plus important. L'influence première de la pente est l'augmentation des vitesses d'écoulement (Chezy 1769 et Manning 1889) Sur des pentes plus grandes, l'infiltration est plus faible et le volume de ruissellement augmente. La longueur de la pente joue un rôle similaire. Elle augmente le volume de ruissellement et ainsi l'érosion (Université de Nice 2008).

Les micros dépressions du terrain provoquent une concentration de l'écoulement qui augmente le potentiel érosif par rapport à un même volume de ruissellement coulant selon une lame uniforme. Par contre, les dépressions fermées limitent les effets de l'érosion en permettant aux sédiments en suspension de se déposer au lieu de poursuivre leur chemin (les vitesses d'écoulement deviennent faibles).

I-4- Les formes de l'érosion hydrique

I-4-1- L'érosion en nappe ou "sheet érosion"

L'érosion en nappe « sheet erosion » est le stade initial de la dégradation des sols par érosion hydrique. Elle entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de l'horizon superficiel, autrement dit il s'agit d'une forme d'érosion diffuse. L'érosion en nappe se manifeste sur le terrain par la

présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et les plus agressés des champs (sommets de collines et rupture de pentes). Elle se manifeste également par la remontée des cailloux en surface suite aux travaux successifs du sol (Zaher, 2010). Les paysans parlent des « cailloux qui poussent ». L'importance de l'érosion en nappe dépend à la fois de :

- * L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement.
- * L'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer.
- * La durée des pluies et/ou de l'humidité avant les pluies.

Pendant l'érosion en nappe, le déplacement des particules se fait avant tout par effet « splash » à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe. Le martèlement du sol par les gouttes de pluie envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions (Zaher, 2010). En réalité, ce n'est qu'après formation des flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, que naquit le ruissellement en nappe (Zaher, 2010). Ce dernier, en s'étalant à la surface du sol (Figure I-3), maintiendra une faible vitesse même sur des pentes de 5 à 10 %, à cause de la rugosité de la surface (présence de mottes, de cailloux, d'herbes, etc.) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde.



Figure I-3 : L'érosion en nappe (Zaher, 2010)

I-4-2-L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill érosion)

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol, des flaques se forment ; ensuite celles-ci communiquent par des filets d'eau et lorsque ces derniers prennent une certaine vitesse, 25 cm/s d'après Hjulström (1935), ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dissipée sur

l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente (Roose, 1994).

L'érosion linéaire (Figure I-4) est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'éroder le sol à un rythme plus rapide que l'érosion en nappe (Blanco & al., 2008).

L'érosion linéaire est révélée par tous les creusements linéaires qui incisent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.). En fait, L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise pour creuser des formes de plus en plus profondes. On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur, mais encore effaçables par les techniques culturales (Zaher, 2010).

Types de l'érosion linéaire :

- * L'érosion en rigoles succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas, mais forment des ruisselets parallèles.
- * On parle de nappe ravinante lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm, mais que leur largeur ait atteint plusieurs mètres (Zaher, 2010).
- * On parle de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 30 cm) et en particulier, lorsqu'elles ne sont plus effaçables par les techniques culturales (Zaher, 2010).
- * On parle de ravinement généralisé ou badlands lorsque l'approfondissement des ravines remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive). Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands". Les ravines suivent la ligne de plus grande pente des versants (Zaher, 2010).



Figure I-4 : L'érosion linéaire (Gourfi, 2014)

I-4-3-L'érosion en masse

Tandis que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse (Figure I-5) concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies, comme les mouvements de masse, les coulées boueuses et les glissements de terrain. Les phénomènes de mouvement de masse sont nombreux. Dans ce qui suit on peut évoquer :

- * Les glissements.
- * Les coulées boueuses et les laves torrentielle.
- * Les formes locales.

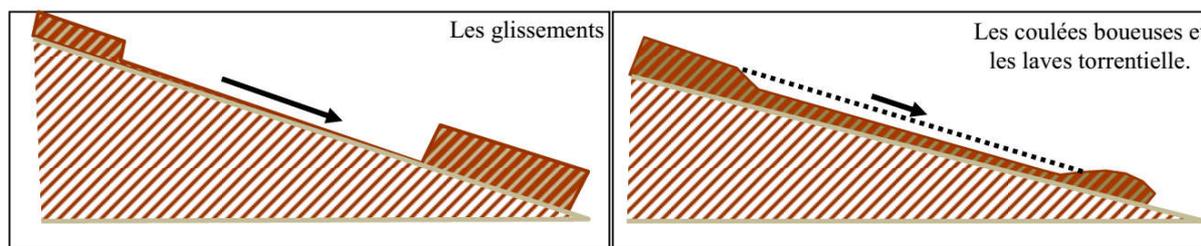


Figure I-5 : Schéma de l'érosion en masse (Zaher, 2010)

I-4-4- L'érosion dans les cours d'eau

Dans les cours d'eau, l'érosion est de deux types. Le premier est causé par les grandes vitesses d'écoulement qui arrachent le matériel de faible résistance sur le lit du cours d'eau (linéaire). Le deuxième est dû à l'instabilité mécanique des talus qui s'effondrent dans le lit (en masse) et dont le matériel est emporté (Zaher, 2010).

I-4-5- Une classification pratique

L'érosion en nappe ne se produit presque que localement par l'impact des gouttes de pluie qui est beaucoup plus importante que celle provoquée par la vitesse de la lame d'eau ruisselée. À la surface du sol, les vitesses de chute des gouttes d'eau (6 à 10 m/s) sont généralement beaucoup plus grandes que celles de l'écoulement de la lame d'eau (0,3 à 0,5 m/s) (Schwab et al, 1966).

À cause des micros dépressions, l'écoulement cherche à se concentrer si bien que l'érosion par de type linéaire en rigoles apparaît rapidement. Au niveau de la parcelle, ces trois formes

d'érosion sont très liées et très difficiles à séparer. Pour cette raison, la classification suivante est proposée (Degoutte, 2012) :

- * L'érosion de surface (ou au champ) qui inclut l'érosion par les gouttes de pluie.
- * Par rigoles et ravinement ;
- * L'érosion dans les cours d'eau.

L'essentiel du transport solide provient des ravines et des oueds (Heush, 1970 ; Arabi, M. et al. 1991).

I-5- Quantification de l'érosion hydrique

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

Les formules les plus utilisées sont les suivantes :

a- Equation universelle des pertes en sols (USLE)

a-1- Historique :

Meyer (1984) a résumé l'évolution de l'USLE (Universal Soil Loss Equation) en distinguant plusieurs périodes. La première période (1890-1940) est caractérisée par la compréhension et la description, de manière qualitative, de la plupart des facteurs qui affectent l'érosion. On retrouve les études sur la pluie de Laws (1940) et les analyses de l'impact des gouttes de pluie rapportées par Ellison (1944, 1947). Pendant la période 1940-1954, le travail dans la « cornbelt » des Etats-Unis a abouti à une procédure d'estimation des pertes en terre qui incorporait l'influence de la longueur et de l'intensité de la pente (Zingg, 1940), des pratiques de conservation (Smith, 1941 ; Smith et Whitt, 1947) et des pratiques culturales (Browning, 1947). En 1946, un Comité national américain a réévalué les valeurs des facteurs en ajoutant un paramètre pour la pluie, produisant ainsi l'équation de Musgrave (Musgrave, 1947). A partir de 1954, l'USLE a été développée par le département américain de l'agriculture (USDA).

Des études sur de petites parcelles sous pluies naturelles et simulées ont formé la base des données de l'USLE. Jusqu'en 1978, des résultats expérimentaux ont fourni des données supplémentaires pour finalement, donner la forme définitive de l'USLE (Wischmeier et Smith, 1978)

L'équation Universelle de Pertes en sols est un modèle empirique basé sur l'analyse statistique de 10.000 parcelles expérimentales. Elle permet de prédéterminer les pertes en terre annuelles moyennes pour une parcelle donnée, dans des conditions bien définies.

Cette équation se présente sous la forme d'un produit de 5 facteurs indépendants, chacun représente une équation paramétrique à plusieurs variables sous sa forme simplifiée, ce modèle s'écrit :

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (I-5)$$

Où

A = perte annuelle moyenne de sol (t/ha/an)

R = indice d'érosivité potentielle de la précipitation (MJmm/ha/an)

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.

Ce modèle présente un certain nombre de points faibles :

Inaptitude à estimer les pertes en terre sur une courte période (saison ou épisode pluvieux isolé).

Il considère les facteurs de l'érosion comme indépendants, alors qu'il existe des nombreuses interactions entre ceux-ci.

a-2- Description des différents termes de l'équation-de WISCHMEIER (1975)

- **Le facteur d'agressivité climatique (R)**

Il est défini comme le produit de l'énergie cinétique (E_c) et l'intensité maximale en 30 minutes (I_{30}).

$$R = E_c \times I_{30} \quad (I-6)$$

Avec

$$E_c = 11,9 + 8,73 \log(I) \quad (I-7)$$

E_c : L'énergie cinétique en $J/m^2/mm$ de pluie

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

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

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

- **Le facteur sol (K)**

Le facteur sol caractérise l'érodabilité du sol, c'est-à-dire sa sensibilité à l'érosion.

Ce facteur sans dimension mesure la plus ou moins grande résistance relative d'un sol à l'érosion.

WISCHMEIER propose un mode de calcul de K , à partir des paramètres suivants :

Pour une première approximation :

- La somme des pourcentages de limon et sable fins
- Le pourcentage de sable
- La teneur en M.O

Et pour une approche plus précise

- La structure
- La perméabilité.

Le nomogramme en figure ci-dessous donne ainsi la méthode de détermination de K .

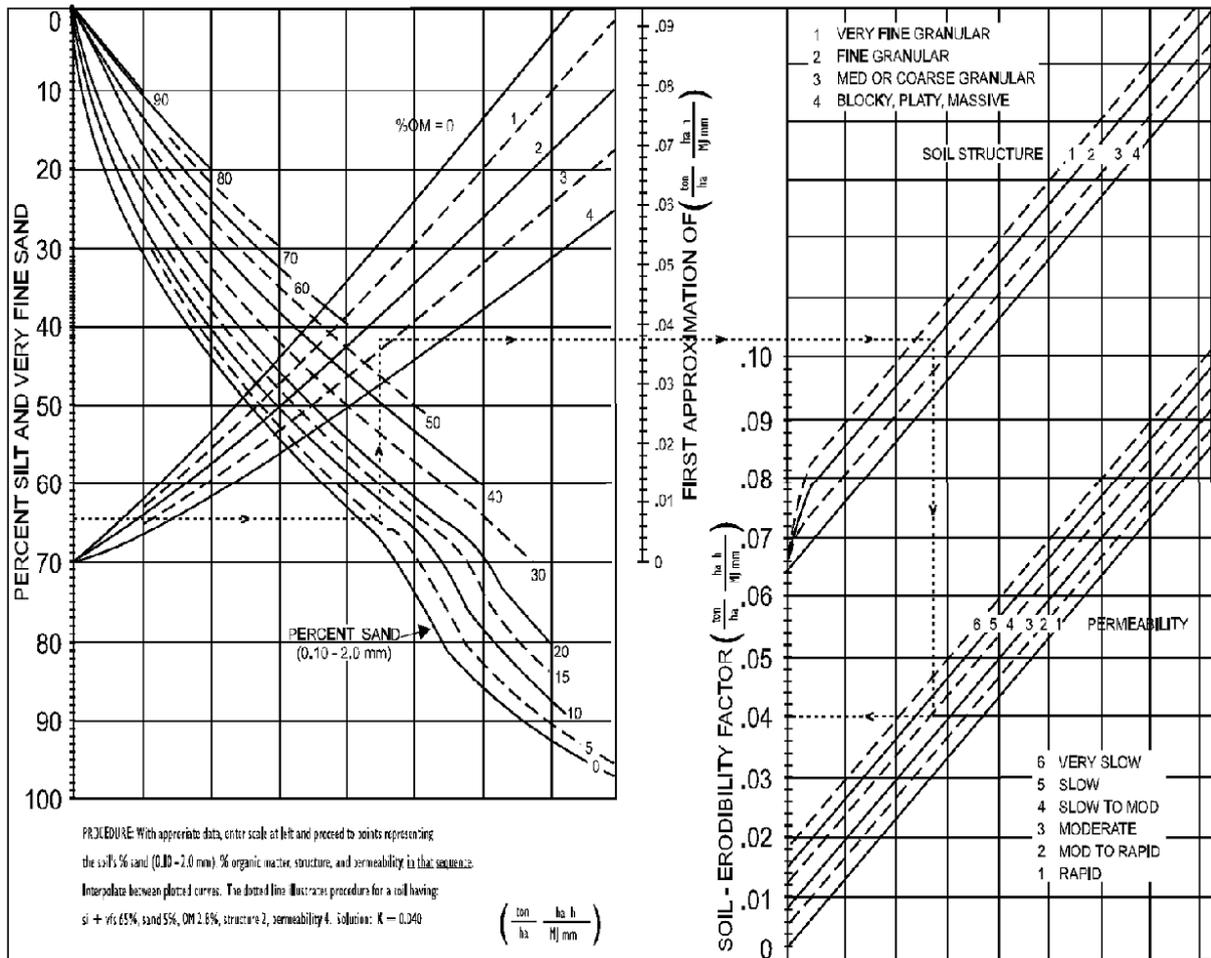


Figure (I-6) : Nomogramme de détermination de l'indice d'érodabilité du sol K (Foster, 1981)

On peut également déterminer K par la formule suivante :

$$100K = 2,1.M^{1,14} \cdot 10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3) \quad (I-8)$$

Où

M est déterminé à partir de :

M : (% sable fin + limon).(100 – % argile),

a : est le pourcentage de matière organique,

b : est le code de la perméabilité,

c : est le code de la structure

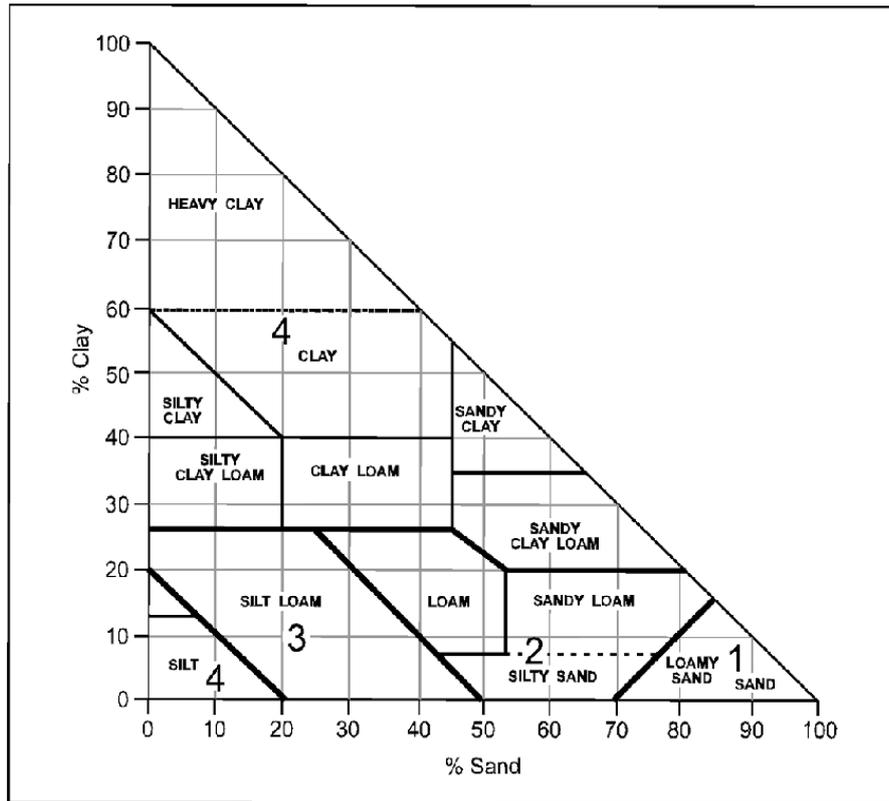


Figure (I-7) : Code Structure basée sur la texture (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

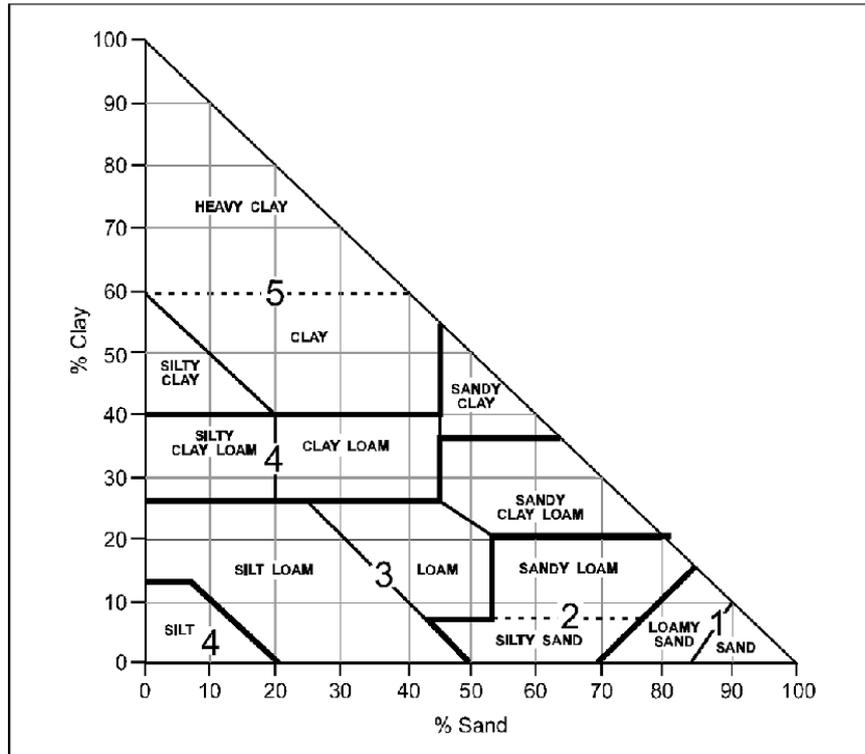


Figure (I-8) : Code de la perméabilité basé sur la texture (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

Tableau I-1 : quelques valeurs du paramètre K (El Garouani, et al., 2008)

Type du sol	K métrique t/ha
Sol peu évoluée lithique	0,32
Sol peu évoluée régosolique	0,44
Sol peu évoluée d'apport alluvial	0,39
Sol peu évoluée d'apport colluvial	0,27
Sol vert	0,36
Sol calcimagnésique rendzine	0,27
Sol fersialitique	0,46

- **Le facteur topographique (LS)**

Il tient compte à la fois de la longueur de la parcelle L et de l'inclinaison de la pente S. Les deux facteurs L et S sont combinés en un seul facteur topographique qui permet d'évaluer globalement l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion. Des formules, tables et abaques (figure I-7) permettent de quantifier les valeurs du facteur topographique ; les relations établies par WISCHMEIER permettent également de déterminer L et S :

$$LS = (1/22.15)^m \cdot (0.06543 + 0.045 s + 0.065 s^2) \quad (I-9)$$

L : facteur de longueur de pente (-)

l : la longueur de la pente (m)

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

m : exposant dépendant de plusieurs paramètres dont la pente

m : 0,5 lorsque la pente < 10 %

m : 0,6 lorsque la pente > 10 %

S : le facteur de pente (-)

s : la pente (%)

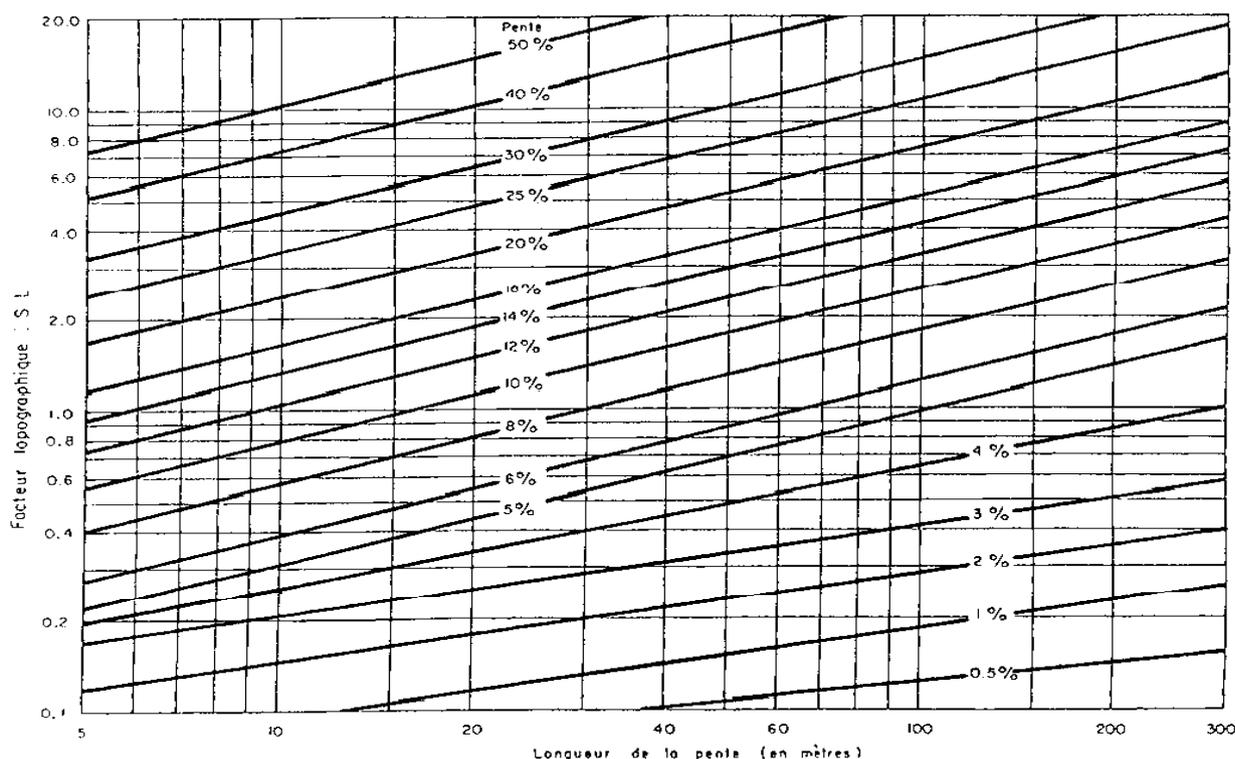


Figure I-9 : Facteur topographique d'après Wischmeier et Smith, 1978

- **Le facteur C ou indice de culture**

Il est défini dans l'équation de l'USLE comme le rapport entre l'érosion mesurée sur une parcelle de référence (jachère nue) et une parcelle test sous une culture bien précise. Il existe des tableaux pour déterminer C en fonction de la couverture végétale, des effets du Much (couche de protection sur le sol) et des techniques culturales.

La valeur du facteur C dépend de plusieurs variables :

La couverture des feuilles et des branches qui interceptent les gouttes de pluie et dissipent une partie de leur force érosive ;

La couverture végétale au sol composée de résidus de culture et de végétation vivante à la surface du sol ;

La biomasse du sol qui améliore l'écoulement de l'eau dans le sol ainsi que la capacité de rétention et le type et la fréquence de travail du sol qui influent la porosité ;

La rugosité de surface et la compaction du sol.

Chacune de ces variables est traitée comme un sous facteur et C'est le produit de ceux-ci.

Tableau I-2 : Quelques valeurs du paramètre C (El Garouani, et al., 2008)

Type d'occupation de sol	Le facteur C
Badlands/ terrains incultes	0,75
Cultures annuelles	0,26
Cultures extensives	0,28
Agricultures	0,25
Oliviers	0,28
Reboisement	0,15
Foret claire	0,10
Foret normale	0,08

- **Le Facteur P ou indice des aménagements antiérosifs**

Il permet d'évaluer l'action des pratiques visant à modifier la vitesse, le profil, la pente ou la direction de l'écoulement en surface et à réduire ainsi l'érosion. Par exemple, la culture en pente transversale, la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternées, l'aménagement de terrasses, la présence de bandes enherbées ou encore l'enherbement des rangs dans le sens de la pente sont des types d'actions antiérosives (Zaher, 2010).

Le facteur P est le rapport de la perte de sol observée sur le terrain étudié travaillé mécaniquement d'une certaine façon et protégé contre l'érosion d'une certaine façon avec celle qui a lieu sur la parcelle de référence où le terrain est labouré fréquemment dans le sens de la plus grande pente.

b- L'équation Universelle des pertes en sol modifiée : MUSLE

L'équation universelle des pertes en sol USLE ne s'applique que pour des données pluviométriques moyennes à l'échelle annuelle. Elle n'est donc pas valable à l'échelle de l'averse. Le modèle MUSLE a été mis au point pour estimer le transport solide de chaque averse. Il ne tient plus compte de l'érosivité de la pluie mais du volume ruisselé (Williams, 1975). L'équation MUSLE (Williams, 1975), se présente sous la forme suivante pour un événement pluvieux donné sur un bassin versant :

$$SY = 11,8 \cdot (Q \cdot q_p)^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot L_v \cdot LS \quad (I-10)$$

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

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

q_p : débit de pointe (m^3/s)

L_v : longueur du versant

Les autres termes, K, C, P et LS sont les mêmes que ceux de l'USLE. L'utilisation du MUSLE nécessite des données météorologiques pour connaître les débits et volumes ruisselés.

c- L'équation Universelle des pertes en sol révisée (Renard, 1991)

En 1991, Renard propose la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Cette équation est utilisée aux Etats-Unis depuis cette date en agriculture.

Son principe est de comparer l'érosion d'un site quelconque à l'érosion d'une parcelle témoin ayant une longueur de 22 m et une pente de 9 % sur jachère nue, c'est-à-dire labourée périodiquement de manière à ce qu'aucune végétation ne puisse s'y développer et tel que le sol ne puisse former une croûte superficielle.

Ce modèle empirique a été établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales menées sur plus de 20 ans. Il exprime les pertes en sol comme le produit de différents facteurs. E est exprimé en t/ha/an est la perte de sol due à l'érosion et constatée par unité de surface pendant une année :

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (I-11)$$

E : est le taux annuel de perte en sol en t/ha/an

Les paramètres sont les mêmes que l'USLE et leur détermination se font de la même manière, sauf le paramètre LS qui sera déterminé à partir de l'équation suivante :

$$LS = \lambda \cdot 0,5(0,0076 + 0,0053 \cdot \alpha + 0,00076 \cdot \alpha^2) \quad (I-12)$$

Ou α est la pente en % et $\lambda = (1/22.15)^m$ (I-13)

d- Formule de Henin "1950"

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion pluviale et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La quantification de l'érosion spécifique "Es" est donnée par la formule (I-14)

$$E_s = \frac{I_p I}{K V_e} \quad (\text{I-14})$$

Avec : I_p : Intensité des précipitations.

I : Pente du bassin versant.

S : Susceptibilité des sols.

K : Perméabilité du sol.

V_e : Végétation.

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

e- Formule de Gavrilovic (1960)

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnel à la température, la pluie et un coefficient de l'érosion, l'équation est donnée par l'expression (I-15) :

$$E_s = 3,14 . T . P_0 \sqrt{Z^3} \quad (\text{I-15})$$

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

T : coefficient de température

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1 \quad (\text{I-16})$$

Avec : t_0 : température moyenne annuelle en °C.

P_0 : pluie annuelle en (mm).

Z : coefficient de l'érosion.

Avec :

$$Z = y.[x.a] \left(\delta + \sqrt{I_{\text{moy}}} \right) \quad (\text{I-17})$$

Où y : valeur du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type du sol et du climat varie entre 0,05 et 1,0.

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

δ : Coefficient qui exprime le type et degré des processus visibles d'érosion dans le bassin versant.

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

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

$$T_{\text{ss}} = 26.62 I_e + 5.071 I_P + 9.77 C_t - 593,59 \quad (\text{I-18})$$

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

I_e : indice lithologique (%).

I_P : indice des précipitations (%).

C_t : Coefficient de torrentialité :

$$C_t = D_d \cdot F_1 \quad (\text{I-19})$$

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{A} \quad (\text{I-20})$$

D_d : densité de drainage

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

F_1 = nombre de talweg/ surface fréquence des talwegs élémentaires

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$$I_e > 10\% \quad \text{et} \quad I_P > 300$$

g- Formule de Tixeront (1960)

$$E_s = [S_1.Ta_1 + S_2.Ta_2 + S_3.Ta_3 + \dots + S_n.Ta_n] \quad (\text{I-21})$$

Avec : E_s : Erosion spécifique ($t/Km^2.an$).

Ta_1, Ta_2, \dots, Ta_n : Taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous bassins (T/Km^2).

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

S_1, S_2, S_n : Superficie des sous bassins (Km^2).

En supposant que la totalité du bassin possède une même perméabilité

La formule (I-21) devient :

$$E_s = K \cdot L_e \quad (I-22)$$

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

K : un coefficient qui est déterminé en fonction de la perméabilité des terrains.

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

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

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

K : 1400 pour les terrains d'une perméabilité faible.

K : 3200 pour les terrains perméables.

h- Formule de Fournier (1960)

$$Q_s = \frac{1}{36} \cdot \left[\frac{P}{P_a} \right]^{2,65} \cdot \left[\frac{H_{moy}}{S} \right]^{0,46} \quad (I-23)$$

Q_s : l'apport solide moyen inter annuel (en $T/Km^2.an$).

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

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

P_a : la pluviométrie moyenne interannuelle (en mm).

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

i- Formule de Poliakov

$$E_s = A.K.Q.I^{1/2} \quad (I-24)$$

Q : Débit de ruissellement de surface.

K : proportionnalité.

I : la pente moyenne du bassin versant.

A =0,5-10 : Coefficient d'érosion variant en fonction des types de sol.

j- Formule de Meddi (2015)

$$D_s = 16115,58.Q_l^{0,67} . S^{-0,52}.IMF^{0,10} \quad (I-25)$$

D_s : Dégradation spécifique (tonne/km²/an).

Q_l : Débit liquide annuel (m³/s).

S : Surface du bassin versant (km²).

IMF : Indice de Fournier modifié donné par la formule suivante

$$IMF = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P} \quad (I-26)$$

P : la pluviométrie annuelle (en mm).

P_i : la pluviométrie mensuelle (en mm).

I-6- L'impact et conséquence de l'érosion

L'érosion est un problème dont la gravité varie beaucoup d'une région à une autre. [Kanwar \(1982\)](#) a montré que sur 13.500 millions d'hectares des surfaces exondées dans le monde, 22 % sont cultivables et seulement 10 % sont actuellement cultivés (soit 1.500 millions d'ha). Ces dix dernières années, les pertes en terres cultivables ont augmenté jusqu'au taux de 7 à 10 millions d'ha/an, suite à l'érosion, à la salinisation ou à l'urbanisation. A ce rythme, dans trois siècles toutes les terres cultivables seront disparues ([Roose, 1994](#)).

L'érosion est donc un problème sérieux à l'échelle mondiale, mais il est bien plus préoccupant dans certaines régions du monde, comme le cas de la région du Nord Afrique et plus particulièrement en Algérie (données d'envasement des barrages de l'ANBT).

Les conséquences économiques se font sentir à deux niveaux :

- D'une part, on constate une réduction de la production nationale agricole en dépit de l'extension des surfaces agricoles suite à la dissection des surfaces cultivées et à la dégradation de leur fertilité. D'après [Sari \(2002\)](#), dans l'Ouarsenis, en 90 ans, les paysans ont perdu le tiers de la superficie cultivable.
- D'autre part l'érosion réduit par envasement la capacité des réserves en eau des barrages au rythme de 20 millions de m³/an. En outre 120 millions de tonnes de terre est le préjudice annuel dû à l'envasement estimé à 1% des investissements consentis à leur réalisation. La durée de vie moyenne de ces barrages en Algérie est d'environ 30 années selon ([Kadik, 1987](#)).

Chapitre II : Transport solide dans les cours d'eau

II-1- Introduction :

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase du processus. Il relève essentiellement du ruissellement et met en jeu les diverses formes d'écoulement de l'eau dans la nature.

La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par les cours d'eau dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de granulométrie (Roche, 1963).

Le champ de vitesse varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval, l'eau est met en jeu deux types de mécanismes : le charriage et la suspension qui sont les principaux types de transport solide.

La capacité de charriage est liée à la nature granulométrique des matériaux et varie dans le temps et dans l'espace avec le débit liquide (Couvert, 1999)

La répartition entre le charriage et la suspension dépend essentiellement des dimensions des matériaux rapportés à la vitesse de l'eau et la turbulence de l'écoulement (Degoutte, 2012).

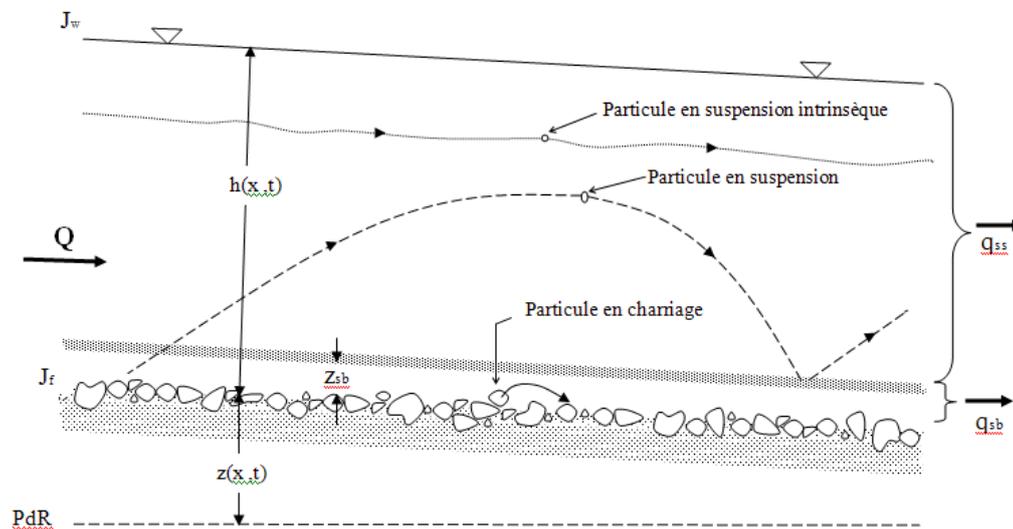


Figure (II-1) : Mode de transport solide (Graf & Altinakar, 2009)

II-2- Les types du transport solide

Le débit solide global d'un cours d'eau peut être divisé en trois types principaux :

a - Transport solide par charriage

Le charriage désigne le transport sur le fond d'éléments non cohésifs. Les particules se déplacent par un mouvement de roulement ou de glissement au voisinage immédiat du fond du cours d'eau concerné, ou encore par saltation, c'est-à-dire de succession des petits sauts au cours desquels les particules quittent le lit durant de courtes périodes (Degoutte, 2012).

Le transport solide par charriage concerne particulièrement les matières solides grossières (sables, gravier, galets et blocs), de diamètre supérieur à 1 mm, qui contribue à la formation et à l'équilibre du lit et principalement la pente. Ces matériaux glissent et roulent sur le fond sans pratiquement jamais quitter le lit (Degoutte, 2012).

Sur le lit des matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrauliques (Degoutte, 2012).

Les forces de pesanteur sont des forces stabilisatrices.

Les forces hydrauliques sont des forces déstabilisatrices dues à l'écoulement (traînée et portance) (Degoutte, 2012).

La grandeur physique explicative de ce mode de transport (charriage) est la contrainte hydrodynamique critique " τ_c " (Degoutte, 2012).

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 " (Degoutte, 2012).

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

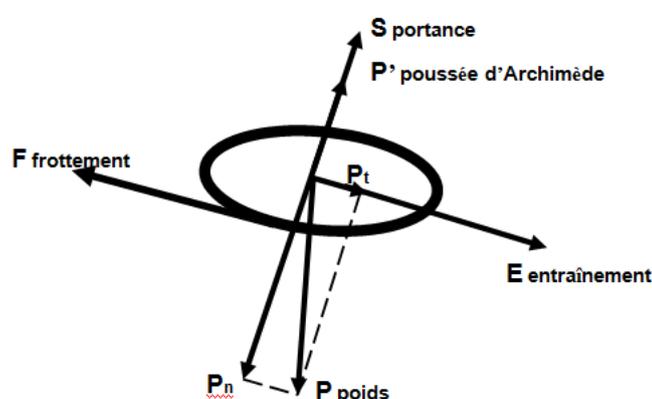


Figure (II-2) : Equilibre d'un grain posé sur le fond d'un canal (Degoutte, 2012)

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

$$\tau = \rho g R_h J \quad (\text{N/m}^2) \quad (\text{II-1})$$

τ : 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) .

L'analyse 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.

B - Transport solide en suspension

Le transport en suspension est le deuxième type du transport dans un cours d'eau. La charge en suspension constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permet dans des conditions d'écoulement déterminées de se déplacer sans toucher le fond du lit (Degoutte, 2012). Il concerne les matériaux fins, argiles, limons et colloïdes et quelquefois de silts et des sables fins.

Ces éléments fins sont maintenus en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau par la turbulence de l'eau, au sein de l'écoulement lui-même malgré leur densité supérieure à celle de l'eau. Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval.

Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence s'accroît également jusqu'au stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces extensionnelles 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 du 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 (Ben Aicha, 2008) suivante :

$$U^2 = 360 \cdot g \cdot D \quad (\text{II-2})$$

$$\text{Avec :} \quad U = C \sqrt{hJ} \quad (\text{II-3})$$

$$\text{et } \tau = \gamma J \cdot h \quad (\text{II-4})$$

$$\text{d'où } \tau = 360 \left(\frac{\gamma g}{C^2} \right) D \quad (\text{II-5})$$

τ : La contrainte tangentielle de l'écoulement (N/m²)

γ : Poids volumique du liquide (N/m³)

C : Coefficient de Chezy.

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 (m²/s).

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 (Graf, 1971)

- $V/W > 0.10$ 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 Schiedls sont représentés dans la figure (II-3).

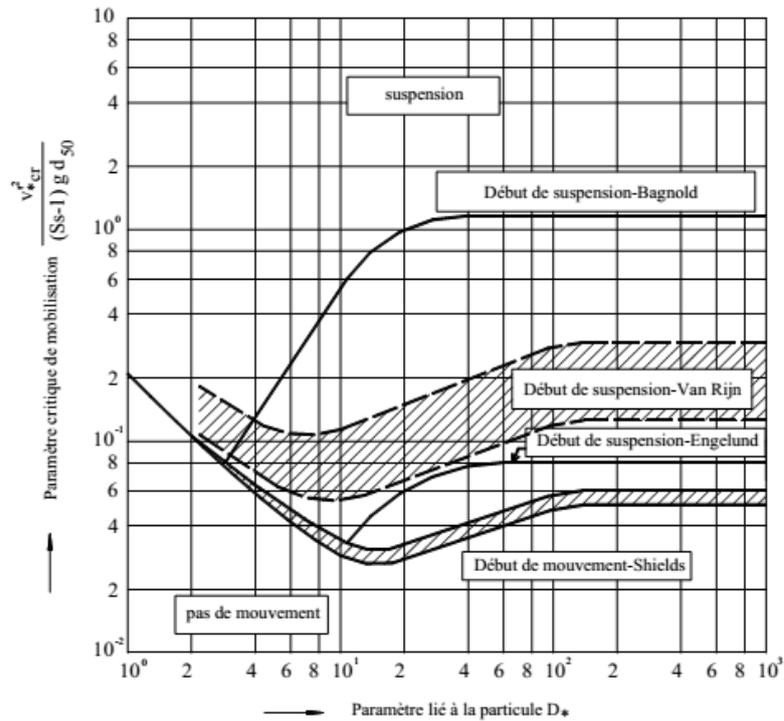


Figure II-3 : Critères de suspension (Van Rijn, 1984)

Le transport en suspension se fait par flotaison et ne comporte que très épisodiquement des retombées des sédiments sur le fond. La turbulence est le facteur principal de la suspension des sédiments.

C - Le transport solide en dissolution

Il concerne les matières transportées en solution dans l'eau venant de l'érosion chimique des bassins versants, des pollutions anthropiques et des apports atmosphériques. Cette troisième partie ne représente qu'une infime partie de débit global solide.

II-3- Méthodes de calculs

Pour estimer le débit solide global d'un cours d'eau, plusieurs méthodes sont utilisées selon le type des matériaux transportés, le transport solide fait l'objet de nombreuses études de recherche théoriques et expérimentales en laboratoire qui ont aboutis à quatre grandes familles de quantification :

- ✓ Modélisation mathématique.
- ✓ Modélisation physique.
- ✓ Méthodes empiriques.
- ✓ Méthodes approchées basées sur les mesures sur terrain

II-3-1- modélisation mathématique

II-3-1-1-Le modèle mathématique

L'utilisation de la modélisation mathématique pour le calcul du transport solide reste limitée à cause de la complexité de quelques solutions numériques des équations mathématiques décrivant le phénomène.

Nous présentons dans ce paragraphe les modèles existants de transport solide à faible débit solide par rapport au débit liquide ou à faible concentration de particules en mouvement au sein de l'écoulement. Les modèles sont basés sur l'écoulement de deux phases en interaction, et non une phase de mélange, comme c'est le cas pour la modélisation des laves torrentielles (Meunier 1991).

II-3-1-2- Phase liquide : équations de Saint-Venant

Les restrictions faites précédemment permettent de faire l'hypothèse que la rhéologie de l'écoulement liquide n'est pas modifiée par la présence de particules en mouvement. L'eau est considérée comme un fluide newtonien (Lagrée, 2016).

Par ailleurs, les vitesses en rivières sont inférieures à 10 m/s, donc négligeables par rapport à la célérité des ondes acoustiques dans l'eau. L'eau pourra donc être considérée comme incompressible (Lagrée, 2016). On pourra donc rendre compte des écoulements en rivières par les équations de Navier-Stokes. Les écoulements en rivière sont presque toujours turbulents ($Re = U_m h / \nu > 2500$ et couramment $10^5 < Re < 10^7$).

L'écoulement de paroi est souvent rugueux ($Rep = u * k_s / \nu > 70$), mais pas toujours.

Ou K_s : est le coefficient de Strickler.

La pression est supposée hydrostatique, une pente de la surface libre inférieure à 10%, une dérivée seconde du tirant d'eau par rapport au temps faible devant l'accélération de la pesanteur et une faible courbure des lignes de courant.

Le profil vertical des vitesses, la turbulence et la loi de frottement sont supposés être ceux du régime uniforme.

On utilise couramment, les équations de Saint-Venant, qui sont issues d'une intégration des équations de Navier-Stokes, sur le tirant d'eau pour la version bidimensionnelle et sur la section en travers pour la version unidimensionnelle (Lagrée, 2016). Nous présentons ci-dessous les équations unidimensionnelles de Saint-venant (Graf & Altinakar, 1996)

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \quad (\text{II-6})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[I_2 \frac{Q^2}{S} \right] + gS \frac{\partial z_s}{\partial x} = -P_m \frac{\tau_0}{\rho} - k_1 \frac{Q}{S} q_1 \quad (\text{II-7})$$

Avec q_1 : débit latéral,

$k_1 = 0$ ou 1 pour un débit latéral respectivement entrant ou sortant.

Les équations de Saint-Venant sont une bonne approximation de la réalité physique de l'écoulement liquide au voisinage du régime uniforme, dans la mesure où la contrainte au fond est liée à la vitesse débitante par le profil vertical en équilibre. Cette approximation devra sans doute être remise en cause dans le cadre de notre étude.

II-3-1-3- Conservation de la masse des sédiments et déformation du lit

La conservation de la masse de la phase solide est traduite par l'équation suivante :

$$(1 - p) \frac{\partial S_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_{sl}}{\partial x} = Q_{sl} \quad (\text{II-8})$$

p : porosité du fond, S_s : aire de la phase solide et Q_{sl} : débit solide

Le système d'équations (II-6) (II-7) et (II-8) est connu sous le nom d'équations de Saint-Venant - Exner (Graf & Altinakar 1996).

La plupart des modèles numériques de transport solide sont basés sur ces équations (Goodwin, 1986 ; Ko, 1990 ; Valiani 1992) avec éventuellement plusieurs équations de transport régissant les différentes classes granulométriques (Rahuel, 1989).

L'érosion et le dépôt doivent être répartis en travers de la section, ce qui est généralement fait au prorata d'une fonction de la contrainte au fond (Ko, 1990). De plus il faudrait en toute rigueur calculer la contrainte en tout point de la section, et tenir compte de la pente transversale du lit, ce que peu de modèles font.

La déformation de la section est délicate, du fait de l'hystérésis entre le dépôt et l'érosion. En particulier, il n'y a pas de dépôts en haut des berges contrairement aux érosions. Beaucoup de modèles ne prennent pas en compte cette hystérésis.

II-3-1-4- Equation dynamique : débit solide et capacité de transport

Pour chaque type de sédiment, on doit distinguer le débit solide observé en volume par unité de largeur noté q_s , et la capacité de transport de l'écoulement en volume par unité de largeur notée

q_s^* , appelé également débit solide à saturation. Le débit solide n'est pas nécessairement égal à la capacité de transport, en particulier s'il n'y a rien à transporter.

Le débit solide est égal à la capacité de transport, lorsque le taux d'érosion est égal au taux de dépôt (les taux sont ici des débits par unité de temps) :

$$T_e(D, \tau_0) = (D, \tau_0, q_s) \Leftrightarrow q_s = q_s^*(D, \tau_0) \quad (\text{II-9})$$

Il existe très peu de mesures concernant ces taux d'érosion et de dépôts, ce sont les capacités de transport qui ont fait l'objet divers de recherche.

L'égalité entre le débit solide et la capacité de transport est réalisée à deux conditions :

- ✓ le matériau est disponible au fond.
- ✓ le régime uniforme est établi pour l'écoulement et le transport solide.

Si le débit solide n'est pas égal à la capacité de transport, il tend vers cette dernière.

Si le régime n'est pas uniforme alors le débit solide tend vers la capacité de transport avec une certaine inertie.

Si le matériau transporté n'est pas présent au fond alors le débit solide est inférieur à la capacité de transport.

L'équation dynamique du sédiment peut s'écrire :

$$\frac{\partial q_s}{\partial t} + V_s \frac{\partial q_s}{\partial x} + K_s \frac{\partial^2 q_s}{\partial x^2} = [T_d - T_e] = \frac{V_s}{X_c} [q_s^* - q_s] \quad (\text{II-10})$$

Avec V_s : vitesse moyenne des sédiments, X_c : distance de chargement,

K_s : coefficient de dispersion lié à l'hétérogénéité des vitesses des particules solides

L'équation (II-10) est une équation de convection dispersion du débit solide avec un second membre faisant intervenir le taux de dépôt et le taux d'érosion. On voit par l'équation (II-10) qu'il y a équivalence entre une approche par la capacité de transport et une approche par les taux d'érosion indépendants du débit solide, et de dépôts variant linéairement avec le débit solide. Ceci permet en général de bien rendre compte des mécanismes de transport solide à faible concentration. Dont les détails sont présents dans les paragraphes sur les lois de chargement.

L'équation (II-10) est rarement utilisée car on considère généralement que le débit solide est égal à la capacité de transport.

II-3-1-5- Lois de chargement

C'est les lois qui traduisent le retard spatial ou temporel du débit solide par rapport à la capacité de transport. Ceci pouvant résulter d'une modification des conditions d'écoulement, ou d'un apport solide inférieur à la capacité de transport. Pour que cette question ait un sens il faut évidemment qu'il y ait suffisamment de matériau mobilisable à l'aval par l'écoulement (Ben Aicha, 2008).

C'est ce phénomène qui a le plus été étudié dans le cadre du transport solide en régime non-uniforme.

Ce retard peut s'expliquer :

- ✓ par l'inertie des particules solides qui ne réagissent pas immédiatement aux modifications de la capacité de transport (Daubert et Lebreton, 1967),
- ✓ par le temps ou la distance nécessaire à l'adaptation de la structure du fond aux nouvelles conditions d'écoulement (Wijbenga & Klaassen, 1983 ; Jain, 1992),
- ✓ par le temps ou la distance nécessaire à l'établissement du nouveau profil des vitesses et de la nouvelle structure turbulente, et donc de l'inertie de la capacité de transport elle-même.

II-3-1-6- Formulation des lois de chargement

Tous les auteurs (Daubert et Lebreton, 1967 ; Bell et Sutherland, 1983 ; Rahuel, 1988 ; Jain, 1992 ; Balayn, 1996) modélisent le retard spatial par des lois de type exponentiel, le retard temporel modélisé par le même type de loi est plus rarement pris en compte dans les modèles.

L'équation générale s'écrit :

$$\frac{\partial q_s}{\partial t} + V_s \frac{\partial q_s}{\partial x} + K_s \frac{\partial^2 q_s}{\partial x^2} = [T_d - T_e] = \frac{V_s}{X_c} [q_s^* - q_s] \quad (\text{II-11})$$

Pour prendre en compte le retard spatial, Daubert & Lebreton (1967), Jain (1992) et Phillips & Sutherland (1985) proposent :

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = \frac{q_s^* - q_s}{X_c} \quad (\text{II-12})$$

Cette équation est une simplification de l'équation (II-11).

Bell et Sutherland (1983) proposent :

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = \frac{q_s^* - q_s}{X_c} + \frac{q_s}{q_s^*} \frac{\partial q_s^*}{\partial x} \quad (\text{II-13})$$

L'équation (II-13) proposée par Bell & Sutherland (1983) a l'inconvénient de donner $q_s = q_s^*$ pour tout $x > X^*$ si on a $q_s(X^*) = q_s^*$, car alors :

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = \frac{\partial q_s^*}{\partial x} \quad (\text{II-14})$$

Cela veut dire qu'une fois que le débit solide a atteint la capacité de transport, il y reste, peu importe l'évolution de l'écoulement à l'aval, c'est un peu une loi de chargement instantané.

Par ailleurs, les valeurs de X_c , obtenues par régression sur des données expérimentales, sont fonction du temps, ce qui conforte le fait que cette formulation est mal adaptée. L'ordre de grandeur du retard spatial (quelques dizaines de centimètres) est le même qu'en utilisant la formule de Daubert & Lebreton (1967). De plus, il semble que les auteurs se soient finalement ralliés à l'équation (II-9), comme en témoigne leur publication de 1985. En conséquence nous ne retiendrons que cette expression.

Pour prendre en compte le retard temporel, Jain (1992) propose :

$$\frac{\partial q_s}{\partial t} = \frac{q_s^* - q_s}{T_c} \quad (\text{II-15})$$

avec $T_c = X_c/V_s$: durée de chargement

II-3-1-7- Inertie des particules en mouvement

Phillips & Sutherland (1985) expriment X_c linéairement avec le libre parcours moyen d'une particule solide X_s , lui-même fonction linéaire de

$$X_c = C_1 X_s = C_2 [\tau_0 - \tau_{0c}] = \alpha_x D (\Psi - \Psi_c) \quad (\text{II-16})$$

Avec C_1, C_2 Constantes et $\alpha_x > 4000$.

Les auteurs font remarquer que les distances ainsi obtenues sont très courtes (quelques dizaines de centimètres). Armanini & Di Silvio (1988) considèrent que le retard spatial est inférieur à la taille des ondulations du fond, et comme ils résolvent les équations sur un pas d'espace supérieur à la taille des ondulations du fond, ils considèrent que le débit solide est toujours égal à la capacité de transport.

Ceci semble raisonnable dans le cas du charriage, mais n'est sans doute plus vrai dans le cas de transport en suspension, pour lequel le libre parcours moyen des particules est nettement plus élevé.

II-3-1-8- Inertie de la structure du fond

La structure du fond peut s'appréhender à deux échelles, la forme du fond, et en particulier les dunes, et l'imbrication des particules constituant le fond.

Les caractéristiques des dunes (hauteur, longueur d'ondes) dépendent des conditions d'écoulement (Wijbenga & Klaassen 1983), et leur formation est intimement liée aux processus de transport solide. Par ailleurs les dunes sont responsables d'une partie de la résistance à l'écoulement, et par voie de conséquence des pertes de charge peuvent être à l'origine du ralentissement des processus de transport (Fredsoe 1981). De nombreux auteurs ont montré que la hauteur des dunes s'adaptait avec une certaine inertie aux modifications des conditions d'écoulement (Gee 1973, Allen 1978, Fredsoe 1979 et 1981, Wijbenga & Klaassen 1983). Ils proposent des lois de relaxations exponentielles pour la hauteur des dunes. Cette inertie est certainement liée à l'inertie du débit solide.

L'agencement des particules au fond les unes par rapport aux autres dépend également des conditions d'écoulement. Jain (1992) pense que l'inertie du débit solide est liée à l'agencement des particules posées au fond. Il rend compte de ce processus en considérant deux catégories de particules (figure II-3) : les particules exposées à l'écoulement et les particules non-exposées avec différentes probabilités de mise en mouvement. La proportion de particules exposées ne s'adaptent que progressivement à la modification des conditions d'écoulement. C'est la différence de ces deux probabilités et la distance ou le temps qu'il faut pour arriver aux nouvelles proportions à l'équilibre des deux catégories de particules, qui font que le retard spatial n'est pas relié à la longueur moyenne d'un saut.

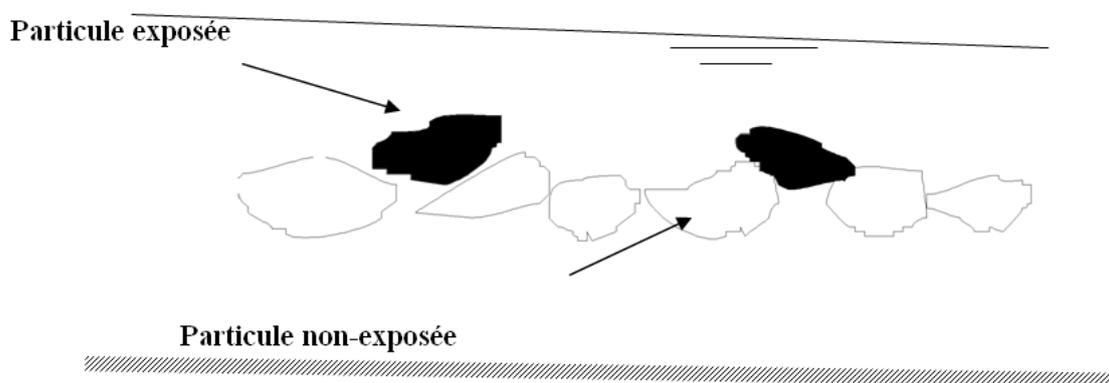


Figure (II-4) Particules exposées en noir et particules non-exposées en blanc (Graf & Altinakar, 2009)

Jain (1992) propose les expressions suivantes pour les retards spatial et temporel :

$$X_c = -\frac{X_s}{\ln(s)} \quad (\text{II-17})$$

Avec X_s : longueur moyenne d'un saut.

$$T_c = -\frac{T_B}{\ln(s)} \quad \text{avec} \quad T_B = \frac{6h}{U_m} \quad (\text{II-18})$$

Avec T_B : temps entre deux bruts.

$$s = (1 + \gamma)(1 - \varepsilon)(r - p) \quad (\text{II-19})$$

r : probabilité de mouvement d'une particule exposée.

p : probabilité de mouvement d'une particule non-exposée.

γ : probabilité moyenne de particules non-exposées déstabilisées par un choc (elles passent dans la couche exposée).

ε : probabilité de particules en mouvement regagnant une position stable (dans la couche non-exposée).

Pour le calcul de la vitesse des particules solides, Jain a utilisé la formule (II-19) (Engelund & Fredsoe, 1976 ; Phillips & Sutherland, 1989) :

$$V_s = 8.5u^* \sqrt{1 - \sqrt{\frac{u_{crit}}{u^*}}} \quad (\text{II-20})$$

A partir de ses propres mesures et des mesures de Bagnold (1936), Jain (1992) propose :

$$X_c = -\frac{X_s}{1.82[\Psi - \Psi_{crit}]} \quad (\text{II-21})$$

$$\text{Avec :} \quad X_s = V_s T_B = 51h \frac{u^*}{U_m} \sqrt{1 - \sqrt{\frac{\Psi_{crit}}{\Psi^*}}} \quad (\text{II-22})$$

Par ailleurs (II-15) et (II-16) impliquent :

$$\frac{T_c}{T_B} = \frac{X_c}{X_s} \quad (\text{II-23})$$

$$T_c = \frac{T_B}{1.82[\Psi - \Psi_{crit}]} = \frac{h}{0.30U_m[\Psi - \Psi_{crit}]} \quad (\text{II-24})$$

II-3-1-9- Comparaison des différentes approches

Les approches de Jain (1992) et des autres auteurs cités sont a priori contradictoires, chacun considérant que son modèle s'ajuste bien aux données.

La seule convergence entre les différents auteurs est l'ordre de grandeur du libre parcours moyen d'une particule, qui est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, et que ce dernier augmente quand la contrainte au fond augmente.

Les données de Jain (1992) sont au nombre de 4, ce qui limite la portée de ces conclusions, alors que les données de Phillips & Sutherland (1985) sont nombreuses mais très dispersées, ce qui limite également la portée de leurs conclusions.

Réexaminons les arguments théoriques des différents auteurs.

Pour Phillips & Sutherland (1985), il y a un lien entre libre parcours moyen et retard spatial, donc plus la contrainte est importante, plus il faudra de temps ou de distance pour qu'une particule donnée retouche le fond, et par conséquent le retard augmente quand la contrainte au fond augmente.

Alors que pour Jain (1992), c'est le contraire, puisque c'est l'inertie de la structure du fond qui est responsable du retard spatial, plus la contrainte est forte, plus le nombre de particules mis en mouvement est important, et plus la structure du fond s'adapte vite, d'où un retard qui diminue quand la contrainte au fond augmente.

Si l'on considère que le retard est proportionnel au nombre de particule mis en mouvement par unité de temps et de surface, et au libre parcours moyen, on devrait alors faire la somme de ces deux termes. Ce qui fait que l'inertie au chargement va augmenter pour les faibles valeurs du paramètre de Shields par l'effet de structure du substrat, et pour les fortes valeurs du paramètre de Shields par l'effet de la suspension.

La difficulté majeure de mise en œuvre des lois de chargement réside dans la détermination de la distance ou du temps de chargement. Ces derniers pourront être des paramètres de calage du modèle au même titre que le coefficient de frottement ou le diamètre représentatif des particules solides (Balayn, 1996).

II-3-1-10- Transport solide en crue

Quelques travaux ont tenté de mettre en évidence l'impact de la nature transitoire de l'écoulement sur la dynamique des sédiments. Des expériences en laboratoire (Graf &

Suzka, 1985 ; Suszka & Graf, 1987) comparent le volume solide transporté lors du passage d'une onde de crue (Vol_s) avec la prédiction faite par un calcul en régime uniforme (Vol_{s0}), la formule de transport solide ayant été calée sur le canal expérimental en régime uniforme.

Un lien est établi entre l'écart des volumes transportés et la forme de la crue. Cette dernière est représentée par le rapport entre la variation du tirant d'eau maximum (Δh) et le temps de montée (ΔT_R), le temps de descente (ΔT_D) et le temps total de la crue (ΔT). Les auteurs utilisent en particulier le paramètre P, qui n'est autre que la version globale du nombre adimensionnel proposé.

$$P = \frac{1}{u^*} \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad (\text{II-25})$$

Suszka propose la relation suivante, obtenue par régression sur les données recueillies en canal expérimental :

$$\frac{Vol_s - Vol_{s0}}{Vol_{s0}} = 115 \left[\frac{1 \Delta h}{u^* \Delta T} \right]^{1/2} \left[\frac{D_{50} l}{\Delta h} \right]^{1/2} - 0,3 \quad (\text{II-26})$$

Les résultats sont ensuite appliqués aux crues rapides. L'écart estimé lors d'une vidange de retenue sur le Rhône est de 25%.

Des mesures antérieures (Griffiths & Sutherland, 1977) ont été effectuées sur le même type d'écoulement. Les auteurs arrivent à la conclusion que les lois du transport solide en régime uniforme donnent des résultats satisfaisants. Comme le fait remarquer Graf à juste titre, les ondes de crues étudiées par Griffiths correspondent à des facteurs P compris entre 0,0003 et 0,002 ce qui donne effectivement un écart faible sur le volume transporté si l'on se ramène à la relation déduite des expériences de Graf.

Par contre, le fait que la relation de Suzka fasse intervenir uniquement ΔT la durée de la crue est curieuse, car les gradients ne jouent plus aucun rôle. Ceci pose problème pour une formule qui veut prendre en compte la nature non-uniforme du régime hydraulique.

Par ailleurs, la façon de calculer le débit solide équivalent en régime uniforme diffère d'un auteur à l'autre. En effet, le débit solide est fonction en régime uniforme du débit et de la hauteur d'eau, ces grandeurs étant liées par le régime uniforme :

On peut calculer le débit solide à partir du débit liquide ou de la hauteur d'eau :

$$q_s = f(\tau_0) \text{ avec } \tau_0 = \rho g \frac{q^2}{K_s^2 h^{7/3}} \text{ et } q^2 = K_s^2 I h^{10/3} \quad (\text{II-27})$$

$$q_s = f(\tau_0) \text{ avec } \tau_{0h} = \rho g I h \text{ ou } \tau_{0q} = \frac{q^{3/5} I^{7/10}}{K_s^{3/5}} \quad (\text{II-28})$$

En régime non-uniforme ce n'est plus le cas, et l'on trouvera des valeurs différentes selon que l'on calcule le débit solide à partir de la hauteur d'eau ou du débit.

Graf le calcule à partir de la hauteur d'eau (τ_{0h}), Griffiths en faisant la moyenne arithmétique entre la valeur obtenue à partir du débit et celle obtenue à partir de la hauteur d'eau ($(\tau_{0h} + \tau_{0q})/2$).

Il serait plus naturel de recalculer une contrainte au fond à partir du débit et de la hauteur d'eau, en utilisant l'expression de la loi de frottement sans faire intervenir la pente :

$$\tau_0 = \rho g \frac{q^2}{K_s^2 h^{7/3}} \quad (\text{II-29})$$

II-3-2- Le modèle physique

Le modèle réduit est encore un outil pour simuler les processus physiques.

La nécessité d'employer un modèle réduit résulte en général suite à une difficulté de résolution des équations mathématiques suite à une difficulté de résolution des équations mathématiques décrivant un phénomène d'étude. Il reste coûteux devant le modèle mathématique (Ben Aicha, 2008).

La transposition des résultats à la réalité nécessite le respect des règles de similitudes qui peuvent limiter les possibilités d'études d'un projet en modèle réduit.

II-3-3- Méthodes empiriques

Plusieurs dizaines de formules ont été proposées pour prédire soit le charriage seul, soit le charriage et la suspension. La plupart d'entre elles ont été établies pour estimer le transport solide moyen, cependant, depuis quelques années, plusieurs auteurs ont cherché à établir des formules donnant le transport solide fractionné, c'est-à-dire, les valeurs de transport associées à chaque diamètre en présence (Parker, et al., 1982; Wilcock et Crowe, 2003). Ce type de formule est très compliqué à utiliser, et surtout, nécessite une analyse très fine de la granulométrie (avec distinction en général des sédiments de surface et de subsurface), généralement non disponible. Les formules donnant le débit solide moyen utilisées par le logiciel HEC-RAS sont les suivantes : Ackers-White (1973), Engelund et Hansen (1967), Laursen (1989), MeyerPeter et Müller (1948), Toffaletti (1948), et Yang (1984)

Tableau II-1 Plage de valeurs d'entrée pour les fonctions de transport des sédiments ([Manuel de l'utilisateur Sam, 1998](#))

Function	d	d _m	s	V	D	S	W	T
Ackers-White (<i>flume</i>)	0.04 - 7.0	NA	1.0 - 2.7	0.07 - 7.1	0.01 - 1.4	0.00006 - 0.037	0.23 - 4.0	46 - 89
Englund-Hansen (<i>flume</i>)	NA	0.19 - 0.93	NA	0.65 - 6.34	0.19 - 1.33	0.000055 - 0.019	NA	45 - 93
Laursen (<i>field</i>)	NA	0.08 - 0.7	NA	0.068 - 7.8	0.67 - 54	0.0000021 - 0.0018	63 - 3640	32 - 93
Laursen (<i>flume</i>)	NA	0.011 - 29	NA	0.7 - 9.4	0.03 - 3.6	0.00025 - 0.025	0.25 - 6.6	46 - 83
Meyer-Peter Muller (<i>flume</i>)	0.4 - 29	NA	1.25 - 4.0	1.2 - 9.4	0.03 - 3.9	0.0004 - 0.02	0.5 - 6.6	NA
Tofaletti (<i>field</i>)	0.062 - 4.0	0.095 - 0.76	NA	0.7 - 7.8	0.07 - 56.7 (R)	0.000002 - 0.0011	63 - 3640	32 - 93
Tofaletti (<i>flume</i>)	0.062 - 4.0	0.45 - 0.91	NA	0.7 - 6.3	0.07 - 1.1 (R)	0.00014 - 0.019	0.8 - 8	40 - 93
Yang (<i>field-sand</i>)	0.15 - 1.7	NA	NA	0.8 - 6.4	0.04 - 50	0.000043 - 0.028	0.44 - 1750	32 - 94
Yang (<i>field-gravel</i>)	2.5 - 7.0	NA	NA	1.4 - 5.1	0.08 - 0.72	0.0012 - 0.029	0.44 - 1750	32 - 94

Où: d : diamètre global de particules, mm

d_m : diamètre de particule médian, mm

s : Poids spécifique des sédiments

V : vitesse moyenne d'écoulement. ft/s

D : profondeur, ft

S : gradient d'énergie

W : Largeur du canal, ft

T : température de l'eau, oF

(R) : hydraulique Radius, ft

NA : Données non disponibles

- La formule du transport global d'Ackers-White(1973) pour une taille de grain unique est représenté par :

$$X = \frac{G_{gr} s d_s}{D \left(\frac{u_*}{V} \right)^n} \quad (\text{II-30})$$

$$\text{et} \quad G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right) \quad (\text{II-31})$$

Où: X : Concentration des sédiments en parties

G_{gr} : paramètre de transport de sédiments

s : Poids spécifique des sédiments

d_s : diamètre de particule moyen

D : Profondeur utile

u^* : vitesse de cisaillement

V : vitesse moyenne d'écoulement

n : exposant de transition, selon la taille des sédiments

C : Coefficient

F_{gr} : paramètre de mobilité des sédiments

A : Paramètre de mobilité des sédiments

- La formule du transport global d'Engelund-Hansen (1967) est représentée par :

$$g_s = 0.05 \gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \left[\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{3/2} \quad (\text{II-32})$$

Où: est g_s : Transport de sédiments

γ : Poids d'eau unitaire

γ_s : Poids unitaire de particules solides

V : vitesse moyenne d'écoulement

τ_o : Contrainte de cisaillement au niveau de lit

d_{50} : 50% des particules dont le diamètre est inférieur

-La formule du transport global Laursen (Copeland)(1989) pour une taille de grain unique est représentée par:

$$C_m = 0.01\gamma\left(\frac{d_s}{D}\right)^{7/6}\left(\frac{\tau_o'}{\tau_c} - 1\right)f\left(\frac{u_*}{\omega}\right) \quad (\text{II-33})$$

Où: C_m : concentration de décharge de sédiments, en poids / volume

γ : Poids unitaire de l'eau

D_s : Diamètre moyen des particules

D : profondeur efficace des flux

τ_o' : Contrainte de cisaillement due à la résistance des grains au lit

τ_c : Contrainte de cisaillement critique au lit

$f\left(\frac{u_*}{\omega}\right)$: Fonction du rapport de la vitesse de cisaillement à vitesse de chute (Laursen, 1958).

-La formule du transport global de MeyerPeter et Müller (1948) est représenté par:

$$\left(\frac{k_r}{k_r'}\right)^{3/2} \gamma R S = 0.047(\gamma_s - \gamma)d_m + 0.25\left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3}\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s}\right)^{2/3} g_s^{2/3} \quad (\text{II-34})$$

Où: g_s : Taux de transport des sédiments unitaire en poids / heure / unité de largeur

K_r : Coefficient de rugosité

k_r' : Coefficient de rugosité à base de grains

γ : Poids unitaire de l'eau

γ_s : Poids unitaire des sédiments

g : Accélération de la pesanteur

d_m : Diamètre médian des particules

R : Rayon hydraulique

S : Gradient d'énergie

-La formule du transport global de Toffaletti (1948) pour une taille de grain unique est représentée par :

Pour la zone inférieure

$$g_{ssL} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0.756z} - (2d_m)^{1+n_v-0.756z}}{1+n_v-0.756z} \quad (\text{II-35})$$

Pour la zone médiane

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} \left[\left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-z} \right]}{1+n_v-z} \quad (\text{II-36})$$

Pour la zone supérieure

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} \left(\frac{R}{2.5}\right)^{0.5z} \left[R^{1+n_v-1.5z} - \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-1.5z} \right]}{1+n_v-1.5z} \quad (\text{II-37})$$

Pour la zone de lit

$$g_{sb} = M(2d_m)^{1+n_v-0.756z} \quad (\text{II-38})$$

$$M = 43.2C_L(1+n_v)R^{0.756z-n_v} \quad (\text{II-39})$$

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_{sb} \quad (\text{II-40})$$

Où: g_{ssL} : Transport de sédiments en suspension dans la zone inférieure, en tonnes /jour/ft

g_{ssM} : Transport de sédiments en suspension dans la zone médiane, en tonnes/jour/ft

g_{ssU} : Transport de sédiments en suspension dans la zone supérieure, en tonnes/jour/ft

g_{sb} : Charge le transport des sédiments en tonnes/jour/ft

g_s : Le transport total de sédiments en tonnes/jour/ft

M : Paramètre de concentration de sédiments

C_L : Concentration de sédiments dans la zone inférieure

R : Rayon hydraulique

d_m : Diamètre médian des particules

z : Exposant décrivant la relation entre la caractéristiques des sédiments et hydrauliques

n_v : Exposant caractérise la température

-Yang (1984) a élargi l'applicabilité de sa formule pour inclure les sédiments de gravier. Les formules de Yang du transport pour le sable et le gravier pour une taille de grain unique sont représentées par :

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.457 \log \frac{u_*}{\omega} + \left(1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.314 \log \frac{u_*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right) \text{ pour le sable } d_m < 2 \text{ mm (II-41)}$$

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 4.816 \log \frac{u_*}{\omega} + \left(2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.282 \log \frac{u_*}{\omega} \right) \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right) \text{ pour le gravier } d_m > 2 \text{ mm (II-42)}$$

Où: C_t : concentration totale de sédiments

ω : vitesse de chute des particules

d_m : Diamètre médian des particules

ν : viscosité cinématique

u^* : vitesse de cisaillement

V : vitesse moyenne d'écoulement

S : gradient d'énergie

La suspension d'une particule de sédiment est initiée une fois que la vitesse de cisaillement au niveau du lit se rapproche de la valeur de la vitesse de chute de cette particule. La particule restera en suspension tant que la composante verticale de la turbulence au niveau du lit dépasse la vitesse de chute. Par conséquent, la détermination du transport de sédiments en suspension dépend fortement de la vitesse de chute des particules.

Plusieurs formules ont été proposées pour la détermination de la vitesse de chute d'une particule.

Les formules utilisées par le logiciel HEC-RAS sont les suivantes : Rubey (1933), Toffaletti (1968) et Van Rijn (1993)

Rubey (1933) a proposé la formule suivante pour le calcul des valeurs de vitesse de chute des particules :

$$\omega = F_1 \sqrt{(s-1)gd_s} \quad (\text{II-43})$$

$$\text{avec } F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gd^3(s-1)}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{gd^3(s-1)}} \quad (\text{II-44})$$

Toffaletti (1968) a proposé le tableau II-2 des valeurs des vitesses de chute:

Où:

ω = vitesse de chute des particules

ν = viscosité cinématique

s = gravité spécifique des sédiments

d = diamètre de la particule

Van Rijn (1993) a proposé la formule suivante pour le calcul des valeurs de vitesse de chute des particules :

$$\omega = \frac{(s-1)gd}{18\nu} \quad 0.001 < d \leq 0.1 \text{ mm} \quad (\text{II-45})$$

$$\omega = \frac{10\nu}{d} \left[\left(1 + \frac{0.01(s-1)gd^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad 0.1 < d < 1 \text{ mm} \quad (\text{II-46})$$

$$\omega = 1.1[(s-1)gd]^{0.5} \quad d \geq 1 \text{ mm} \quad (\text{II-47})$$

Tableau N° : II-2: Valeurs des vitesses de chute Toffaleti (1968)

T (°F)		VITESSE DE LA VITESSE (FT/SEC)										VARIATION DE LA VITESSE (FT/SEC)									
		VFS	FS	MS	CS	VCS	VFG	FC	MO	VFS	FS	MS	CS	VCS	VFG	FC	MO				
35	0.013	0.045	0.130	0.305	0.590	1.000	1.410	1.950	0.021	0.065	0.165	0.354	0.640	1.000	1.410	1.950					
36	0.013	0.045	0.131	0.307	0.592	1.000	1.410	1.950	0.021	0.066	0.166	0.356	0.641	1.000	1.410	1.950					
37	0.013	0.046	0.132	0.310	0.594	1.000	1.410	1.950	0.021	0.067	0.167	0.357	0.643	1.000	1.410	1.950					
38	0.014	0.047	0.133	0.312	0.596	1.000	1.410	1.950	0.022	0.067	0.168	0.359	0.644	1.000	1.410	1.950					
39	0.014	0.047	0.135	0.314	0.598	1.000	1.410	1.950	0.022	0.068	0.170	0.360	0.646	1.000	1.410	1.950					
40	0.014	0.048	0.136	0.316	0.600	1.000	1.410	1.950	0.022	0.069	0.171	0.361	0.647	1.000	1.410	1.950					
41	0.015	0.049	0.137	0.318	0.602	1.000	1.410	1.950	0.022	0.070	0.172	0.362	0.649	1.000	1.410	1.950					
42	0.015	0.050	0.138	0.320	0.604	1.000	1.410	1.950	0.023	0.071	0.173	0.363	0.650	1.000	1.410	1.950					
43	0.015	0.051	0.140	0.321	0.606	1.000	1.410	1.950	0.023	0.071	0.175	0.364	0.652	1.000	1.410	1.950					
44	0.016	0.051	0.141	0.322	0.608	1.000	1.410	1.950	0.023	0.072	0.176	0.365	0.653	1.000	1.410	1.950					
45	0.016	0.052	0.142	0.323	0.690	1.000	1.410	1.950	0.024	0.072	0.177	0.365	0.655	1.000	1.410	1.950					
46	0.016	0.053	0.143	0.325	0.610	1.000	1.410	1.950	0.024	0.073	0.178	0.367	0.656	1.000	1.410	1.950					
47	0.016	0.053	0.144	0.326	0.612	1.000	1.410	1.950	0.024	0.073	0.180	0.368	0.657	1.000	1.410	1.950					
48	0.017	0.054	0.145	0.328	0.614	1.000	1.410	1.950	0.024	0.074	0.181	0.370	0.658	1.000	1.410	1.950					
49	0.017	0.055	0.146	0.330	0.616	1.000	1.410	1.950	0.025	0.074	0.182	0.371	0.659	1.000	1.410	1.950					
50	0.017	0.055	0.147	0.331	0.618	1.000	1.410	1.950	0.025	0.075	0.183	0.373	0.660	1.000	1.410	1.950					
51	0.018	0.056	0.148	0.333	0.620	1.000	1.410	1.950	0.025	0.075	0.184	0.375	0.661	1.000	1.410	1.950					
52	0.018	0.057	0.150	0.334	0.621	1.000	1.410	1.950	0.025	0.076	0.185	0.376	0.662	1.000	1.410	1.950					
53	0.018	0.057	0.151	0.336	0.623	1.000	1.410	1.950	0.025	0.077	0.186	0.378	0.663	1.000	1.410	1.950					
54	0.018	0.058	0.152	0.338	0.624	1.000	1.410	1.950	0.026	0.077	0.187	0.380	0.664	1.000	1.410	1.950					
55	0.018	0.059	0.153	0.340	0.626	1.000	1.410	1.950	0.026	0.078	0.188	0.381	0.665	1.000	1.410	1.950					
56	0.019	0.059	0.154	0.341	0.627	1.000	1.410	1.950	0.026	0.078	0.190	0.383	0.666	1.000	1.410	1.950					
57	0.019	0.060	0.155	0.343	0.629	1.000	1.410	1.950	0.026	0.079	0.192	0.385	0.667	1.000	1.410	1.950					
58	0.019	0.061	0.156	0.344	0.630	1.000	1.410	1.950	0.027	0.079	0.194	0.386	0.668	1.000	1.410	1.950					
59	0.019	0.061	0.157	0.346	0.632	1.000	1.410	1.950	0.027	0.080	0.195	0.388	0.669	1.000	1.410	1.950					
60	0.020	0.062	0.158	0.347	0.633	1.000	1.410	1.950	0.027	0.080	0.196	0.390	0.670	1.000	1.410	1.950					
61	0.020	0.063	0.160	0.349	0.635	1.000	1.410	1.950	0.028	0.081	0.197	0.391	0.671	1.000	1.410	1.950					
62	0.020	0.063	0.161	0.350	0.636	1.000	1.410	1.950	0.028	0.081	0.198	0.392	0.672	1.000	1.410	1.950					
63	0.020	0.064	0.162	0.351	0.638	1.000	1.410	1.950	0.028	0.082	0.199	0.393	0.673	1.000	1.410	1.950					
64	0.021	0.065	0.163	0.353	0.639	1.000	1.410	1.950	0.028	0.082	0.200	0.394	0.674	1.000	1.410	1.950					

II-3-4- Méthodes approchées basées sur les mesures de terrain :

II-3-4-1- Transport par charriage

Les phénomènes de charriage sont difficilement accessibles à des mesures directes. Les méthodes basées sur l'utilisation de nasse à graviers sont impraticables sur les cours d'eau à régime torrentiel. Celle basées sur l'utilisation de tracteurs radioactifs ou luminescents est pour la même raison, assez aléatoire (Chauvin et Danion, 1963).

II-3-4-2- Transport en suspension

La méthode consiste à effectuer des prélèvements en bordure d'un cours d'eau.

Ainsi, dans un laboratoire, nous mesurerons la concentration « c » de l'échantillon prélevé par filtration, le passage à l'étuve et enfin la pesée.

La relation du débit solide est exprimée par la formule (II-48) :

$$Q_s = C \cdot Q_l \quad \text{en (kg/ s)} \quad \text{(II-48)}$$

La répartition de la charge en suspension, dans la section transversale d'une rivière dépend de la dimension du matériau. Les particules dont le diamètre est inférieur à 60 microns montrent en général une répartition homogène selon la profondeur et la largeur (suspension uniforme) (Ben Aicha, 2008).

Il n'est pas de même pour les éléments grossiers qui se présentent selon un gradient de concentration en fonction de la profondeur (suspension graduée).

II-3-4-3- La mesure du taux de remplissage des retenues

Un barrage constitue une fosse à sédiments de grande taille. Si l'on contrôle le bilan hydraulique du barrage et la turbidité des volumes d'eau déversés ou soutirés, on peut déduire l'envasement de la retenue, une valeur moyenne des transports solides sur une période allant de la date de la mise en eau du barrage à la date des mesures d'envasements ou sur une période suffisamment longue, comprise entre deux relevés successifs.

II-4 - Erosion du fond, transport et dépôt dans un cours d'eau naturel

Dans un cours d'eau naturel, l'écoulement n'est jamais uniforme soit parce que des paramètres géométriques changent (pente, largeur...), soit parce qu'il y a des singularités (méandres, seuils). Il y a donc des zones à plus forte vitesse et des zones à plus faible vitesse (Degoutte, 2012).

Dans les zones à forte vitesse, il y a davantage de matériaux prélevés : ce sont des zones d'érosion du fond. Dans les zones à faible vitesse, les matériaux transportés de l'amont peuvent se déposer à nouveau : ce sont des zones de dépôt. Les dépôts prennent la forme de bancs (ou plages ou grèves) ou d'îles (Degoutte, 2012).

Le cours d'eau transporte toujours autant de matériaux qu'il est capable d'en transporter, à condition bien sûr que ces matériaux soient disponibles sur place, c'est-à-dire sur le fond ou sur les berges.

A chaque instant, l'écoulement est donc saturé en débit solide (charriage et suspension). Dans cette situation, le tronçon du cours d'eau considéré est en équilibre et le débit solide entrant est égal au débit solide sortant. On dit aussi que le taux d'érosion est égal au taux de dépôts. Si le débit solide sortant est inférieur, il y a dépôt dans le tronçon considéré et la capacité du transport est inférieure au débit solide entrant ; si le débit solide sortant est supérieur, il y a érosion du fond ou des berges dans le tronçon considéré et la capacité du transport est supérieure au débit solide entrant (Degoutte, 2012). Pour un tronçon de rivière qui ne serait pas saturé en débit solide, l'expérience et la théorie montrent que lorsque le charriage est prédominant, la distance nécessaire pour le retour à la saturation est faible, quelques dizaines de mètres. Par contre, lorsque la suspension prédomine, l'inertie est plus grande et la distance nécessaire est importante, quelques kilomètres (Degoutte, 2012).

Un cours d'eau naturel présente donc une double variabilité de son lit :

- Dans l'espace : il y a des zones privilégiées d'érosion, et des zones privilégiées de dépôt ;
- Dans le temps : des matériaux fins déposés en régime moyen pourront être emportés et transportés en crue.

Synthèse de la première partie

Dans cette partie du travail qui présente l'étude bibliographique, sur l'érosion, le transport et le dépôt, nous avons présenté une description sur l'origine, le processus de l'érosion hydrique, les facteurs influençant ce phénomène, ses formes ainsi que les différentes méthodes de sa quantification, son impact et ses conséquences sur le milieu naturel dans le premier chapitre.

Dans le second chapitre, nous avons présenté une analyse des différents types de transport solide, ainsi que ses différentes méthodes de calcul et d'estimation suivie d'une présentation du mécanisme d'érosion, du transport et du dépôt dans les cours d'eau.

Deuxième partie :
Présentation des bassins
versants

Introduction

Cette partie est consacrée à une description générale des deux bassins versants Bassin Oued Labiod appartenant au bassin Chott Melghir et Oued Chemora du bassin Haut plateaux constantinois. Ainsi que les différents sous bassins analysés afin de donner les indications géographiques, physiographiques et leurs réseaux hydrographiques dans le troisième chapitre, suivi d'une analyse des caractéristiques climatiques des bassins versants, qui sont la base de l'étude des comportements et des réponses hydrologiques de ses cours d'eau dans le quatrième chapitre, ensuite une évaluation des écoulements superficiels et de leur variabilité qui passe par la prise en compte des débits moyens annuels, et bilans hydrologiques, régimes fluviaux et variations saisonnières des débits, débits moyens journaliers et intensités des débits extrêmes des crues, et des étiages ainsi que leur fréquence sont les objectifs du cinquième chapitre.

Tous ces points forment une base indispensable à la compréhension des mécanismes de l'érosion hydrique et du transport des sédiments, objectifs du sixième chapitre. Ce dernier est consacré à la présentation des différentes méthodes classiques d'estimation des apports solides, ainsi que leurs résultats dans les deux bassins à différentes échelles, de l'échelle de la crue jusqu'à l'échelle interannuelle.

CHAPITRE III : Description physiographique du milieu d'étude

III-1- Aperçu géographique

La zone d'étude regroupe deux bassins versants : Bassin Oued Labiod appartenant au bassin Chott Melghir et le bassin d'Oued Chemora du bassin Haut plateaux constantinois.

Le grand bassin hydrologique Chott Melghir N°06 (selon la nomenclature de l'ANRH) englobe trente (30) sous bassins versants (ANRH, 2005), dont le sous bassin versant Oued Labiod, est situé dans le massif des Aurès (partie orientale de l'Atlas saharien). Il est composé de six principaux Oueds : Oued Labiod, Oued Ichmoul, Oued Bacha, Oued T'kout, Oued Isli et Oued Bou Sahbane formant par leur confluence Oued Labiod 'Ighzer Amellal'. L'ensemble de ces Oueds cheminent vers le Sud et se déversent dans Chott Melghir. L'Oued Labiod est formé par la réunion des torrents descendants des raides pentes de Chelia (2328m), Ichemoul (2100m), Bou Tlaghmine (2178m), El-hara (1972m), Taghda (1899 m) et Ich Aziza (1937 m).

Après avoir traversé le défilé resserré de Tighanimine, Oued Labiod s'encaisse dans les canyons de Ghoufi et les gorges étroites de M'chounèche, puis s'ouvre une voie vers la plaine Saharienne jusqu'aux gorges de Foum el Gherza.

Le bassin versant oued Labiod englobe 9 Communes et 6 Daïras qui s'étendent de Khenchela (Nord-Est) jusqu'à Biskra (Sud-Ouest) selon les coordonnées géographiques suivantes :

Longitude varie entre 5,90° et 6,64°

Latitude varie entre 34,83° et 35,37°

Il est ainsi limité par les communes d'Inoughissen, Ichemoul et Arris au Nord et par M'chounèche et Sidi Okba au Sud, il couvre une superficie de 1317 km².

Le grand bassin hydrologique les hauts plateaux constantinois N°07 selon la nomenclature de l'ANRH englobe sept (07) sous bassins versants (ANRH, 2005), dont le bassin versant de l'Oued Chemora, est situé dans le massif des Aurès. Il couvre une superficie de 741 km² (à la station de Chemora), dont les rebords sont constitués des massifs montagneux des Aurès au Sud, Djebels Bou-Arif au Nord-Ouest, Djebels Asker et Ras er Rih au Sud-Ouest, Djebels Tizagrouit au Sud-Est, et Djebels Ammrane au Nord-Est. La conjonction des facteurs géographiques et climatiques (semi-aridité) a donné naissance à un écoulement endoréique ; L'eau s'écoule à l'intérieur des terres vers des lacs salés (Sebkhas, Garaâs) qui constituent de ce fait leur niveau de base géomorphologique et leur exutoire hydrologique.

L'Oued Chemora résulte de la jonction de trois principaux affluents : Oued Reboa, Oued Morri et Oued Soudhes.

L'Oued Chemora se perd après un trajet d'environ 30 km, dans les lacs salés des hautes plaines Constantinoises, il s'agit de Sebkhet Djendli, Garâet Ank Djmel, et Garâet el Tarf.

Le bassin versant englobe 7 Communes et 3 Daïras qui s'étendent des communes Oued Taga et Foum Toub (Sud) jusqu'à la commune de Chemora (Nord) selon les coordonnées géographiques suivantes :

Longitude varie entre 6,24° et 6,64°

Latitude varie entre 35,32° et 35,61°

III-2- Description physiographique

III-2-1- Orographie

III-2-1-1- Bassin versant Oued Labiod

Le bassin versant d'oued Labiod présente des ensembles naturels fortement variés qui agissent sur le comportement hydrologique du bassin. Il est subdivisé en deux milieux naturels :

A- Les montagnes : Elles sont composées essentiellement de massifs montagneux des Aurès dans la partie Nord du bassin. Elles sont constituées par les monts de Chelia (2328 m), Ichmoul (2100) et Ich Aziza (1937m), à l'Est on rencontre la chaîne montagneuse de Zallatou (1995 m) et Ahmar Khaddou (1931m) caractérisée par de forts reliefs en plusieurs chaînons orientés sensiblement SO-NE ; Ces reliefs forment une barrière naturelle, qui joue un rôle climatique et hydrologique important. Les différents paramètres climatiques sont fortement influencés par ces reliefs.

B- Les piedmonts : C'est une zone de transition entre la montagne et la plaine : elle s'allonge du Nord Est au Sud-Ouest on trouve également le piedmont méridional avec ses collines et ses étendues planes, étagées et en pente douce ; son altitude varie entre 350 et 200m.

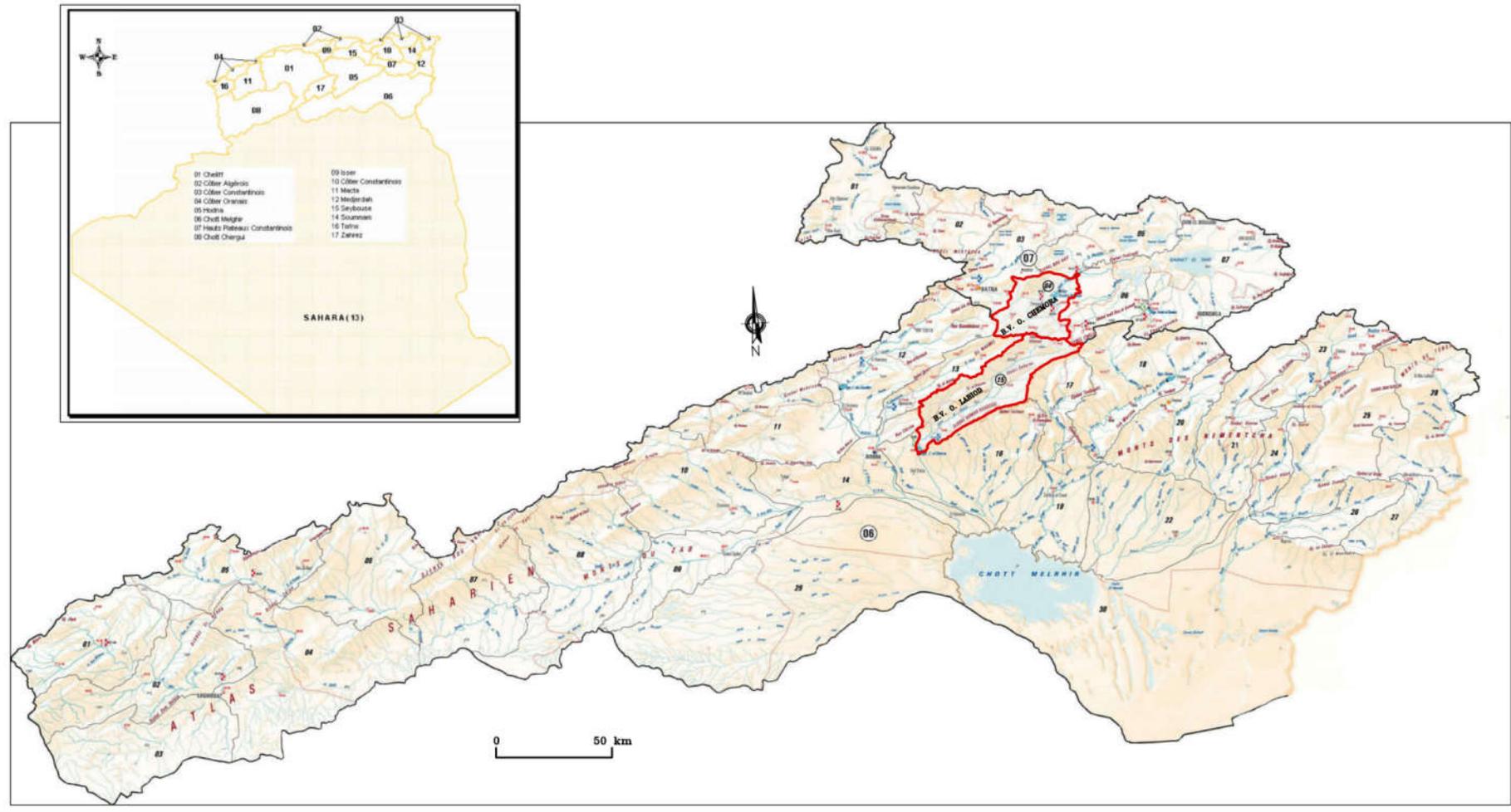


Figure III-1 (a): Bassins versants Algériens

Figure III-1 (b) : Les bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora dans l'ensemble du Chott Melghir (06) et des Hauts Plateaux Constantinois (07) extraite de la carte des bassins versants de l'ANRH (2005).

III-2-1-2- Bassin versant Oued Chemora

Il est possible de subdiviser le bassin d'Oued Chemora en trois milieux naturels bien distincts :

A- La montagne

C'est une région formée d'une chaîne montagneuse à relief accidenté avec une altitude variant entre 1400 m et 2321 m ; Ce secteur constitue la partie la plus arrosée, elle est drainée par oued Taga qui descend de Djebel El Mahmel (2321 m), puis par oued Loudh qui prend ses sources dans le Djebel Aslaf ; Ces deux oueds se jettent dans l'Oued Rbôa, à leur confluence

B- Le piedmont

C'est une zone de transition entre la montagne et la plaine : Elle s'allonge de l'Ouest à l'Est au pied du versant Nord et celui de Djebels Bou-Arif au Nord-Ouest, sous forme des collines constituées par les dépôts colluviaux qui descendent en pente atténuée vers la plaine, son altitude varie entre 1200 et 1400 m. La plus grande partie de ce secteur, est drainée par Oued Ait Fedhala et Oued Anza n'Zdira, ces deux oueds forment oued Soudhes. La convergence d'Oued Soudhes et d'Oued Reboa après son confluence avec Oued Morri forme Oued Chemora.

C- La plaine

Cette zone plate occupe la plus grande partie du bassin et s'étend au Nord et à l'Est des piedmonts. Elle est circonscrite par les courbes de niveau 1200m et 900m, et s'étale jusqu'aux rives des lacs salés avec une déclivité qui ne dépasse pas le plus souvent les 8%. Cette partie du bassin est drainée principalement par Oued Chemora.

III-2-2- Lithologie

La nature de la roche joue un double rôle : Son influence se fait sentir, d'une part, sur le régime du cours d'eau, et d'autre part, sur l'érosion et le transport solide.

III-2-2-1- Bassin versant d'Oued Labiod

La lithologie de la première partie de notre zone d'étude (oued Labiod) présente peu de variétés. Ce bassin comporte deux principales formations de roches. La répartition lithologique du bassin versant montre des zones à érodibilité moyenne à faible au Nord et une érodibilité forte au Sud, l'absence du couvert végétal favorise un ruissellement violent et donc l'érosion sera plus ou moins importante.

La série stratigraphique et les formations géologique essentielles du bassin versant d'oued Labiod sont les suivantes :

Crétacé -Campanien inférieur : alternance de calcaires et de marnes.

-Campanien supérieur : schistes et marnes schisteuses.

-Mæstrichtien : calcaires cristallins.

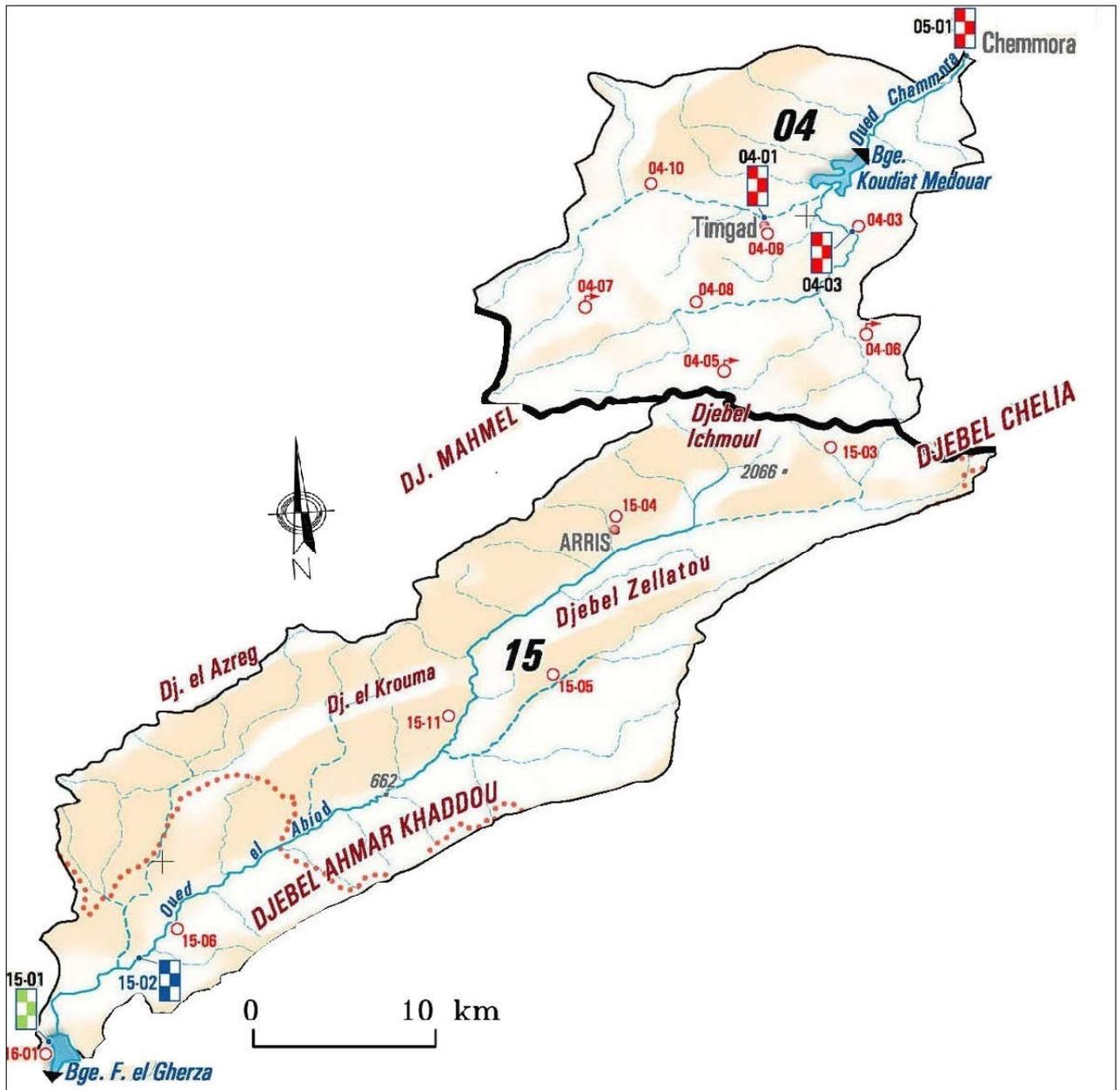


Figure III-2 : Bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora (carte extraite de la carte des bassins versants de l'ANRH ; 2005)

Miocène Ce sont des poudingues et des alternances de marnes, grès, marnes gypseuses. Cette première série lithologique est surmontée en disconcordance par des formations plus récentes

appartenant essentiellement au Miocène et au Pliocène caractérisées par des conglomérats, des argiles et des sables. Ces dernières se localisent surtout vers le Sud du bassin versant (Haoues, 2007).

En résumé la surface du bassin se compose de :

Calcaires récifaux et calcaires marneux du crétacé moyen et inférieur (résistants) : 30 %.

Calcaire, argile et gypse de l'éocène moyen et inférieur (moyennement érodable, présence de couvert végétal): 46%

Argile à gypse de l'oligocène continental (érodable) : 24 %

III-2-2-2- Bassin versant Oued Chemora

Les terrains les plus anciens qui affleurent dans le secteur étudié sont attribués au Crétacé, et les plus récentes au Quaternaire (Laffitte, 1939).

Le Crétacé : Il constitue les principaux affleurements des monts des Aurès et des Djebels Bou-Arif. La série de Crétacé inférieur à une extension réduite, elle affleure au Nord-Oued du bassin (Dj.Bou-Arif), il s'agit d'une série à dominante calcaire, bien litée et attribuée à l'Aptien. Alors que le Crétacé supérieur qui s'étend du Cénomaniens au Maastrichtien, est constitué essentiellement de marno-calcaire et de mame dominant, il apparaît sur la majorité des reliefs.

Le Tertiaire : Les terrains attribués au Miocène et Pliocène non différencié, affleurent largement dans le secteur d'étude, il s'agit d'une série constituée par alternance d'argile silteuse et de grès, qui occupent les reliefs de Gloua-ouchal, Djebels Tagratine ; Et des Grès blancs et grossiers qui affleurent en de nombreux endroits par de vastes surfaces allant jusqu'à 50km². Alors que la formation conglomératique constituée de mame, conglomérats, et de calcaire, a une extension très limitée, elle affleure au Sud-Ouest du bassin.

Le Quaternaire : Il est représenté par les nappes d'éboulis d'origine calcaire ou gréseuse, localisées sur les flancs de Djebels Timagout ; Les alluvions récentes formées le long des Oueds (Reboa-Chemora) ; Les glacis polygénique nappant les reliefs, qui couvrent de très vastes surfaces et organisés en pente douce ; Et les croûtes calcaires qui affleurent en de nombreux endroits localisés dans le Nord-Ouest du bassin.

En résumé la surface du bassin se compose de :

Bassin de relief peut accentuer constitué de majorité de formations stables : glaciis quaternaire (27%), grès tortonien (16%), marnes calcaires boisées du crétacé moyen dominant le sud du bassin (10%)

Dans le bassin inférieur de Chemora les formations Quaternaires, formations gréseuses et les argiles siliceuses étendent sur les zones de faible pente, et s'effectue le dépôt de la charge solide arrachée aux versants occupe 43% de la surface.

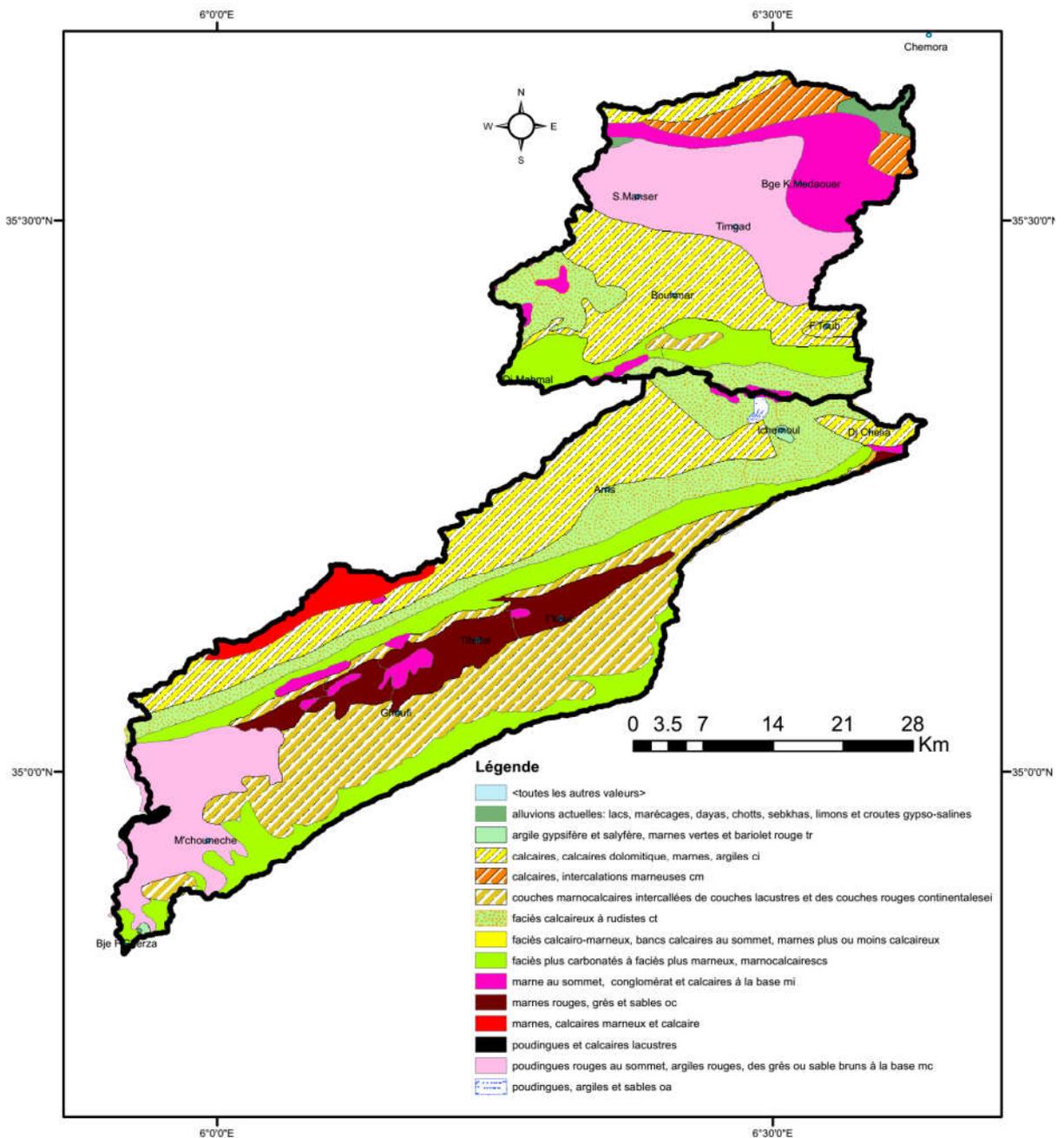


Figure III-3 : Carte lithologique des Bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora (carte établie à partir de la carte géologique des Aurès de Laffitte, (1939))

III-2-3- Les pentes

L'établissement de la carte des pentes est un élément fondamental dans toute étude de l'érosion. La topographie, représentée par les pentes, constitue un des facteurs essentiels de la dégradation du milieu physique et un élément important influant sur l'écoulement des eaux et l'occupation des sols. Les pentes ont été ressorties en dix (10) classes bien différenciées (III-4).

Tableau III-1 : Répartition des classes des pentes dans le bassin versant Oued Labiod.

Classes	Surfaces (km ²)	Surfaces (%)
0 - 5	97.47	7.40
5 - 10	167.31	12.70
10 - 15	180.65	13.71
15 - 20	169.44	12.86
20 -25	146.98	11.16
25 - 40	295.66	22.45
40 - 60	167.55	12.72
60 - 80	58.70	4.46
80 - 100	20.50	1.56
> 100 %	12.95	0.98
Total	1317,20	100.00

Tableau III-2 : Répartition des classes des pentes dans le bassin versant Oued Chemora.

Classes	Surfaces (km ²)	Surfaces (%)
0 - 5	226.13	30.51
5 - 10	169.69	22.90
10 - 15	104.34	14.08
15 - 20	73.31	9.89
20 -25	51.25	6.91
25 - 40	78.18	10.55
40 - 60	29.19	3.94
60 - 80	6.60	0.89
80 - 100	1.63	0.22
> 100 %	0.79	0.11
Total	741.10	100.00

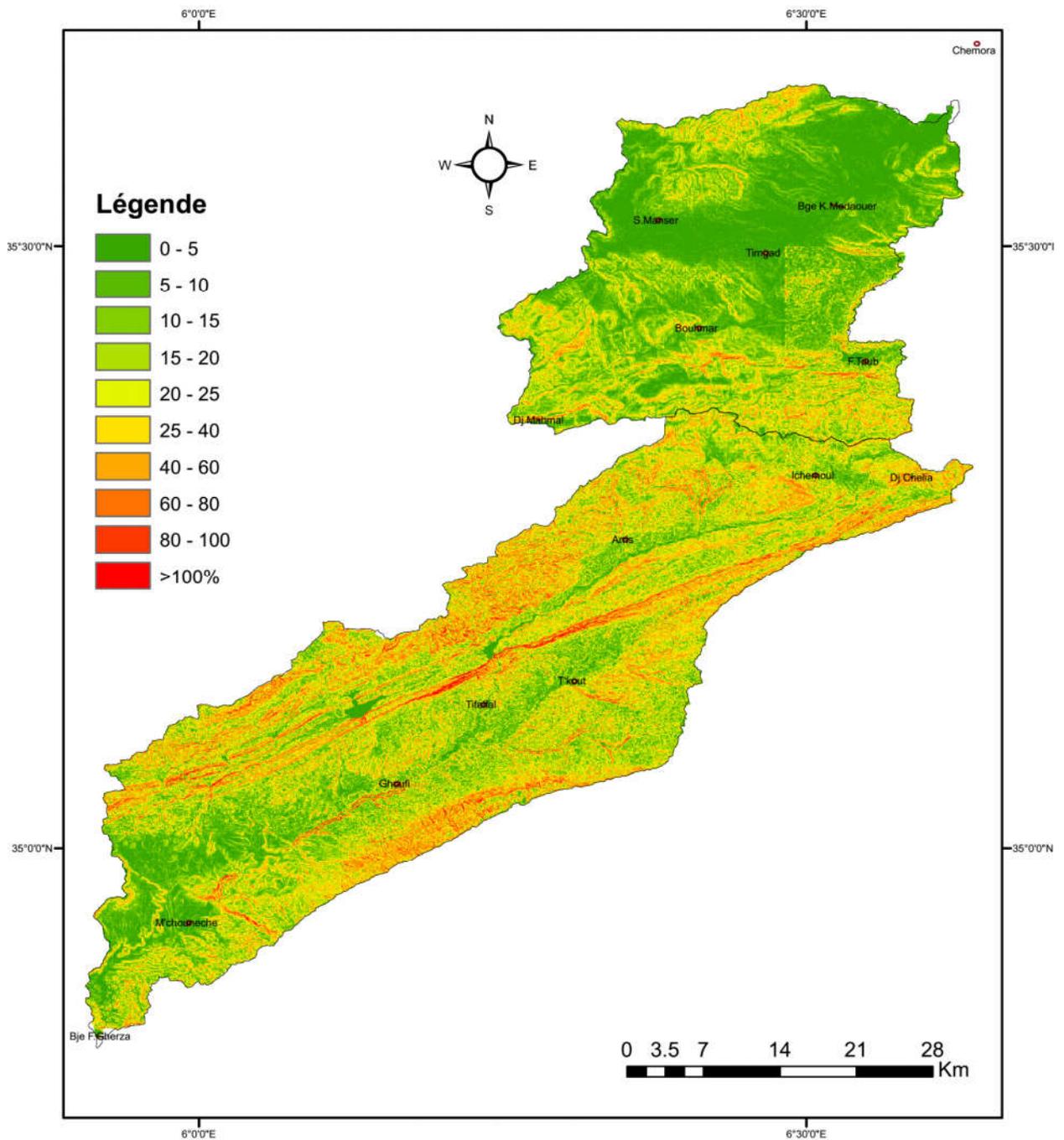


Figure III-4 : Carte des pentes des Bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora

III-2-4- Occupation du sol

La végétation joue un rôle essentiel dans la protection du sol, elle exerce une protection mécanique directe sur l'écoulement fluvial, en diminuant la force vive des eaux et en favorisant leur infiltration ; cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense (Université de Nice, 2008).

Elle donne de l'ombre, ce qui conserve l'humidité et l'activité biologique nécessaire à l'équilibre du sol, l'infiltration en profondeur est facilitée par les fissurations préparées au sein du sol les eaux qui ruissellent rencontrent des obstacles, qui les obligent à ralentir leurs vitesses ([Université de Nice, 2008](#)).

Enfin, les végétaux jouent un rôle mécanique très important dans les zones de forte déclivité, en atténuant la violence des crues, ils protègent le sol contre l'érosion, et limitent le transport solide.

III-2-4-1- Classification de la végétation

Plusieurs classifications plus ou moins complexes ont été proposées, mais la classification des types de couverture par ordre de densité de J, Tricart (1963 - 1968) est plus adaptée à montrer l'impact du couvert végétal sur les conditions d'écoulement à notre contexte.

Nous reprendrons les trois grandes catégories de type de couverture végétale distinguées :

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

B- Les surfaces incomplètement protégées : Ce sont les surfaces partiellement nues en permanence et les surfaces saisonnièrement protégées, dont les averses peuvent engendrer un ruissellement important qui peut déclencher des actions érosives et des crues inondantes.

Il s'agit généralement des terres de culture destinées soit pour la céréaliculture, qui occupe densément le sol pendant une période de l'année et de l'arboriculture qui laisse le sol nu en permanence entre les arbres. Ainsi la pratique de la jachère nue est dommageable puisque les terres sont laissées au repos une année sur deux sans aucune protection.

C- Les surfaces mal protégées ou nues : Elles englobent les terrains dénudés, les terrains de parcours taillis et broussailles à faible densité de recouvrement, où le ruissellement et l'érosion hydrique sont largement favorisées, surtout dans les terrains dénudés imperméables et sur les terrains de parcours fortement pâturés.

Le développement de la couverture végétale dépend de la combinaison des facteurs physico-géographiques tels que le climat, le relief, la lithologie et l'action humaine qui s'impose par la mise en culture des terres. Pour cela, il est nécessaire de connaître les différents types de végétaux et leur répartition dans les deux bassins en étude.

III-2-4-2- Bassin versant Oued Labiod

La répartition du couvert végétal au niveau du bassin versant de l'Oued Labiod est donnée par la carte d'occupation du sol de la figure III-5.

Les formations végétales protègent donc le sol, mais n'empêchent pas totalement l'érosion dite naturelle. Le paysage végétal du bassin de l'Oued El Abiod a été largement dégradé et défraîchi en montagne. L'effet dévastateur dû aux conséquences de la guerre d'indépendance est à signaler. Les belles forêts sont localisées sur le versant Nord entre 1600m et 2328 m composé de cèdre sur 1400ha environ. Le reste de la surface boisée se partage entre chêne vert pin d'Alep, plus particulièrement entre 1400m et 1000m, quant aux basses vallées elles opposent déjà leurs rubans de palmeraies aménagés en terrasses à la nudité du désert, le jardinage des oasis est associé à d'autres pratiques culturelles notamment, la céréaliculture dont l'irrigation est assurée par des dérivations de l'Oued et d'épandage de crues. On rencontre ce type d'exploitation dans les environs de Ghassira, Rhoufi et M'chouneche. En général d'après la carte de répartition de la végétation, la surface couverte est estimée à 42% de la superficie du bassin. Cette concentration est comprise entre Djebel Chelia et les gorges de Tighanimine, d'une part, et sur les montagnes d'Ahmer khadou, d'autre part. La zone semi-aride et aride, d'une superficie de 58%, résulte plus d'une intense dégradation de la végétation que des conditions lithologiques et climatiques. La classification des types de végétation par ordre de densité ou d'efficacité décroissante, a permis de distinguer les grandes catégories se trouvant dans le bassin.

La première catégorie couvre la partie du bassin bien protégée en permanence donc défavorable au ruissellement et à l'érosion hydrique, forêts denses entre Chelia et Tighanimine (cèdre, chêne vert et pin d'Alep); suivi d'une autre catégorie qui couvre la partie du bassin moyennement protégée par le couvert végétal où les averses tombent sur les parties du sol non protégées peuvent engendrer un ruissellement plus ou moins violent et exerçant une érosion plus ou moins importante de Tighanimine à Ghassira.

La dernière catégorie emporte la partie du bassin mal protégées ou totalement nues où le ruissellement et l'érosion hydrique sont largement favorisés de Ghassira jusqu'à El Habel.

L'absence du couvert végétal dans certaines zones a favorisé un ruissellement violent et donc l'érosion sera plus importante.

III-2-4-3- Bassin versant Oued Chemora

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 de la guerre d'indépendance et d'une dégradation anthropique qui a engendré l'apparition de terrains nus relativement importants.

Les surfaces occupées par des plantes pendant seulement une période de l'année (couverture végétale saisonnière) représentent la part majoritaire du bassin. Ce sont les cultures céréalières qui dominent largement, et ce d'autant plus que l'on va de Sud vers le Nord.

En résumé, la majorité des terres du sous bassin de Reboa est considérée comme mal protégée ou nue, car ces terres sont couvertes par de la steppe et de la broussaille. Ces formations végétales se trouvent dans un état de dégradation très avancé, par la suite d'une utilisation intensive de pâturage.

Cette situation se trouve dans le sous bassin de Morri où les surfaces mal protégées sont prédominantes, elles sont représentées par une couverture forestière très dégradée, qui est localisée sur les reliefs de Gliaa-ouchal, et par des terres nues qui occupent une proportion importante de la surface du sous bassin.

Dans le sous bassin de Soudhes, le couvert forestier occupe une partie plus ou moins importante (carte n°III-5). Il est localisé sur les reliefs de Dj.Asker et Dj.Ras er Rih où les précipitations sont abondantes et l'action anthropique est limitée, ce qui a permis à la conservation de ces forêts.

Les terres de culture représentent aussi une proportion importante. Elles s'étendent dans le Nord-Est du sous bassin, et il s'agit essentiellement de la céréaliculture avec jachère. Alors que les terrains dénudés représentent une part très faible des terres du sous bassin.

Enfin dans le bassin inférieur, les surfaces occupées par la végétation forestière sont très limitées, elles sont localisées sur le versant sud de Djebels Bou-Arif et sur les sommets de Djebels Tagratine, tandis que la végétation couvrant temporairement la terre, occupe la part majoritaire du bassin, il s'agit essentiellement de la céréaliculture, où les façons culturales qu'implique ce système agricole, s'ajoutent à la forte déclivité des versants sud de Djebels Bou-Arif, favorisent le ruissellement et accentuent des matériaux sous l'effet des averses intenses.

Au total, les formations végétales assurant une protection médiocre au sol, sont les plus représentées dans le bassin de l'Oued Chemora, dont le caractère dégradé et discontinu de cette

couverture présage d'un écoulement irrégulier et torrentiel et d'une érosion très développée dans la région, seul la couverture forestière du sous bassin de Soudhes dont l'extension est importante, peut avoir un impact positif sur le ruissellement.

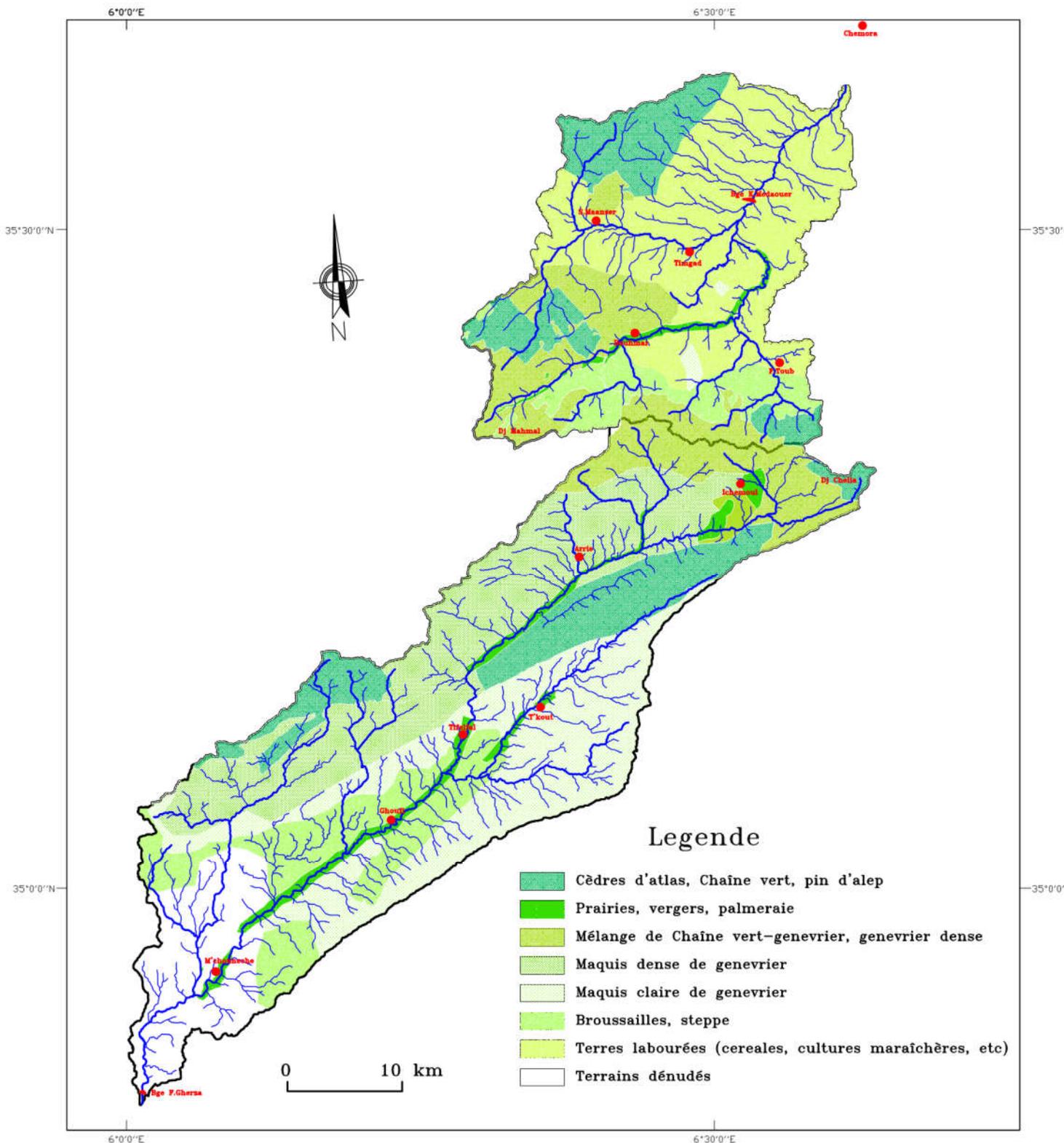


Figure III-5 : Carte d'occupation du sol des Bassins versants Oued Labiod et Oued Chemora

III-3- Caractéristiques morphométriques et réseau hydrographique des bassins versants

Les différents paramètres morphométriques d'un bassin notamment, la forme, les altitudes caractéristiques, la pente et le relief ainsi que le réseau hydrographique qui est l'ensemble des cours d'eau, par lequel s'écoulent toutes les eaux de ruissellement, interviennent souvent d'une façon combinée dans les modalités de l'écoulement, donc il est utile de les préciser dès le début dans toute étude hydrologique.

A- Présentation

1- Bassin Oued Labiod

L'Oued Labiod est situé dans le massif des Aurès (partie orientale de l'Atlas saharien). Il est composé de cinq principaux Oueds : Oued Labiod, Oued Ichmoul, Oued Bacha, Oued T'kout, Oued Isli et Oued Bou Sahbane formant par leur confluence Oued Labiod. L'ensemble de ces Oueds cheminent vers le Sud et se déversent dans Chott Melghir. L'Oued Labiod est formé par la réunion des torrents descendants des raides pentes de Chelia (2328m), Ichemoul (2100m), Bou Tlaghmine (2178m), El-hara (1972m), Taghda (1899 m) et Ich Aziza (1937 m).

Après avoir traversé le défilé resserré de Tighanimine, il s'encaisse dans les canyons de Ghoufi et les gorges étroites de M'chounèche, puis s'ouvre une voie vers la plaine Saharienne jusqu'aux gorges de Foum el Gherza.

Le bassin d'Oued Labiod totalise une surface de 1317 km² (au site du barrage Foum El-Gherza) et d'une exposition dominante Nord-Est (Dj Zellatou), Sud-ouest (Dj Taghenechirt) et dont la ligne de partage des eaux lui confère une forme allongée.

L'Oued Labiod prend sa source au Nord-Est de Djebels Chelia, coule vers l'Ouest, draine une surface de 23,60 km² avant de confluer avec l'Oued Ichmoul.

L'Oued Ichmoul (Medina) résulte de la jonction de trois affluents prend sa source au Nord de Djebels Ichemoul, coule vers le Sud, draine une surface de 43,83 km².

L'Oued Bacha prend forme à l'amont par la jonction des deux Oueds : Oued Afra issu des massifs montagneux Bou Tlaghmine et coule dans la direction Sud ; et Oued Meloudja avec une orientation Ouest, les deux s'accroissent pour former Oued Bacha qui coule dans la direction Sud-Ouest ensuite dans la direction Sud jusqu'à Oued Labiod. La surface totale du sous bassin est 86,33 km².

L'Oued Labiod résulte de la jonction des oueds cités auparavant coule dans la direction Ouest, reçoit sur sa rive droite les Oueds Ghrara, Chir et Milane ensuite dans la direction Sud vers les gorges de Tighanimine.

Cette partie du bassin (jusqu'aux gorges de Tighanimine) totalise une surface de 422,59 km². Après avoir traversé le défilé resserré de Tighanimine, il reçoit sur sa rive gauche oued T'kout, résulte de la jonction de deux oueds :

Oued Chennaoura qui prend sa source au Nord Est de Djebel El-Hara, draine une superficie de 131,38 km², coule dans la direction Sud-Ouest et Oued Tahemmamet issu des massifs montagneux Timedrit et coule dans la direction Ouest, draine une surface totale de 77,51 km².

Après la jonction de Oued T'kout et Oued Labiod au site Ghassira, Oued Labiod (qui prend le nom de Oued Ghassira dans cette partie) s'encaisse dans les canyons de Ghoufi, reçoit sur ses deux rives plusieurs affluents drainant des sous bassins de petites surfaces (dans l'ordre de 10 km² en maximum). A la fin canyons de Ghoufi, Oued Ghassira reçoit sur sa rive droite Oued Asli issu des monts de Taghda coule dans la direction Sud, draine un sous bassin d'une surface de 69,00 km². Après la station hydrométrique de M'chouneche, Oued Labiod reçoit sur sa rive droite Oued Sahbane issu des monts d'Ich Aziza (Djebel Lazrag) coule dans la direction Sud, draine un sous bassin d'une surface de 195,40 km². Ensuite Oued Labiod traverse les gorges étroites de M'Chounèche, puis s'ouvre une voie vers la plaine Saharienne jusqu'aux gorges de Foum el Gherza.

2- Bassin Chemora

L'Oued Chemora résulte de la jonction de deux affluents : Oued Reboa et Oued Soudhes, qui drainent respectivement une surface de 324,86 et 218,00 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 30km, dans les lacs salés de hautes plaines Constantinoises, il s'agit de Sebkhet Djendli, Garâet Ank Djemel, et Garâet et Tarf (cartes n°III-2). L'Oued Reboa prend forme à l'amont par la jonction des deux Oueds : Oued Taga issu des massifs montagneux des Aurès et coule dans la direction SW-NE draine une surface de 154,83 km²; L'Oued Sebaa Regroud résulte de la confluence des Oueds de Khanguet El-Akra et Foum Toub drainant un sous bassin d'une surface de 106,11 km². L'Oued Reboa traverse la vallée entre Draâ Charf et Gloua ouchal avec une orientation SW-NE, jusqu'à Draâ Ouled Makhoulf où il rencontre les roches gréseuses, et change brusquement de direction vers le Nord-Ouest pour

recevoir l'Oued Morri sur sa rive gauche (superficie de son bassin 21,75 km²), et reprend ensuite son orientation SW-NE pour confluer avec l'Oued Soudhes à environ 3km.

L'Oued Soudhes résulte aussi de la jonction de deux Oueds : Ait Fedhala (Berloudi) qui prend sa source au Nord-Ouest de Djebels Tagratine et qui draine un sous bassin d'une surface de 41,83 km², et Enza N'sdira qui prend naissance à partir de la confluence de l'Oued El-Kaine et l'Oued Bel-Achir qui se forment dans les massifs de Djebels Ras er-Rih drainant un sous bassin d'une surface de 82,38 km². L'Oued Soudhes coule à travers les plaines au Sud de Djebels Tagratine, avant de confluer avec l'Oued Reboa, il reçoit sur sa rive gauche l'Oued Guergour, en aval de la ville de Timgad.

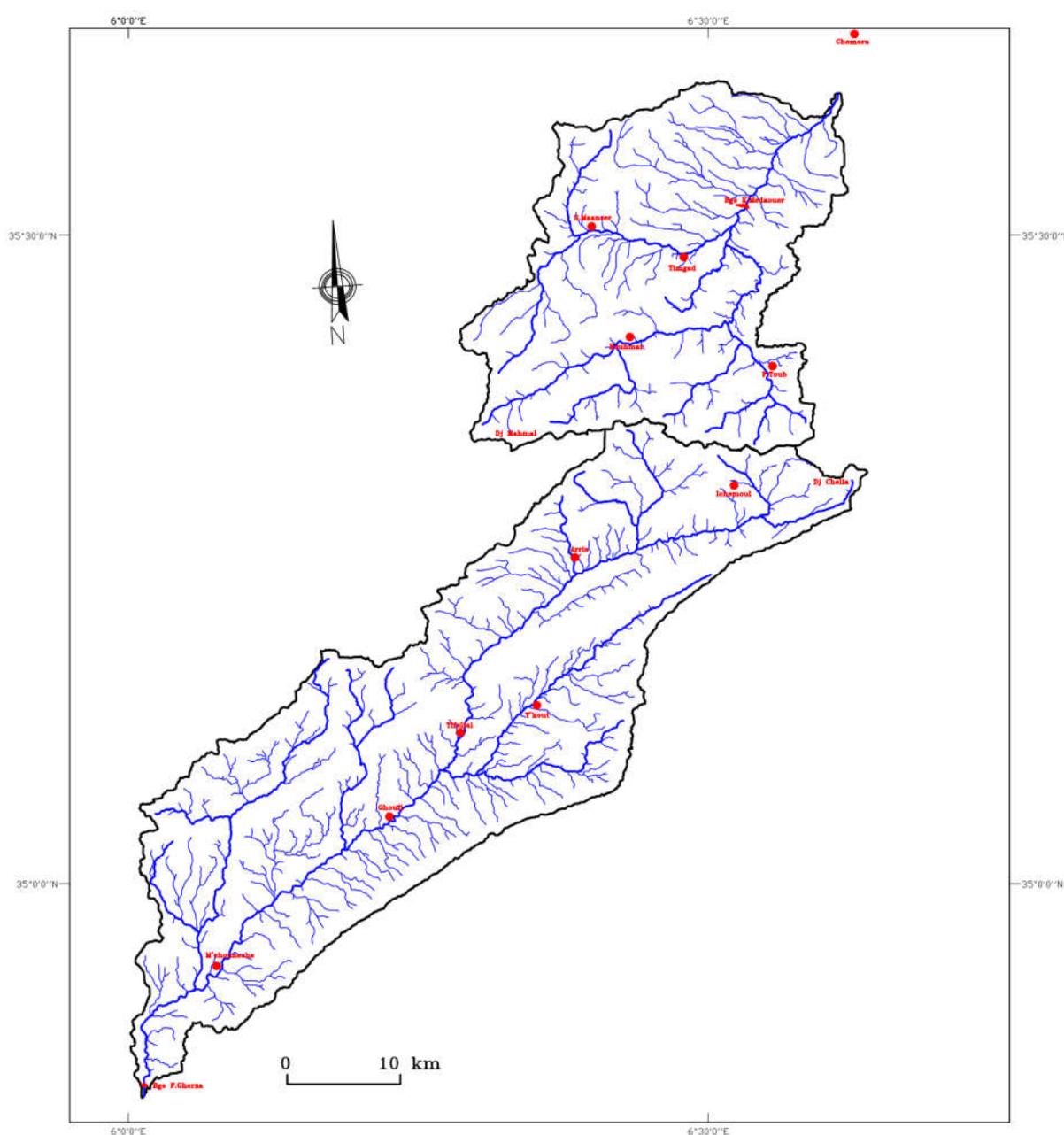


Figure III-6 : Carte des réseaux hydrographiques des Bassins versants

B- Profils en long

1- Bassin Oued Labiod

Le bassin versant est caractérisé par sa dissymétrie, une partie montagneuse au Nord culminant à plus de 2000 m (2328 m Dj Chelia) et une autre basse au Sud (203 m Foum El Gherza), ce qui génère des pentes longitudinales et transversales le long de son exposition. Quant aux pentes, on constate une série de ruptures qui s'expliquent par les variations lithologiques (résistance à l'érosion) d'une part et le degré de perméabilité des matériaux de l'autre part, d'autres ressauts le long de l'Oued beaucoup moins marqués, sont également liés à des seuils rocheux qui apparaissent d'une manière moins nette sur le profil en long.

On constate, une accentuation de pentes entre El Hamra et Ghassira qui engendrent également un encaissement rapide des vitesses d'écoulement, et met en évidence la puissance de l'érosion, d'où un encadrement du lit dans l'absence du champ d'inondation au niveau de la confluence d'Oued Labiod et Oued T'kout.

Il existe une nette relation entre le changement brusque des pentes et l'exposition Nord-Est / Sud-Ouest due à l'inadaptation du réseau hydrographique avec la structure. Ainsi au niveau d'Oued T'kout, on constate de très fortes pentes révélant ainsi le caractère torrentiel de cet affluent, les pentes élevées dans la partie amont, ne sont réalisées que sur de brefs secteurs et sont à l'origine des crues exceptionnelles. En revanche Oued Asli, présente un profil assez régulier, interrompu par quelques légères ruptures de pentes annonçant les cours d'eau des hautes plaines semi-arides.

Ainsi, la partie basse, présente une allure régulière traduisant l'amorce d'équilibre. On notera la présence de gros blocs dans le lit de l'Oued, due soit à un affleurement rocheux, soit à l'arrivée d'un affluent qui transporte des matériaux beaucoup plus gros que ceux transportés par l'Oued principal, ce qui traduit l'inexistence d'équilibre permanent.

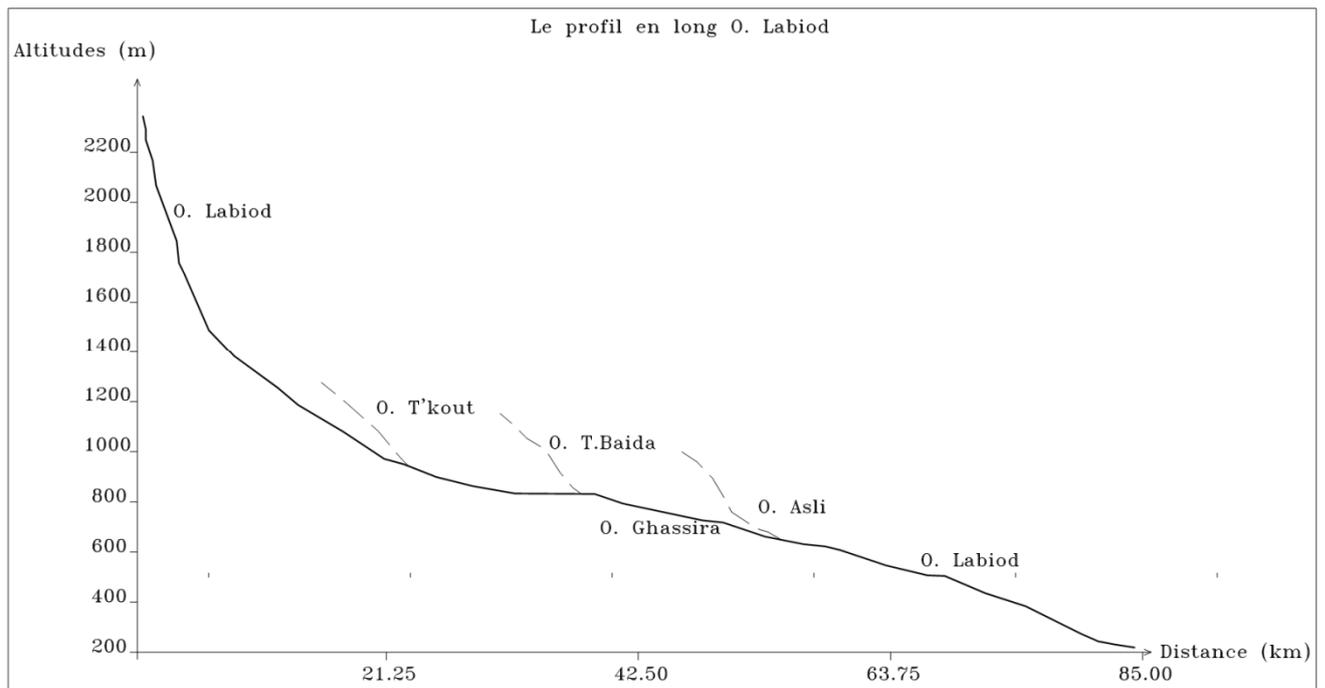


Figure III-7 : Profil en long du Oued Labiod

2- Bassin Chemora

Le profil en long de l'Oued Chemora et ses principaux affluents, permet d'apporter des éléments complémentaires à la densité de drainage, au vu de rôle déterminant des pentes des talwegs sur le ruissellement superficiels, et sur la vitesse d'écoulement lors des crues.

L'Oued Chemora présente généralement des pentes faibles et régulières, sur son cours principal (entre 0.4 et 1.7%), et des fortes pentes sur les affluents qui drainent les massifs montagneux (5 à 16%), mais avec des ruptures dues à des seuils rocheux, nettement marquée de l'Oued Taga (Kh. Bousberga) en amont de chef-lieu de Bouhmar, et celle de l'Oued Sebaa-Regroud à environ 3km avant sa confluence avec l'Oued Taga (figure n°III-3).

La forte déclivité des affluents qui drainent les flancs abrupts des massifs montagneux, accentuent les vitesses de propagation des crues, et favorisent l'érosion fluviale. Ce dernier a le rôle principal dans l'accumulation des matériaux déposés dans les vallées alluviales.

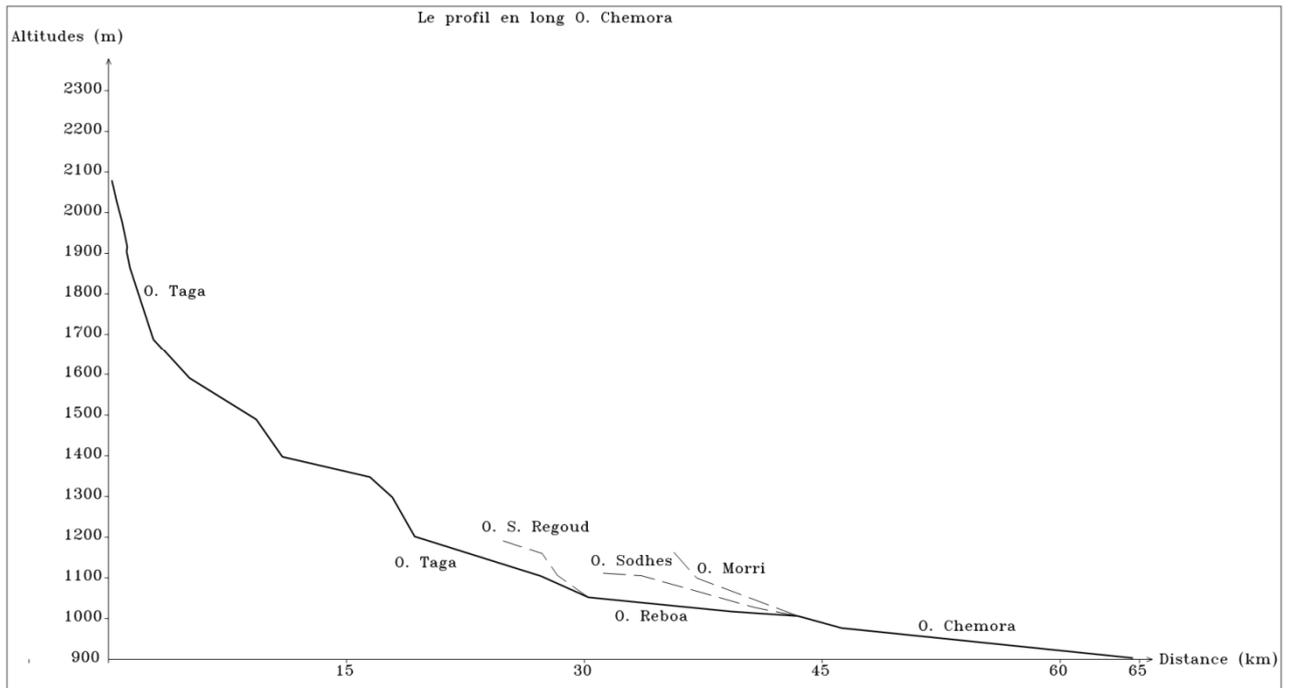


Figure III-8 : Profil en long d'Oued Chemora

C- Le temps de concentration :

Bien que, ce paramètre intervient pour l'étude des crues, le temps de concentration est largement utilisé comme paramètre hydrologique de grande importance, qui sert aussi à la comparaison des bassins différents.

Le temps de concentration dépend de la déclivité du bassin, la densité de drainage, et aussi l'étendue du bassin.

Il est déterminé par la formule de GIANDOTTI

1- Bassin Oued Labiod

Les deux sous bassin de Labiod (jusqu'au au gorges de Tighanimine) et T'kout, situés au Nord où l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief, présentent des temps de concentration différents : 8,57 et 6,54 heures. Le bassin versant de l'Oued Labiod de la station de M'chouneche et celui du barrage Foum El-Kharza, présentent un temps de concentration plus long : 11,47 et 12,83 heures.

2- Bassin Chemora

Les deux sous bassin de Reboa et Soudhes, situés au Sud où l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief, présentent des temps de concentration rapprochés : 7,28

heures pour Rbôe et 7,62 heures pour oued Soudhes; Le sous bassin de Morri situé aux piémonts des Aurès, présente un temps de concentration court (3,73 heures) en raison de leur faible extension.

Le bassin versant de l'Oued Chemora au site du barrage de K. Medaour et celui à la station de Chemora, présentent un temps de concentration et plus long : 11,04 et 12,83 heures, en raison de la prédominance de la plaine en allant vers le Nord avec l'augmentation de la surface du bassin de l'Oued Chemora qui emboîte les sous bassins décrits précédemment.

D- Récapitulatif

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

Le calcul numérique des caractéristiques topographiques et hydrographiques sert comme moyen de comparaison entre les sous bassins. Alors que l'approche cartographique reflète avec fidélité la réalité du terrain, mais la qualité de l'information reste toujours relative.

Nous pouvons conclure qu'il y a une dissymétrie dans la répartition altimétrique et hydrographique pour les deux bassins, qui entraîne des conséquences sur la stabilité du régime d'écoulement.

On distingue deux reliefs différents : Les secteurs montagneux qui présentent des caractéristiques morphométriques favorables à la genèse et à la propagation des crues ; Les secteurs de piémonts ont un degré moindre ; Alors que les secteurs de plaines sont le siège d'une accumulation des dépôts détritiques où les conditions d'écoulement sont défavorables au ruissellement (pentes faibles).

En résumé les différentes caractéristiques morphométriques et géométriques des deux bassins se résument dans les tableaux suivants :

Tableau III-3 : Les principales caractéristiques physiographiques du bassin O. Labiod.

Paramètre	Valeur	Unité
Surface du bassin versant (S)	1317,2	km ²
Périmètre du bassin versant (P)	870,2	km
Le plus long talweg (Lp)	81,0	km
Indice de compacité de Gravelius (KG)	1,56	-
Longueur du rectangle équivalent (L)	81,87	km
Largeur du rectangle équivalent (l)	16,05	km
Altitude maximale (H _{max})	2328	m
Altitude minimale (H _{min})	128	m
Altitude moyenne (H _{moy})	1170	m
Altitude à 95% de la superficie du bassin (H _{95%})	556	m
Altitude à 05% de la superficie du bassin (H _{05%})	2096	m
Indice de pente global (Ig)	18,98	m/km
Dénivelée spécifique (Ds)	666,25	m
Densité de drainage (Dd)	3,80	km/km ²

Tableau III-4 : Les principales caractéristiques physiographiques du bassin O. Chemora.

Paramètre	Valeur	Unité
Surface du bassin versant (S)	741,10	km ²
Périmètre du bassin versant (P)	1138,9	km
Le plus long talweg (Lp)	58,0	km
Indice de compacité de Gravelius (KG)	1,37	-
Longueur du rectangle équivalent (L)	51,79	km
Largeur du rectangle équivalent (l)	14,29	km
Altitude maximale (H _{max})	2321	m
Altitude minimale (H _{min})	890	m
Altitude moyenne (H _{moy})	1270	m
Altitude à 95% de la superficie du bassin (H _{95%})	960	m
Altitude à 05% de la superficie du bassin (H _{05%})	1730	m
Indice de pente global (Ig)	14,86	m/km
Dénivelée spécifique (Ds)	404,49	m
Densité de drainage (Dd)	2,46	km/km ²

III-4- Conclusion

En conclusion, les composantes naturelles des bassins d'Oued Labiod et de Chemora représentent des caractéristiques d'une zone semi-aride à aride favorable à une érosion accentuée : pentes raides dans le bassin oued Labiod et dans les partie Sud du bassin oued Chemora, couvert végétal dégradé dans la majorité des bassins, et des pluies plus au moins torrentielles et irrégulières. Ce qui engendre des pertes importantes de sols de l'amont vers l'aval.

La répartition lithologique du bassin versant d'oued Labiod montre des zones à érodibilité moyenne à faible au Nord, et d'autres secteurs à érodibilité forte au sud en raison de la lithologie favorable qui coïncide avec l'absence du couvert végétal, ce qui favorise un ruissellement violent et donc l'érosion sera plus importante.

Pour le bassin versant d'oued Chemora, la répartition lithologique montre des zones à érodibilité moyenne au Sud-Ouest, le reste des secteurs à érodibilité forte en raison de la lithologie favorable qui coïncide avec l'absence du couvert végétal, ce qui favorise l'érosion.

CHAPITRE IV : Les caractéristiques climatiques

L'étude des caractéristiques climatiques d'un bassin versant est nécessaire pour la connaissance du comportement hydrologique de ses cours d'eau.

En effet l'abondance, la durée et les variations des quantités de pluies qui tombent au cours des périodes de l'année pendant lesquelles les sols ne sont pas protégés par la végétation ont une incidence dramatique sur le milieu physique, et peuvent provoquer une action érosive.

Ce chapitre est consacré à l'analyse des facteurs climatiques des deux bassins versants et notamment les précipitations.

IV-1- Températures

Les données disponibles, montrent les caractéristiques du climat semi-aride (Medina et Boulhilet) et avec des valeurs minimales pendant les mois de Décembre, Janvier, Février, tandis que les valeurs maximales coïncident avec les mois de Juin, Juillet et Août où les précipitations sont rares, tandis que le climat aride (M'chouneche) montre des fluctuations assez nettes avec des valeurs maximales aux mois de Mai, juin, juillet, Août et Septembre et des minimales aux mois de Décembre, Janvier et Février (pendant l'hiver).

Tableau IV-1. Températures moyennes mensuelles interannuelles Medina, M'chouneche période (1971-1991) et Boulhilet période (1990-2005)

Station	Code	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Julil	Aou	Moy
Médina	061503	20.25	15	9.9	5.75	5.35	6.55	8.8	13.15	15.8	22.3	24.6	23.65	14.26
M'chouneche	061506	28.5	22.3	16.2	11.9	11.6	13.7	15.7	19.8	24.6	29.2	33.5	32.8	21.65
Boulhilet	070502	17.4	14.2	7.65	6.25	5.91	6.37	8.52	9.85	13.6	20.7	24.53	23.7	13.22

Source : D.S.A.

IV-2- L'humidité relative de l'air

L'humidité relative est l'un des paramètres principaux du cycle hydrologique. Sources de toutes les précipitations, elle conditionne l'évaporation. Vu le manque total de données concernant ce paramètre, nous avons eu recours à deux stations à climat différent (Batna et Biskra), pour mieux montrer l'écart d'humidité relative entre une zone semi-aride montagnaise et une autre aride saharienne. Ce qui traduit la réalité de notre aire d'étude. En effet, les deux bassins versants de l'oued Labiod et Chemora s'étalent sur des territoires montagneux à climat tantôt semi- aride ou subhumide à des territoires franchement aride vers l'exutoire pour l'oued El-Gherza et semi-aride inférieur pour l'Oued Chemora.

Tableau IV-2 : L'humidité relative

Station	Heure	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Batna (Hr)	7h	57	72	79	88	85	86	72	59	54	50	45	49
	13h	32	44	52	56	56	45	34	34	29	22	22	23
	18h	45	59	68	71	70	60	52	45	44	41	33	34
Biskra (Hr)	7h	50	64	69	62	62	58	47	47	42	36	38	57
	13h	34	45	49	52	44	40	32	32	27	27	25	39
	18h	35	54	60	58	54	48	37	37	32	26	30	47

La variation à caractère climatique se représente forcément sur la valeur de l'humidité relative et son articulation dans l'espace.

IV-3- Régime des vents

Du fait de l'absence totale des appareils anémométriques dans les deux bassins versants, le tableau suivant donne les caractéristiques générales faites par Seltzer (1913-1938) indiquant la vitesse, la direction et la période de passage.

Tableau IV-3 : Le régime des vents

Mois	Direction	Vitesse (m/s)	Fréquence (jour)
Septembre	N	3.9	8.1
Octobre	NO	4.4	11.1
Novembre	NO	4.1	9.7
Décembre	NE	4.5	11.6
Janvier	NE	4.5	13.7
Février	NE	5.2	13.7
Mars	NE	4.6	12.2
Avril	E	4.4	11
Mai	SE	4.2	9.6
Juin	SE	4.0	8.1
Juillet	SO	4.0	9.0
Aout	SO	4.2	10.3
Moyenne annuelle		4.3	10.7

Source : B.N.E.F

IV-4- La neige

En ce qui concerne la neige, les statistiques disponibles se limitent au nombre annuel de jours de chutes de neige, et la durée de l'enneigement au sol, et le nombre mensuel de jours où il y a neigé.

D'une manière générale, la durée de l'enneigement reste faible à l'échelle des bassins (8 jours à Batna, 15 jours à Arris, 16 jours à Foum Toub et 02 jours à T'kout), elle peut être considérable sur les hauts sommets des massifs des Aurès (au-dessus de 1600 m d'altitude) où l'influence directe du relief et les faibles températures hivernales Seltzer (1913-1938).

IV-5- L'évaporation

Comme nos bassins versants s'étalent sur trois zones climatiques, nous avons utilisé les données mis à notre disposition par la B.N.E.F et l'A.N.B.T.

Tableau IV-4 : L'évaporation

Station	Altitude (m)	Evaporation (mm)
Batna	1044	1890
Biskra	124	2590
Bouhmama	1200	2200

IV-6- Les précipitations

Il s'agit de l'intensité, du volume, de la fréquence des pluies et de leur répartition au cours de l'année. Ces caractères conditionnent notamment l'importance du couvert végétal qui s'oppose au ruissellement en absorbant l'eau. L'eau ruisselle lorsque la vitesse d'arrivée de l'eau sur le sol est supérieure à la vitesse d'infiltration. Le volume d'eau en excès à la surface dépend de l'intensité (hauteur d'eau par rapport à une durée) de la pluie et du volume total précipité.

IV-6-1- Le réseau pluviométrique et les séries d'observation

La pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs Seltzer (1913-1938) Gausson et Paquin (1913-1963). La plus part des stations connues des périodes d'arrêt pendant la guerre d'Algérie d'autres ont subi des modifications après 1962 ([Annuaire pluviométrique de l'Algérie, 1973](#)).

Un bon nombre de stations ont été installées dans les années (1968- 1970), les années de ces stations sont très utiles pour l'établissement des séries hydro- pluviométriques. Le grand bassin versant BV6 (Chott Melghir) équipé de 34 stations pluviométriques, dont 05 stations se situent dans le bassin Oued Labiod (une station se situe juste en aval du barrage Fom El-Guerza), ces stations sont réparties de manière relativement homogène.

22 dans le bassin versant BV7 (Hauts plateaux constantinois) dont 07 appartenant au bassin de Chemora, ces stations sont réparties de manière relativement homogène, plus particulièrement dans le bassin supérieur à caractère montagnard et le plus arrosé (carte n° III-3). Une autre station pluviométrique (Boulhilet) se situé juste en aval du bassin.

Les coordonnées des stations pluviométriques utilisées dans cette étude et leurs codes sont présentées ci-dessous.

Tableau IV-5 : Coordonnées et codes des stations pluviométriques ([Annuaire pluviométrique de l'Algérie, 1973](#))

Nom de la station	Code	Coordonnées		Altitude
		X	Y	
Barrage	061601	766.110	3.860.700	200
M'chouneche	061506	775.040	3.871.610	390
Tifelfel	061511	793.620	3.890.500	740
Tkout	061505	800.880	3.894.240	998
Médina	061503	819.880	3.914.390	1450
Ain Tine	070405	812.170	3.920.520	1650
Foum Toub	070406	822.100	3.923.950	1160
Baiou	070407	802.250	3.925.510	1490
Bouhmar	070408	810.020	3.926.410	1220
Timgad	070409	814.940	3.932.260	1000
Reboe	070403	821.310	3.933.190	1002
Sidi Manser	070410	806.600	3.936.170	1112
Boulhilet	070502	831.760	3.960.000	859

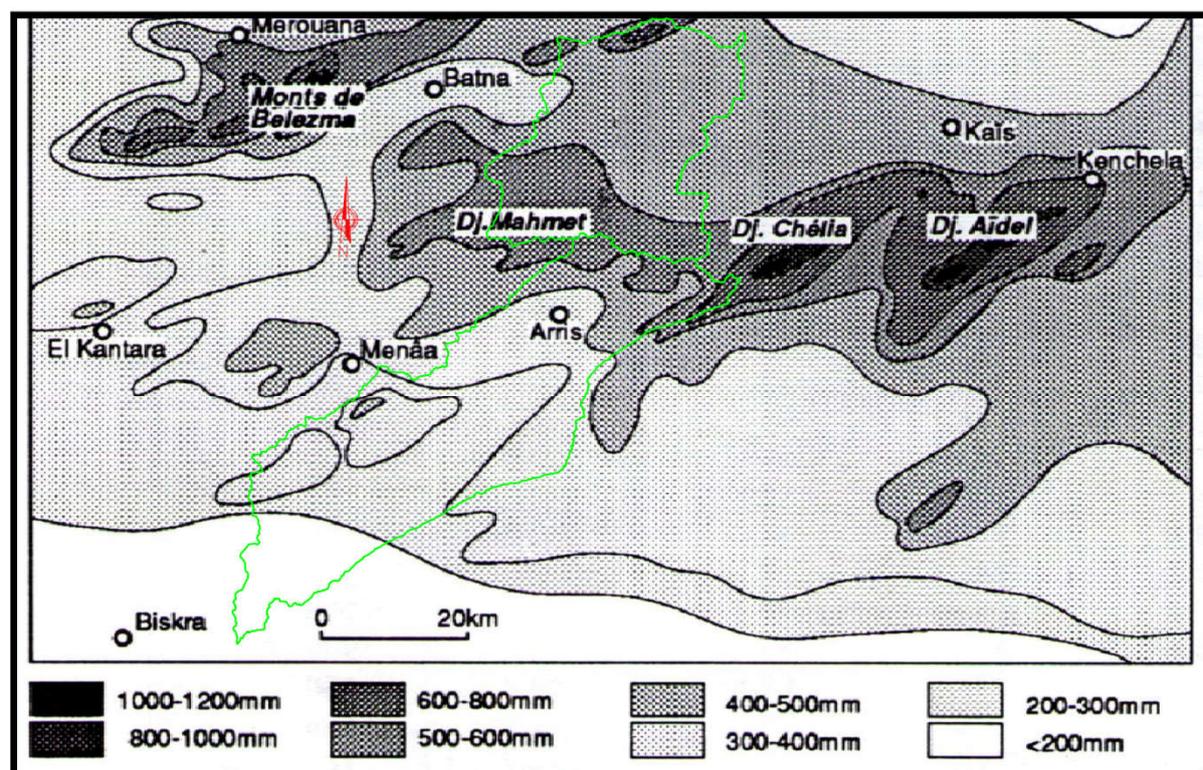
IV-6-2- Les précipitations annuelles et leur variabilité

Les précipitations constituent le facteur essentiel intervenant par leur répartition annuelle et mensuelle, leurs totaux journaliers, et surtout les averses génératrices des crues. Ces différents aspects des précipitations plus ou moins modifiés par l'effet combiné des autres paramètres physiques (altitude et exposition), et climatiques (températures et évapotranspiration surtout), permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique des bassins ([Guidoum, 2004](#)).

Par rapport à ses environs immédiats et à sa situation méridionale, le massif de l'Aurès est bien arrosé puisque certains sommets enregistrent plus de 1000 mm/an. C'est le cas du Djebel Chélia et du Djebel Aidel qui arrivent à 1200 mm/an ([Chaumont et Paquin, 1971](#)).

TABLEAU IV-6 : Répartition saisonnière des pluies dans le massif de l'Aurès (période 1913-1938).

Station		Hiver	Printemps	Eté	Automne	Total
El Kantara	en mm	82	58	25	76	241
	en %	34	24	10	31	100
Ain Touta	en mm	91	67	76	35	269
	en %	24,9	28,2	13	33,8	100
Sgag	en mm	141	163	135	42	481
	en %	33,9	28	87	29,3	100
Arris	en mm	106	195	99	45	345
	en %	27,5	28,6	13	30,9	100
Foum Toub	en mm	124	126	99	45	468
	en %	27	35,6	13	30,9	100
Batna	en mm	86	100	110	50	346
	en %	28,9	33,2	14,4	24,8	100
Menâa	en mm	67	74	28	101	272
	en %	27,5	26,8	10,3	35,3	100
Dj. Mahmel	en mm	333	272	84	287	976
	en %	34,1	27,8	08,6	29,4	100
Khenchela	en mm	131	146	181	71	529
	en %	27,6	34,2	13,4	24,7	100
Foum	en mm	108	113	158	71	446
	en %	25,1	35,1	15,7	24	100
El Gueiss	en mm	108	113	158	71	446
	en %	25,1	35,1	15,7	24	100
Moyenne	en %	29	30	11,8	29	100

Figure IV-1 : Les précipitations moyennes dans le massif de l'Aurès (1913-1963). *Source : Carte pluviométrique de l'Algérie par Chaumont et Paquin, 1971.*

Les bassins en étude appartenant aux massif des Aurès connaît une diversité de climats importante puisqu'on constate que le total des précipitations d'une station à l'autre varie considérablement et ce sur une distance très courte. Dans ce cas, nous citons les exemples :

Station REBOE avec 275 mm/an par rapport du Dj. Mahmel avec 500 mm/an (976 mm/an sur carte Siltzer) qui ne se trouve pourtant qu'à 24 km à vol d'oiseau.

Station TIMGAD avec 282 mm/an par rapport du Dj. Mahmel avec 500 mm/an (976 mm/an sur carte Seltzer (1946) qui ne se trouve pourtant qu'à 23 km à vol d'oiseau.

Station TIFELFAL avec 195 mm/an par rapport du Dj. Chelia avec 600 mm/an (1200 mm/an sur carte Seltzer (1946)) qui ne se trouve pourtant qu'à 46 km à vol d'oiseau.

Station TKOUT avec 238 mm/an par rapport du Dj. Chelia avec 600 mm/an (1200 mm/an sur carte Seltzer (1946)) qui ne se trouve pourtant qu'à 37 km à vol d'oiseau.

En fait la répartition spatiale des pluies obéit à deux paramètres :

- à la répartition hypsométrique : les secteurs les plus arrosés sont les plus élevés.
- à la disposition du relief Nord-Est / Sud-Ouest donc perpendiculaire au flux perturbé du Nord-Ouest. Suivant ces deux paramètres, l'étude des zones bioclimatiques de l'Est Algérien faites par Cote (1998) fait ressortir trois secteurs de pluviosité biens distincts dans la région :

- Un secteur sub-humide,

- Un secteur moyennement arrosé,

- Un secteur sec.

A- Le secteur sub-humide

Celui-ci correspond aux montagnes et aux sommets dépassant 1800 m d'altitude. Nous citons le Mahmel, l'Ichmoul, le Chélia. Autrement dit un secteur de direction Est-Ouest et se situant au Nord du bassin Oued Labiod et au Sud du bassin Oued Chemora. Il reçoit des précipitations oscillant entre 900 et 1200 mm/an (carte Seltzer). Ceci est partiellement en contradiction avec la carte conçue par l'ANRH qui n'admet, dans ce secteur qu'une pluviosité de 400 à 600 mm/an.

B- Le secteur aux précipitations moyennes

Celui-ci correspond aux piedmonts Nord et Sud de la chaîne El Mahmel, l'Ichmoul et Chélia. Dans ce secteur, les précipitations moyennes oscillent entre 350 et 400 mm/an.

C- Le Secteur sec

Pour celui-ci, les précipitations moyennes oscillent entre 140 et 350 mm/an et se répartissent aussi bien au Sud du bassin Oued Labiod (des précipitations moyennes annuelles de 140 mm/an au site du barrage F. El-Gherza) qu'au Nord du bassin Oued Chemora (des précipitations moyennes annuelles de 236 mm/an à Boulhilet).

Nous relevons trois saisons pluvieuses sensiblement égales (hiver 29,05 %, printemps 30,05 % et automne 29 % et une saison sèche où il ne pleut que 11,8 % du total annuel).

Cette analyse semble s'opposer à beaucoup d'études qui déterminent deux cycles pour le massif de l'Aurès, l'un pluvieux et l'autre non pluvieux (Ansar, 1988).

Enfin, la répartition spatiale des précipitations ne change pas au cours de l'année. Autrement dit elles sont proportionnelles qu'elles soient au mois de mars (saison pluvieuse) ou au mois de Juillet (saison sèche) la grande concentration des pluies reste dans la partie Nord du bassin versant Oued Labiod et Sud du bassin Chemora avec l'augmentation du total vers les sommets et l'Est. L'autre originalité du massif de l'Aurès, est qu'une partie des précipitations tombe sous forme neigeuse, due essentiellement au froid hivernal. La durée annuelle d'enneigement croit très vite en altitude : 20 jours à 1300 m, 64 jours à 3 mois au sommet du Mahmel et du Chélia (Ballais, 1981).

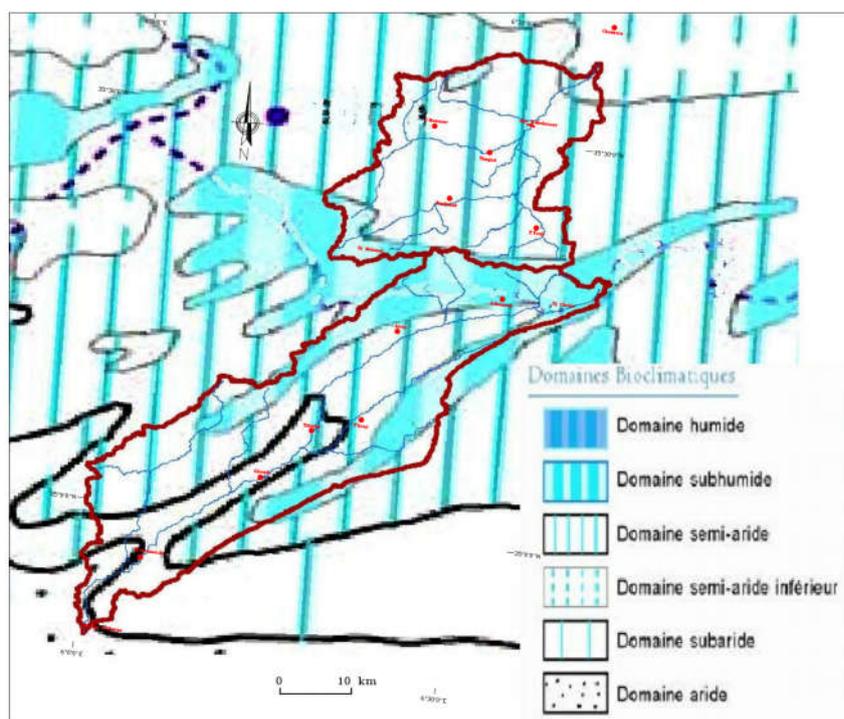


Figure IV-2 : Carte bioclimatique (extraite de la carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est Algérien Cote, 1998a)

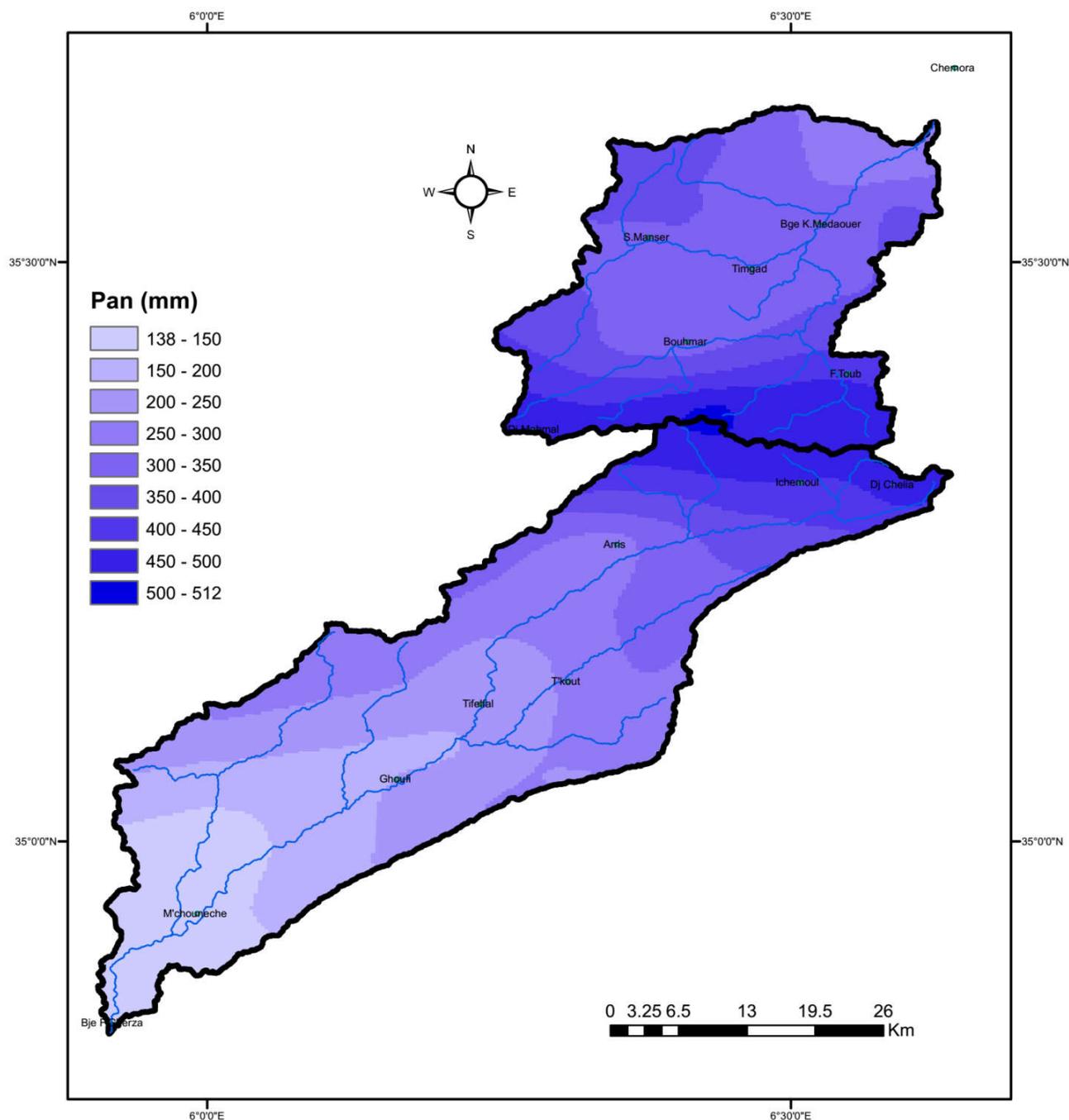


Figure IV-3 : Carte des précipitations annuelles moyennes (*extraite de la carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est Algérien établie par A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989*)

IV-6-3- Les pluies journalières maximales

L'analyse des précipitations journalières maximales et même des hauteurs de pluie horaire, présente un intérêt particulier pour les études d'érosion et du transport solide.

Pour voir l'influence des pluies extrêmes sur le régime des écoulements, nous nous basons sur des données d'observation disponible pour onze (11) stations et pour des périodes variant de 13 à 51 ans, ainsi que sur les données d'étude faite par Body (1981).

Les données qui nous ont été fournies sont celles des stations de Médina, Tifelfel et F.Gherza, Rebôe, Bouhmar, Timgad, Sidi Maancer, Ain Tin, Fou Toub, Tniet El-Abed et Batna, nous avons procédé à l'étude statistique de ces données et choisi la loi de distribution qui leurs convient le mieux (voir ci-contre).

TABLEAU IV-7 : Pluies maximales journalières des différentes stations

Station	Tifelfel	T-El-Abed	Medina	BGE	Reboe	Bouhmar	Timgad	S-Mancer	Batna	Foum Toub	Ain Tin
P_{jmax}	27.01	37.75	48.05	29.71	27.93	39.45	32.88	37.96	33.75	46.18	48.75

Il s'avère que la hauteur d'eau journalière maximale, décroît d'une manière générale, en allant du secteur montagneux vers les plaines, à titre de Comparaison, Ain Tin qui totalise en moyenne annuelle et pour la même période de référence 469 mm, à reçu une lame d'eau journalière maximale moyenne de 48,75 mm et Medina qui totalise en moyenne annuelle et pour la même période de référence 431,3 mm, à reçu une lame d'eau journalière maximale moyenne de 48,08 mm; Alors que Timgad dont le total annuel s'élève à 292 mm n'a reçu qu'une hauteur maximale moyenne de 32,88 mm; donc ces hauteurs maximales recueillies en 24 heures sont d'autant plus élevés que le module mensuel et plus fort.

Concernant la variabilité temporelle de pluies maximales journalières, on relève que la hauteur la plus fort coïncide avec les mois les plus pluvieux de l'année, septembre, octobre, ou mars, avril, mai, pour la série.

Ces pluies exceptionnelles alimentent largement les crues et les transports solides des Oueds, notamment dans les terrains fortement dénudé qui occupent une partie importante des bassins, elles jouent donc un grand rôle dans l'érosion hydrique dans la région d'étude.

IV-6-4-Estimation des pluies journalières maximales et leur fréquence

Afin de faire ressortir cette irrégularité de pluie extrême, une étude fréquentielle nous permet de caractériser et d'estimer les précipitations exceptionnelles, pour les différentes durées de récurrence.

La loi qui s'ajuste mieux aux valeurs extrêmes, est celle de GUMBEL

Les quantiles estimés pour les onze stations, et pour les probabilités de retour retenues, sont présentés dans le tableau n IV-8.

TABLEAU IV-8 : Pluies maximales journalières fréquentielles des différentes stations

Période de retour (ans)	2	5	10	50	100	1000	
Fréquence	0.5	0.8	0.9	0.98	0.99	0.999	
Variable de GUEMBEL	0.367	1.500	2.250	3.902	4.600	6.907	
$P_{j \max \%}$	Tifelfel	26.5662	45.1163	57.39808	84.42832	95.8555	133.6145
	T-El-Abed	35.30045	48.50489	57.24738	76.48821	84.62237	111.5002
	Medina	43.72002	67.03603	82.47325	116.4481	130.8112	178.2712
	BGE	25.78589	46.89418	60.86971	91.62762	104.6307	147.5969
	Rebôe	25.83661	37.10138	44.55965	60.9741	67.91339	90.843
	Bouhmar	36.15257	53.90851	65.66449	91.53753	102.4755	138.6179
	Timgad	30.39786	43.76945	52.6226	72.10698	80.34411	107.5621
	S-Mancer	35.37502	49.29785	58.51598	78.80361	87.38032	115.7204
	Batna	32.02552	41.28581	47.41693	60.91054	66.61504	85.46448
	Foum Toub	44.71645	52.62218	57.85647	69.37629	74.24635	90.33857
	Ain Tin	45.44148	63.23643	75.01823	100.9481	111.9101	148.1319

IV-7- Combinaison des facteurs thermique et pluviométrique : les zones bioclimatiques

La combinaison des précipitations et des températures caractérise le rythme climatique à dominance « Aride à Semi-Aride » régnant à travers les deux bassins : la saison froide et humide s'oppose à la saison chaude et sèche.

La carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien établie d'après Cote M., 1998a définit les limites entre les cinq grands types de bioclimats méditerranéens : humide (pluviométrie annuelle P supérieure à 900 mm, forte humidité de l'air), subhumide ($P > 600$ mm environ), semi-aride ($300-350 < P < 550-600$ mm, net déficit hydrique), subaride ($P < 350$ mm, nombre de mois secs $>$ nombre mois humides) et aride ($P < 150$ mm, 12 mois biologiquement secs).

Sur cette carte notre zone d'étude se répartit sur quatre zones bioclimatiques, allant de la zone Sub-humide aux sommets des Aurès, passant par deux zones semi-arides situant au Nord et au Sud de ces sommets jusqu'à la zone aride située au Sud du bassin Oued Labiod.

IV-8- L'évapotranspiration potentielle (E.T.P.)

La cartographie des E.T.P. de l'Algérie (A.N.R.H., 2002) est un outil supplémentaire qui permet d'éviter de faire recours à des calculs par le biais de formules empiriques. Elle offre l'avantage de connaître, en tout point de l'espace, les valeurs mensuelles et annuelles moyennes de l'évapotranspiration potentielle.

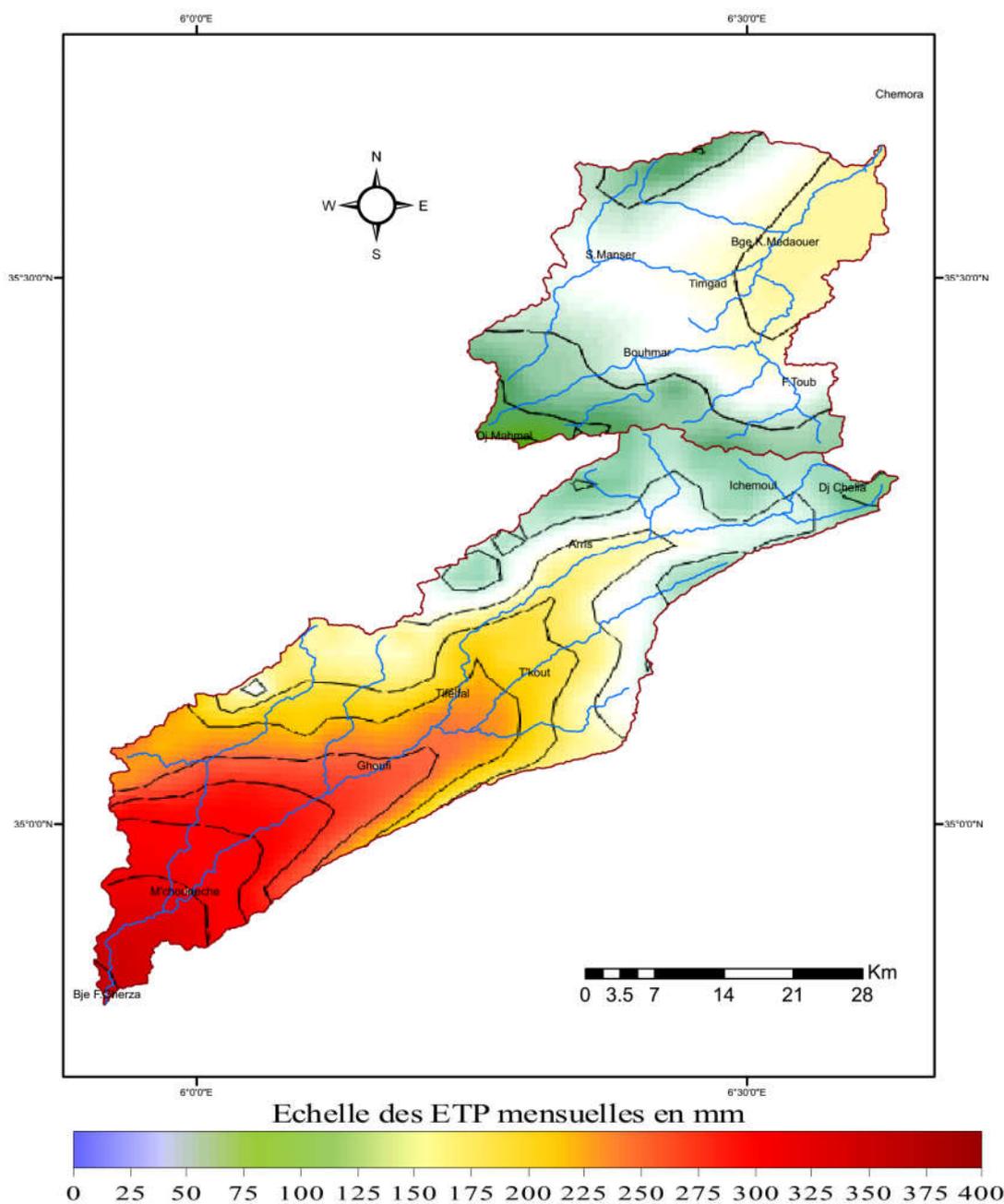


Figure IV-5 : Carte d'E.T.P. annuelles moyennes (extraite de la carte d'E.T.P. annuelles moyennes de l'Algérie établie d'après A.N.R.H., 2002).

IV-9- Conclusion

Les caractéristiques climatiques des bassins versants sont étroitement liées à sa position géographique et son relief ; on relève de fortes variabilités spatiales et surtout temporelles des précipitations sous forme d'averses, des températures et l'influence élevée de l'évapotranspiration. La combinaison des conditions physico-géographiques et climatiques est déterminante dans le comportement hydrologique des diverses unités des bassins.

CHAPITRE V : Etude des écoulements superficiels

V-1- Introduction

Le comportement hydrologique d'un cours d'eau dépend essentiellement des facteurs climatiques et physico-géographiques analysés dans les chapitres précédents.

L'évaluation des ressources en eau et de leur variabilité passe par la prise en compte des :

- Débits moyens annuels et bilans hydrologiques.
- Régimes fluviaux et variations saisonnières des débits.
- Débits moyens journaliers.
- Intensités des débits extrêmes des crues et des étiages ainsi que leur fréquence.

V-2- Etude des apports liquides

V-2-1- Estimation des apports liquides moyens interannuels en utilisant les mesures existantes :

Cette étude sera basée sur les données hydrométriques acquises aux stations de M'chouneche et de Chemora. La station de M'chouneche est située à l'exutoire du bassin versant oued Labiod, et dispose d'une série d'observations de 41 ans (1969 - 2009).

Pour le bassin de l'Oued Chemora, on dispose de quatre (4) stations hydrométriques : Reboa, Timgad, Morri, et Chemora, qui contrôlent les sous bassins des mêmes noms (carte n°III-3).

La station hydrométrique de Chemora représentative du bassin versant Oued Chemora dispose d'une série de 25 ans (1971 - 1995).

V-2-2- Estimation des lames d'eau écoulées :

Elles sont déterminées comme suit :

$$A = Q \cdot N.$$

A : apport annuel (hm³).

Q : débit moyen annuel (m³/s).

N : nombre de seconde dans l'année (31536000s).

$$\text{D'où : } Le = A / S \cdot 10^3$$

Le : lame d'eau écoulée (mm).

A : apport annuel (hm³).

S : surface du bassin versant (km²).

L'apport moyen interannuel est estimé à 20,059 hm³ avec une lame d'eau écoulée de 19,046 mm pour le bassin Oued Labiod et de 23,675 hm³ avec une lame d'eau écoulée de 31,950 mm pour le bassin de Chemora.

Tableau V-1 : Variation interannuelle des débits, les apports et les lames d'eau écoulées de la station de M'chouneche.

Années	Débit (m ³ /s)	Apports (hm ³)	Lames écoulées (mm)	Années	Débit (m ³ /s)	Apports (hm ³)	Lames écoulées (mm)
68 – 69	0.400	12.614	12.002	89 – 90	0.629	19.836	18.873
69 – 70	1.808	57.017	54.250	90 – 91	0.175	5.503	5.236
70 – 71	0.117	3.690	3.511	91 – 92	0.113	3.548	3.376
71 – 72	0.569	17.944	17.073	92 – 93	0.137	4.305	4.096
72 – 73	1.031	32.514	30.936	93 – 94	0.978	30.842	29.345
73 – 74	0.280	8.830	8.402	94 – 95	0.670	21.129	20.104
74 – 75	0.420	13.245	12.602	95 – 96	1.350	42.574	40.508
75 – 76	0.570	17.976	17.104	96 – 97	0.190	5.992	5.701
76 – 77	1.250	39.420	37.507	97 – 98	0.690	21.760	20.704
77 – 78	0.250	7.884	7.501	98 – 99	0.190	5.992	5.701
78 – 79	0.230	7.253	6.901	99 – 00	0.440	13.876	13.203
79 – 80	0.690	21.760	20.704	00 – 01	0.250	7.884	7.501
80 – 81	0.574	18.102	17.224	01 – 02	0.510	16.083	15.303
81 – 82	0.150	4.730	4.500	02 – 03	0.760	23.967	22.804
82 – 83	0.270	8.515	8.102	03 – 04	2.960	93.347	88.817
83 – 84	0.080	2.523	2.401	04 – 05	1.290	40.681	38.707
84 – 85	0.080	2.523	2.401	05 – 06	1.040	32.797	31.206
85 – 86	0.290	9.145	8.701	06 – 07	0.350	11.038	10.502
86 – 87	0.348	10.962	10.430	07 – 08	0.330	10.407	9.902
87 – 88	0.112	3.529	3.358	08 – 09	3.230	101.861	96.918
88 – 89	0.280	8.827	8.399	Moyenne	0.636	20.059	19.086

Tableau V-2 : Variation interannuelle des débits, les apports et les lames d'eau écoulées de la station de Chemora.

Années	Débit (m ³ /s)	Apports (hm ³)	Lames écoulées (mm)	Années	Débit (m ³ /s)	Apports (hm ³)	Lames écoulées (mm)
1970-1971	1.725	54.410	73.428	1984-1985	0.452	14.250	19.231
1971-1972	2.739	86.380	116.572	1985-1986	0.400	12.630	17.045
1972-1973	0.771	24.330	32.834	1986-1987	0.084	2.640	3.563
1973-1974	0.459	14.460	19.514	1987-1988	0.302	9.520	12.848
1974-1975	1.760	55.490	74.885	1988-1989	1.259	39.710	53.590
1975-1976	0.925	29.170	39.366	1989-1990	0.909	28.660	38.677
1976-1977	0.170	5.350	7.220	1990-1991	1.120	35.320	47.665
1977-1978	0.195	6.150	8.300	1991-1992	0.370	11.670	15.749
1978-1979	0.324	10.230	13.806	1992-1993	0.113	3.570	4.818
1979-1980	0.433	13.650	18.421	1993-1994	0.417	13.140	17.733
1980-1981	0.580	18.300	24.696	1994-1995	2.303	72.640	98.030
1981-1982	0.943	29.740	40.135	1995-1996	0.087	2.750	3.711
1982-1983	0.371	11.690	15.776	Moyenne	0.751	23.675	31.950
1983-1984	0.308	9.710	13.104				

V-3- Etude des débits extrêmes

La prédétermination des débits extrêmes d'un cours d'eau est d'intérêt important, du fait la quasi-totalité des apports solides annuels est due aux quelques plus fortes crues de l'année.

Deux séries d'observations sont disponibles au niveau des services de l'A.N.B.T. La première série date de 1938 à 1951 et la deuxième série date de 1975 à 2006. Les relevés des débits extrêmes sur 30ans (1977/2006), montrent des débits parfois très importants du 222 m³/s jusqu'à 3400 m³/s pour Oued Labiod et de 221 m³/s jusqu'à 240m³/s pour l'Oued Chemora. La crue d'Oued Labiod du 03/04 Mai 2006 d'un débit max de 3400³ m/s a causé beaucoup de dégâts, elle a ravagé de vastes terrains agricoles. Les tableaux V-3 et V-4 représentent les crues extrêmes ($Q_{\max} > 200 \text{ m}^3/\text{s}$) observées aux stations de M'chounèche et de Chemora durant la période (1977/2006) :

Tableau V-3 : Crues enregistrées durant la période (1977/2006) - Oued Labiod ($Q_{\max} > 200$ m³/s)

Année	Date de la crue	Q max (m ³ /s)
1978	28.08.1978	237
1979	03.09.1979	283
1981	25.06.1981	297
1982	11.09.1982	305
1982	03.11.1982	222
1984	29.08.1984	247
2001	30.09.2001	426
2004	29/30.03.2004	1080
2004	15/16/.042004	510
2006	03/04.05.2006	3437

Tableau V-4 : Crues enregistrées durant la période (1977/2006) - d'Oued Chemora ($Q_{\max} > 200$ m³/s)

Année	Date de la crue	Q max (m ³ /s)
1981	02.06.1982	221
1989	27.05.1989	240
1997	20.09.1997	231

Les crues sont distinguées suivant deux périodes :

V-3-1- La période froide

Au début de l'automne et selon l'état de surface du sol, une grande partie de la lame d'eau précipitée ruisselle brusquement suite aux averses génératrices de crues automnales (Novembre, Décembre), ce qui provoque la remontée rapide des eaux et à un degré moindre pendant les mois de Mars et Avril. Ces crues coïncident avec les mois les plus pluvieux de l'année.

V-3-2- La période chaude

Dans cette période, les crues sont liées à des averses orageuses, brèves et leur extension spatiale est limitée. Elles sont de type torrentiel, ce qui provoque des inondations brutales avec des débits supérieurs à ceux enregistrés pendant la période froide. Ces crues se produisent fréquemment aux mois d'Aout, Septembre et Octobre.

V-3-3- Les différentes méthodes d'estimation des débits des crues

La synthèse des résultats obtenus par plusieurs méthodes d'évaluations des débits de crues est exposée dans cette partie de l'étude.

V-3-3-1- Formules empiriques régionales de Drouhin, Mallel et Paquant

Il existe de nombreuses formules empiriques pour l'estimation des débits des crues. E peuvent être classées selon les paramètres intervenants, entre autre celles dans lesquelles le débit est en fonction de la surface du bassin versant "S" et la période de retour "T".

La relation empirique proposée par Drouhin, Mallel et Paquant issue des lois de Gilbert-Galton-Gauss et de la relation séjourne muni d'un terme correctif commode et donne de bons résultats, une fois confronté aux valeurs historiques observées. En exprimant la crue Q_{crue} en m^3/s , la pluie moyenne interannuelle "P" en mètre "S" la surface du bassin versant en km^2 , la longueur de ce bassin "L" en km, "T" période de retour en année, on peut prendre en Algérie pour un bassin versant $k=1$ et $A=20$, qui sont des coefficients qui dépendent des caractéristiques topographiques, climatologiques et géologiques des bassins. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V-5 : Calcul des débits des crues maximums par la formule empirique issue des lois de Gilbert-Galton-Gauss

Bassin	Surface (km^2)	Longueur du bassin (km)	Pluie moyenne (mm)	Y_{100}	Q_{100} (m^3/s)	Y_{1000}	Q_{1000} (m^3/s)
O. Labiod	1317	85	421.54	0.502	2943.40	0.864	5061.86
O. Soudhes	194	28	338.56	1.035	1429.48	1.490	1798.46
O. Rebôte	296	40	382.84	0.877	1522.96	1.304	2263.32
O. Chemora	765	65	371.42	0.584	2598.58	0.959	4265.81

$$\bullet \text{ B : } \gamma_{100} = 2.S^{-0.25}.\sqrt{9 - \ln S} \quad (V-1)$$

$$\bullet \text{ C : } Q_{100} = \gamma_{100} .S.K.\ln(1 + AP)(S/L^2)^{0.25} \quad (V-2)$$

$$\bullet \text{ D : } \gamma_{1000} = 2.S^{-0.25}.\sqrt{13 - \ln S} \quad (V-3)$$

$$\bullet \text{ E : } Q_{1000} = \gamma_{1000} .S.K.\ln(1 + AP)(S/L^2)^{0.25} \quad (V-4)$$

V-3-3-2- Formules empiriques régionales de Meddi et Toumi (Meddi & Toumi, 2016)

Meddi et Toumi ont divisé le Nord de l'Algérie en trois régions ; notre zone d'étude se situe dans la région III ; Le débit fréquentiel peut être obtenu avec :

$$Q_i(F) = u_i q(F) \quad (V-5)$$

Ou

$Q_i(F)$: Débit de fréquence i

u_i : La moyenne de la population au site

Tableau V-6 : Valeurs des u_i

Bassins	u_i
Oued Labiod	103.46
Oued Chemora	91.78

$q(F)$: Fonction de quantile normalisé ou de la distribution de fréquence régionale ajustée ; donné par le tableau suivant :

Tableau V-7 : Valeurs de $q(F)$ en fonction des périodes de retour pour les trois régions du Nord Algérie

<i>q(F)</i> (quantile function)	<i>Return period</i> (years)							
	2	5	10	20	50	100	200	500
Region I	0.74	1.54	2.14	2.74	3.53	4.13	4.73	5.52
Region II	0.59	1.47	2.27	3.22	4.74	6.14	7.78	10.43
Region III	0.71	1.62	2.29	2.94	3.77	4.37	4.96	5.72

Tableau V-8 : Valeurs des débits des crues maximums par la formule empirique régionale de Meddi et Toumi (2016)

Bassins	Q 10 ans	Q 50 ans	Q 100 ans	Q 500 ans
Oued Labiod	236.92	390.04	452.12	591.79
Oued Chemora	210.17	346.01	401.08	524.98

V-3-3-3- Par traitement statistique des données d'observation (données de mesure)

Le traitement statistique fréquentielle des données disponibles en utilisant la loi de GUMBEL; qui s'adaptent mieux aux données de crues des bassins 06 et 07 contenant les bassins en étude (Belagoune, 2012)..

La loi de GUMBEL adoptées :
$$F(Q) = e^{-e^{-a(Q-Q_0)}} \quad (V-6)$$

En adoptant "Q" comme représentation de variable.

* Q_0 : Paramètre de position :
$$Q_0 = Q_m - \left(0,577 \cdot \frac{1}{a} \right) \quad (V-7)$$

* $\frac{1}{a}$: Paramètre d'échelle = $0,780 \delta \quad (V-8)$

* Q_m et δ : Sont respectivement la moyenne et l'écart type des échantillons
La détermination des quantiles (tableau V-9) peut se faire d'après l'équation de la droite de Gumbel. L'équation de la droite de GUMBEL : $u = (Q - Q_0) \quad (V-9)$

Tableau V-9 : Débits des crues maximums estimés par la loi de GUEMBEL

Bassin	U	F	Période de retour	Q_{\max} (m ³ /s)
B.V. Labiod $Q_{\max}=70.66U+41.3$	0.367	0.50	2	67.29
	1.500	0.80	5	147.38
	2.250	0.90	10	200.40
	2.970	0.95	20	251.25
	3.902	0.98	50	317.10
	4.600	0.99	100	366.44
	6.709	0.999	1000	508.38
B.V. Soudhes Timgad Gue $Q_{\max}=55.73U+61.55$	0.367	0.50	2	81.98
	1.500	0.80	5	145.14
	2.250	0.90	10	186.96
	2.970	0.95	20	227.07
	3.902	0.98	50	279.01
	4.600	0.99	100	317.92
	6.709	0.999	1000	435.44
B.V. Rebôe $Q_{\max}=20.29U+11.03$	0.367	0.50	2	18.50
	1.500	0.80	5	41.61
	2.250	0.90	10	56.91
	2.970	0.95	20	71.59
	3.902	0.98	50	90.59
	4.600	0.99	100	104.83
	6.709	0.999	1000	147.15
B.V. Chemora $Q_{\max}=44.94U+55.35$	0.367	0.50	2	71.82
	1.500	0.80	5	122.76
	2.250	0.90	10	156.48
	2.970	0.95	20	188.82
	3.902	0.98	50	230.70
	4.600	0.99	100	262.08
	6.709	0.999	1000	356.58

V-3-3-4- Méthode faisant intervenir les pluies : Méthode du Gradex

Ces méthodes se rattachent toutes au départ à la technique de l'Hydrogramme unitaire, c'est à dire que le débit pluvial (et éventuellement de fonte de neige) diminué de la rétention par le terrain est étalé dans le temps, par son parcours dans le bassin versant, pour former à l'exutoire le débit de crue.

Cependant, les variations de la rétention par le terrain en fonction du temps au cours de l'averse et dans les différentes parties du bassin versant, restent généralement très mal connues, et l'ajustement des modèles aux crues

Les services d'exploitation d'électricité de France emploient depuis 1966 une méthode simplifiée d'évaluation des crues extrêmes, appelée la méthode du Gradex, qui est applicable aux bassins versant de 0 à 5000km², dont le temps de concentration de ruissellement ou de l'écoulement rapide est compris entre 1 heure et 4 jours (Loup, 1974).

A : La crue moyenne est calculée par la relation suivant :

$$Q_{\text{moy crue}}(t_c, T) = Q_{\text{moy crue}}(t_c, T = 50\text{ans}) + (g_{t_c} \cdot (S/3.6) \cdot t_c) \cdot \ln(T/10) \quad (\text{V-10})$$

Où :

* $Q_{\text{moy crue}}(t_c, T=50\text{ans})$: le débit moyen de crue ($T=50\text{ans}$) ; en m³/s.

* g_{t_c} : Gradex pour une pluie de durée égale à t_c (m).

* T_c : Temps caractéristique du bassin (heure).

* S : La surface du bassin versant en km².

* T : Période de retour.

A : Exposit climatique ; il est calculé par la formule :

$$b = 1 + \frac{\ln(P_{j \text{ max}}/24) - \ln(25)}{\ln(24) - \ln(0.5)} \quad (\text{V-11})$$

B : Pour une pluie de durée est égale à t_c et sur le même étendue de la série d'observation, le Gradex correspondant est évalué par la relation de Montana :

$$g_{t_c} = g \left(\frac{t_c}{24} \right)^b \text{ en mm} \quad (\text{V-12})$$

C : Le coefficient de pointe des débits de crue estimé par la formule de Fuller :

$$r = 1 + \left(\frac{2.66}{S} \right)^b \text{ en mm} \quad (\text{V-13})$$

D : Le débit de crue moyen (T=50ans) est égale à :

$$\frac{\text{débit de pointe}}{r} \text{ en } (m^3 / s) \quad (\text{V-14})$$

Le débit de pointe de crue (t_c, T) calculé par la formule suivante :

$$Q_{\text{ pointe crue } (t_c, T)} = r \cdot Q_{\text{ moy crue } (t_c, T)} \quad (\text{V-15})$$

Pour le sous bassin de oued Labiod la station pluviométrique la plus proche est celle de Medina ; Sur 39 ans (1970-2008) les $P_{j\max}$ sont ajustées à une loi de Gumbel et la valeur de g déduite est égale à : 21.01 mm.

Pour le sous bassin de l'oued de Soudhes; Sur 38 ans (1968-2006) les $P_{j\max}$ sont ajustées à une loi de Gumbel et la valeur de g déduite est égale à : 8.11 mm

Pour le sous bassin de l'oued de Reboa ; Sur 33 ans (1969-2001) les $P_{j\max}$ sont ajustées à une loi de Gumbel et la valeur de g déduite est égale à : 9.87 mm

Pour le sous bassin de l'oued Chemora les stations pluviométriques les plus proche sont : Ain Tin, sidi Mancer, Fom Toub et Bouhmar ; Sur 33 ans (1969-2001) les $P_{j\max}$ sont ajustées à une loi de Gumbel et la valeur de g déduite est égale à : 27 mm.

Tableau V-10 : Application de la méthode du Gradex

Bassin versant	T_c (heure)	Gradex g(mm)	A			B		C	D
			b	$Q_{\text{pte}} (m^3/s)$ 50 ans	Surface (km ²)	g_{tc} (mm)	r	$Q_{\text{moy}} (m^3/s)$ 50 ans	
O. Labiod	9.24	21.01	0.22	317.10	1053	17.01	1.27	250.32	
O. Soudhes	3.41	8.18	0.21	279.01	194	5.48	1.41	197.23	
O. Rebôe	4.43	9.87	0.20	90.59	334	6.99	1.37	65.98	
O. Chemora	7.25	27.00	0.21	230.70	765	21.09	1.31	175.99	

Tableau V-11 : Débits des crues moyennes estimés par la méthode de Gradex

Bassin versant	100	500	1000	5000	10000
O. Labiod	355.68	429.55	461.36	535.23	567.04
O. Soudhes	200.69	202.28	202.96	204.56	205.24
O. Rebête	72.29	76.95	78.95	83.61	85.61
O. Chemora	251.33	303.40	325.82	377.89	400.32

Tableau V-12 : Débits de crues maximums estimés par la méthode de Gradex

Bassin versant	100	500	1000	5000	10000
O. Labiod	451.15	544.85	585.20	678.89	719.25
O. Soudhes	282.21	284.45	285.42	287.66	288.62
O. Rebête	99.79	106.21	108.98	115.41	118.18
O. Chemora	327.88	395.80	425.05	492.98	522.23

V-4- Conclusion

L'étude des écoulements sur les deux Oueds des deux bassins, a permis de confirmer le caractère d'irrégularité du régime d'écoulement.

La variabilité des débits est liée aux caractéristiques physico-géographiques et climatiques propres à chacun des sous bassins.

Les crues, plus spécialement celles de début de l'année hydrologique, dont la gravité et la fréquence sont les plus fortes présentent une ressource potentielle importante.

Les différentes méthodes utilisées pour le calcul des débits de crue à savoir celle basée sur le traitement statistique des données d'observation, ou les relations empiriques régionales proposées soit par Drouhin, Mallel et Paquant, issues des lois de Gilbert-Galton-Gauss ou par Meddi ou celle faisant intervenir les pluies (Gradex) ont donné des résultats différents.

La méthode d'estimation des crues basée sur le traitement statistique des données d'observation, celle de Gradex et celle de Meddi et Toumi ont donné des résultats proches.

CHAPITRE VI : Etude des apports solides

Les deux bassins Oued Labiod et Oued Chemora offrent des conditions très favorables à la mobilisation et au transport des matériaux, car des précipitations agressives s'abattent sur un ensemble morphologique très sensible à l'érosion : Terrains en conglomérats des argiles et des sables au Sud d'Oued Labiod et collines argileuses ou marneuses au centre et au Nord d'oued Chemora avec des pentes assez fortes et très peu protégées par la végétation.

VI-1- Origine et ampleur du phénomène

Dans les bassins de oued Labiod et oued Chemora, les divers facteurs physio-géographiques et climato-hydrologiques analysés précédemment sont favorables au déclenchement et à l'accélération de l'érosion :

Les zones des conglomérats, des argiles, des sables, gypse, sable rouge-sable grossier, grés sableux, argile siliceuse, marneuse, et marno-calcaires, qui sont très sensibles à l'érosion, occupent plus de 30% des surfaces des deux bassins. Le climat semi-aride de la région, contribue à désagréger le sol et le préparer au décapage et à l'érosion. Aussi, les pluies supérieures à 30 mm en 24 heures, sont fréquentes, intenses et engendrent des crues brutales qui favorisent le transport solide. Enfin, le couvert forestier très dégradé ou inexistant sur certaines zones, et la prédominance d'une couverture végétale saisonnière, favorisent l'entraînement des matériaux solides.

VI-2- Evaluation des transports solides basée sur les données de mesures

L'évaluation des sédiments en suspension est basée sur deux types d'action :

- L'observation du réseau hydrométrique (mesure de turbidité).
- La mesure directe du taux de remplissage des retenues.

L'évaluation des transports par charriage est basée sur l'utilisation de tracteurs radioactifs ou luminescents (on ne dispose pas de cette technique en Algérie).

VI-2-1- Méthode basée sur la mesure de la turbidité au niveau du réseau hydrométrique

Cette méthode fait appel à des mesures instantanées et elle ne concerne que les transports en suspension.

La technique opérationnelle utilisée est la suivante :

- Prélèvement en un point unique soit sur bord, soit au milieu, au moyen du récipient (1 litre) qui sert à stoker les échantillons.
- Echelonnement des prélèvements, lors d'une crue, suivant des intervalles de temps variables en fonction du régime de l'Oued étudié.
- Traitement des échantillons au laboratoire (décantation et siphonnage filtrage, séchage à l'étuve et pesée).

VI-2-2- Méthode basée sur la mesure du taux de remplissage des retenues

Un barrage constitue une fosse à sédiments de grande taille. Si l'on contrôle le bilan hydraulique du barrage et la turbidité des volumes d'eau déversés ou soutirés, on peut déduire l'envasement de la retenue, une valeur moyenne des transports solides sur une période allant de la date de la mise en eau du barrage à la date des mesures d'envasements ou sur une période suffisamment longue, comprise entre deux relevés successifs.

VI-2-3- Evaluation des transports par charriage

Les phénomènes de charriage sont difficilement accessibles à des mesures directes. Les méthodes basées sur l'utilisation de nasse à graviers sont impraticables sur les cours d'eau à régime torrentiel. Celle basée sur l'utilisation de tracteurs radioactifs ou luminescents est pour la même raison, assez aléatoire ; par contre le charriage fait l'objet de nombreuses études expérimentales en laboratoire.

VI-3- Evaluation des apports solides dans les deux bassins en utilisant les mesures de la turbidité au niveau des stations hydrométriques

La collecte des informations conduit à un grand nombre de données de concentrations basses et insignifiantes ; Les concentrations élevées n'étant mesurées qu'en de rares occasions, ceci est justifié par la discontinuité du phénomène de transports solides en suspension qui dépend de l'état initial du bassin versant :

En saison estivale, une faiblesse du transport des matériaux fine dû simplement à la faiblesse voire l'absence de l'écoulement. En automne les premières précipitations de cette saison, souvent sous formes torrentielles qui arrivent sur un sol dénudé, après une longue période chaude, entraînent des masses considérables d'argiles et de limons déjà préparés sur place, aussi une forte quantité de terre est apportée par le ruissellement de surface au début de campagne de labours où le sol est remanié, aéré et fragilisé. Le transport en suspension est

faible en hiver quand les versants ont déjà lessivé par les premières pluies de la saison humide.

Cette situation se traduit par des lacunes inévitables au niveau des séries d'observation, et nécessite d'établir des relations qui peuvent servir de base pour le comblement de ces lacunes. Ceci pour l'évaluation des apports solides à différents pas de temps, et par suite l'interprétation du phénomène des transports solides.

Pour le bassin d'Oued Labiod : La station de Mechouneche a une série de 41 ans (1969-2009).

Pour le bassin Chemora : La station de Chemora a une série de 25 ans (1971-1996).

L'étude est basée sur les valeurs instantanées des débits liquides (Q_L), donnés en m^3/s , mesurées à la station. Pour chaque mesure effectuée, la charge de la matière en suspension a été obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevés sur les rives de l'oued au moyen d'un conteneur de 50 cl. La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à $105^\circ C$ pendant 30 minutes. On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé, ce qui établit la concentration en g/l. La fréquence des prélèvements effectués dépendait de la variation de la hauteur d'eau. En période de crue, à chaque variation de 10 cm de hauteur d'eau, on prélève un échantillon. En période normale, on prélève une fois tous les deux jours (Roche, 1963).

Le calcul du débit solide en suspension est basé sur la mesure du débit liquide de l'écoulement puisque :

$$Q_{SS} = C \cdot Q_L \quad (VI.1)$$

Q_{SS} : Débit solide en suspension (kg/s)

Q_L : Débit liquide (m^3/s)

C : Concentration ou turbidité (g/l)

Calcul des apports

Les apports solides en tonnes A_s (t) et les apports spécifiques en tonnes par kilomètre carré par an, A_{ss} ($t/km^2/an$) sont données par :

$$A_s = Q_s \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (VI.2)$$

$$Ass = (As \cdot 10^6) / S \quad (VI.3)$$

Avec :

As : apport solide annuel, mensuel, saisonnier ou mensuel (T)

Qs : débit solide annuel, mensuel ou saisonnier (Kg/s)

N : temps en secondes (s)

Ass : apport solide spécifique (t/km²/an)

S : superficie du bassin versant (km²)

VI-3-1- Variabilité interannuelles des apports

Le flux annuel des matières solides en suspension exporté par les deux oueds étudiés est calculé par la formule :

$$A_s = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_{m_j} C_j \quad (VI.4)$$

où,

C_j : est la concentration mesurée à l'instant t_j

Q_{m_j} : correspondant au débit liquide moyen entre l'instant t_j et t_{j+1}.

N : est le nombre de prélèvement effectués sur l'année considérée,

t_{j+1} - t_j : est le pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs.

Au moment des crues les prélèvements sont intensifiées, et donc par suite, le pas de temps est réduit.

De même, Al, l'apport liquide annuel engendrant le flux des apports solides As, est calculé par la formule

$$Al = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j \quad (VI.5)$$

Les résultats de calcul des apports des sédiments en suspension et la lame d'eau écoulée, ainsi que la dégradation spécifique du sol durant les périodes (1969 - 2009) pour la station de M'chouneche et (1971-1996), pour la station de Chemora sont récapitulés dans les tableaux (VI-1, et VI-2), et présentés aux figures (VI-1 et VI-2).

Tableau VI-1 : Les apports solides, liquides, la lame d'eau et la dégradation spécifiques au niveau de la station de M'chouneche.

Année	Al (hm ³)	Lame d'eau écoulee (mm)	As (T)	Ass (T/km ²)
68 – 69	12,614	12,002	302746	288,06
69 – 70	57,017	54,250	5761577	5482,00
70 – 71	3,690	3,511	148142	140,95
71 – 72	17,944	17,073	694881	661,16
72 – 73	32,514	30,936	2853070	2714,62
73 – 74	8,830	8,402	46358	44,11
74 – 75	13,245	12,602	458016	435,79
75 – 76	17,976	17,104	242831	231,05
76 – 77	39,420	37,507	3422728	3256,64
77 – 78	7,884	7,501	154274	146,79
78 – 79	7,253	6,901	28556	27,17
79 – 80	21,760	20,704	1456517	1385,84
80 – 81	18,102	17,224	2118329	2015,54
81 – 82	4,730	4,500	144036	137,05
82 – 83	8,515	8,102	544074	517,67
83 – 84	2,523	2,401	39930	37,99
84 – 85	2,523	2,401	68859	65,52
85 – 86	9,145	8,701	328449	312,51
86 – 87	10,962	10,430	390639	371,68
87 – 88	3,529	3,358	21177	20,15
88 – 89	8,827	8,399	154824	147,31
89 – 90	19,836	18,873	1963778	1868,49
90 – 91	5,503	5,236	60533	57,60
91 – 92	3,548	3,376	32888	31,29
92 – 93	4,305	4,096	274422	261,11
93 – 94	30,842	29,345	190728	181,47
94 – 95	21,129	20,104	1929680	1836,04
95 – 96	42,574	40,508	1480156	1408,33
96 – 97	5,992	5,701	191481	182,19
97 – 98	21,760	20,704	660542	628,49
98 – 99	5,992	5,701	172343	163,98
99 – 00	13,876	13,203	370707	352,72
00 – 01	7,884	7,501	207814	197,73
01 – 02	16,083	15,303	401762	382,27
02 – 03	23,967	22,804	543100	516,75
03 – 04	93,347	88,817	1483183	1411,21
04 – 05	40,681	38,707	332408	316,28
05 – 06	32,797	31,206	128894	122,64
06 – 07	11,038	10,502	15342	14,60
07 – 08	10,407	9,902	1499	1,43
08 – 09	101,861	96,918	646208	614,85
Moyenne	20,059	19,086	743109,3	707,05

Tableau VI-2 : Les apports solides, liquides, la lame d'eau et la dégradation spécifiques du sol au niveau de la station de Chemora.

Années	Al (hm ³)	Lame d'eau écoulée (mm)	As (T)	Ass (T/km ²)
1970-1971	54,41	73,428	609196	822,13
1971-1972	86,38	116,572	486688	656,80
1972-1973	24,33	32,834	233856	315,60
1973-1974	14,46	19,514	44084	59,49
1974-1975	55,49	74,885	294820	397,87
1975-1976	29,17	39,366	489535	660,64
1976-1977	5,35	7,220	133490	180,15
1977-1978	6,15	8,300	51759	69,85
1978-1979	10,23	13,806	496153	669,57
1979-1980	13,65	18,421	74117	100,02
1980-1981	18,3	24,696	73060	98,60
1981-1982	29,74	40,135	622295	839,80
1982-1983	11,69	15,776	5070	6,84
1983-1984	9,71	13,104	384145	518,41
1984-1985	14,25	19,231	49920	67,37
1985-1986	12,63	17,045	210429	283,98
1986-1987	2,64	3,563	8873	11,97
1987-1988	9,52	12,848	329009	444,01
1988-1989	39,71	53,590	795480	1073,52
1989-1990	28,66	38,677	565204	762,76
1990-1991	35,32	47,665	230135	310,57
1991-1992	11,67	15,749	198609	268,03
1992-1993	3,57	4,818	15171	20,47
1993-1994	13,14	17,733	313618	423,24
1994-1995	72,64	98,030	794609	1072,35
1995-1996	2,75	3,711	383277	517,24
Moyenne	23,68	31,951	303561,6	409,7

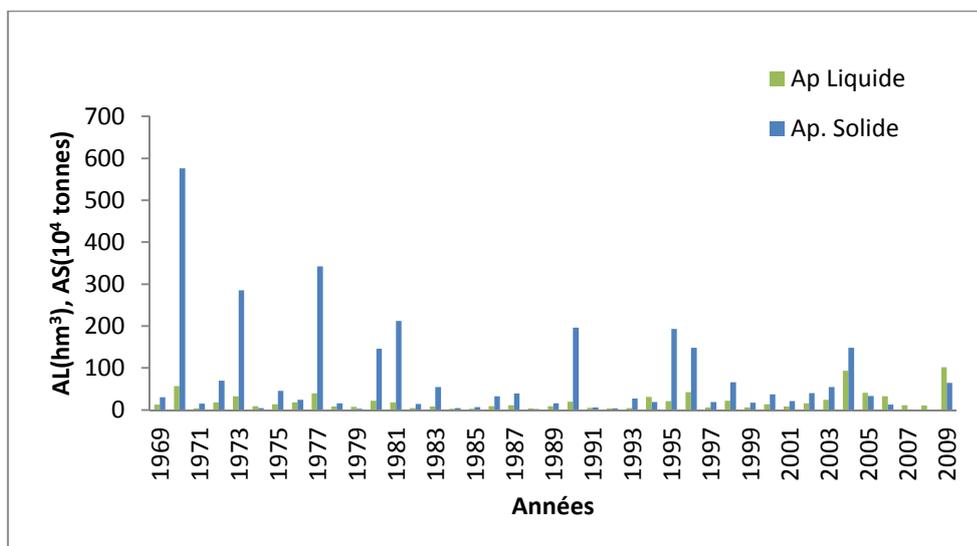


Figure VI-1 : variation interannuelle des apports liquides et solides (Oued Labiod)

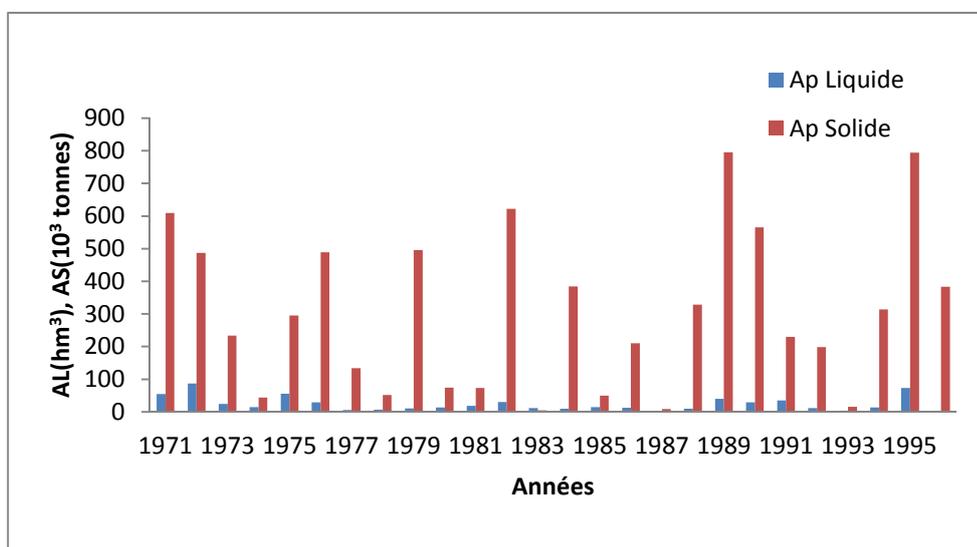


Figure VI-2 : variation interannuelle des apports liquides solides (Oued Chemora)

L'Analyse des résultats montre une harmonie dans l'allure générale de la variation des apports solides, mais avec des ordres de grandeurs variables. A l'échelle interannuelle, durant les périodes d'observation, une très forte variabilité des apports liquides et solides est observée. Sur une période d'observation de 41 ans, pour Oued Labiod (station de M'chouneche), les apports solides de 09 ans (22%) seulement ont dépassé la moyenne interannuelle et sur 26 ans période d'observation de Oued Chemora (station de Chemora), les apports solides de 12 ans (46 %) seulement ont dépassé la moyenne interannuelle ce qui montre la forte variabilité à cette échelle.

Sur ces périodes d'observation la valeur maximale (le pic) des apports solides est de 5761577 tonnes observée durant l'année 1969/1970 et la moyenne interannuelle est de 743109 Tonnes

pour oued Labiod. Pour l'oued Chemora, la valeur maximale (le pic) des apports solides est de l'ordre de 795480 tonnes observée durant à l'année 1988/1989 et la moyenne interannuelle est de 303562 Tonnes. L'analyse de ces données, permet de déduire que les dégradations spécifiques annuelles est de l'ordre 707,1 Tonnes/km²/an, pour une lame d'eau écoulée de 19,086 mm/an pour le bassin Oued Labiod, et 409,7 Tonnes/km²/an, pour une lame d'eau écoulée de 31,95 mm/an pour le bassin Oued Chemora.

VI-3-2- Variabilité mensuelle des apports

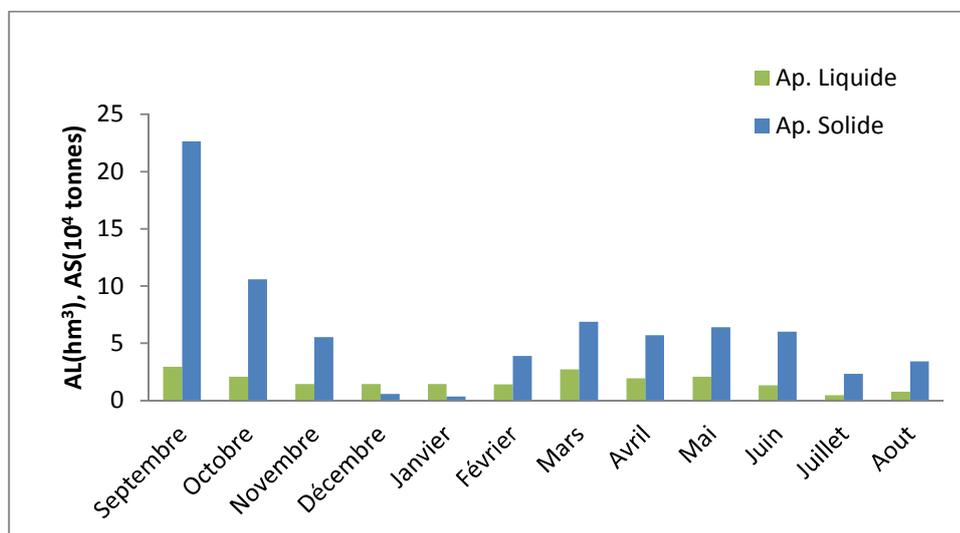
Pour suivre la variabilité du transport solide à une échelle plus fine, nous classons les apports solides mois par mois. Les résultats de ce classement sont récapitulés dans le tableau (VI-03 et VI-04) et présentés dans la figure (VI-04 et VI-05).

Tableau VI-3 : Variabilité mensuelle des apports solides, liquides et la lame d'eau et la dégradation spécifique bassin Oued Labiod (Période 1979/96).

Mois	Al (hm ³)	E (mm)	As (T)	Ass (T /km ²)
Septembre	2.96	2.82	226247.80	215.27
Octobre	2.07	1.97	105967.39	100.83
Novembre	1.44	1.37	55281.44	52.60
Décembre	1.45	1.38	5680.52	5.40
Janvier	1.44	1.37	3610.38	3.44
Février	1.40	1.33	38973.19	37.08
Mars	2.72	2.59	68817.80	65.48
Avril	1.94	1.84	56981.98	54.22
Mai	2.08	1.98	64027.14	60.92
Juin	1.33	1.27	60153.68	57.23
Juillet	0.47	0.44	23259.32	22.13
Aout	0.77	0.73	34108.72	32.45
Total	<u>20.059</u>	<u>19.09</u>	<u>743109.36</u>	<u>707.05</u>

Tableau VI-4 : Variabilité mensuelle des apports solides, liquides et la lame d'eau et la dégradation spécifique bassin Oued Chemora (Période 1971/96)

Mois	Al (hm ³)	E (mm)	As (T)	Ass (T /km ²)
Septembre	2.91	3.927	58466.2	78.90
Octobre	1.21	1.633	41874.7	56.51
Novembre	1.75	2.362	17091.7	23.07
Décembre	1.03	1.390	2434.9	3.29
Janvier	1.69	2.281	18814.7	25.39
Février	1.75	2.362	4942.4	6.67
Mars	2.85	3.846	15772.3	21.29
Avril	4.69	6.330	8262.0	11.15
Mai	2.87	3.874	57071.1	77.02
Juin	1.49	2.011	30264.0	40.84
Juillet	0.68	0.918	22060.0	29.77
Aout	0.76	1.025	26507.7	35.77
Total	<u>23.68</u>	<u>31.958</u>	<u>303561.7</u>	<u>409.7</u>

**Figure VI-3** : Variabilité mensuelle des apports liquides et solides (Oued Labiod).

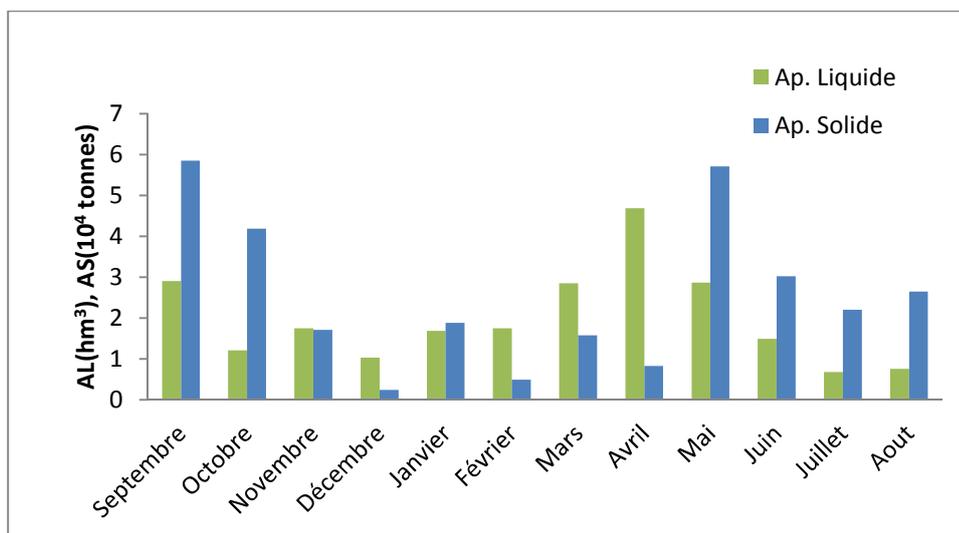


Figure VI-4 : Variabilité mensuelle des apports liquides et solides (Oued Chemora).

L'apport solide des sédiments en suspension maximal est observé en septembre pour Oued Labiod avec une valeur de 226247,8 Tonne, soit 30,5 % de l'apport solide annuel. Dans le même mois, l'apport liquide est de 2,96 Hm³ ce qui représente 14,77 % de l'apport liquide annuel.

Pour l'Oued Chemora, avec une valeur de 58466,2 Tonne enregistré durant le mois de Septembre, soit 19,3 % de l'apport solide annuel, dans le même mois l'apport liquide est de 2,91 Hm³ ce qui représente 12,3% de l'apport liquide annuel.

En deuxième position, pour l'oued Labiod, le mois d'Octobre transporte un apport solide de 105967,39 Tonnes soit un pourcentage de 14,3 pour des apports liquides de 2,07 hm³ qui correspondent à un pourcentage de 10,31 d'apport liquide annuel.

Pour Oued Chemora le mois de Mai 57071,06 Tonne, soit 18,8% de l'apport total, ce qui correspond à un apport liquide de 2,87 Hm³ soit 12,12 d'apport liquide annuel.

Le taux le plus faible correspond au mois de Janvier avec un pourcentage de 0,5 pour le bassin Oued Labiod et le mois de décembre avec un pourcentage de 0,8 pour oued Chemora.

Le tableau n°VI-5, donne en g/l la teneur moyenne mensuelle des eaux de l'Oued Labiod et l'Oued Chemora en transports solides en suspension : Série d'observation 1979-1996 pour le premier et 1971-1995 pour le second.

Tableau n°VI-5 : Valeurs mensuelles de la turbidité en g/l.
(Oued Labiod)

Oued Labiod (1979-1995)	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Août	Année
	76,36	51,23	38,49	3,91	2,51	27,93	25,33	29,42	30,71	45,24	49,72	44,21	425,07

Tableau VI-6 : Variabilité mensuelle de la turbidité en g/l.
(Oued Chemora)

Oued Chemora (1971-1995)	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Août	Année
	49,27	34,16	17,77	3,33	2,35	2,96	4,69	12,39	24,32	35,79	29,92	30,17	247,12

Les variations saisonnières de la turbidité suivent généralement une évolution inverse de celle de l'écoulement (tableaux VI-5 et VI-6), un accroissement en automne avec un maximum en septembre ou octobre, puis une chute en hiver avec un minima en Décembre ou en Janvier, et une reprise en Mars-Mai.

Sur l'Oued Labiod (période 1979-1996), la valeur maximale de la turbidité mensuelle est observée en Septembre, soit 76,36g/l, alors que la teneur minimale moyenne est enregistrée en Janvier, soit 2,51g/l.

La turbidité mensuelle maximale de la période (1971-1995) sur l'Oued Chemora est de 49,27 g/l en septembre ; Elle est minimale en Janvier (2,35 g/l).

Cette variation saisonnière s'explique par l'état initial du sol, la distribution des précipitations, et aussi l'état de la couverture végétale. En automne, la distribution irrégulière des pluies (averses orageuses) sur sol encore dénudé (début de la campagne de labours) est favorable aux fortes teneurs (Meddi, 1992). Alors qu'au printemps la distribution plus ou moins régulière des précipitations en pleine saison végétative, réduit considérablement la mobilisation des matériaux fins sur les versants, et engendre des faibles teneurs en transports solides (Meddi, 1992).

VI-3-3- La relation entre le débit liquide et le débit solide

Afin de mieux saisir l'évolution des transports solides, les relations entre le débit solide et le débit liquide ont été déterminées (Demmak, 1982, Guidoum, 2004), et leurs variations saisonnières, pour les stations de M'chouneche et Chemora (tableau VI-7).

Les variations des débits solides ne suivent pas forcément celles des débits liquides ; Les valeurs maximales de la turbidité sur les deux Oueds, s'observent en automne et au printemps, lors des crues. Ces résultats corroborent avec ceux trouvés par Meddi (1992) dans le bassin versant de l'Oued Mina à l'Ouest de l'Algérie.

Au mois d'Octobre 1983, la turbidité à M'chouneche a été de 183,60 g/l, alors que le débit liquide mensuel moyen était de 0,66 m³/s ; En Septembre 1979 pour la même station, la teneur en matériaux solides a été de 139,40 g/l ce qui correspond à un débit liquide mensuel moyen de 5,64 m³/s.

L'Oued Chemora a écoulé en septembre 1987 un débit moyen mensuel de 0,13 m³/s pour 49,62 g/l de concentration ; La turbidité a atteint son maximum en octobre (124,44 g/l) pour un débit liquide de 0,55 m³/s.

La relation entre les apports solides et les apports liquides généralement suivant un modèle de puissance $Y = a X^b$ sous forme $Q_s = a Q_l^b$,

Tableau n°VI-7 : Les relations saisonnières : Débit liquide - débit solide au pas de temps journalier (Demmak, 1982 ; Guidoum, 2004)

Bassins	Saisons	Paramètres de la droite de régression.		le coefficient de détermination R ²	Relations.
		b	a		
Oued Labiod,	01 (sep, oct, nov)	8,17	1,47	0,79	$Q_s=8,17 Q_L^{1,47}$
	02 (dec, jan, fév)	3,09	1,47	0,81	$Q_s=3,09 Q_L^{1,47}$
	03 (mar, avr, mai)	3,15	1,96	0,86	$Q_s=3,15 Q_L^{1,96}$
	04 (jui, juil, août)	9,64	1,39	0,69	$Q_s=9,64 Q_L^{1,39}$
Oued Chemora,	01 (sep, oct, nov)	24,38	1,27	0,86	$Q_s=24,38 Q_L^{1,27}$
	02 (dec, jan, fév)	2,29	1,67	0,86	$Q_s=2,29 Q_L^{1,67}$
	03 (mar, avr, mai)	1,75	2,10	0,74	$Q_s=1,75 Q_L^{2,1}$
	04 (jui, juil, août)	43,25	1,19	0,83	$Q_s=43,25 Q_L^{1,19}$

VI-3-4- Contribution des crues aux apports solides moyens annuels

L'examen des valeurs de transport solide de quelques événements de crues, montre que non seulement les fortes concentrations sont le signe d'un apport quantitatif élevé de sédiments, celui-ci étant conditionné par l'importance du débit liquide : Ainsi par exemple à Oued Labiod la crue du 02/09/79 a transportée 1.024.137 tonnes de sédiments ; qui représente 48% de la charge de l'année et qui dépasse la charge moyenne annuelle.

A Chemora, la crue du 01/09/1989 a transporté 300.320 tonnes ce qui correspond à 42% de la charge de l'année et 99% de la charge moyenne annuelle.

Leur dégradation spécifique est respectivement 972,41 tonnes/km², et 392,58 tonnes/km² ; A l'échelle moyenne annuelle, elle est de 707,1 tonnes/km² pour le bassin d'Oued Labiod et de 409,7 tonnes/km² à Chemora.

Donc, le phénomène d'érosion et du transport solide semblant prendre tout son ampleur lors du déclenchement de crues brutales, à la suite d'averse intense d'automne et la quasi-totalité des apports solides annuels est due aux quelques plus fortes crues de l'année.

VI-4- Evaluation des apports solides dans le bassin d'oued Labiod en utilisant les mesures du taux de remplissage de la retenue

L'évaluation des apports solides dans le bassin versant oued Labiod en utilisant les levés bathymétriques effectués au niveau de la retenue du barrage Foum El-Gherza nous donne les résultats suivants :

Tableau VI-8 : Variation de la capacité, la vase au niveau du barrage Foug El-Gherza et celle mesurée au niveau de la station de M'chouneche (Ben Aicha 2008).

Année	Temps (ans)	Capacité observée (Mm ³)	Vase observé (Mm ³)	Vase au niveau du barrage (Mm ³)	Vase au Mesurée à M'chouneche (Mm ³)
1950	0	47.00	0.00	////	////
				11.93	////
1967	17	35.07	11.93	3.14	////
				5.41	5,34
1975	25	31.93	15.07	2.20	1,81
				7.42	3,25
1986	36	26.52	20.48	2.01	1,68
				0.15	0,70
1993	43	24.32	22.68	////	////
				////	////
2001	51	16.90	30.10	////	////
				////	////
2004	54	14.89	32.11	////	////
				////	////
2009	59	14.74	32.26	////	////
				////	////

Nous constatons des différences considérables entre les quantités des sédiments estimées en utilisant les mesures de matières en suspension au niveau de la station de M'chouneche et celles estimées en utilisant les levés bathymétriques de la retenue du barrage Foug El-Gherza.

Cela est dû probablement :

- Aux apports supplémentaires des sédiments provenant du sous bassin situant en aval de la station de M'chouneche, et en amont du barrage Foug El-Gherza (superficie 264 km²).
- Au fait que le transport solide par charriage n'est pas pris en considération dans les calculs des sédiments en utilisant les mesures au niveau de la station de M'chouneche.
- Au fonctionnement du barrage durant les crues (ouverture des vannes de vidange et fonctionnement d'évacuateur de crue).

VI-5- Conclusion

Les apports solides dans les bassins versants constituent un phénomène irrégulier, complexe et aléatoire.

Les facteurs mis en jeu sont nombreux et interdépendants. En se basant sur les données disponibles observées aux stations de M'chouneche pour le bassin oued Labiod et de Chemora pour oued Chemora, nous avons essayé d'analyser le comportement et la variabilité des apports solides à différentes échelles.

Les valeurs de la dégradation spécifique passent de 410 tonnes/km²/an sur le bassin oued Chemora à 710 tonnes/km²/an sur oued Labiod, pour la période (1971-1996) pour oued Chemora, et pour la période (1979-1996) pour oued Labiod.

A ces variations spatiales de la turbidité, s'ajoutent des variations temporelles. En effet, 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 en absence de crue.

Conclusion de la deuxième partie

Les deux bassins Oued Labiod et Oued chemora offrent des conditions très favorables à la mobilisation et au transport des matériaux, car des précipitations agressives s'abattent sur un ensemble morphologique très sensible à l'érosion : Les formations prédominantes dans les deux bassins versant étudiés, sont celles du quaternaire dans les grandes plaines et vers les oueds sont bien développées. Les terrains imperméables et semi-perméables sont majoritaires dans les bassins. A cette faible perméabilité vient s'ajouter les conditions morphologiques favorables au ruissellement. Le couvert végétal rencontré à travers les bassins est de type dégradé, il est constitué de touffes de plantes clairsemées, de steppes d'alfas, de broussailles adoptées au sol et au climat, où la végétation devient rare et plus dégradée du fait de la surexploitation des quelques nappes vertes dans la partie montagneuse et assez dénudée.

L'étude des écoulements sur les deux Oueds des deux bassins, a permis de confirmer le caractère d'irrégularité du régime d'écoulement.

Certains sous bassins sont responsables d'une grande partie de débit écoulé à l'Oueds, surtout en période de crues. Les débits extrêmes de ces dernières ont été estimés par différentes méthodes à savoir celle basée sur le traitement statistique des données d'observation, ou les relations empiriques régionales proposées soit par Drouhin, Mallel et Paquant, issues des lois de Gilbert-Galton-Gauss ou par Meddi et Toumi, ou celle faisant intervenir les pluies (Gradex) ont donné des résultats différents.

La méthode d'estimation des crues basée sur le traitement statistique des données d'observation, celle de Gradex et celle de Meddi et Toumi ont donné des résultats proches.

L'analyse du transport solide en suspension montre sa variation 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.

Les valeurs maximales de la concentration ont été enregistrées en automne et au printemps, lors des violentes crues. Par contre les valeurs minimales ont été enregistrées en années de faible hydraulicité, en saison sèche, et en hiver en absence de crue.

Troisième partie :
Modélisation de l'érosion et
du transport solide dans les
deux bassins

Introduction

Les bassins d'Oued Labiod et Oued Chemora sont exposés à un climat semi-aride méditerranéen (pluie d'hiver, sécheresse estivale). Ses pluies sont torrentielles et irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps. Mais les averses orageuses de forte intensité sont particulièrement fréquentes en automne, lorsque le couvert végétal est absent (Arabi et Roose, 1989). Les conditions géologiques, de part de son climat, son relief et les facteurs anthropiques qui ont largement contribué à l'accélération des processus érosifs.

Le processus du transport des matières solides dans les bassins versants est complexe. Il se fait principalement en période de crue, et il est étroitement lié à l'intensité des précipitations, à la configuration du bassin versant et aux caractéristiques hydrauliques du cours d'eau.

La dégradation des sols est sévère, il est impératif d'appliquer des modèles d'érosion des sols de base qui nécessitent moins de données, et donc qui correspondent le mieux avec les ressources disponibles. L'équation universelle des pertes de sol révisée (RUSLE) est l'une des méthodes les plus utilisées. Le modèle RUSLE peut prédire le potentiel d'érosion moyen annuel sur une base d'un pixel, c'est l'objectif du 8^{ème} chapitre.

Ce modèle est simple, il exige des données limitées, et peut donc être pratique pour les grands bassins versants où les données peuvent être insuffisantes (Kinnell, 2001; Renschler et Harbor, 2002, Sadiki *et al.*, 2004). Ces données peuvent être recueillies par la télédétection. En effet, la télédétection fournit des données homogènes sur de vastes régions, et peut donc contribuer grandement à l'évaluation régionale de l'érosion.

En exploitant ces données de la télédétection à l'échelle saisonnière, des données de pluies enregistrées aux niveaux des stations pluviométriques situées dans les deux bassins et en utilisant le modèle HEC-HMS pour prédire les réponses hydrologiques en débits liquides des deux bassins, durant des crues présélectionnées afin de calibrer et valider le modèle pour choisir les paramètres qui s'adaptent mieux aux données naturelles des régions de l'étude.

Une fois le jeu de paramètres est choisi, en utilisant l'option d'estimation du transport solide offert par le modèle HEC HMS, qui utilise l'approche de Williams [1976] " Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)", pour l'estimation de l'érosion dans les versants, et l'une des six fonctions de transport et l'une des quatre méthodes de calcul des vitesses de chute dans les cours d'eau disponibles dans le logiciel, pour évaluer les quantités des sédiments produites par les deux bassins versants durant les mêmes crues utilisées précédemment.

En comparant les résultats obtenus avec les apports solides mesurés aux niveaux des deux stations hydrométriques contrôlant les deux bassins en variant l'équation du transport et la méthode de calcul de vitesse de chute, on obtient celles qui conviennent mieux aux conditions naturelles pour chaque bassin.

Après le choix des jeux de paramètres, on applique ce modèle pour les différentes pluies maximales journalières de différentes fréquences, pour prédire en premier lieu les débits liquides des crues fréquentielles résultant ensuite les apports solides produits par les deux bassins durant ces crues.

Le dernier chapitre porte sur l'application du logiciel HEC-RAS, qui comprend un modèle de transport de sédiment unidimensionnel, qui met à jour la bathymétrie du canal sur la base de la mécanique des sédiments, contrairement à HEC HMS, au système d'oued Chemora (oued Chemora et ses affluents), entre les stations hydrométriques situant en amont (St de Timgad, St de Morri et St de Rebôe) et la station hydrométrique de Chemora, située en aval durant deux crues différentes, pour l'analyse des phénomènes présents dans l'Oued principal comme l'érosion, transport des sédiments, dépôts et la capacité maximale du transport de l'écoulement.

CHAPITRE VII : Présentation des modèles HEC-HMS & HEC RAS

VII-1- Modèle HEC-HMS

VII-1-1- Modèle hydrologique HEC-HMS

Un modèle mathématique peut être défini comme une représentation théorique simplifiée d'une réalité physique. En hydrologie, la modélisation concerne généralement la relation pluie-débit, c'est à dire que les modèles utilisent la pluie comme variable d'entrée et calculent un hydrogramme en sortie du bassin. Ces modèles reposent en général sur deux fonctions distinctes :

- Une fonction de production qui sépare la pluie en une partie infiltrée et en une partie ruisselée.
- Une fonction de transfert qui achemine la pluie ruisselée à l'exutoire de l'unité hydrologique (le bassin versant)

Les Modèles développés sous le HEC-HMS se basent sur trois fonctions essentielles :

Modèles pour calculer les précipitations, le volume de ruissellement, le ruissellement direct et les modèles de calcul des écoulements souterrains (USACE, 2000 ; Henine, 2005 ; USACE, 2013).

VII-1-1-1- Modélisation des précipitations

La modélisation des précipitations s'effectue sur deux plans :

VII-1-1-1-1- Répartition temporelle

C'est le calcul de la précipitation moyenne par l'une des méthodes, moyenne arithmétique, moyenne arithmétique pondérées et méthode de Thiessen (USAID, 2013).

VII-1-1-1-2- Répartition spéciale

C'est une autre alternative à la méthode précédente qui comprend en fait deux étapes (calcul de P_{moy} puis la répartition temporelle). Cette méthode permet la réalisation directe de l'hyétographe en faisant intervenir la notion de nœuds entre pluviomètres. Les nœuds sont positionnés sur le bassin versant de sorte à avoir une répartition spatiale adéquate de la précipitation. Le HEC-HMS définit alors la répartition temporelle des pluies en un nœud par pondération des données pluviométriques donnée par la relation suivante (USAID, 2013):

$$P_{\text{node}}(t) = \sum_i w_i P_i(t) \quad (\text{VII-1})$$

où : w est le coefficient de pondération affecté à la station i ($i = 1 \dots \text{nbr de stations}$) Pour calculer les coefficients de pondération, le HEC-HMS construit un repère orthogonal basé sur un nœud (figure VII.1), puis il détermine pour chaque quadrangle délimité par deux axes une station (la plus proche du nœud). Le facteur de pondération est calculé par la relation suivante :

$$w_j = \frac{1/d_j^2}{\sum 1/d_j^2} \quad (\text{VII-2})$$

où, $1/d_j^2$ Inverse du carré de la distance de la station j au « nœud P ».

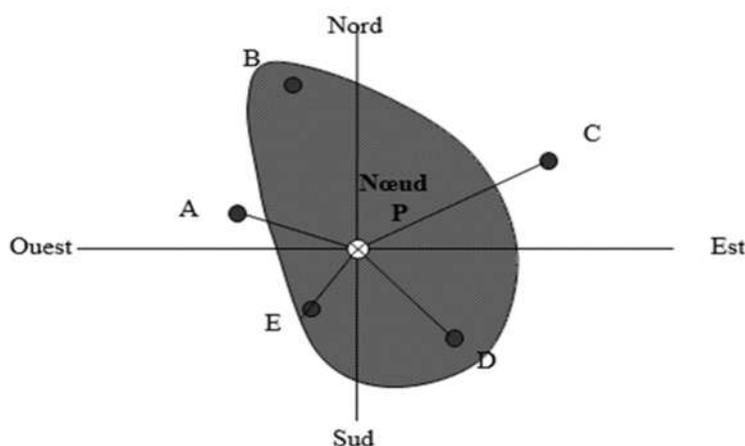


Figure VII-1 : Illustration de la méthode de l'inverse du carré de la distance

Une fois la série $P_{node}(t)$ est établie pour tous les nœuds, la moyenne temporelle des précipitations est calculée par la relation suivante :

$$P_{node}(t) = \frac{\sum w_{node}(t) P_{node}(t)}{\sum w_{node}} \quad (\text{VII-3})$$

où : w_{node} est le poids affecté pour chaque nœud. Si un seul nœud est utilisé dans le bassin versant, w_{node} sera égal à 1.00. Sinon, on détermine w_{node} pour chaque nœud en utilisant les polygones de Thiessen ou un autre schéma.

VII-1-1-1-3- Evènements pluvieux hypothétiques

On peut créer avec le logiciel HEC-HMS des évènements pluvieux (ou plus simplement : pluies) hypothétiques, c'est à dire réaliser une simulation à partir de données qui ne sont pas issues de relevés réels. Cela peut s'avérer utile en particulier lorsqu'on veut connaître les volumes d'écoulements pour dimensionner des ouvrages d'art (USAID, 2013).

On peut créer trois types d'évènements pluvieux standards :

- Pluie hypothétique basée sur la fréquence
- Pluie de projet standard : cette méthode fait intervenir des paramètres définis uniquement pour le territoire américain par certains organismes
- Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur

* Pluie hypothétique basée sur la fréquence

L'objectif de cette méthode est de définir un événement pour lequel la hauteur et la durée des précipitations sont déterminées pour une probabilité de dépassement donnée. Pour définir cet événement avec HEC-HMS l'utilisateur doit spécifier la hauteur de précipitation en chaque pas de temps pour une probabilité de dépassement choisi. Les hauteurs des précipitations peuvent être déduites à partir des courbes HDF (Hauteur-Durée-Fréquence). HEC-HMS applique un coefficient de correction de surface aux hauteurs données par les courbes HDF. Généralement, la distribution de l'intensité des précipitations est non uniforme sur le bassin versant, la hauteur moyenne sur la surface du bassin est inférieure à la hauteur donnée par les courbes HDF. Pour pallier à ce problème, le U.S. Weather Bureau, a défini des facteurs qui permettent d'ajuster les hauteurs données par les courbes HDF à la hauteur moyenne (USACE, 2000 ; USACE, 2013). Ces facteurs, exprimés en pourcentage, sont fonction de la surface du bassin et de la durée de la pluie (figure VII-2).

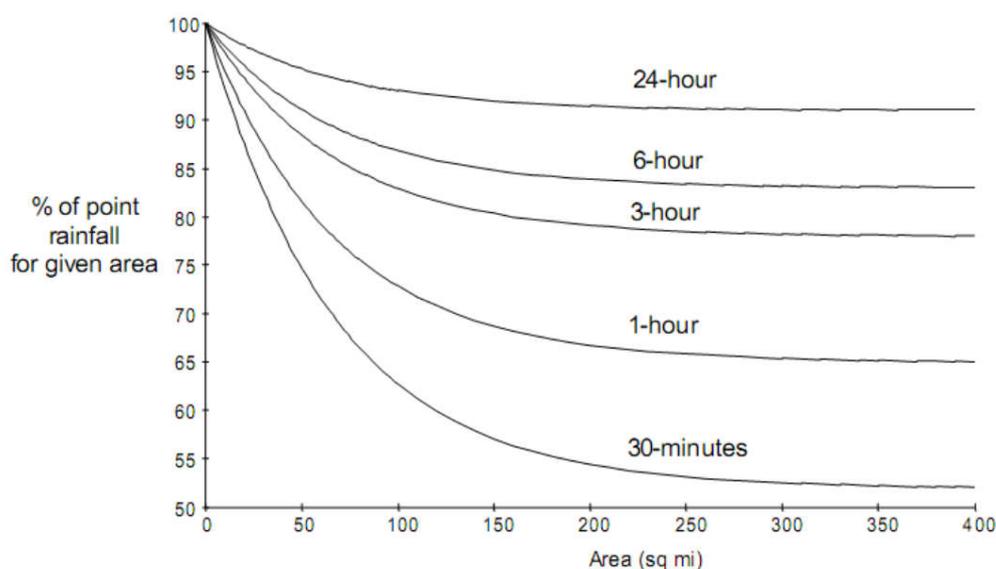


Figure VII-2 : Facteurs de réduction des hauteurs données par les courbes HDF

HEC-HMS fait une interpolation linéaire pour calculer les hauteurs d'eau au pas de temps régulier. Ensuite, il détermine un hyétogramme à partir des valeurs incrémentales des hauteurs de

précipitations par la méthode dite en « Bloc ». Cette méthode positionne la hauteur maximale en milieu de l'hétérogramme. Les blocs restants sont arrangés alors dans l'ordre décroissant, alternativement avant et après le bloc central. Cette méthode est illustrée sur la figure VII-3 (USAID, 2013).

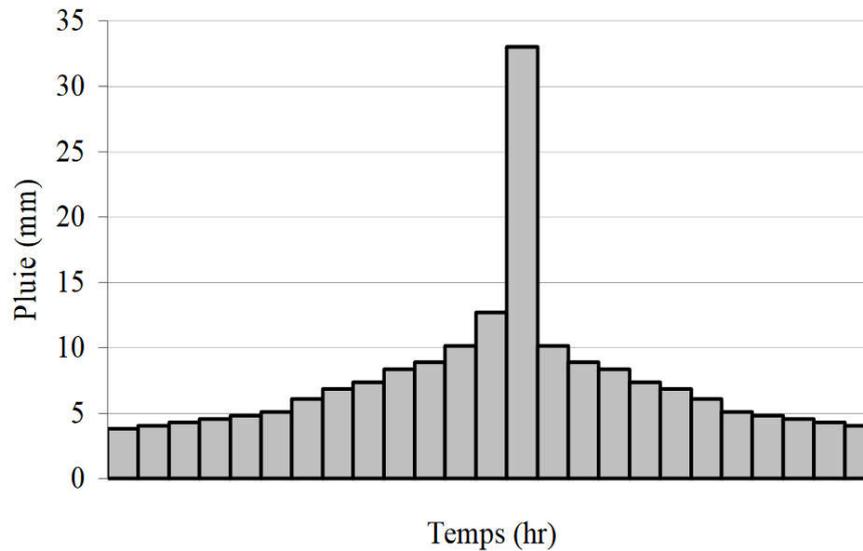


Figure VII-3 : Exemple de la distribution de la Pluie basée sur la fréquence

*** Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur**

Cette méthode permet à l'utilisateur de définir la hauteur et la distribution de la pluie hypothétique. On peut aussi donner la quantité totale d'eau tombée sur le bassin versant et la fraction de cette quantité à chaque instant, avec une courbe du type (Figure VII-4) :

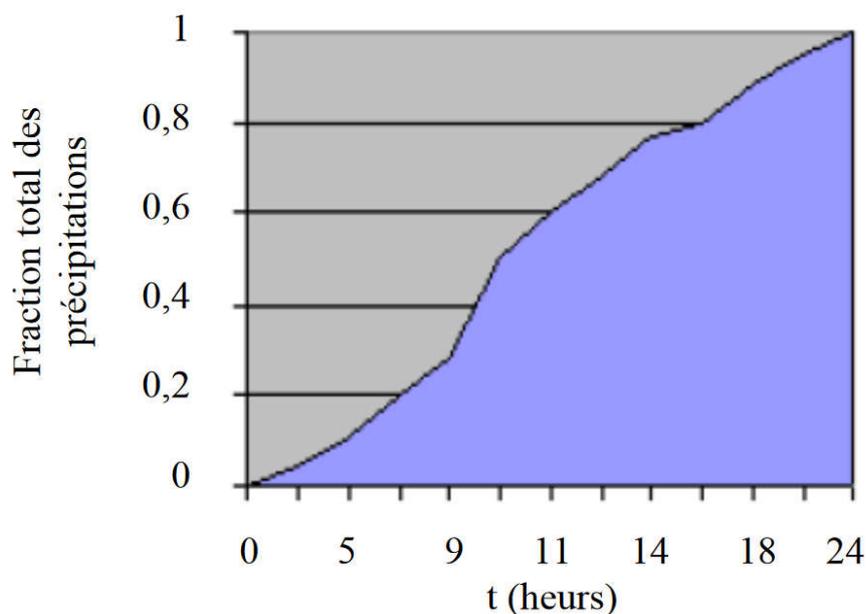


Figure VII-4 : Répartition de la précipitation au cours de l'évènement

Il est important de définir un évènement pluvieux hypothétique d'une durée suffisamment longue pour que tout le bassin versant participe à l'écoulement. A titre indicatif un temps total égal à 3 fois le temps de concentration du bassin versant donne de bons résultats.

VII-1-1-2- Modélisation de l'Evapotranspiration (ETP)

Comme l'ETP reste insignifiante pendant la crue, le HEC-HMS ne tient pas compte de tous les détails concernant cette entité. Dans le cas des orages plus courts, telle que la pluie de projet standard, il est approprié d'omettre cette entité. Avec le modèle SMA, qui est décrit dans la section 'Modélisation de pertes', il est possible d'analyser la réponse du bassin versant à des séries de précipitations de longue durée qui incluent les périodes de précipitation et les périodes sans précipitations. Pendant les périodes sans précipitations, l'état d'humidité du bassin versant continue à changer. L'évapotranspiration est la composante critique de ce mouvement. L'évapotranspiration, comme modélée dans HEC-HMS, inclut la vaporisation de l'eau directement du sol et la transpiration des végétaux.

Dans HEC-HMS on représente l'Evapotranspiration par des valeurs et des coefficients de correction en pas de temps mensuel. Le taux d'évapotranspiration mensuel est calculé ensuite par le produit des valeurs de l'ETP par ces coefficients ([USACE, 2000](#) ; [USACE, 2013](#)).

VII-1-1-3- Modélisation des pertes

HEC-HMS calcule les volumes d'écoulements en soustrayant aux précipitations les quantités d'eau qui sont stockées, infiltrées ou évaporées sur le bassin versant. L'interception, l'infiltration, le stockage et l'évaporation sont représentés par le HEC-HMS comme étant des «pertes».

VII-1-1-3-1- Concept de base

Les surfaces d'un bassin versant sont classées en deux catégories ([USACE, 2000](#) ; [USACE, 2013](#)):

1. Surfaces directement connectées et imperméables, où l'écoulement est direct et se fait sans pertes. Dans ce cas on utilise le modèle « sans pertes »
2. Surfaces perméables soumises à des pertes décrites par les différents modèles suivants :
 - Modèle de perte initiale et à taux constant
 - Modèle à déficit et à taux de perte constant
 - Modèle basé sur le Curve Number (CN)
 - Modèle de Green et Ampt.

Pour tous ces modèles, les pertes sont calculées pour chaque intervalle de temps et soustraites à la moyenne surfacique de précipitations de cet intervalle. La quantité d'eau restante désigne l'excès de précipitation. Cette quantité est considérée uniforme sur tout le bassin versant et représente le volume d'écoulement de surface.

a- Le modèle de pertes initiales et à taux constant

Ce modèle considère que le potentiel du taux de pertes maximum, noté f , est constant, et inclut le taux de pertes initiales I_a qui représente l'interception et le stockage dans les dépressions de surfaces. L'interception est une conséquence de l'absorption de la pluie par le couvert végétal et le stockage de surface est la conséquence de la topographie du bassin versant : l'eau stockée dans les dépressions de surface sera soit évaporée soit infiltrée. Tant que I_a n'est pas atteint, il n'y a pas de ruissellement (USAID, 2013).

On peut résumer ce fonctionnement de la manière suivante :

$$\text{Si } \sum_i P_i \leq I_a \text{ alors } P_{et} = 0$$

$$\text{Si } \sum_i P_i \geq I_a \text{ et } P_t \leq f_c \text{ alors } P_{et} = 0$$

$$\text{Si } \sum_i P_i \geq I_a \text{ et } P_t \geq f_c \text{ alors } P_{et} = P_i - f_c.$$

Où : P_t : La moyenne surfacique des précipitations au temps t ; P_{et} : le ruissellement au temps t donné par :

$$P_{et} = \begin{cases} P_t - f_c & \text{Si } P_t > f_c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{VII-4})$$

La difficulté de cette méthode réside dans la détermination des pertes initiales et du taux de pertes constantes.

b- Le modèle du Curve Number (CN)

Ce modèle estime l'excès de précipitations comme une fonction des précipitations cumulées de la couverture et de l'humidité initiale du sol à partir de l'équation suivante (USACE, 2000 ; USACE, 2013) :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (\text{VII-5})$$

Où: P_e : L'excès de précipitation ; P : est le total des précipitations accumulées au temps t ;

I_a : Les pertes initiales et S : est le potentiel maximum de rétention.

On a par ailleurs la relation empirique ci-dessous, qui a été développée à partir d'une analyse menée sur un ensemble de petits bassins versants expérimentaux qui donne I_a en fonction de S :

$$I_a = 0.2 S \quad (\text{VII-6})$$

On obtient donc :

$$P_e = \frac{(P-0.2 S)^2}{P+0.8 S} \quad (\text{c}) \quad (\text{VII-7})$$

Le potentiel de rétention maximum, S , et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du nombre de courbe CN (Curve Number) par :

$$S = \frac{25400-254CN}{CN} \quad (\text{VII-8})$$

CN peut être estimé comme une fonction du type du sol, d'occupation du sol et des conditions hydriques précédentes du bassin versant : ce nombre peut être estimé à partir des tables des données (Annexe A du manuel de référence technique HEC-HM), qui expriment CN en fonction du type de la couverture végétale.

Pour un bassin versant composé de différents types de sols ou de couvertures végétales, on peut établir un CN moyen par la relation suivante :

$$CN_{\text{moy}} = \frac{\sum_i a_{ij} CN_i}{\sum_i A_i} \quad (\text{VII-9})$$

Où : j : L'indice associé à la subdivision du bassin de type de sol uniforme : a : l'aire de la subdivision j dans le sous-bassin i et A_i : l'aire du sous-bassin i .

c- La méthode CN en grille

Une autre alternative de la méthode de CN qui peut être utilisée par le HEC-HMS est celle de CN en grille, avec cette option, la subdivision de l'équation (c) sera des cellules d'une grille, dans la base de données, où chaque cellule doit inclure : sa localisation, sa distance de l'exutoire, ses dimensions et son CN (qui est donné en fonction du type de sol). Ainsi, le HEC calcul l'excès des précipitations pour chaque cellule indépendamment en utilisant l'équation (c), ensuite, il calcule l'excès total au niveau de l'exutoire en utilisant la méthode de ModClark (cette méthode

sera présentée dans la section suivante). Ce qui veut dire que la méthode de CN en grille n'est compatible qu'avec cette méthode de calcul (USACE, 2000 ; USACE, 2013).

d- Le modèle de Green & Ampt

Il est l'un des plus utilisés, c'est un modèle conceptuel d'infiltration et de précipitation. Sa fonction de production est basée sur la loi de Darcy généralisée aux milieux non saturés combinée avec le principe de conservation de la masse (USACE, 2000 ; USACE, 2013). Les pertes sur les zones perméables sont calculées par la formule suivante :

$$f_i = K \left[\frac{1 + (\varphi - \theta_i) S_f}{F_t} \right] \quad (\text{VII-10})$$

Où : K : Conductivité hydraulique saturée ; φ : la porosité ; $(\varphi - \theta_i)$: le volume du déficit hydrique ; S_f : un paramètre tabulé qui exprime l'aspiration avant mouillage ; F_t : représente les pertes cumulées aux temps t.

L'excès des précipitations est calculé, ensuite, en soustrayant à la moyenne surfacique des précipitations (P_{moy}) pour le même intervalle de temps les pertes calculées par l'équation précédente.

e- Le modèle continue SMA (Sol-Moisture Accounting)

Contrairement aux modèles précédents, SMA est un modèle qui permet d'étudier de longues périodes avec alternance de la pluie et du temps sec. Le modèle simule le mouvement de l'eau à travers les différents éléments d'un bassin versant. A partir des données de précipitations et d'évapotranspiration, le modèle calcule le ruissellement de surface, les infiltrations et les pertes dues à l'évapotranspiration et les percolations profondes (USAID, 2013).

Le modèle SMA représente le bassin versant avec une série de couches de stockage interconnectées entre elles. La figure VII-5 représente la façon dont les couches de stockages sont connectées. Chacune est représentée par le taux d'apport, de sortie et de sa capacité de stockage qui commande la quantité d'eau perdue ou supplémentaire.

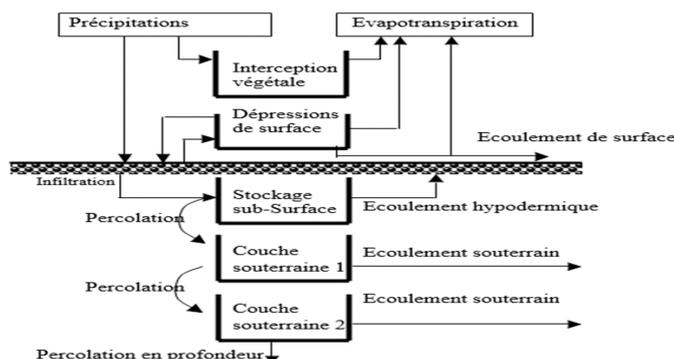


Figure VII-5 : Schéma conceptuel de l'algorithme du modèle SMA (USAID, 2013)

VII-1-1-3-2- Application et limitation des modèles de ruissellement utilisés avec le HEC-HMS

Le choix du modèle et l'estimation des différents paramètres sont une étape critique dans le développement des données avec le logiciel HEC-HMS. On ne peut pas joindre n'importe quel modèle de pertes avec n'importe quel modèle de transfert (USAID, 2013).

VII-1-1-4- Modélisation du ruissellement direct

Dans cette partie, on présente les modèles qui simulent le processus du ruissellement direct des précipitations excédentaires sur un bassin versant. HEC HMS se rapporte à ce processus comme transformation de l'excès de précipitation pour chacun des sous bassin en un écoulement à son exutoire. Avec le HEC-HMS il existe deux options pour calculer le volume de ruissellement (USAID, 2013) :

- ✓ Un modèle empirique : Le but de ce type de modèle est d'établir un lien causal entre le ruissellement et l'excès de précipitation sans considérations détaillées des processus internes. Les équations et les paramètres du modèle ont une signification physique très limitée.
- ✓ Un modèle conceptuel : Le modèle conceptuel inclus dans HEC-HMS est le modèle de l'onde cinématique de l'écoulement de surface. Il représente, le mieux possible, les mécanismes physiques qui régissent le mouvement de l'excès de précipitation sur la surface et dans les petits canaux du bassin versant.

VII-1-1-4-1- Les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire (HU)

Ces modèles donnent une relation empirique entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct. La méthode de l'hydrogramme unitaire vise à déterminer l'hydrogramme de ruissellement direct à l'exutoire d'un bassin versant à partir des hyétogrammes de l'averse correspondante reçue par ce même bassin (Ouazar, 2001).

L'hydrogramme unitaire donne le débit de ruissellement par unité de hauteur d'eau tombée sur le bassin versant. Cette méthode repose donc principalement sur l'hypothèse de linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement (USAID, 2013).

On a donc l'équation de convolution suivante :

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq m} P_m U_{n-m+1} \quad (\text{VII-11})$$

Où : Q_n est le débit de ruissellement au temps $n \cdot \Delta t$

P_m est l'excès de précipitation entre $m \Delta t$ et $(m+1) \cdot \Delta t$ (en hauteur d'eau)

U_{n-m+1} est la valeur de l'hydrogramme unité au temps $(n-m+1) \cdot \Delta t$

Cette méthode repose sur l'ensemble des hypothèses suivantes :

- La distribution spatiale de l'excès de précipitations doit être uniforme et son intensité reste constante durant l'intervalle de temps Δt
- La linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct ;
- L'hydrogramme unitaire résultant est indépendant des précipitations antécédentes ;
- L'excès de précipitation en un pas de temps donné est censé produire un hydrogramme, avec un temps équivalent, indépendamment de l'intensité des précipitations

a- Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur

Ce modèle consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de la formule III-15 et des données complètes d'un événement pluvieux. En pratique, cette méthode n'est que très peu utilisée car elle nécessite des données beaucoup trop complètes. De plus, l'hydrogramme obtenu ne pourra s'appliquer qu'à des événements pluvieux qui ont la même durée (USAID, 2013).

b- Hydrogramme unitaire paramétrique

Un hydrogramme unitaire paramétrique est obtenu par calcul à partir de plusieurs paramètres. Par exemple, l'amplitude et l'instant du pic suffisent à calculer entièrement un hydrogramme unitaire triangulaire. Un hydrogramme unitaire synthétique met en relation les paramètres d'un hydrogramme unitaire paramétrique et les caractéristiques du bassin versant. Cette méthode permet d'adapter l'hydrogramme unitaire obtenu dans certaines conditions pour un bassin versant à d'autres conditions et d'autres bassins versants. Par exemple, on peut relier l'amplitude du pic d'un hydrogramme unitaire triangulaire à l'aire drainée par le bassin (USAID, 2013).

VII-1-1-4-2- Modèles d'hydrogrammes unitaires synthétiques

a- Le modèle de SNYDER

Cette méthode permet d'estimer l'hydrogramme unitaire à partir des caractéristiques du bassin versant. Il est basé sur trois paramètres : l'amplitude du pic, la base du temps total et le décalage entre le maximum de l'hyétogramme de la pluie excédentaire et le pic de l'hydrogramme (USAID, 2013). Ce modèle est fondé par ailleurs sur un événement standard tel que le décalage temporel (t_p) qui est déterminé par la relation suivante :

$$t_p = 5.5 t_r \quad (\text{VII-12})$$

Où : t_r est la durée de l'événement

Si le décalage temporel est assez différent du temps calculé par la relation précédente, on utilise la relation suivante :

$$t_{PR} = t_R - \frac{t_r - t_R}{4} \quad (\text{VII-13})$$

Où: t_R : Le décalage temporel de l'hydrographe désiré (défini par l'utilisateur) ;

t_{PR} : Le décalage temporel de l'hydrogramme unitaire (défini par l'utilisateur).

Pour ce type d'événement, Snyder a établi une relation entre le décalage temporel et le pic de l'hydrogramme unitaire.

$$\frac{U_p}{A_d} = C \frac{C_p}{t} \quad (\text{VII-14})$$

Où: U_p : Le pic de l'hydrogramme unitaire ;

A_d : La surface drainée ;

C_p : Coefficient du pic de l'hydrogramme unitaire ;

C : Constante de conversion=2.08 pour le Système international d'unités(SI) ;

t : Le temps de décalage. Il est égal à t_p pour des événements standards et à IPR pour d'autres durées.

b- La méthode du SCS (Soil Conservation Service) :

Cette méthode repose sur l'hydrogramme unitaire normalisé (qui est la moyenne de nombreux hydrogrammes unitaires calculés pour différents bassins versant). Cet hydrogramme normalisé représente le débit d'écoulement, (U_t), comme une fraction du débit maximal, (U_p), et, (T_p), l'instant du pic. On a par ailleurs les relations :

$$U_p = 2.08 \frac{A_d}{T_p} \quad (\text{VII-15})$$

$$T_p = \frac{A_t}{2} + 0.6T_c \quad (\text{VII-16})$$

Où: A_t : la durée de l'excès de précipitation ; et

T_c : le temps de concentration du bassin.

VII-1-1-4-3- La méthode de CLARK

Il s'agit d'une méthode quasi-conceptuelle puisqu'il prend en compte les deux processus intervenant dans la transformation d'un excès de précipitation en ruissellement, à savoir le mouvement de l'eau dès son origine jusqu'à l'exutoire du bassin versant et l'atténuation de cette quantité d'eau par stockage lors de son parcours. Le modèle de Clark modifié, fait intervenir un maillage du bassin versant qui permet de mieux modéliser les temps de parcours (USAID, 2013).

Une fois que l'excès de précipitation est déterminé pour chaque grille du maillage du bassin versant, le temps de transfert de l'excès de précipitation de la grille à l'exutoire est calculé par la relation suivante :

$$t_{\text{cell}} = t_c \frac{d_{\text{cell}}}{d_{\text{max}}} \quad (\text{VII-17})$$

Où:

t_{cell} : temps de transfert de l'excès de précipitation de la grille ;

t_c : temps de concentration du bassin versant ;

d_{cell} : distance entre la grille et l'exutoire du bassin versant ;

d_{max} : le plus long parcours du bassin versant ;

VII-1-1-4-4- Modèle de l'onde cinématique

Il s'agit d'un modèle conceptuel qui représente les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à l'excès de précipitations. Il résout donc les équations (de continuité et de quantité du mouvement) qui régissent les écoulements instationnaires en eau peu profonde pour tracer l'hydrogramme de ruissellement (USAID, 2013).

Le bassin versant étant découpé en deux plans séparés par le cours d'eau dans lequel les écoulements se déversent (figure VII-6). Le modèle de l'onde cinématique représente les écoulements de surface sur ces plans.

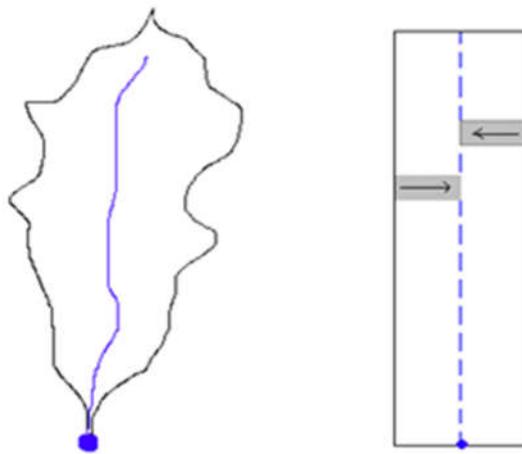


Figure VII-6 : Modélisation d'un modèle de bassin pour le modèle d'onde cinématique

Sans rentrer dans la théorie complète, on retiendra que sous quelques hypothèses simplificatrices, l'équation de mouvement et celle de continuité donnent :

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \alpha^{m-1} \frac{\partial A_T}{\partial x} = q \quad (\text{VII-18})$$

$$\text{avec } \alpha = 1.486 \frac{S^{0.5}}{N} \text{ et } m = \frac{5}{3} N \quad (\text{VII-19})$$

Où : A_T : La section transverse ; S : est la pente, N : est un coefficient de rugosité; q : est le débit d'apport latéral par unité de longueur du canal.

HEC-HMS représente les écoulements de surface sur un canal rectangulaire de largeur unité. Cette méthode est aussi utilisée pour les écoulements fluviaux. Dans les deux cas, la résolution des équations se fait par la méthode des différences finies pour assurer la précision et la stabilité. Pour utiliser la méthode de l'onde cinématique dans la modélisation du ruissellement, le bassin versant est décomposé en divers éléments :

- Les plans de ruissellement de surface ;
- Les canaux de collection ;
- Le cours d'eau principal.

Le choix du modèle de ruissellement direct dépend essentiellement de la disponibilité des données pour le calage ou pour l'estimation de certains paramètres, de la pertinence des hypothèses faites pour chaque modèle par rapport au cas étudié et de l'expérience que peut avoir l'utilisateur face aux divers modèles.

VII-1-1-5- Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC-HMS

Les différents modèles d'écoulements fluviaux inclus dans le HEC-HMS permettent de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces modèles utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement (USAID, 2013).

a- Équation de continuité

Elle s'écrit sous la forme suivante

$$A \frac{\partial v}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q \quad (\text{VII-20})$$

Où : B : Largeur de la surface libre ; q : Le débit unitaire, calculé par unité de longueur du canal et
A : L'aire de la section du cours d'eau

b- Equation de quantité de mouvement

L'équation du mouvement s'écrit comme suit :

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (\text{VII-21})$$

Où: S_f : est le gradient hydraulique ; S_0 : est le gradient au fond du canal ; V : vitesse d'écoulement ; y : hauteur hydraulique ; x : la longueur du chemin de l'écoulement ; $\frac{\partial y}{\partial x}$: le gradient de pression ; $\frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x}$: l'accélération convective et $\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$: l'accélération locale.

Les principales hypothèses retenues lors de l'élaboration de ces équations sont :

- La vitesse est constante sur la surface et elle reste horizontale sur chaque section du cours d'eau ;
- La pression reste hydrostatique en chaque point du cours d'eau ;
- Aucune circulation latérale et secondaire ne se produit ;
- Le lit du canal est fixé ; l'érosion et le dépôt ne changent pas la forme de la section du canal ;

- La résistance à l'écoulement peut être décrite par des formules empiriques, telles que l'équation de Manning ou de Chézy.

VII-1-1-5-1- Modèle de Puls (modified puls)

Ce modèle est basé sur une approximation en différences finies de l'équation de continuité, et sur une représentation empirique de l'équation de quantité de mouvement (USAID, 2013). On considère qu'il n'y a pas d'apports latéraux. L'équation de continuité devient alors :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{VII-22})$$

On utilise alors la méthode des différences finies en écrivant que :

$$I_t - O_t = \frac{\Delta S_t}{\Delta t} \quad (\text{VII-23})$$

Où : I_t et O_t sont les débits moyen respectivement amont et aval pendant une période Δt . ΔS_t étant la variation du stock d'eau durant le même pas de temps.

On obtient alors l'équation suivante :

$$\frac{S_t}{\Delta t} + \frac{Q_t}{2} = \frac{I_{t-1} + I_t}{2} + \left(\frac{S_{t-1}}{\Delta t} - \frac{Q_{t-1}}{2} \right) \quad (\text{VII-24})$$

Ainsi, au temps t , on connaît les termes de droite, et l'on cherche à déterminer les termes de gauche. On a donc deux inconnues S_t et Q_t , et l'on doit donc connaître une relation supplémentaire entre ces deux variables. Une fois cette relation déterminée, on résout le nouveau système d'équations par récurrence. En ce qui concerne la relation liant S_t à Q_t , on peut la déterminer par des observations historiques des valeurs des débits et du volume d'eau stocké au cours du temps.

VII-1-1-5-2- Modèle de Muskingum

Ce modèle utilise comme le modèle précédent une approximation simple en différences finies de l'équation de continuité (USAID, 2013) :

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2} \right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} \right) \quad (\text{VII-25})$$

On écrit ensuite que le volume d'eau stocké est la somme d'un volume stocké constant et d'une variation du stock :

$$S_t = T_p O_t + P_p X (I_t - O_t) = T_p (X I_t + (1 - X) O_t) \quad (\text{VII-26})$$

avec, T : Temps de parcours et X paramètre permettant une pondération ($0 < X < 0.5$).

Ainsi, si le stockage d'eau dans la rivière est contrôlé par les conditions aval, on met $X=0$ (On retrouve alors le modèle de réservoir linéaire présenté plus haut). Au contraire, on prendra

$X=0.5$, pour donner un poids similaire aux débits entrants et sortants.

Finalement, on obtient l'équation suivante :

$$O_t = \left(\frac{\Delta t - 2T_P X}{2T_P(1-X) + \Delta t} \right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2T_P X}{2T_P(1-X) + \Delta t} \right) I_{t-1} + \left(\frac{2T_P(1-X) + \Delta t}{2T_P(1-X) + \Delta t} \right) O_{t-1} \quad (\text{VII-27})$$

Connaissant les valeurs de T, X, Δt pour tous les instants t, et de la condition initiale (O_0) HEC-HMS calcule par récurrence l'hydrogramme amont.

Les paramètres T et X peuvent être évidemment estimés par une série d'essais successifs corrigés au fur et à mesure. T peut être aussi mesuré comme l'intervalle de temps entre deux points similaires appartenant respectivement aux hydrogrammes amont et aval.

VII-1-1-5-3- Le modèle du décalage (lag model)

Cette méthode est la plus simple et est extrêmement utilisée, surtout pour modéliser le drainage urbain. On considère que l'hydrogramme aval est simplement l'hydrogramme amont décalé dans le temps d'une certaine durée (Lag). La valeur de ce décalage peut être estimée comme la durée entre les deux pics des deux hydrographes (ou leurs centres de gravité respectifs) (USAID, 2013).

VII-1-1-5-4- Le modèle de l'onde cinématique

Ce modèle est basé sur une approche différences finies de l'équation de continuité et une approche simplifiée de l'équation du mouvement. Cette approche est décrite dans la section précédente (USAID, 2013). Les informations nécessaires à ce modèle sont :

- Le type de la section du cours d'eau : trapézoïdale, rectangulaire ou circulaire ;
- Les dimensions principales : la base de la section du canal, le diamètre de la conduite
- Pente des berges ;
- La longueur du bief ;
- La pente de ligne d'énergie ;
- Coefficient de la rugosité de Manning (n).

VII-1-1-5-5- Le modèle Muskingum-Cunge

Le modèle Muskingum est facile à utiliser mais emploie des paramètres qui n'ont pas de signification physique et qui sont difficiles à évaluer. De plus ce modèle est basé sur des approximations qui s'avèrent souvent fausses. Le modèle de Muskingum-Cunge évite ces erreurs. Il est basé sur l'équation de continuité incluant un débit latéral et sur la forme diffusive de l'équation de quantité de mouvement (USAID, 2013) :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (\text{VII-28})$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (\text{VII-29})$$

La combinaison de ces deux équations, donne l'équation de diffusion–convection de Miller et Cunge, 1975.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + Cq_1 \quad (\text{VII-30})$$

avec, c : La célérité et μ : La diffusivité hydraulique définie par :

$$c = \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (\text{VII-31})$$

$$\mu = \frac{Q}{2BS_0} \quad (\text{VII-32})$$

L'approximation en différences finies des dérivées partielles permet d'obtenir l'équation suivante :

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q_1 \Delta X) \quad (\text{VII-33})$$

Avec :

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{k} + 2X}{\frac{\Delta t}{k} + 2(1 - X)} \quad (\text{VII-34})$$

$$C_3 = \frac{\frac{\Delta t}{k} - 2X}{\frac{\Delta t}{k} + 2(1 - X)} \quad (\text{VII-35})$$

$$C_3 = \frac{-\frac{\Delta t}{k} + 2(1 - X)}{\frac{\Delta t}{k} + 2(1 - X)} \quad (\text{VII-36})$$

$$C_4 = \frac{2 \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (\text{VII-37})$$

$$K = \frac{\Delta X}{C} \quad (\text{VII-38})$$

$$X = 0.5 \left(1 - \frac{Q}{BS_0 C \Delta X} \right) \quad (\text{VII-39})$$

C, Q, B et les quatre paramètres C sont des variables. Ils sont recalculés à chaque pas de temps et d'espace par HEC-HMS.

VII-1-2- Modèle hydro-sédimentologique HEC-HMS : Érosion et transport des sédiments

HEC-HMS utilise l'approche (Williams, 1976) Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) pour calculer le rendement des sédiments du bassin versant (Figure VII-7). MUSLE est une approche largement appliquée et très empirique pour les calculs de rendement des sédiments. Elle nécessite plusieurs paramètres spécifiques du site qui permettent de quantifier l'énergie érosive des précipitations (y compris le taux de ruissellement hydrologique pointe et le volume de ruissellement total) et l'érodabilité du bassin versant (facteur topographique LS, facteur d'érodabilité du sol K, facteur de couverture et occupation du sol et le facteur de gestion P) (USACE, 2010).

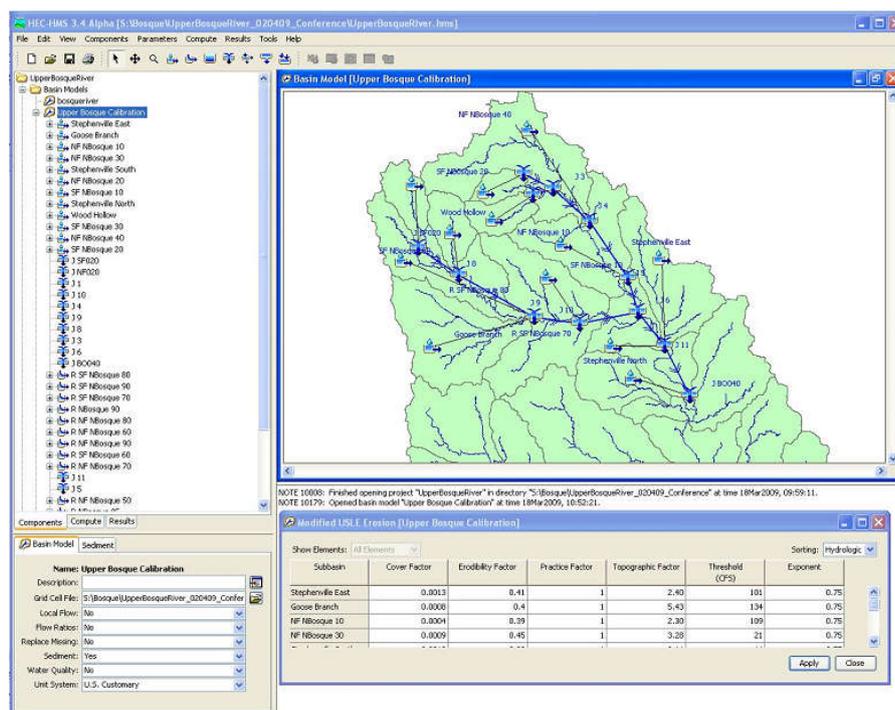


Figure VII-7 : Sédiments édités de rendement à HEC-HMS.

L'approche de MUSLE a été conçue pour calculer la masse totale des sédiments d'un événement. Par conséquent, trois calculs supplémentaires sont nécessaires pour traduire la masse totale calculée à partir de l'équation de MUSLE en un résultat qui fonctionne comme une condition aux limites pour un modèle de mécanique de la rivière.

La masse totale de sédiments est traduite sous forme d'une série chronologique (Sédiments Time-Séries). HEC-HMS traduit la charge des sédiments en fonction du débit liquide par une fonction de puissance simple :

$$G_s = kQ^b \quad (\text{VII-40})$$

Où G_s est le débit des sédiments, Q est débit liquide et k et b sont des coefficients empiriques.

Une série temporelle doit être introduite comme une condition à la limite amont. Les données des sédiments dans HEC HMS doivent être partitionnées par classe de grain (Grain Class Partition).

HEC-HMS a inclus également un «facteur d'enrichissement" (Slattery, 1997), qui est le simple rapport de la fraction de la production de sédiments calculée composée d'une classe de grain donné à la fraction de cette classe de grain que l'on trouve dans les sols des bassins versants. Ce facteur permet au modèle de traduire les données de gradation des bassins versants dans un cloisonnement de classe de grain de la sédigraphe calculée (Figure VII-8).

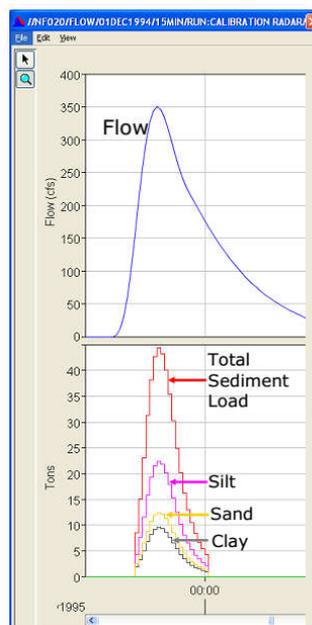


Figure VII-8 : Débit et sédiments sortant (des séries chronologiques par classe de grain) d'un élément sous-bassin HEC-HMS.

Des modifications ont été apportées afin d'appliquer la méthodologie aux événements multiples (Multi-Event Modeling), La simulation continue dans HEC-HMS, il s'agit d'ajouter deux critères supplémentaires, un taux de seuil de ruissellement de pointe et une période de temps critique.

En fin HEC-HMS comprend des algorithmes de canal de base pour acheminer les sédiments entre les sous-bassins (Canal Sédiments Routage), y compris l'équilibre uniforme, rapport de volume, réservoir linéaire et les méthodes de dispersion de Fischer. Ces méthodes utilisent une forme de canal uniforme pour toute la portée de calcul du profil de surface de l'eau, et les paramètres hydrauliques résultants sont calculés pour chaque valeur de débit dans le hydrogramme d'entrée. La capacité de transport est calculée avec l'une des sept fonctions de transport et emploie un procédé de mélange de la couche active simplifiée pour calculer une masse de sédiments érodées (sans mise à jour de la géométrie du canal).

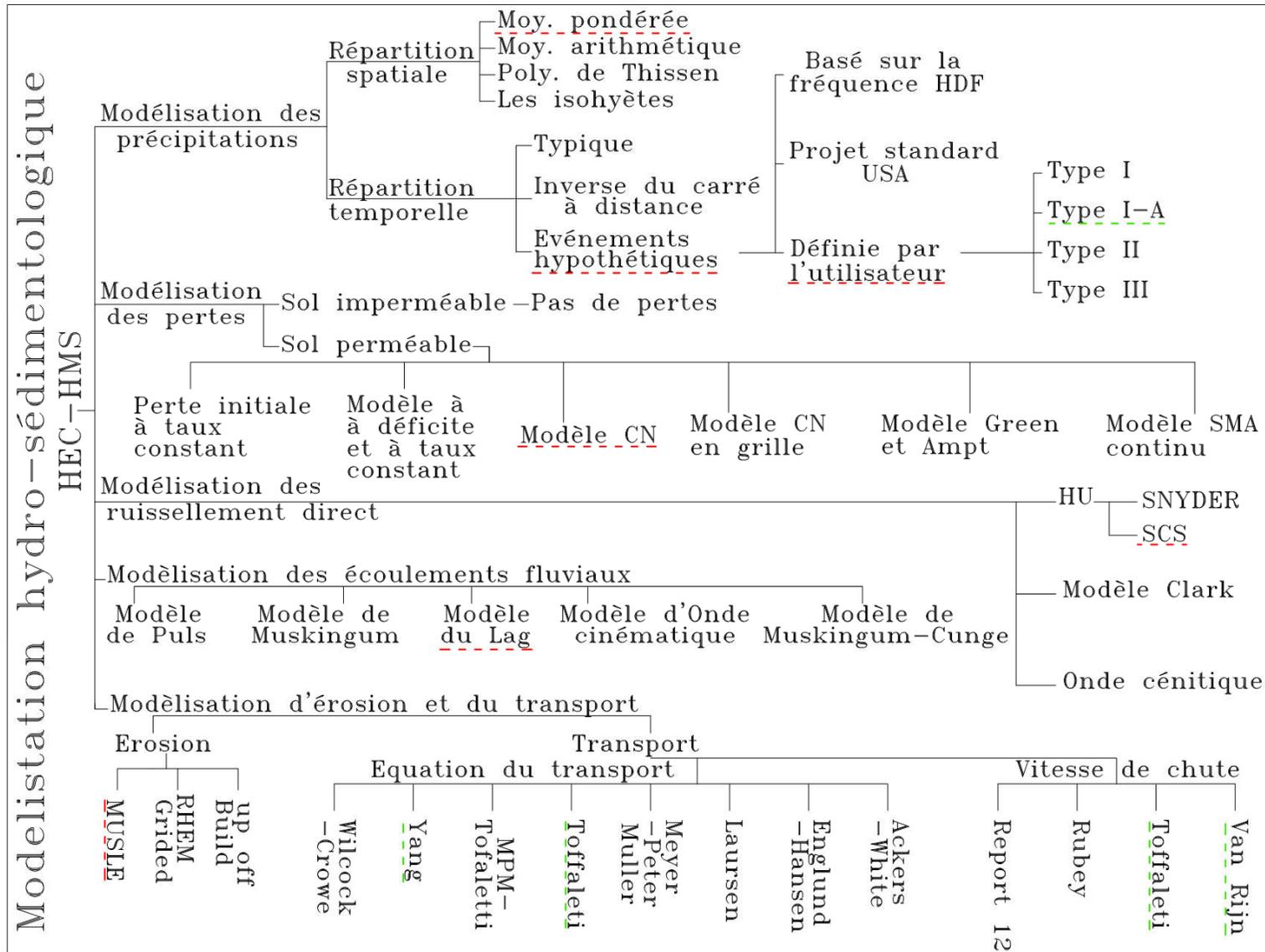


Figure VII-9 : Organigramme de la modélisation par HEC-HMS

VII-2- Modèle HEC-RAS

VII-2-1- Modèle hydraulique HEC-RAS

Le logiciel HEC-RAS est un logiciel de simulation hydrodynamique unidimensionnel dans les rivières et canaux développé par l'«U.S. Army Corps of Engineers» (USACE, 2008). Il est capable d'effectuer des simulations de la propagation des écoulements dans les cours d'eau par :

- Le calcul des écoulements permanents et non permanents dans un réseau de cours d'eau;
- Le calcul de transport des sédiments et le changement morphologique d'un canal mobile;
- L'analyse de la qualité de l'eau et prise en compte du couvert de glace.

Ce logiciel est capable de modéliser des ouvrages hydrauliques, qui se trouvent dans un tronçon du cours d'eau. Il permet de réaliser des sections transversales avec un coefficient de Manning variable, de différencier les zones actives et non actives dans un canal ou un oued et de créer des sections transversales interpolées (USACE, 2010).

VII-2-2- Modèle hydrau-sédimentologique HEC-RAS

Le calcul du transport des sédiments fluviaux nécessite souvent une simulation détaillée du changement de lit et de l'évolution gradations. HEC-RAS comprend un modèle de transport de sédiment unidimensionnel qui met à jour la bathymétrie du canal sur la base de la mécanique des sédiments (Figure VII-9) contrairement à HEC HMS (Stanford, Research Hydraulic Engineer, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2006). Le modèle résout l'équation de continuité des sédiments (Exner) sur des volumes de contrôle centrés sur chaque section transversale. La capacité de transport est calculée pour chaque classe de grain en utilisant l'une des six fonctions de transport, dont trois (MPM, Laursen-Copeland et Ackers-White) peuvent être étalonnées ou personnalisées pour des conditions spécifiques du site (Gibson, Pak et Fleming, 2011).

HEC-RAS compare la capacité de transport calculée pour chaque classe de grain à l'apport de sédiments entrant dans le volume de contrôle. Le modèle calcule le déficit sédimentaire localisé ou l'excédent de la différence entre la capacité et la fourniture, qui se traduit par l'érosion et le dépôt, respectivement.

VII-2-2-1- Hydrodynamique

Les spécifications d'écoulement pour les calculs de transport des sédiments (jusqu'à la version 4.1) suivent l'approche d'écoulement « quasi-stationnaire » de HEC-6. Un événement ou une période est rapproché en calculant une série de profils de flux stationnaire (Figure VII-9). Chacun de ces profils de chaque flux stationnaire est alors lié à une durée et aux paramètres de transport sont produits à chaque section.

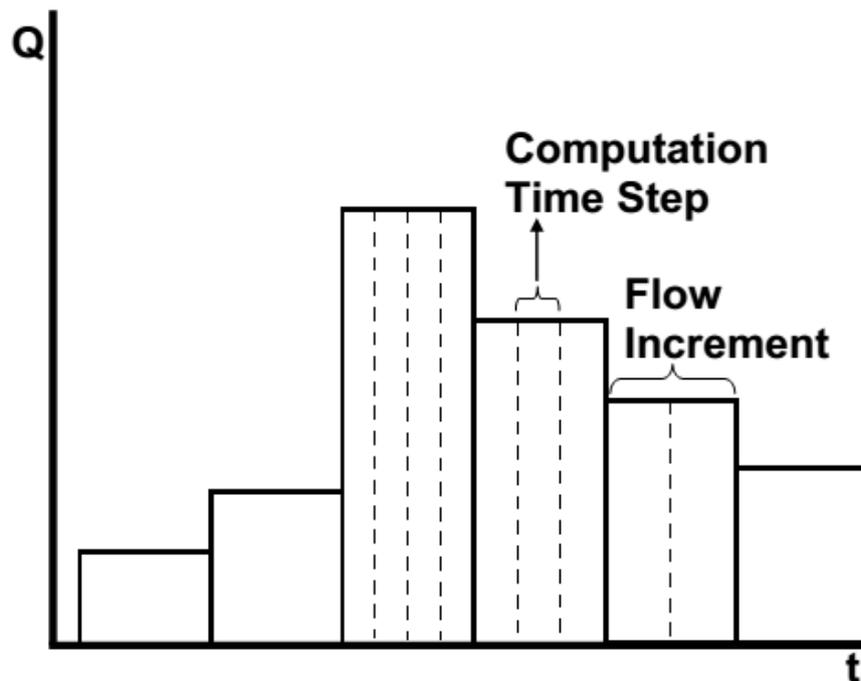


Figure VII-10 : Schéma de la division quasi-stationnaire d'écoulement.

Des mises à jour de bathymétrie sont exigées plus fréquemment que la durée d'incrément d'écoulement, ainsi une étape de temps informatique est spécifiée.

Le dossier de la géométrie est mis à jour et la nouvelle hydrodynamique de flux stationnaire sont calculées au début de chaque étape de temps informatique.

VII-2-2-2- Calculs de transport

Six fonctions de transport sont disponibles dans RAS comprenant : Ackers et White (1973), Englund Hansen (1967), Laursen (1958), Myer-Peter-Muller (1948), Toffaleti (1968), et Yang (1972). La capacité totale de transport est calculée en appelant l'hypothèse de similitude (Armanini, 1992 et Vanoni 1975 après Einstein, 1950) en divisant la courbe de gradation de

sédiment en classes de taille discrètes, calculant indépendamment un potentiel de transport pour chaque classe de taille et puis pesée par l'abondance relative dans la couche active tels que :

$$T_c = \sum_{j=1}^n \beta_j T_j \quad (\text{VII-41})$$

Là où :

T_c = Capacité totale de transport

n = Nombre des classes de grosseur du grain

β_j = % d'une couche active composée de matériel dans la classe « j » de grosseur du grain

T_j = Potentiel de Transport calculé pour 100% de la classe matérielle « j » de grain

L'équation de continuité de sédiment d'Exner est résolue :

$$(1 - \lambda_p) B \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial x} \quad (\text{VII-42})$$

Où η est l'enfoncement de l'altitude, B est la largeur du volume de commande, q est le taux volumétrique de transport, λ_p est la porosité de lit. Ceci représente un changement des côtes de lit en réponse à un déficit ou à un excédent de sédiment en volume de commande. L'équation d'Exner est résolue séparément pour chaque grosseur du grain est ajoutée ou enlevée sur la couche active. À la fin de chaque étape de temps, l'agrégation ou la dégradation est traduite en changement uniforme de lit au-dessus du périmètre mouillé entier de la section transversale.

VII-2-2-3- Contraintes physiques à l'érosion et au dépôt

Les contraintes physiques peuvent avoir comme conséquence une fraction de l'excédent ou du déficit de sédiment calculé par l'équation d'Exner traduisant directement en agrégation ou dégradation dans une étape de temps donnée.

VII-2-2-4- Modificateurs temporels

La solution de l'équation d'Exner aura comme résultat de l'excédent ou du déficit pour chaque section, traduisant immédiatement en dépôt ou érosion. Ceci ne reflète pas des processus physiques réels, cependant, car le dépôt et l'érosion sont des phénomènes temporels.

Des modificateurs dépendant du temps sont appliqués à l'excédent ou au déficit pour chaque section. L'efficacité de dépôt est calculée par le grosseur du grain basé sur la vitesse de chute calculée et sur la masse prévu du matériel dans la colonne d'eau basée sur les rapports de la concentration de Toffeletti (Vanoni, 1975). Le taux de dépôt comme rapport de l'excédent de sédiment qui traduit en dépôt dans une étape de temps indiquée est défini comme :

$$\text{Deposition Rate} = \frac{V_s(i) \cdot \Delta t}{D_e(i)} \quad (\text{VII-43})$$

Où $V_s(i)$ est la vitesse d'arrangement pour la dimension particulière i , $D_e(i)$ est la profondeur efficace pour la taille i , et Δt est la durée de l'étape de temps (USACE, 1993 et Thomas, 1994).

Un rapport semblable a été mis en application pour modifier temporellement l'érosion. Ce coefficient appelle l'approche « de longueur caractéristique » qui inclut la prétention que l'érosion prend à une distance d'approximativement 30 fois la profondeur de se développer entièrement. Par conséquent, dans les cas où la capacité dépasse l'approvisionnement, l'anomalie de capacité/approvisionnement est multipliée par un coefficient d'entraînement (C_e) qui limite la quantité de matériel qui peut être enlevée d'une section transversale dans une étape de temps. Le coefficient d'entraînement est :

$$C_e = 1.368 - e^{\frac{-L}{30 \cdot D}} \quad (\text{VII-44})$$

Où L est la longueur du volume de commande et D est la profondeur efficace (USACE, 1993 ; Thomas, 1994).

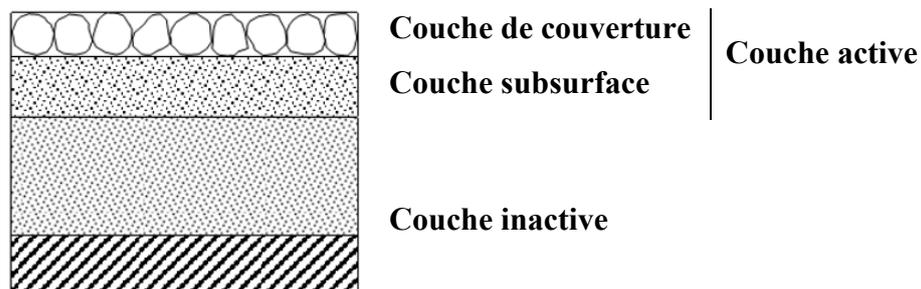


Figure VII-11 : Schéma de 3 couches utilisées dans Exner méthode de tri et armoring.

VII-2-2-5- Tri et Armoring

L'autre processus principal considéré dans le calcul de la continuité est limitation potentielle d'approvisionnement en raison des procédés de mélange de lit. HEC-RAS utilise Exner 5, un algorithme de « trois couches » pour calculer le lit assortissant des mécanismes. Exner 5 divise la couche active en deux couches secondaires, simulant le lit coarsening en enlevant des fines au

commencement d'une couche mince de couverture. Pendant chaque fois que l'étape, la composition de cette couche de couverture est évaluée et si, selon un rapport empirique approximatif, le lit est partiellement ou entièrement blindé, la quantité de matériel disponible pour satisfaire l'excédent peut être limitée.

VII-3- Intégration du HEC-HMS avec HEC-RAS

Deux méthodes ont été ajoutées à HEC-RAS pour faciliter la modélisation des bassins versants fluviaux intégrée en coordination avec HEC-HMS (Modèle Connection et modèle ADH) (Gibson, Pak et Fleming, 2011).

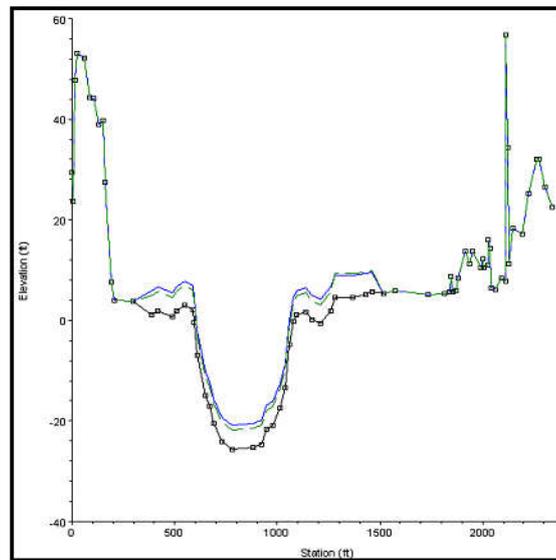


Figure VII-12 : sections HEC-RAS mis à jour lors d'un événement de dépôt.

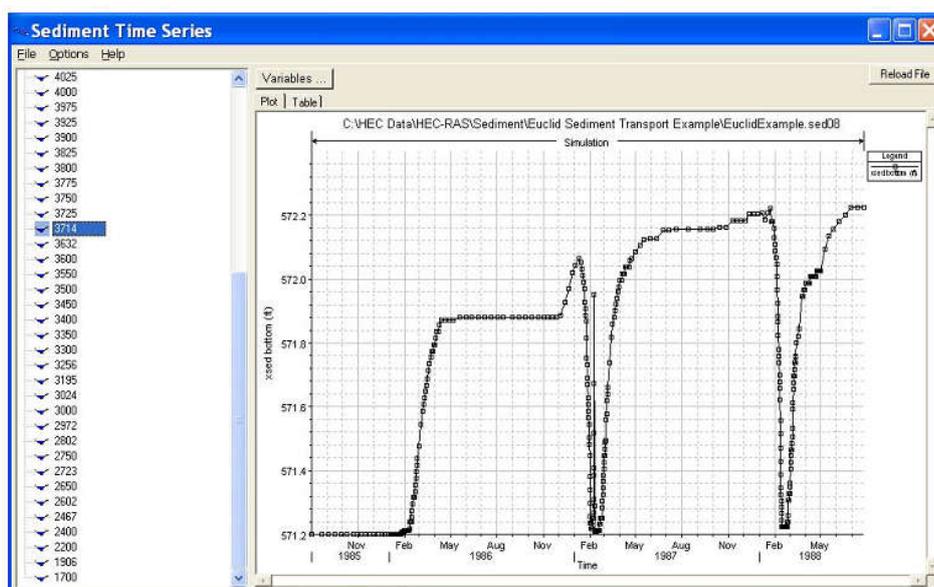


Figure VII-13 : Temps-série de dépôt épisodique et l'érosion calculée par HEC-RAS.

VII-3-1- Grain de classe Modification

Le processus de déplacement entre les modèles de différentes échelles consiste à faire des hypothèses à l'échelle grossière (traduisant par exemple la charge de MUSCLE en particulier des séries chronologiques de taille) et l'assouplissement des conditions requises pour le modèle d'échelle plus fine. HEC-RAS utilise les classes (vingt) de céréales, qui constituent des incréments égaux sur une échelle de \log_2 (à savoir la limite supérieure de chaque classe de grain est le double de la limite inférieure).

HEC-HMS a quatre classes de grains par défaut : argile, de limon, sable et gravier.

Les configurations de classe de grain doivent être conciliés afin de pouvoir utiliser ces modèles ensemble. HEC-RAS inclut une option pour renommer et redimensionner les bacs de classe de grain (figure VII-13) qui peuvent être utilisés pour coordonner les classes de grains entre les modèles.

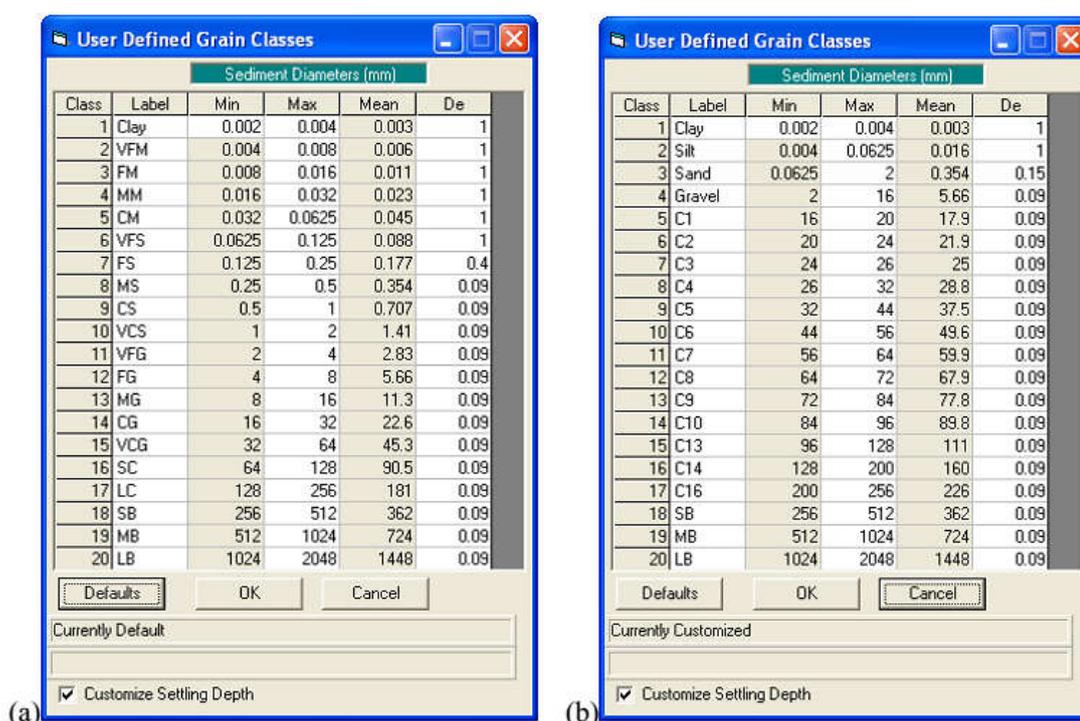


Figure VII-14 : Editeur de classe de grain dans HEC-RAS version 4.1 avec (a) valeurs et (b) quatre grandes classes de grains par défaut.

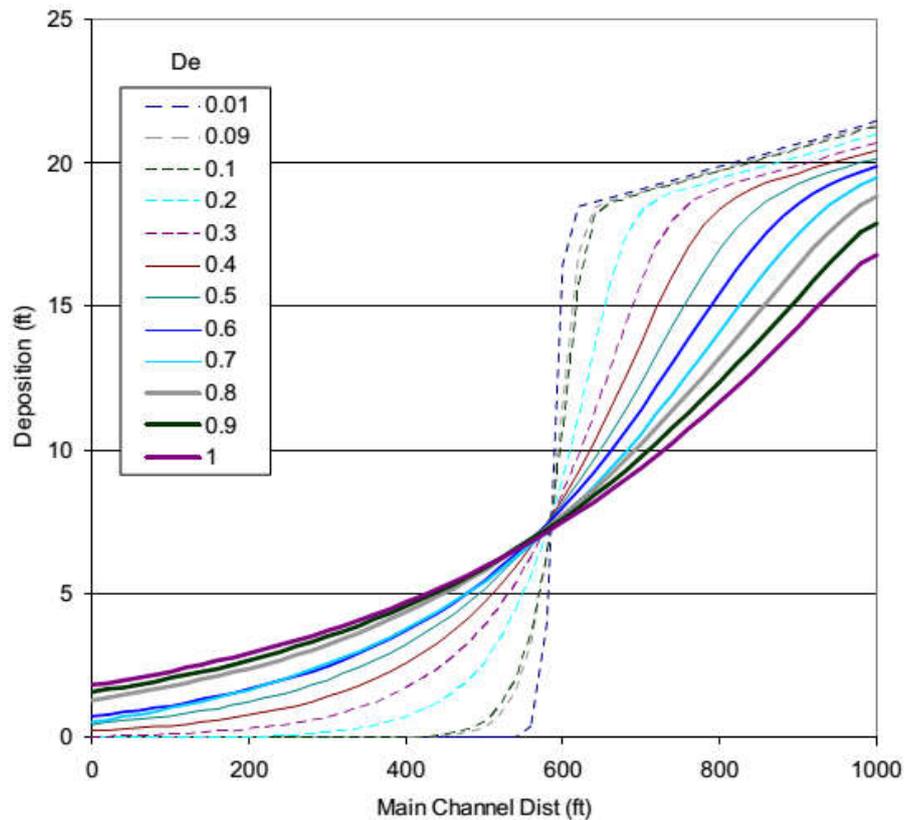


Figure VII-15 : Expérimentation numérique démontrant l'influence de régler la profondeur (D_e) sur la forme de l'avant de dépôt de sable dans un réservoir. De plus petits D_e de générer plus raides fronts de dépôt.

VII-3-2- Modèle Connection

HEC-HMS et HEC-RAS passent des séries chronologiques utilisant HEC système de stockage de données (HEC-DSS). HEC-DSS est largement utilisé pour fournir des hydrogrammes de HEC-HMS, pour les simulations instationnaires dans HEC-RAS, mais les conditions de délimitation des sédiments sont un peu plus idiosyncrasique parce qu'une condition frontière unique est associée à plusieurs enregistrements de séries chronologiques.

Dans d'autres conditions aux limites des sédiments HEC-RAS, une courbe de notation est utilisée pour répartir les charges de sédiments dans les fractions de classe de grain. Dans la fonction DSS, une condition limite de sédiments est composée de jusqu'à une série chronologique pour chaque classe de grain (figure VII-15). Il convient de noter que cette fonctionnalité a été ajoutée pour l'intégration avec le sédiment, laver les capacités de HEC-HMS, mais fonctionne également comme un outil général, pour importer les sédiments de séries temporelles par classe de grain si elles sont peuplées à un fichier DSS.

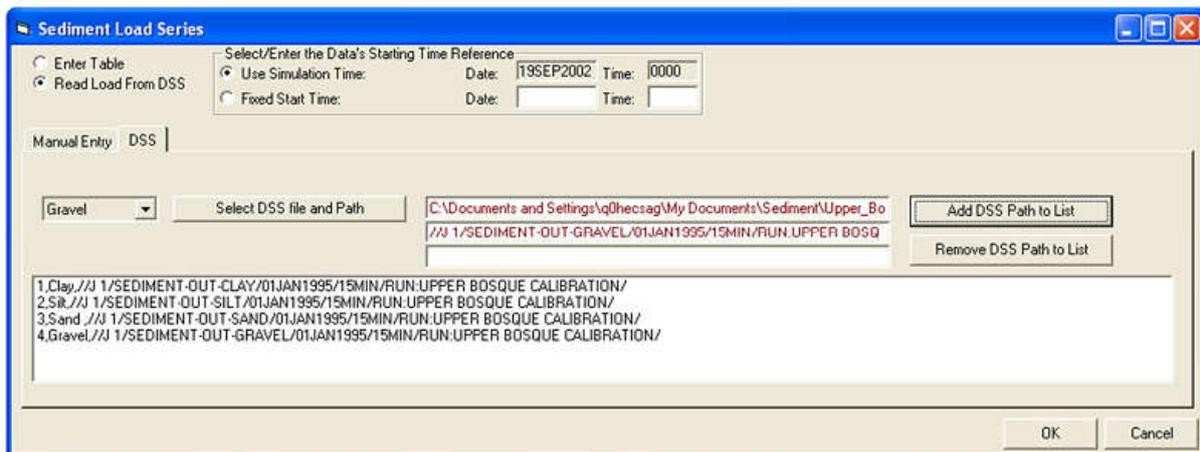


Figure VII-16 : Sédiments éditeur de la série de charge HEC-RAS. Sortie de sédiments HEC-HMS est utilisé comme condition à la limite amont de HEC-RAS.

VII-3-3- ADH

Il est intéressant de noter que l'approche de modélisation intégrée est multi-échelle, car de nombreux problèmes de sédiments sont fondamentalement de nature multidimensionnelle. Les modèles de sédiments USACE comprend ADH, un maillage adaptatif, modèle de sédiments multi-dimensionnelle (figure VII-16), développé au Laboratoire côtier et hydraulique du Centre de recherche et de développement Corps 'Engineering. Connexions DSS entre HEC-HMS / RAS et ADH sont en développement. Cela permettra aux outils HEC à être utilisés directement pour générer des conditions aux limites plus détaillées et des études localisées de phénomènes multidimensionnels.

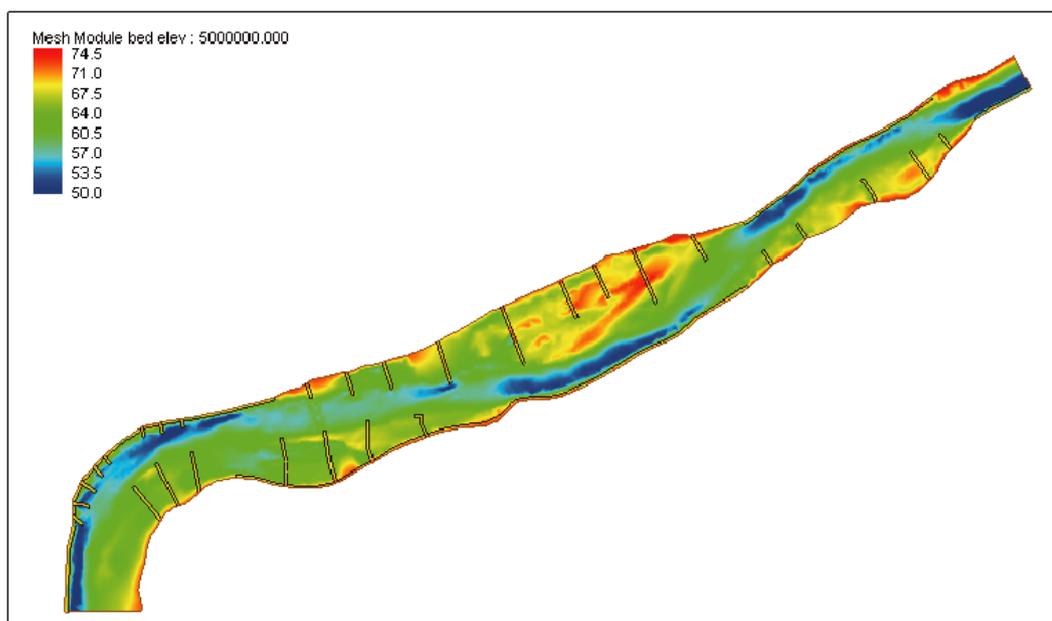


Figure VII-17 : Simulation du changement de lit en réponse à des structures de navigation (Tate et Berger, 2006)

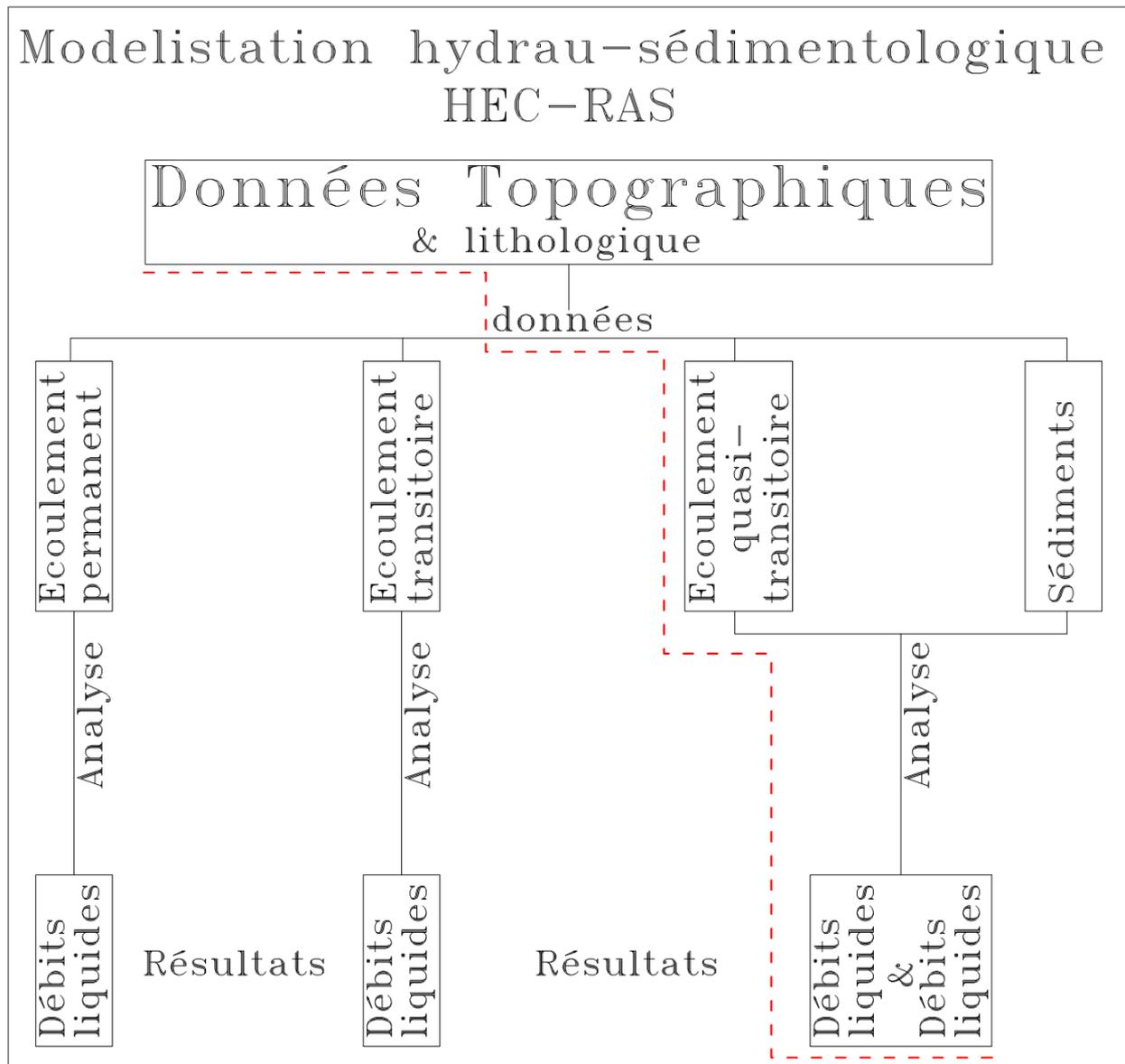


Figure VII-18 : Organigramme de la modélisation par HEC-RAS

VII-4- Conclusion

Des méthodes ont été ajoutées à HEC-HMS et HEC-RAS pour faciliter la modélisation des sédiments du bassin versant intégré. HEC-HMS traduit l'événement en débit total unique à partir de l'équation de MUSLE en multi-événement, des séries chronologiques de classe spécifique de grain, et la structure de classe de grains dans HEC-RAS peut être personnalisé afin de coordonner avec les résultats de précision inférieure du modèle à l'échelle grossière.

CHAPITRE VIII : Estimation de l'érosion des sols d'après le modèle *RUSLE*

VIII-1- Introduction

L'équation universelle de pertes en sol (Universal Soil Loss Equation : USLE) établie par Wischmeier et Smith en 1978 s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives. Elle est donnée par :

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (\text{VIII-1})$$

A = perte annuelle moyenne de sol (t/ha/an)

R = indice d'érosivité potentielle de la précipitation (MJmm/ha/an)

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.

L'USLE a été améliorée, dans le but du développement de l'équation universelle de perte de sol révisée (*RUSLE*) qui a la même équation de l'USLE, mais avec des améliorations pour vérifier les facteurs. ([Manuel d'agriculture N° 703 1997 USDA](#)).

Ses améliorations se résument en ([Unité hydrographique Aquin - Saint Luis du Sud 2010](#)) :

- Numérisation d'algorithmes pour faciliter les calculs.
- Nouvelles valeurs d'érosivité de pluies-écoulement (R) dans l'ouest des USA (conditions arides) basées sur plus de 1200 localités.
- Développement d'un terme de susceptibilité du sol à l'érosion périodiquement variable (K) et des méthodes alternatives d'estimation de (K) quand le monogramme n'est pas applicable (cas où la texture du sol ne se trouve pas dans le monogramme).
- Une nouvelle méthode pour calculer le facteur couverture-gestion (C), utilisant les sous-facteurs qui incluent l'utilisation préalable de la terre, de cultures, couverture végétale du sol (incluant des fragments de roche sur la superficie), et rugosité du terrain.
- Nouvelles formes d'estimer les facteurs de largeur et magnitude de la pente (LS) qui considèrent les pourcentages d'érosion en sillons et inter-sillons.

- La capacité d'ajuster le (LS) pour les pentes de forme variable ; et de nouvelles valeurs de pratiques de conservation (P) pour les cultures dans les bandes alternées, utilisation de drainage souterrain et prairies.

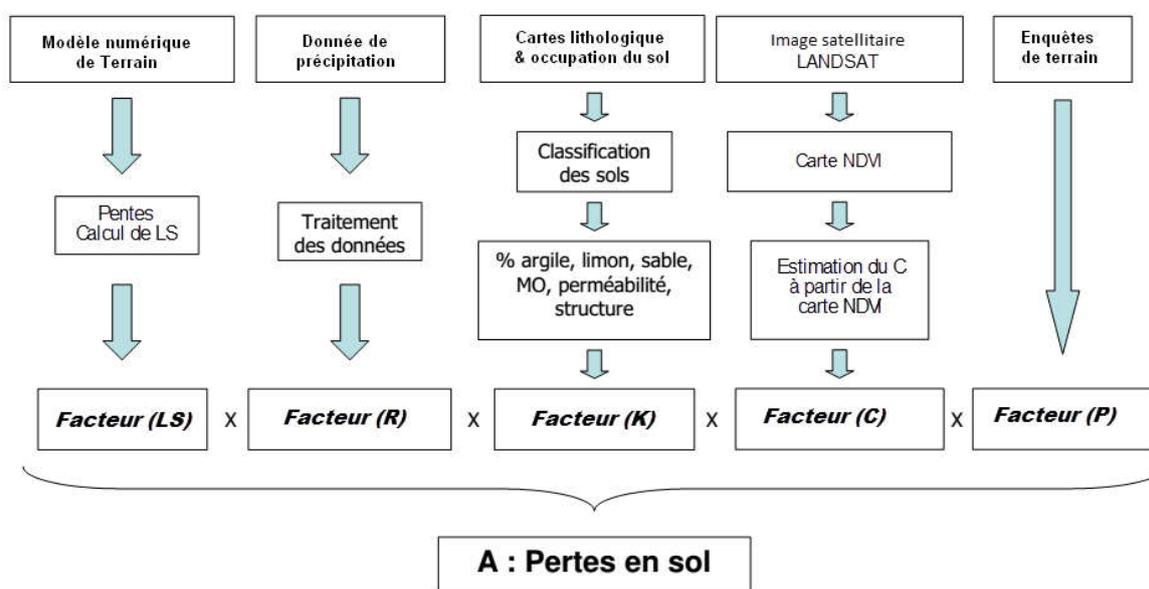


Figure VIII-1 : Concept du modèle USLE et RUSLE

L'approche utilisée pour la cartographie de l'érosion hydrique dans les bassins d'étude est basée sur le principe de superposition des différentes cartes thématiques, représentant les principaux facteurs de l'érosion, en vue de la production d'une carte de synthèse donnant une spatialisation quantitative de l'ampleur du phénomène à l'intérieur des bassins versants. Les cartes thématiques élaborées sont :

- * La carte des longueurs de pentes donnant l'influence du relief dans le processus de détachement et de transport des sédiments ;
- * Les cartes des isohyètes reflétant l'agressivité climatique ;
- * Les cartes de dureté du sol (lithologique et occupation du sol) indiquant sa résistance à l'érodibilité due à l'action du facteur climatique (pluie et ruissellement) ;
- * Les cartes de l'occupation des sols et du couvert végétal (élaboré à partir de l'image satellitaire) indiquant le degré de son influence sur l'érosion.
- * La carte des pratiques antiérosives.

VIII-2- Agressivité climatique (R)

La précipitation joue le premier rôle pour provoquer l'érosion. Wischmeier et al. (1978) ont corrélé plus de 40 facteurs climatiques ou météorologiques (hauteur de précipitation, différentes intensités caractéristiques, les conditions antécédentes de précipitations ou d'humidité, etc.) et leur relation avec l'érosion sur des parcelles standards nues et cultivées dans le sens de la pente.

La plus grande corrélation ($R = 0.90$) a été obtenue avec le produit de l'énergie de la pluie (E_c) et de l'intensité maximale de la pluie pour une période de 30 minutes (I_{30})

L'estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier & Smith nécessite donc la connaissance des énergies cinétiques (E_c) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) des gouttes de pluie de chaque averse. Elles sont données par la formule suivante :

$$R = K \cdot E_c \cdot I_{30} \quad (\text{VIII-2})$$

K étant un coefficient dépendant du système d'unités de mesure.

Cette formule a toujours été difficile à mettre en œuvre à cause du manque de données. Les seules données disponibles concernant les précipitations, dans les stations qui se trouvent dans le bassin ou à sa proximité, sont des moyennes mensuelles et annuelles.

Certains auteurs (Cortez 1991 - Renard 1996) ont utilisé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations annuelles pour déterminer le facteur R :

$$\text{Cortez :} \quad R = 2,8959 X + 0.002983 P^2 \quad (\text{VIII-3})$$

$$\text{Renard :} \quad R = 0,0483 \cdot P^{1.61} \quad (\text{VIII-4})$$

Où : R : représente l'indice annuel d'érosivité de la pluie en MJ mm/ha/hr ;

P : précipitation moyenne annuelle, en mm.

D'autres auteurs (Sadiki, 2004 - Soutter, 2007) ont utilisé des formules impliquent les précipitations mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur R :

$$\log R = 1,74 \log \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_i^2}{P} \right) + 1,29 \quad (\text{Sadiki, 2004}) \quad (\text{VIII-5})$$

$$R = \frac{P_h^2}{P_a} \quad (\text{Soutter, 2007}) \quad (\text{VIII-6})$$

Appelé aussi indice de Fourier.

Cette dernière équation a été modifiée par Arnoldus (1977), lequel a déterminé un indice climatique pour chaque mois et a utilisé par la suite la somme des douze valeurs obtenues pour construire un coefficient climatique.

Cet indice climatique connu sous le nom «d'indice de Fournier modifié» a été utilisé dans les études de développement de la FAO, un peu partout dans le monde, notamment dans les bassins méditerranéens.

Il s'écrit (DGACTA, 1995) :

$$R = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{Pa} \quad \text{(VIII-7)}$$

Où ; les P_i représentent les précipitations mensuelles et P les précipitations annuelles (mm).

L'utilisation de cette dernière équation n° VIII-7 permet de calculer le coefficient climatique pour chaque mois et d'appliquer le modèle USLE où (RUSLE) pour estimer les pertes en sol à l'échelle mensuelle.

Le facteur d'agressivité climatique mensuel calculé en utilisant la formule d'Arnoldus (VIII-7) pour les deux bassins, connaît une diversité importante durant le temps et dans l'espace, il varie de 0,0 MJmm/ha/an au mois de Juillet pour les deux bassins au 8,2 MJmm/ha/an durant le mois de Septembre aux sommets des Aurès.

R annuel varie de 12 MJmm/ha/an au Sud (Foum El-Guerza) à 20 MJmm/ha/an au Nord (Chemora) passant par des R qui dépassent 40 MJmm/ha/an (atteint 47 MJmm/ha/an) aux sommets des Aurès (lignes des partages des eaux entre les deux bassins) avec une moyenne de 28,50 dans l'ensemble des bassins versants.

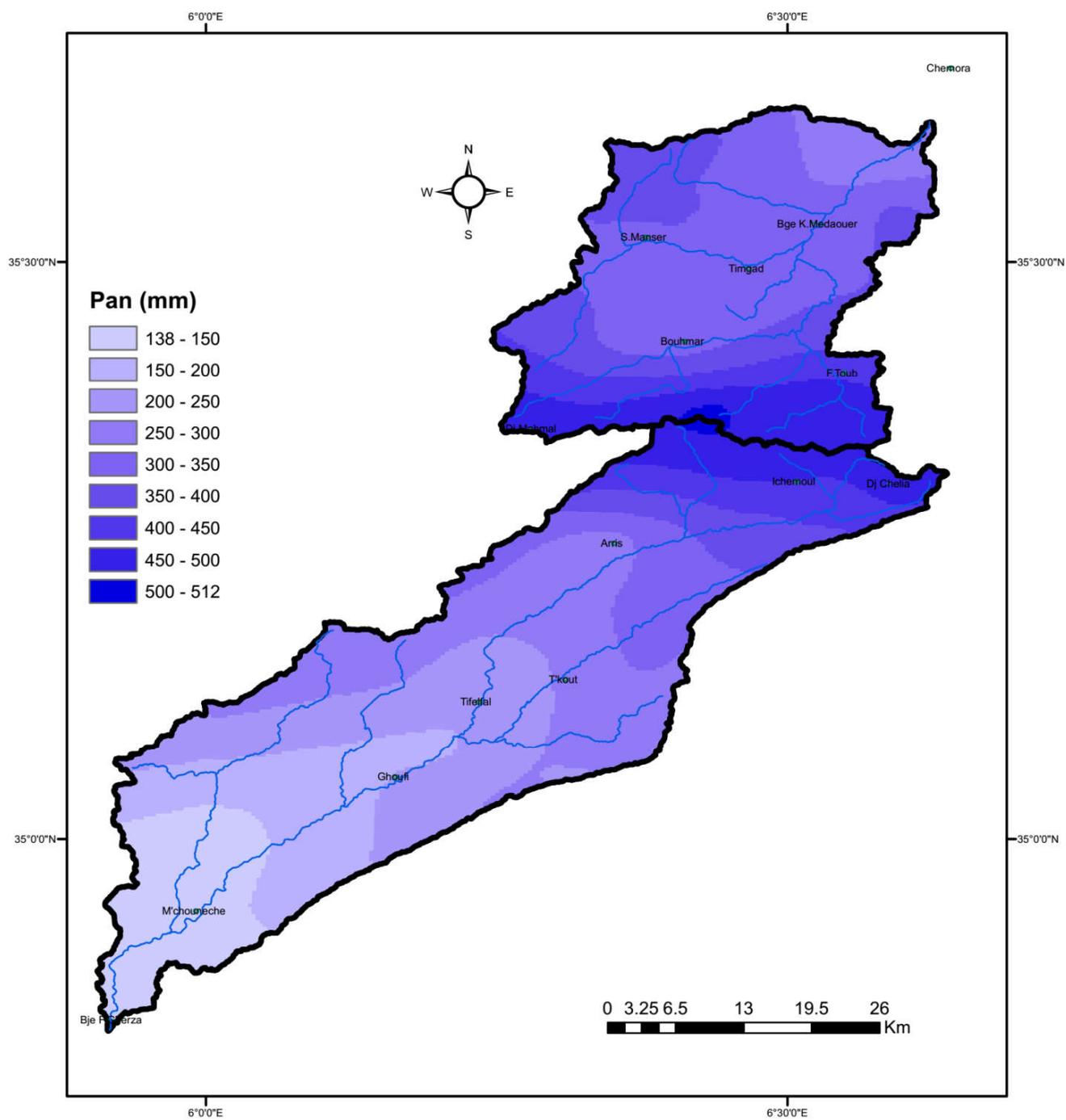
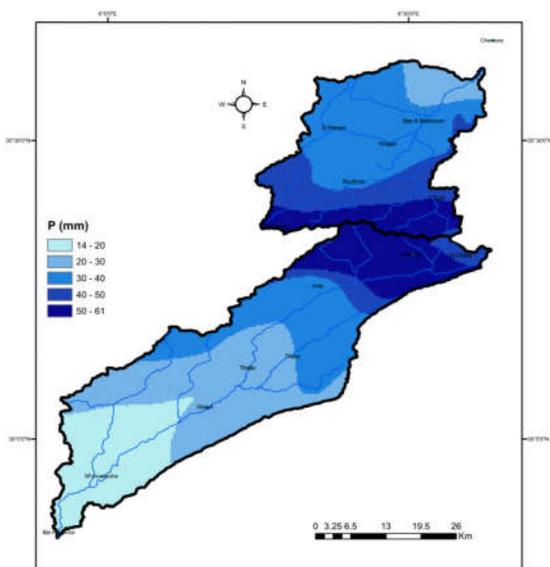
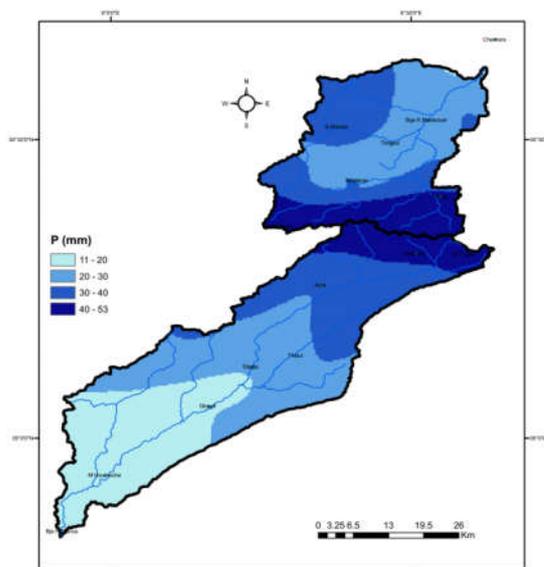


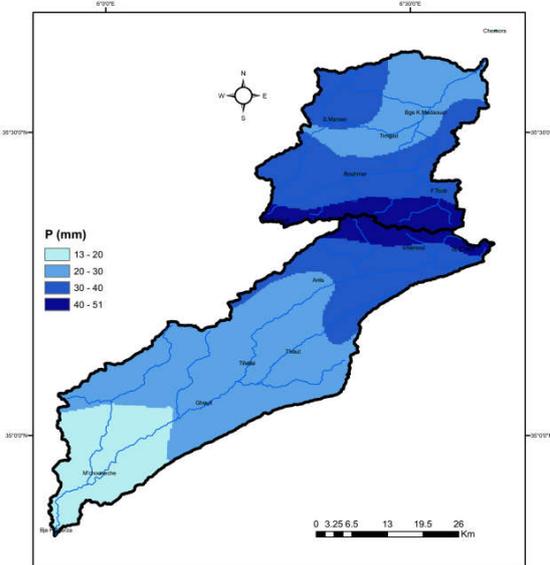
Figure VIII-2 : Précipitations annuelles dans les deux bassins (mm)



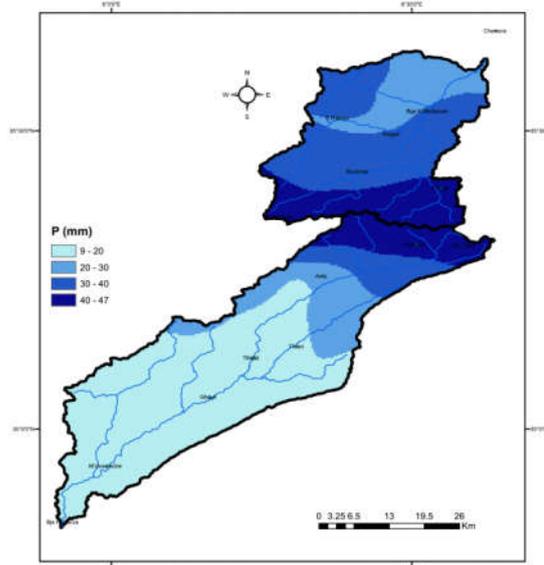
FigureVIII-3 : Précipitations mensuelles du mois de Septembre (mm)



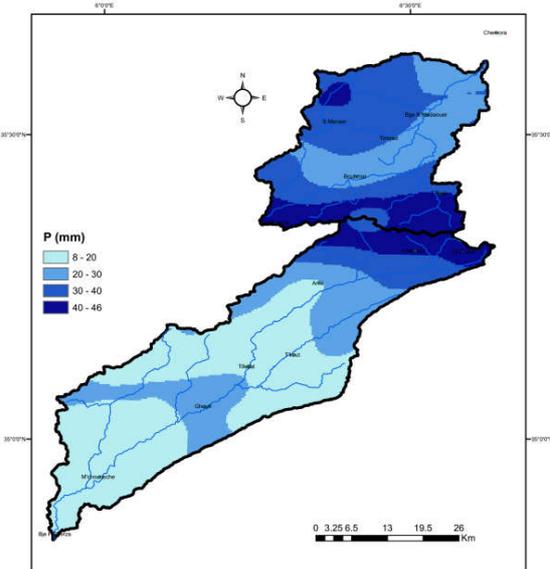
FigureVIII-4 : Précipitations mensuelles du mois d'Octobre (mm)



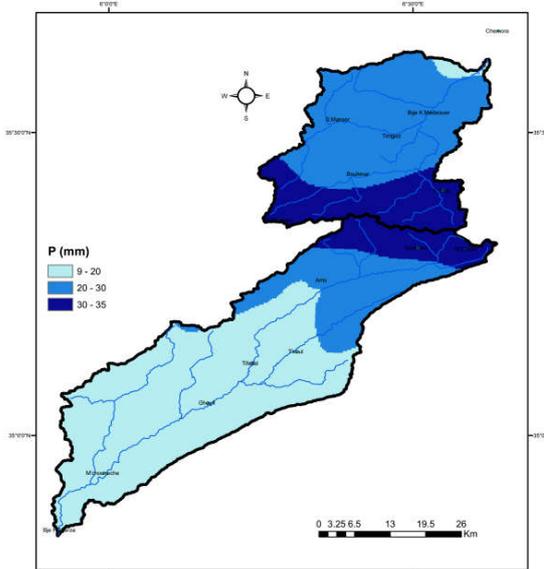
FigureVIII-5 : Précipitations mensuelles du mois de Novembre (mm)



FigureVIII-6 : Précipitations mensuelles du mois de Décembre (mm)



FigureVIII-7 : Précipitations mensuelles du mois de Janvier (mm)



FigureVIII-8 : Précipitations mensuelles du mois de Février (mm)

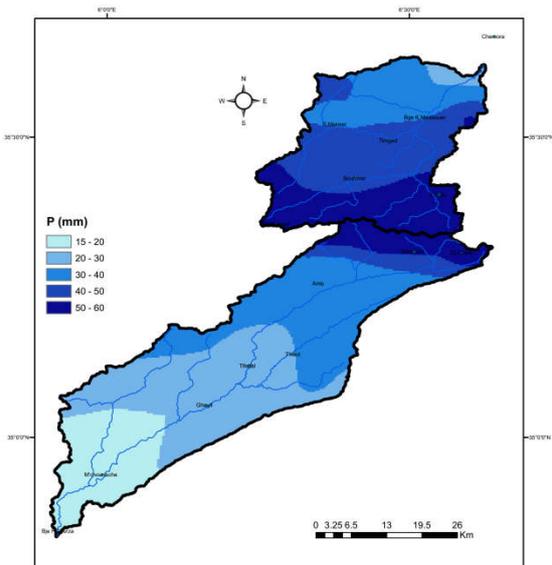


Figure VIII-9 : Précipitations mensuelles du mois de Mars (mm)

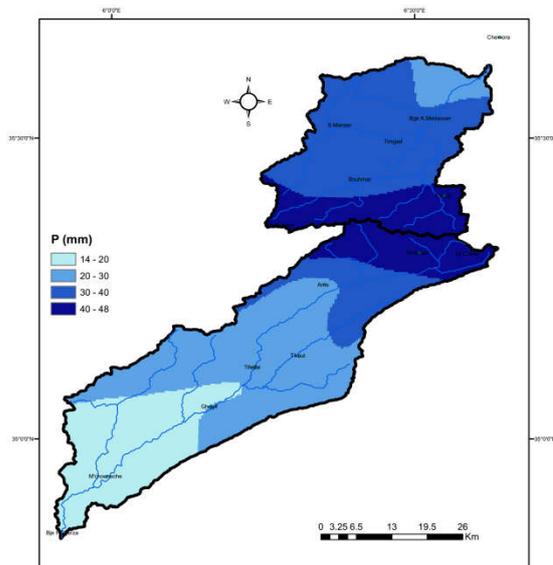


Figure VIII-10 : Précipitations mensuelles du mois d'Avril (mm)

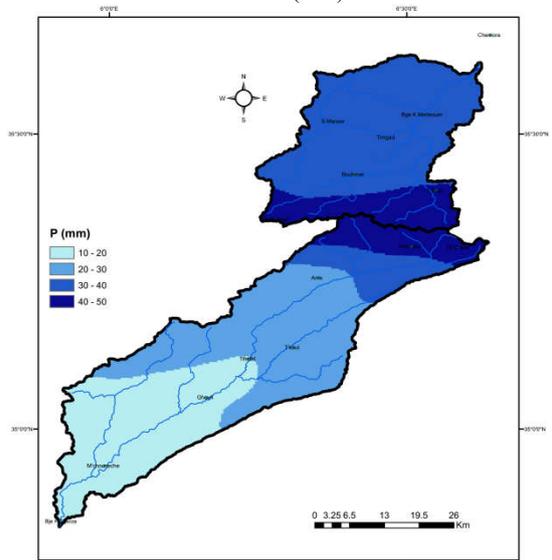


Figure VIII-11 : Précipitations mensuelles du mois de Mai (mm)

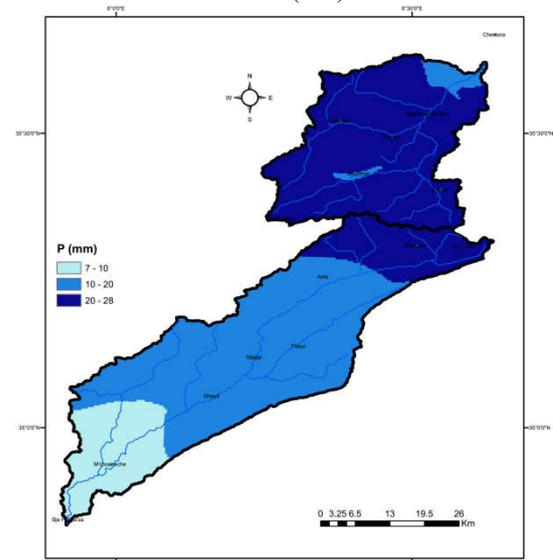


Figure VIII-12 : Précipitations mensuelles du mois de Juin (mm)

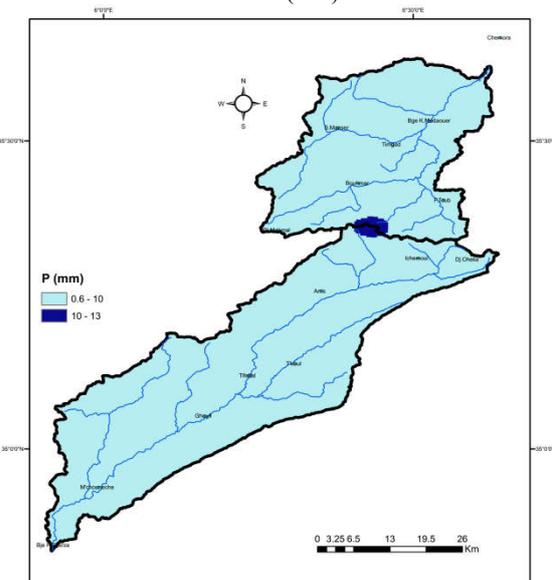


Figure VIII-13 : Précipitations mensuelles du mois de Juillet (mm)

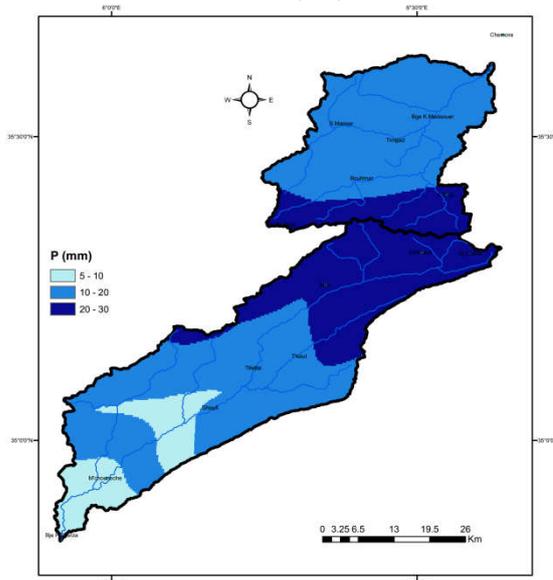


Figure VIII-14 : Précipitations mensuelles du mois d'Aout (mm)

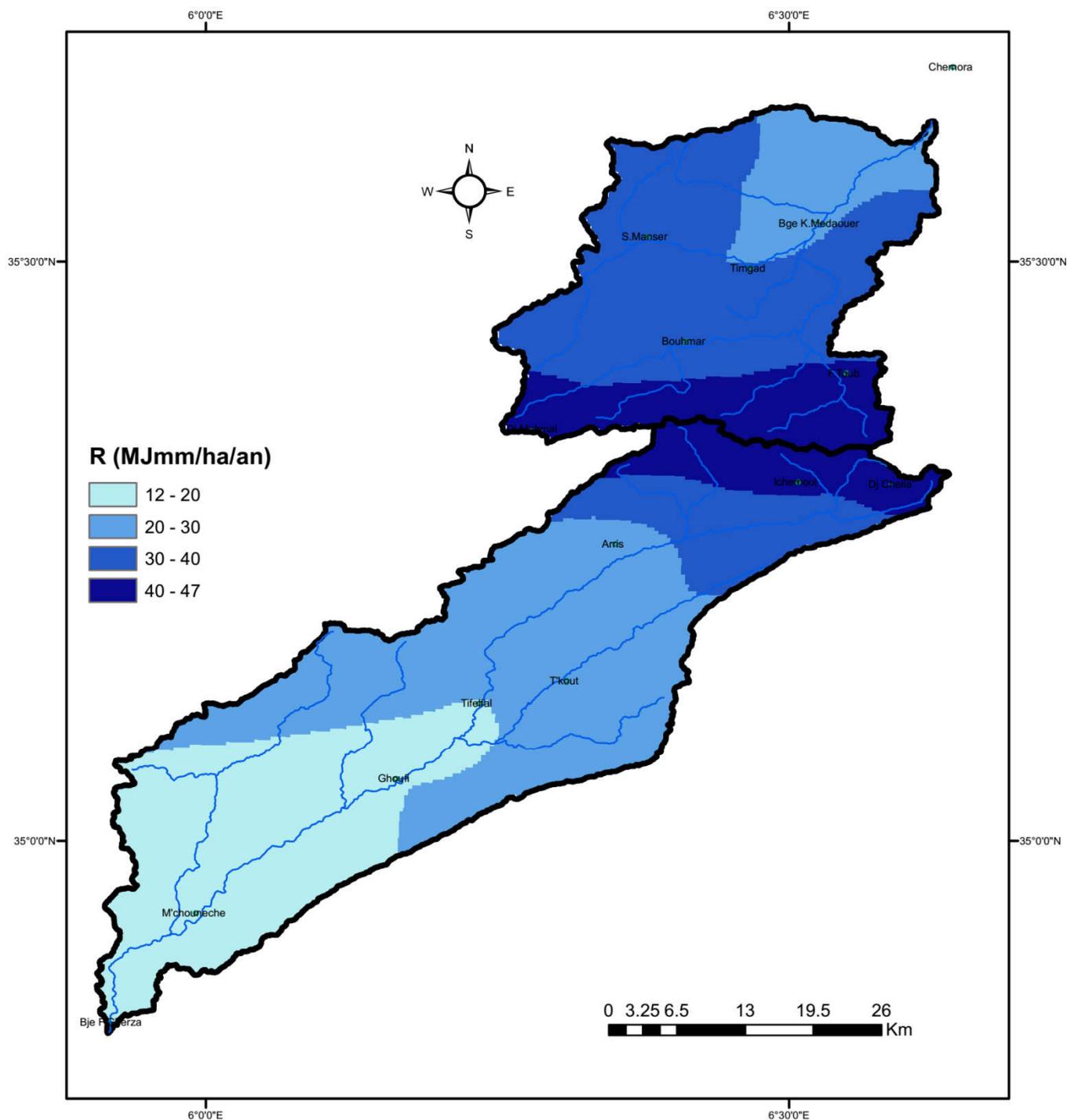


Figure VIII-15 : Facteur R annuel de l'érosivité potentielle de la précipitation

R (Mj mm/ha/an)

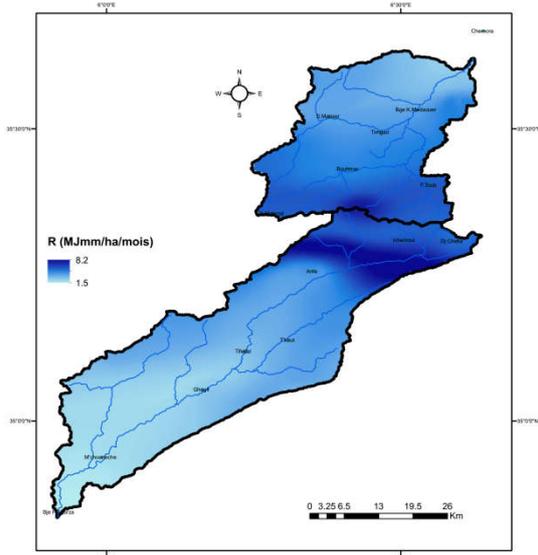


Figure VIII-16 : Facteur R du mois de Septembre (Mj mm/ha/Mois)

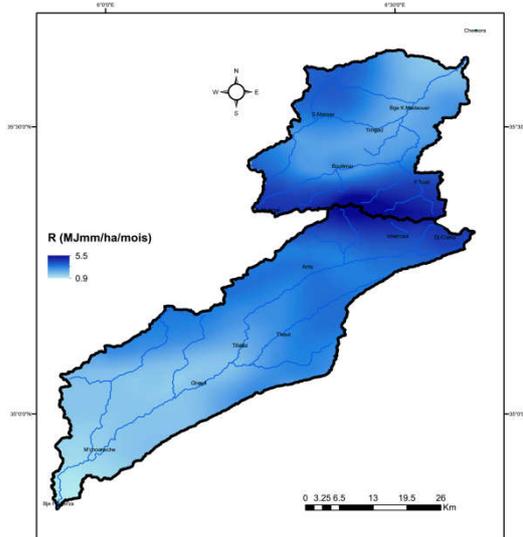


Figure VIII-17 : Facteur R du mois d'Octobre (Mj mm/ha/Mois)

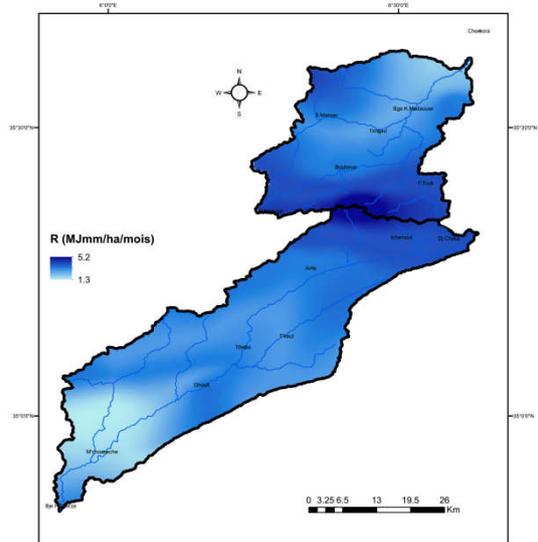


Figure VIII-18 : Facteur R du mois de Novembre (Mj mm/ha/Mois)

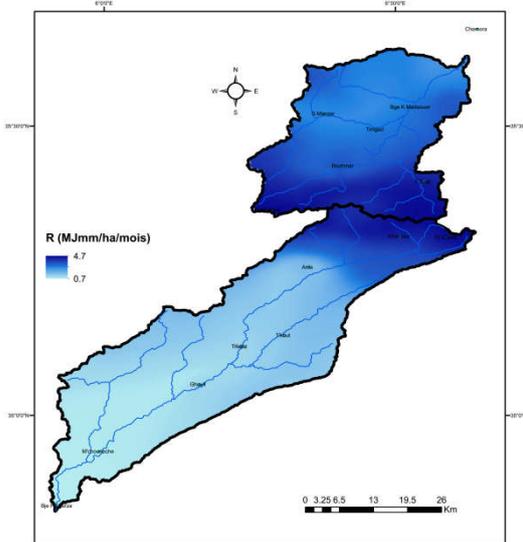


Figure VIII-19 : Facteur R du mois de Décembre (Mj mm/ha/Mois)

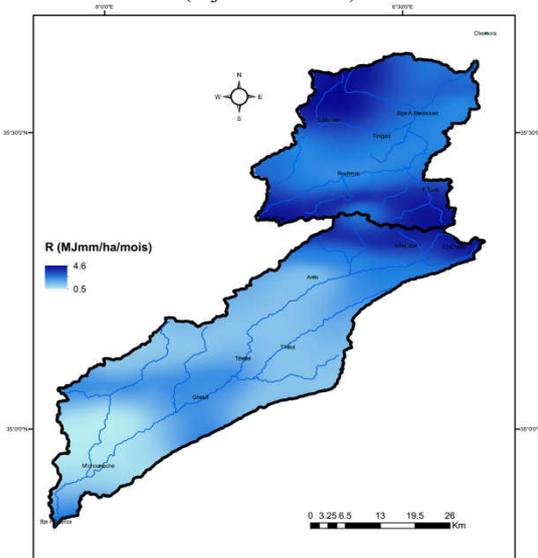


Figure VIII-20 : Facteur R du mois de Janvier (Mj mm/ha/Mois)

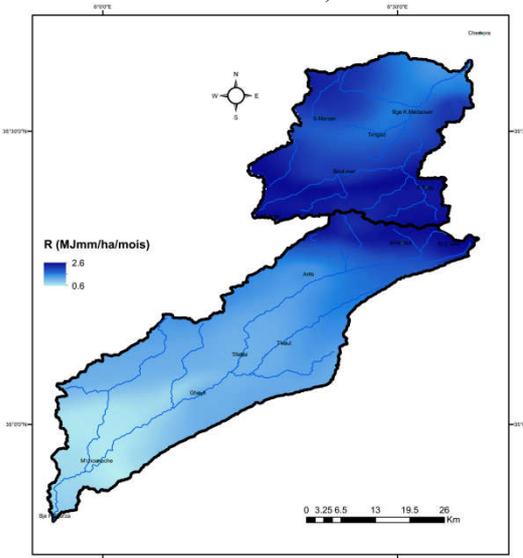


Figure VIII-21 : Facteur R du mois de Février (Mj mm/ha/Mois)

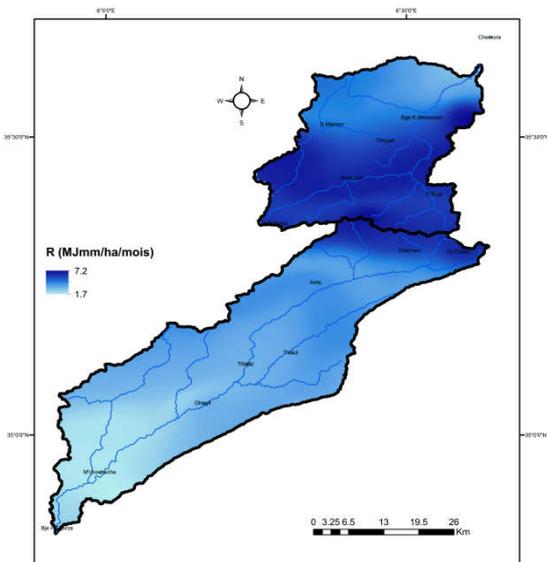


Figure VIII-22 : Facteur R du mois de Mars (Mj mm/ha/Mois)

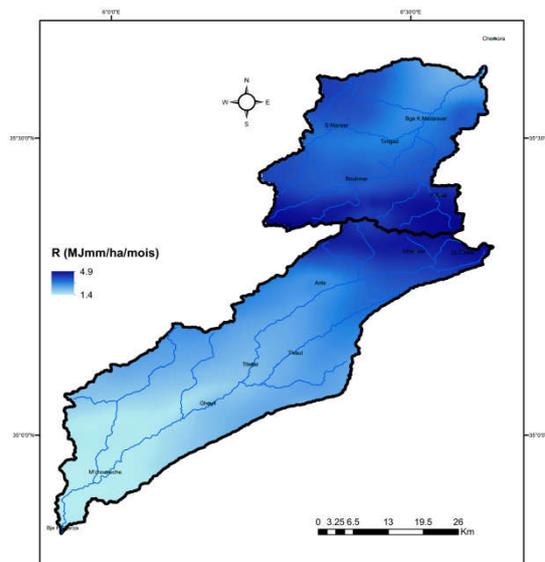


Figure VIII-23 : Facteur R du mois d'Avril (Mj mm/ha/Mois)

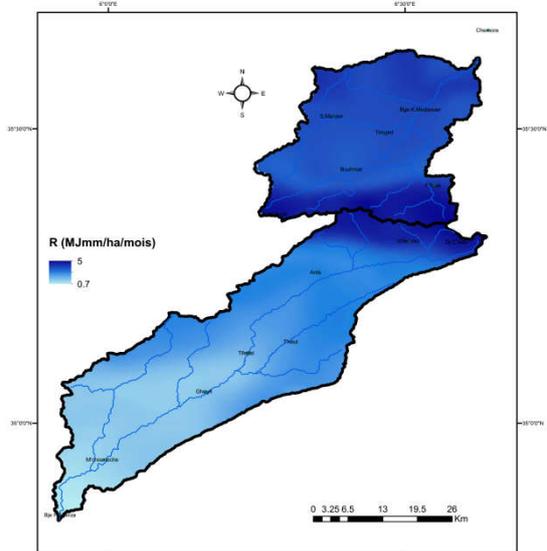


Figure VIII-24 : Facteur R du mois de Mai (Mj mm/ha/Mois)

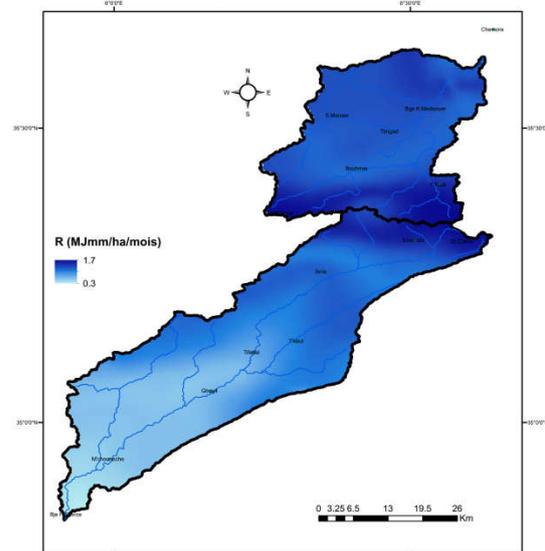


Figure VIII-25 : Facteur R du mois de Juin (Mj mm/ha/Mois)

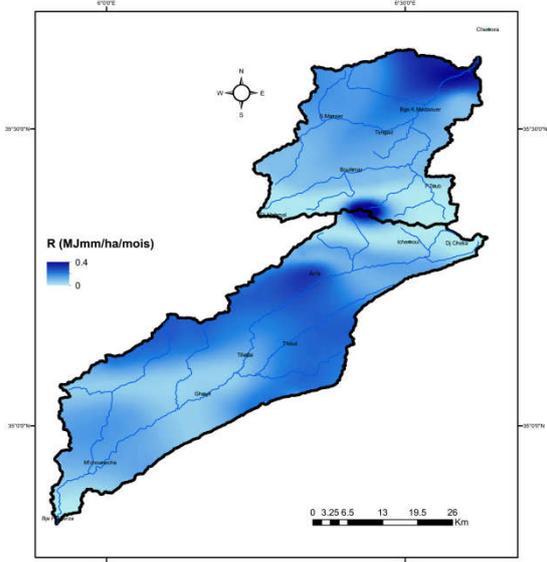


Figure VIII-26 : Facteur R du mois de Juillet (Mj mm/ha/Mois)

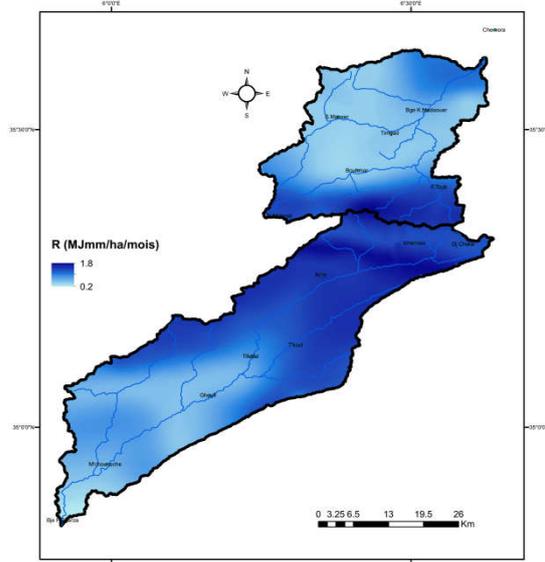


Figure VIII-27 : Facteur R du mois d'Aout (Mj mm/ha/Mois)

VIII-3- Facteur de l'érodabilité des sols (K) :

Le facteur d'érodabilité (K) d'un sol exprime sa sensibilité à l'érosion hydrique et dépend de ses propriétés intrinsèques à savoir sa texture, sa structure et sa perméabilité. Il se détermine pour un sol donné par la relation de WISHMEIER W.H. et SMITH D.D. (1978) :

$$100K = 2.1M^{1.14} * 10^{-4}(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \quad (\text{VIII-8})$$

Où M est calculé par la formule

$$M = (\% \text{ sable fin} + \% \text{ limon}) \times (100 - \% \text{ argile}) ;$$

a : est le pourcentage de matière organique ;

b : est le code de la perméabilité ;

c : est le code de la structure.

Tableau VIII-1 : 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 particulière	1
Assez structuré	2
Peu structuré	3
Non structuré	4

Tableau VIII-2 : 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

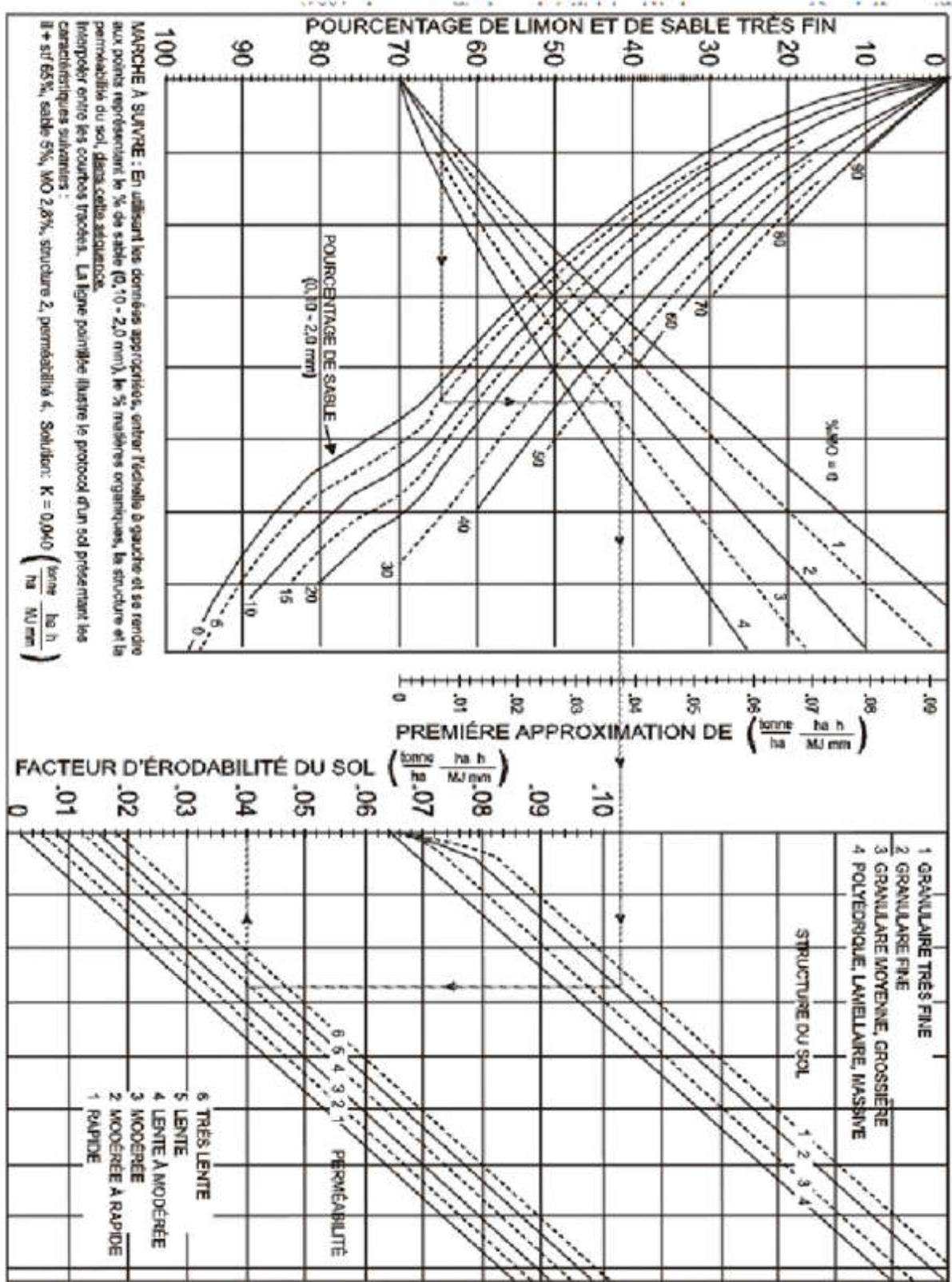


Figure VIII-28 : Nomogramme de l'érodibilité des sols (Foster., 1981, Foster, 1982).

Le facteur K doit être multipliée par 0,1317, pour qu'il soit dans le système des unités international SI. Les dimensions de K dans le SI sont : $T \cdot \text{ha} \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$

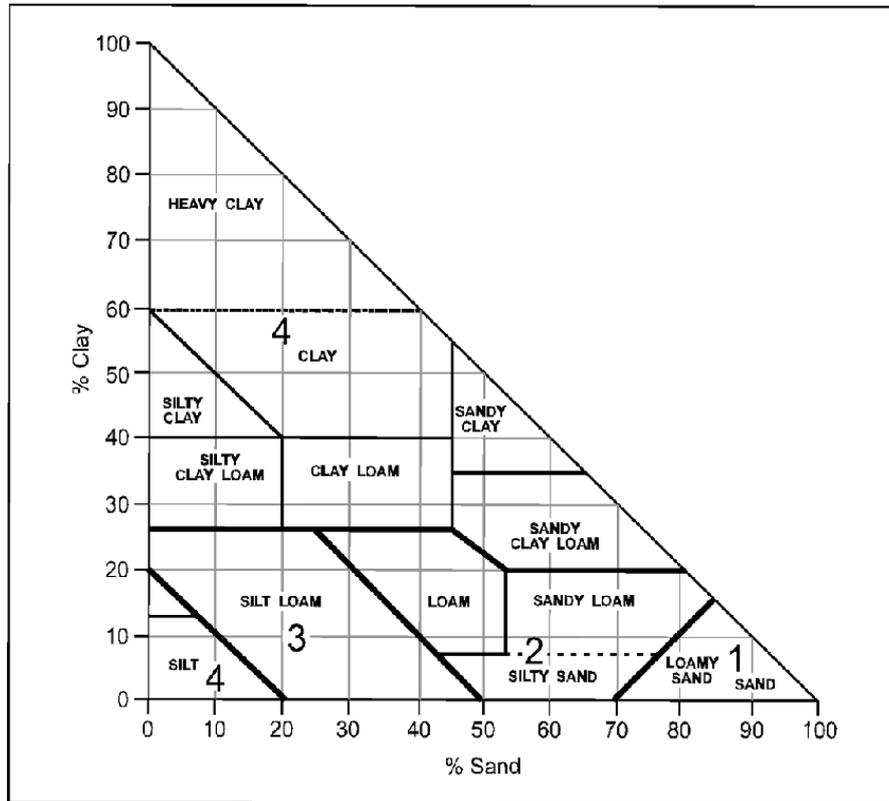


Figure VIII-29 : Code Structure basée sur la texture (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

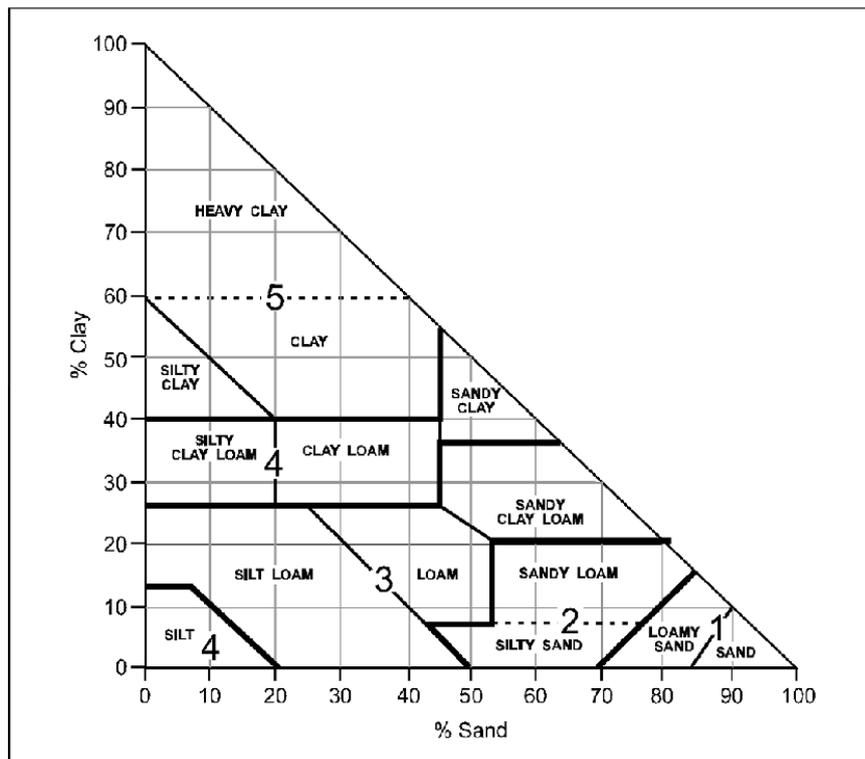


Figure VIII-30 : codes de perméabilité basés sur la classification des textures (Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, 1993)

Les valeurs de K correspondant à des types de sols ont été identifiées à partir de l'abaque d'érodibilité des sols (figure VIII-32) en tenant compte de la classe de perméabilité. Les valeurs de K estimées pour les groupes de lithologie varient de $0,19 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ au $0,96 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ avec une moyenne de $0,47 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

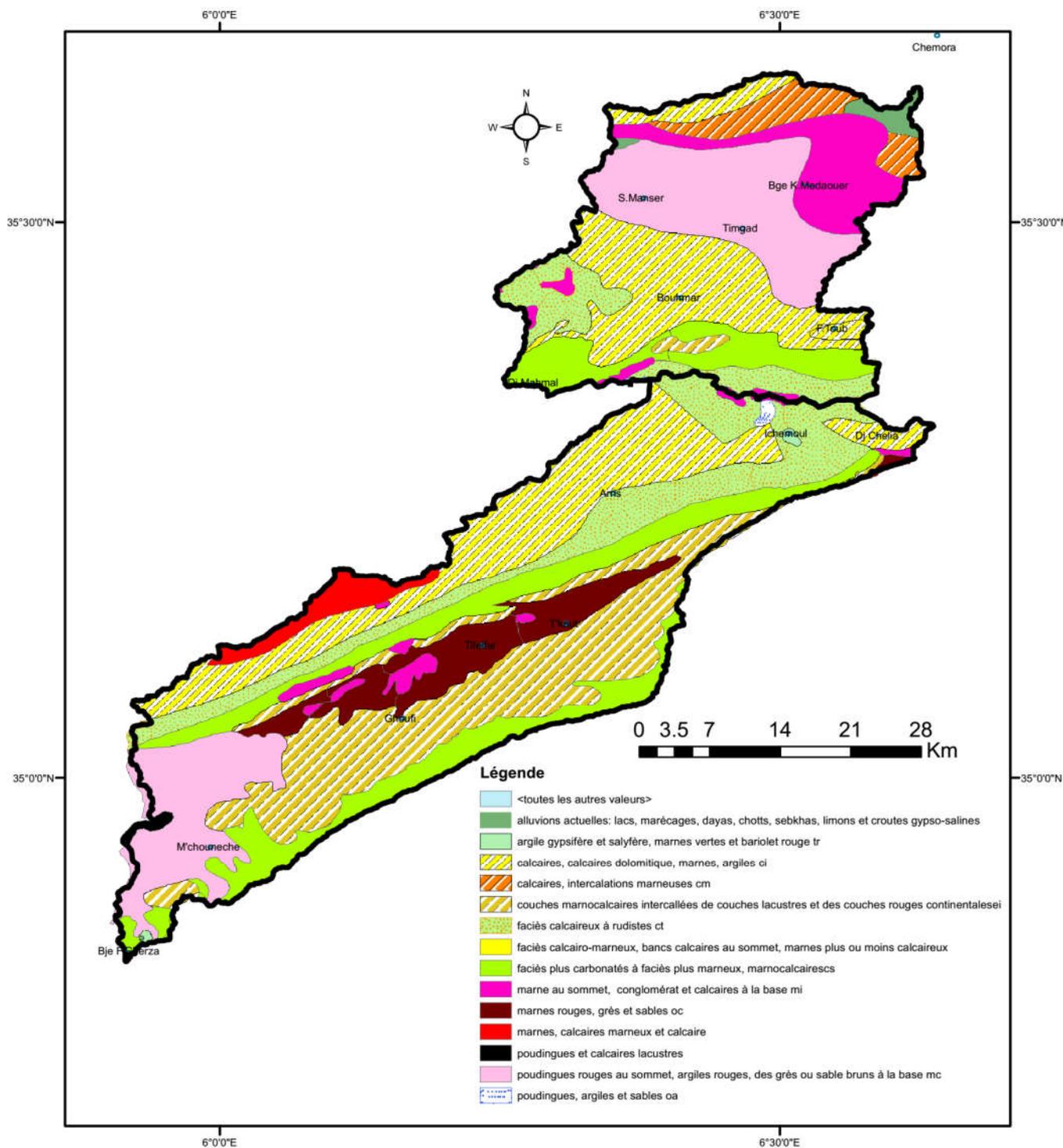


Figure VIII-31 : Carte lithologique des bassins versants « établie à partir de la carte géologique des Aurès (Lafite 1939) »

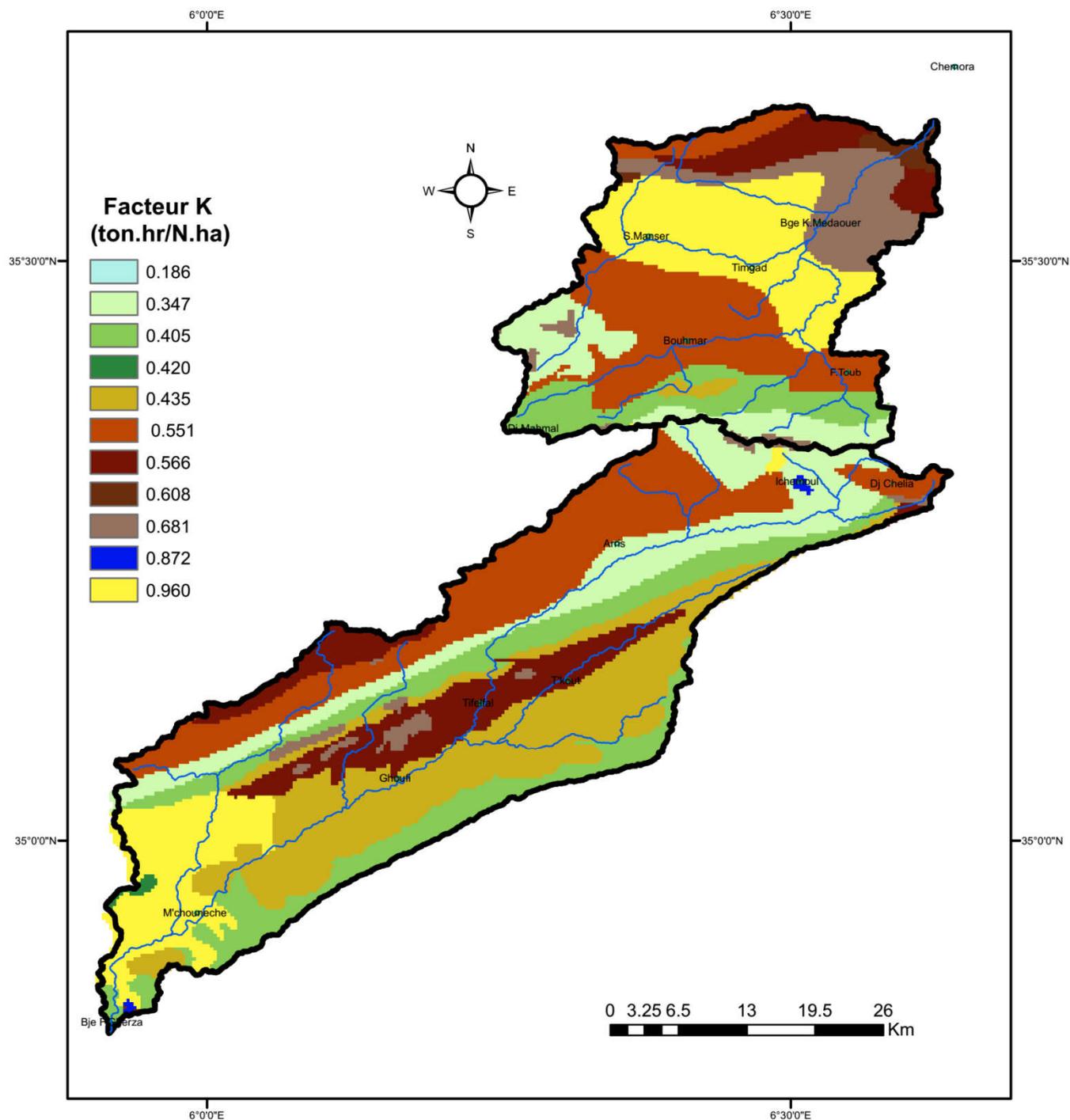


Figure VIII-32 : Carte du facteur K (SI) à partir des données K interpolées du nomogramme de l'érodibilité des sols (Foster 1982)

VIII-4- Facteur topographique (LS)

L'indice (LS) exprime l'importance des pertes en sol, pour une pente et une longueur de pente donnée, relativement à celle d'une parcelle standard ayant une longueur de 22 m, une pente de 9° et un LS de valeur égale à 1. Pour la détermination de ce facteur (LS), il faut tout d'abord dresser la carte des pentes des bassins versants à partir du modèle numérique de terrain. Le facteur (LS) a

été, par la suite, calculé pour chaque parcelle à partir de son inclinaison et la longueur de sa pente par la formule de RENARD K.G, 1997 (Revised USLE : *RUSLE*) :

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad (\text{VIII-9})$$

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (\text{VIII-10})$$

$$\beta = \left(\frac{\sin \theta}{0,0896} \right) / (3 * (\sin \theta)^{0,8} + 0,56) \quad (\text{VIII-11})$$

$$S = 10,8 \sin \theta + 0,03 \quad \text{Pour les pentes } < 9\% \quad (\text{VIII-12})$$

$$S = 16,8 \sin \theta - 0,50 \quad \text{Pour les pentes } \geq 9\%$$

$$\theta: \text{Angle par rapport à l'horizontale.} \quad (\text{VIII-13})$$

Où :

L : Facteur de la pente,

S : Facteur de l'inclinaison,

λ : Longueur de la pente en m,

θ : Angle par rapport à l'horizontale,

m_p : Un paramètre qui varie en fonction de la pente (Tableau VIII-3),

Tableau VIII-3 : Valeurs du paramètre (m_p) en fonction de la variation de la pente (RENARD K.G. et al, 1997)

Valeurs de la pente P_e	valeurs du paramètre m_p
$P_e \geq 5 \%$	0,5
$3\% \leq P_e < 5 \%$	0,4
$1\% \leq P_e < 3 \%$	0,3
$P_e < 1\%$	0,2

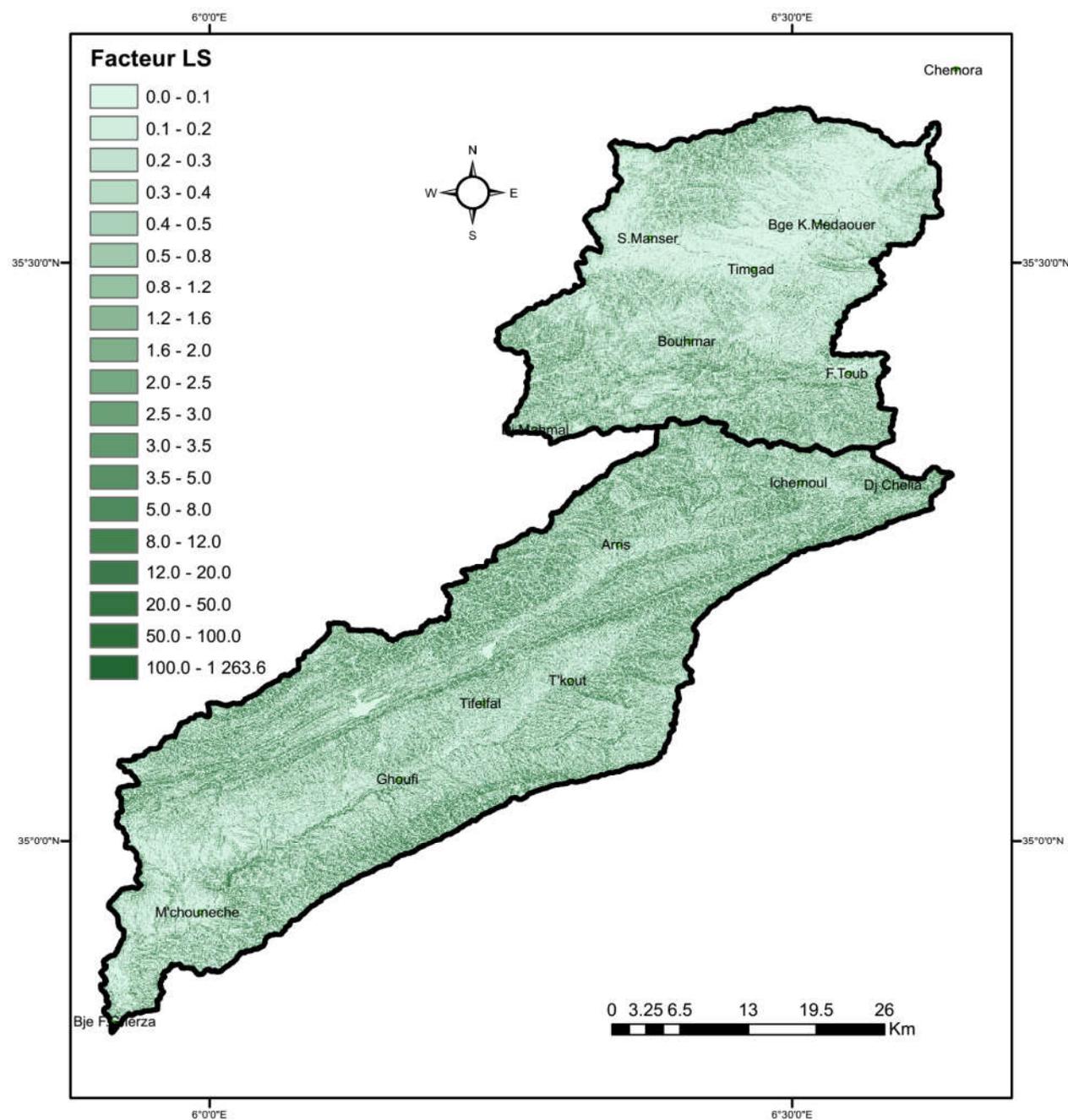


Figure VIII-33 : Carte du facteur LS

La majeure partie des bassins (94,48 %) est caractérisée par des valeurs du facteur *LS* faibles avec une moyenne de 15,25 pour l'ensemble des bassins.

Ce facteur est plus faible dans le bassin d'Oued Chemora que dans le bassin d'Oued Labiod.

VIII-5- Le couvert végétal (occupation du sol C) :

Le facteur C indique comment le plan de conservation affectera la perte et comment la perte potentielle de sol sera distribuée dans le temps durant les activités de construction, rotations de culture ou autres schémas de gestion (Wall et Shelton 2002).

Ce facteur sans dimension est estimé à partir de l'indice de végétation normalisé dérivé NDVI déterminé de l'imagerie satellitaire, l'approche basée sur le NDVI été utilisée pour obtenir des valeurs approximées du facteur C (Tidjani, Khorsi et Ziani 2010). En fait, La valeur du facteur C dépend de la nature de la végétation et du pourcentage du couvert végétal (Tidjani, Khorsi et Ziani, 2010). Ce dernier peut être estimé par l'écart normalisé de l'indice de végétation (NDVI) (Jensen, 2000).

Les images satellitaires choisies dans cette étude sont celle du LANDSAT5 du 25 Janvier, 11 Mars, 18 Juin et 21 Octobre 2011.

Ces images représentent les quatre saisons de l'année d'une part, d'autre part, elles sont prises durant des journées claires (non nuageuses et non neigeuses). Les figures VIII-35, VIII-36, VIII-37 et VIII-38 présentent les valeurs du NDVI dans les deux bassins versants.

La classification de la végétation est réalisée suivant les conditions de seuillage suivantes (Tidjani, Khorsi et Ziani 2010):

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 :

$$C = 1,1119.NDVI^2 - 2,0976.NDVI + 0,9944 \quad (\text{VIII-14})$$

Les cartes du facteur C (figures VIII-39, VIII-40, VIII-41 et VIII-41) 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).

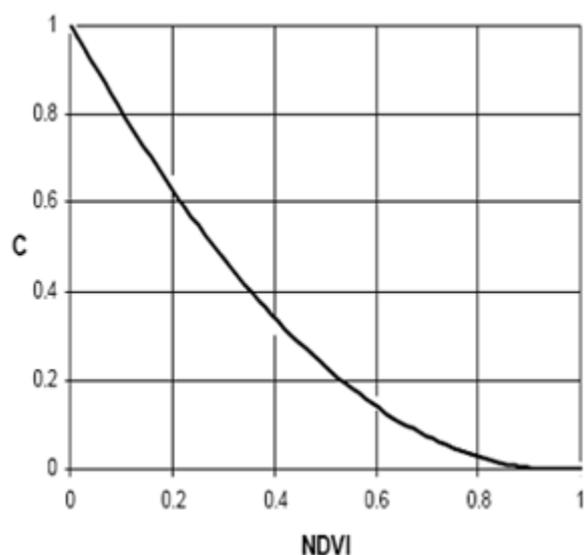


Figure VIII-34 : Diagramme expérimental d'estimation du facteur C de Gitas *et al.* (2009).

La majeure partie des bassins est caractérisée par des valeurs du facteur C supérieures à 0,8 pour les mois de Janvier et d'Octobre avec des moyennes de 0,92 et 0,90 respectivement ; tandis que pour les mois de Mars et de Juin, la majeure partie des bassins est caractérisée par des valeurs du facteur C supérieures à 0,6 avec des moyennes de 0,82 et 0,79 respectivement.

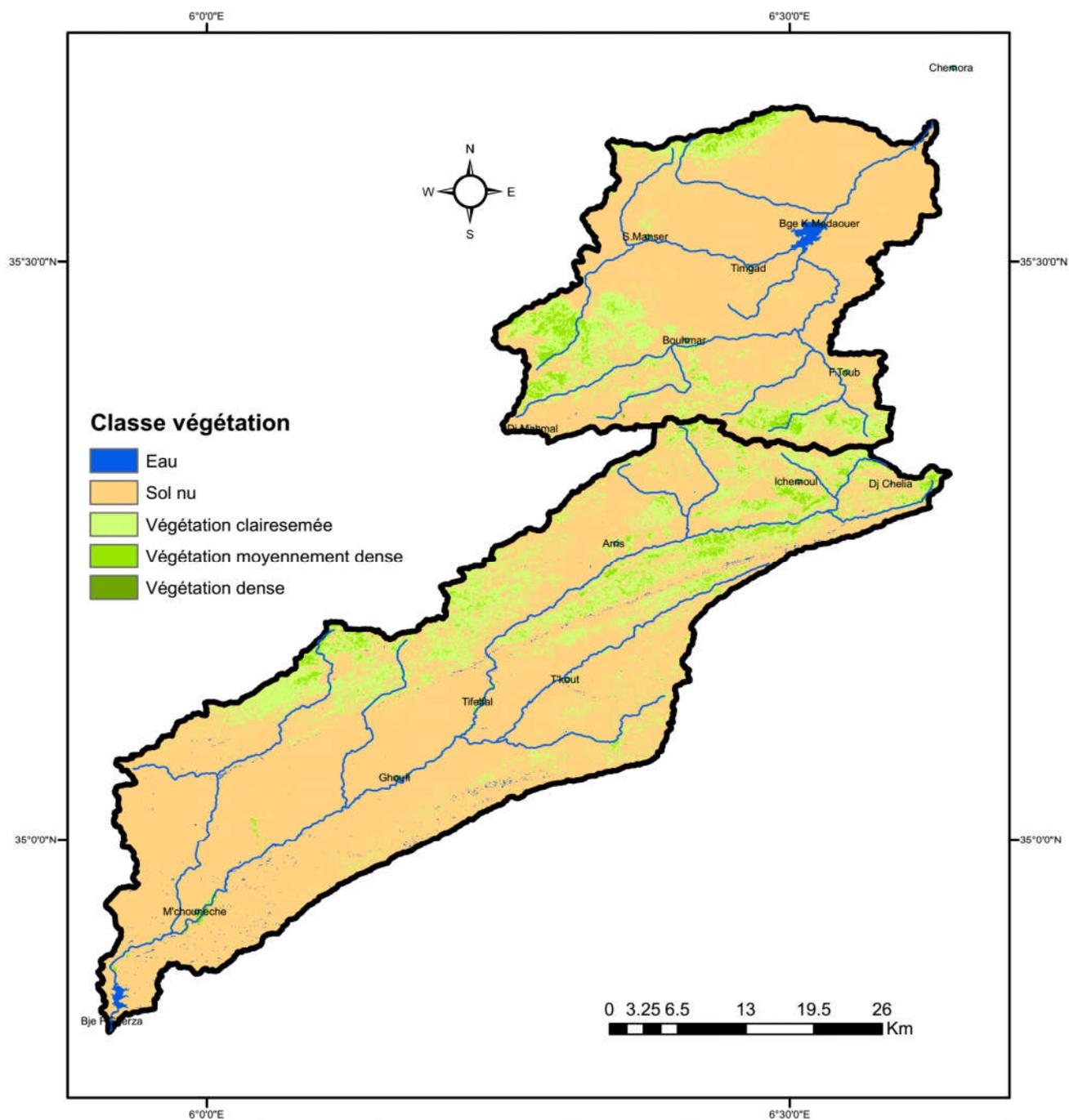


Figure VIII-35 : Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT5 du 25 Janvier 2011.

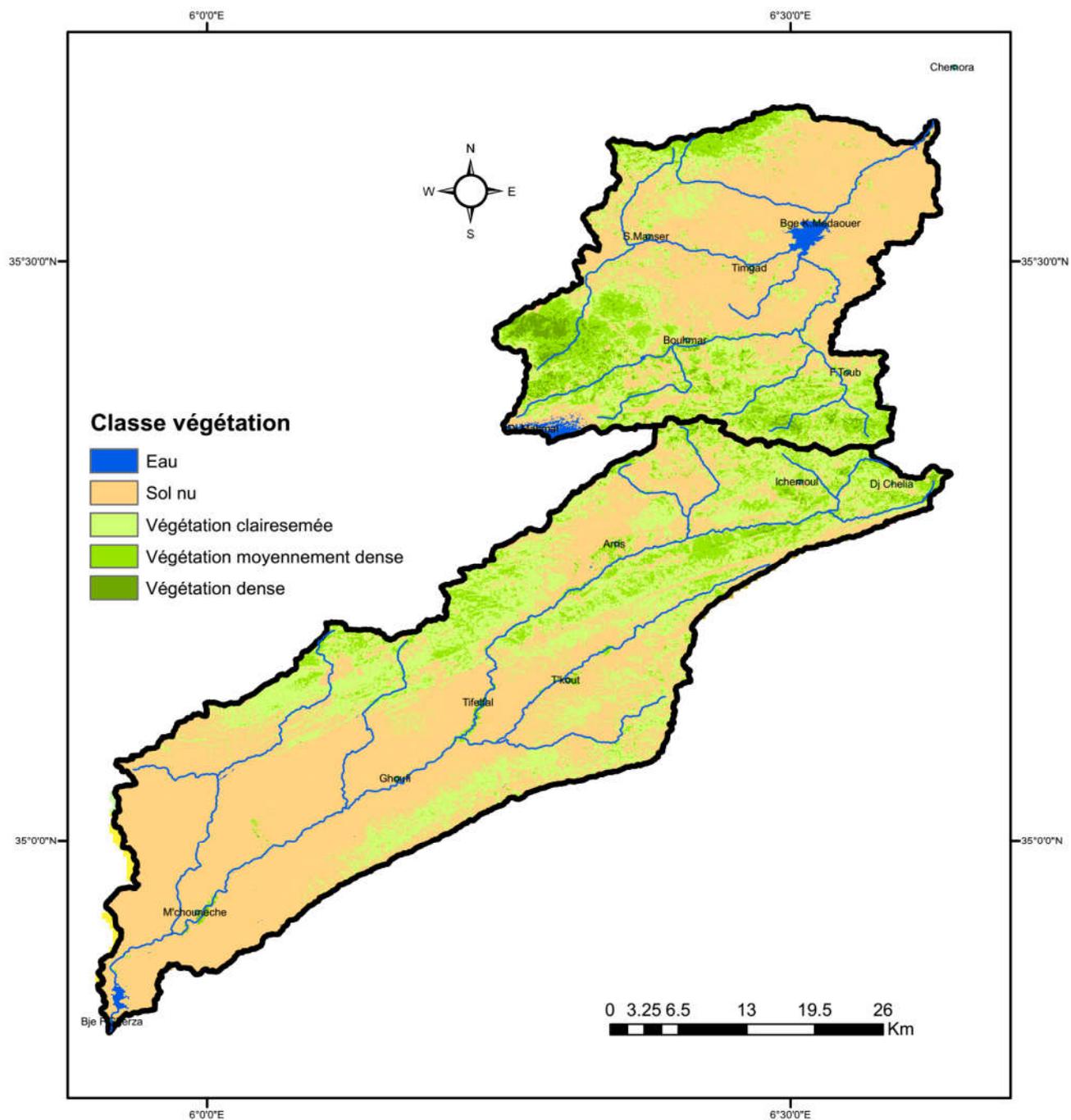


Figure VIII-36 : Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT5 du 11 Mars 2011.

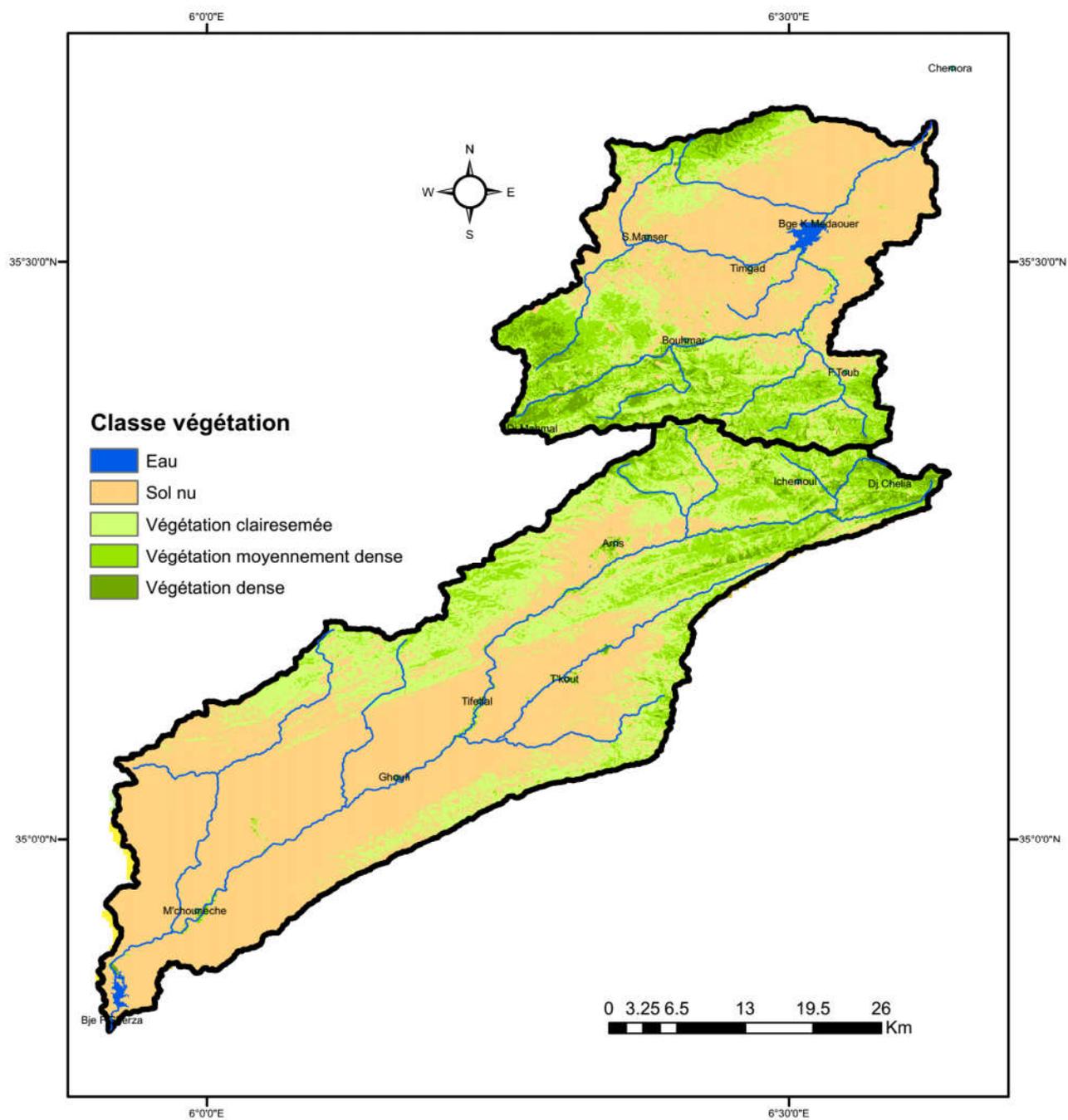


Figure VIII-37 : Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT5 du 18 Juin 2011.

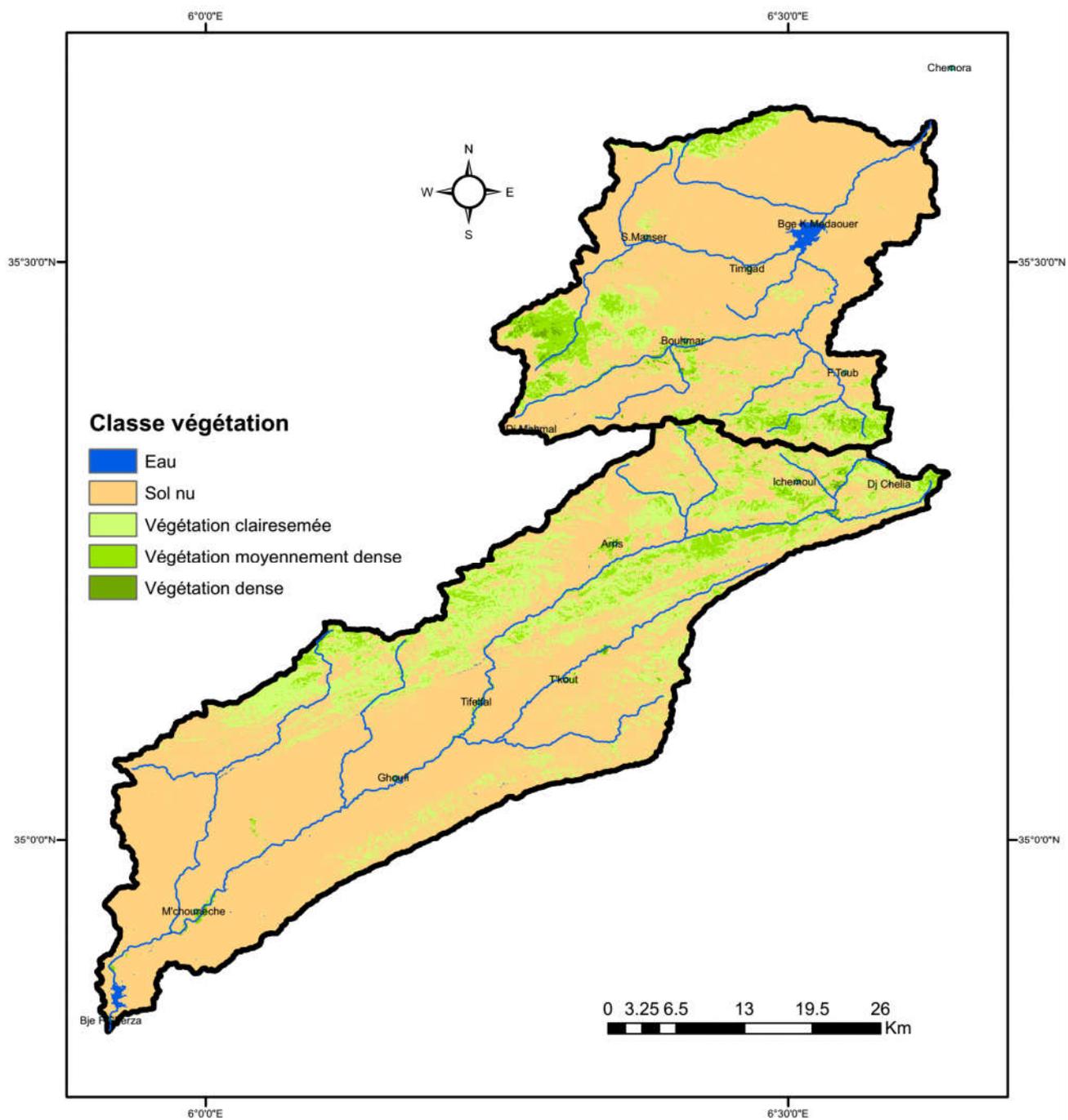


Figure VIII-38 : Carte des valeurs du NDVI générée à partir de la transformation de l'image satellite LANDSAT5 du 21 Octobre 2011.

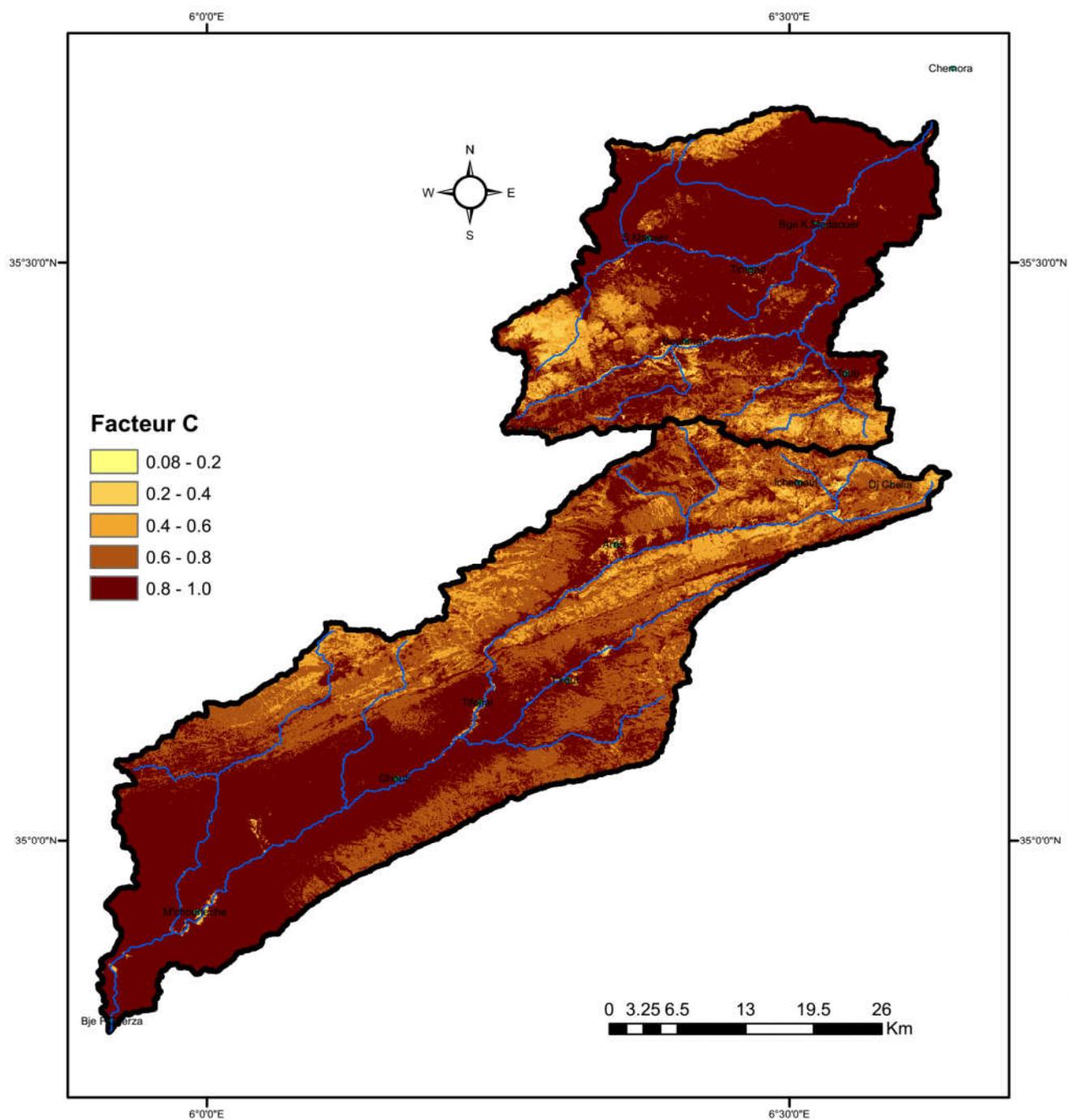


Figure VIII-39 : Carte de distribution spatiale du facteur C dans les deux bassins du 25 Janvier 2011

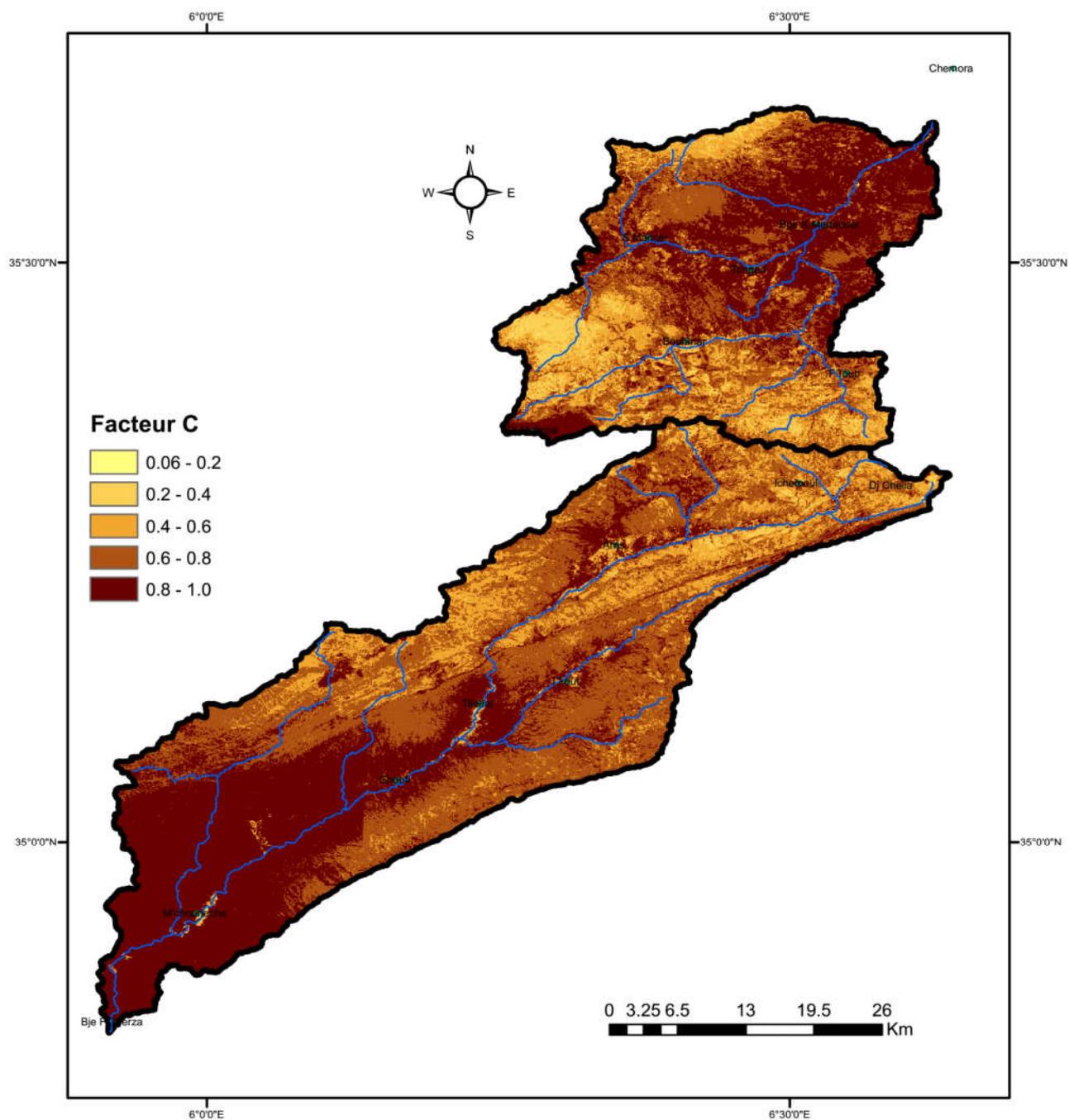


Figure VIII-40 : Carte de distribution spatiale du facteur C dans les deux bassins du 11 Mars 2011

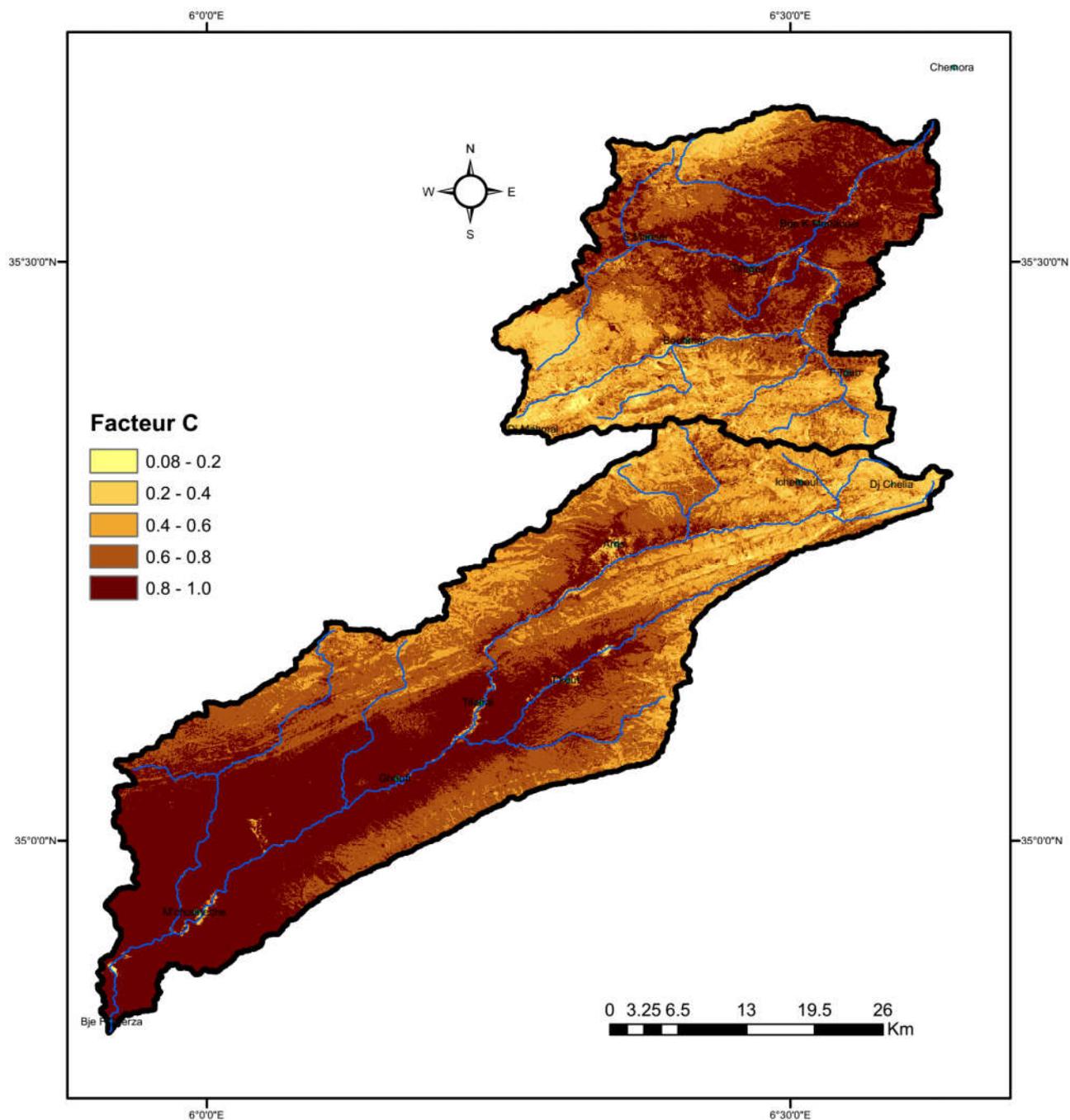


Figure VIII-41 : Carte de distribution spatiale du facteur C dans les deux bassins du 18 Juin 2011

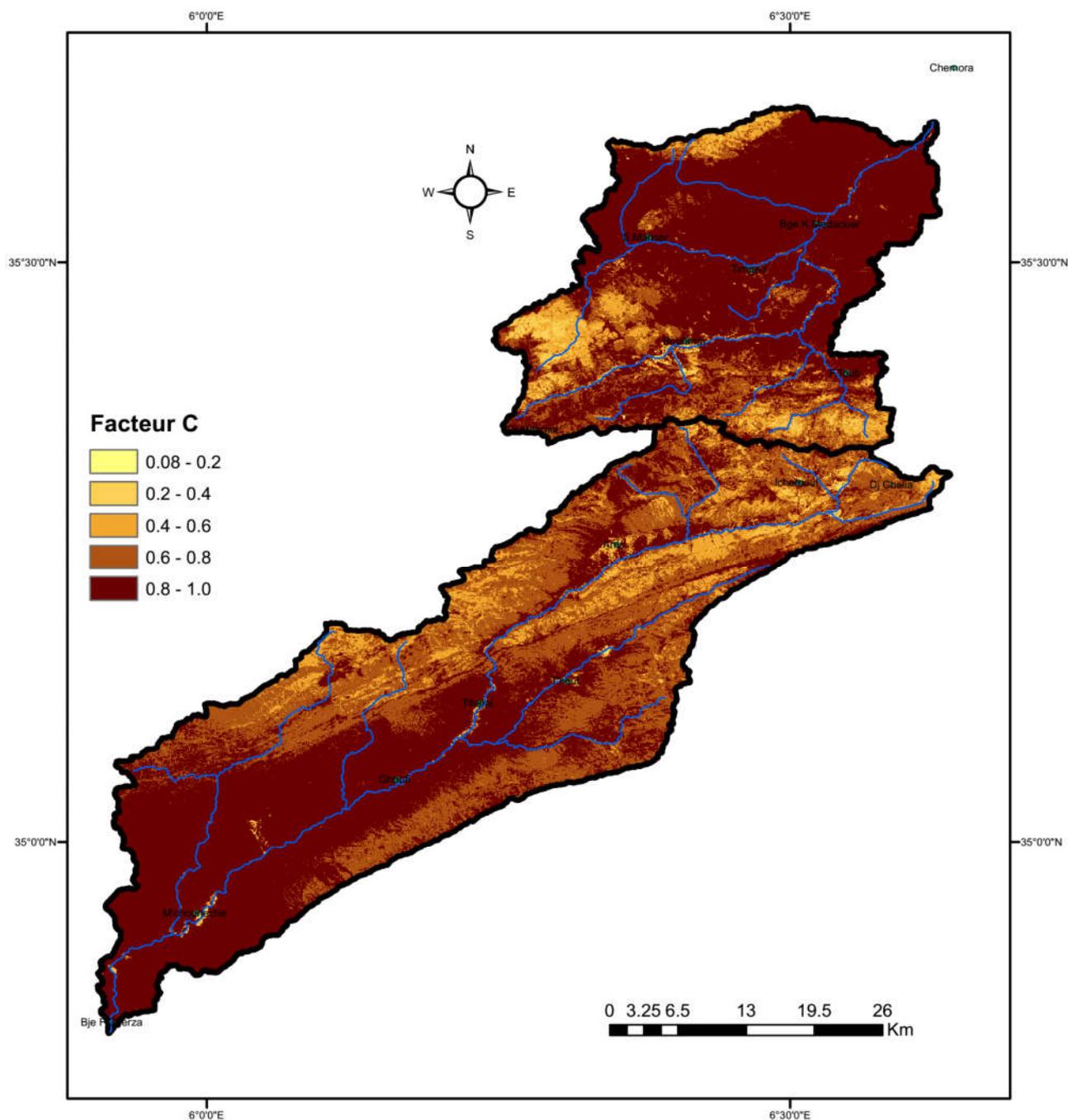


Figure VIII-42 : Carte de distribution spatiale du facteur C dans les deux bassins du 21 Octobre 2011

VIII-6- Pratiques culturales (P)

La valeur de P (variant de 0 à 1) est considérée constante et égale à 1 pour toute la zone d'étude. Cette situation s'explique par le fait que les enquêtes de terrain ont révélé que les agriculteurs labourent le sol dans les deux sens de la pente et n'établissent généralement pas de structures anti-érosives.

VIII-7- Conclusion : Erosion potentielle (A)

Les cartes de l'érosion potentielle mensuelles et annuelle pour les deux bassins versants d'étude sont produites par un simple procédé de superposition des cinq cartes thématiques obtenues et de multiplication des indices correspondants qui varient comme suit :

Carte d'agressivité climatique (R_{mensuel}) : de 0 (en Juillet) à 8,2 (en Septembre);

Carte d'agressivité climatique (R_{annuel}) : de 12 à 47 avec une moyenne de 28,50 dans l'ensemble des bassins versants ;

Carte du facteur topographique (LS) : de 0 à 1264 ; avec 94,48 % des valeurs sont inférieurs à 5 avec une moyenne de 15,25 dans l'ensemble des bassins versants ;

Carte de l'érodabilité des sols (K) : de 0,192 à 0,99 avec une moyenne de 0,487;

Carte de l'occupation des sols (C) : de 0,06 à 1,0 avec des moyennes varie de 0,79 au mois de Juin à 0,92 au mois de Janvier.

Les valeurs de l'indice synthétique ainsi obtenues par multiplication varient de 0,0 à 4332,8 t/ha/an avec une moyenne de 149,62 t/ha/an pour le bassin d'Oued Labiod, et 87,16 t/ha/an pour le bassin d'Oued Chemora.

Pour la quantification et la variabilité des apports solides simulés à une échelle plus fine pour les bassins Labiod, (jusqu'au barrage de Foum El-Guerza et jusqu'à la station hydrométrique de M'chouneche) et Chemora (la station hydrométrique de Chemora et jusqu'au barrage de Koudiet Medaouer), nous classons les taux d'érosion et les apports solides mois par mois, les résultats de ce classement sont récapitulés dans les tableaux (VIII-04 et VIII-05) et présentés dans les figures (VIII-43 et VIII-44).

Tableau VIII-4 : Variabilité mensuelle des quantités des apports solides érodées du bassin d'Oued Labiod.

Mois	BV Labiod (1) (Bge F. El-Guerza) (S=1317 km ²)	BV Labiod (2) (St M'chouneche) (S=1051 km ²)
Septembre	3.110.196,0	2.900.447,4
Octobre	2.214.255,4	2.044.687,3
Novembre	2.248.025,0	2.055.709,8
Décembre	1.568.037,8	1.619.167,9
Janvier	1.581.591,3	1.418.737,9
Février	1.199.431,1	1.065.779,7
Mars	2.548.444,4	1.420.108,3
Avril	1.930.729,9	1.914.234,7
Mai	1.734.604,1	1.701.873,7
Juin	682.633,2	662.844,5
Juillet	76.508,2	73.533,1
Aout	810.826,4	771.421,8
Total	19.705.282,7	<u>17.648.546,0</u>

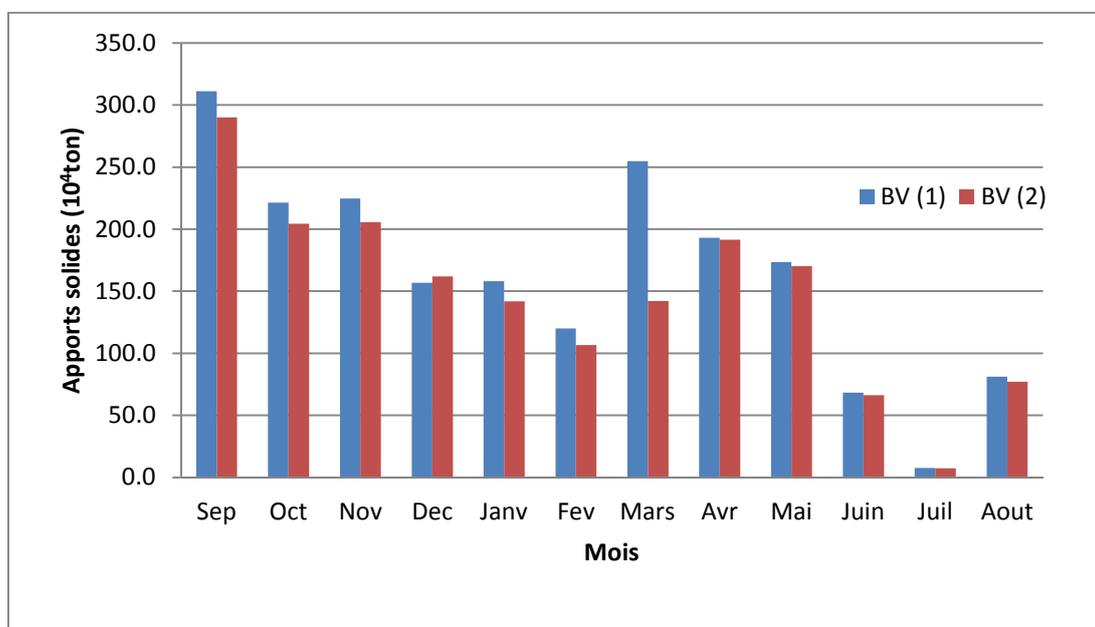
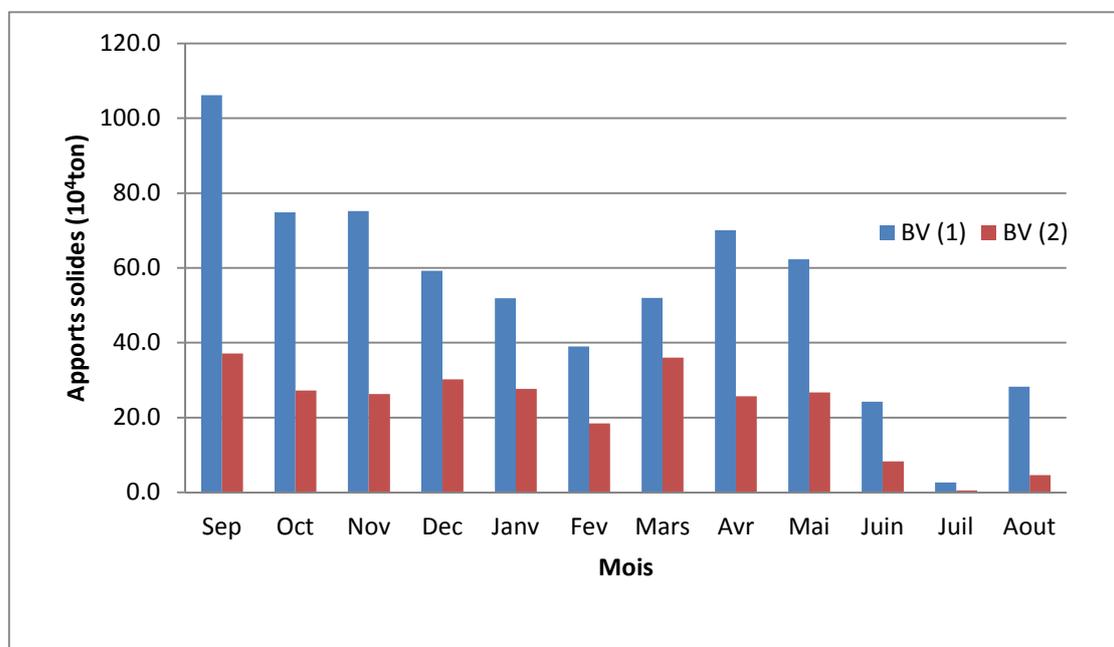
**Figure VIII-43** : Variation mensuelle des quantités des apports solides érodées (bassin Oued Labiod)

Tableau VIII-5 : Variabilité mensuelle des quantités des apports solides érodées du bassin Oued Chemora,

Mois	BV Chemora (1) (St Chemora) (S=741 km ²)	BV Chemora (2) (K, Medaouer) (S= 640 km ²)
Septembre	1.061.418,0	371.654,5
Octobre	748.252,8	272.618,7
Novembre	752.286,5	263.089,4
Décembre	592.534,1	302.494,0
Janvier	519.186,8	276.984,1
Février	390.021,8	184.233,9
Mars	519.688,3	359.902,5
Avril	700.513,7	257.117,7
Mai	622.800,2	267.102,9
Juin	242.567,8	83.149,9
Juillet	26.909,4	5.329,6
Aout	282.301,6	46.280,1
Total	6.458.480,8	2.689.957,3

**Figure VIII-44** : Variation mensuelle des quantités apports solides érodées (bassin oued Chemora)

Dans les bassins versants, seulement une fraction du sol érodé atteindra l'exutoire du système. Cette partie de sédiment est désignée sous le nom du rapport de la livraison de sédiment (RDS : sediment delivery ratio).

Elle est estimée généralement par la méthode de service de conservation du sol ([USDA Soil Conservation Service \(1983\)](#)) et celle de [Shen et Julien \(1993\)](#) et :

$$- \text{SDR} = 0.417762 A^{-0.134958} - 0.127097 \quad (\text{VIII-15})$$

$$- \text{SDR} = 0.31 \times A^{-0.3} \quad (\text{VIII-16})$$

Où : SDR : coefficient de délivrance (%)

A : surface du bassin versant (mi²)

Pour le cas du bassin d'Oued Labiod (jusqu'à la station de M'chouneche), la surface est de 1051 Km² (653 mi²), ce qui donne un SDR égale à 4,71 % par la première méthode et 4,43 % par la deuxième méthode (une moyenne de 4,57 %).

Pour le cas du bassin d'Oued Chemora (jusqu'à la station de Chemora), la surface est de 741 Km² (460 mi²), ce qui donne un SDR égale à 5,55 % par la première méthode et 4,93 % par la deuxième méthode (une moyenne de 5,24 %).

On peut conclure que 95,43 % pour le bassin oued Chemora et 94,76 % pour le bassin oued Labiod, des sédiments sont déposés entre le champ et l'exutoire du bassin versant. Les sédiments qui n'arrivent pas à atteindre l'exutoire sont arrêtés dans les pièges entre le point de génération et l'exutoire du bassin versant.

La comparaison entre les résultats des pourcentages des sédiments érodés des bassins, estimés par *RUSLE*, arrivés aux exutoires des bassins, et les sédiments mesurés aux niveaux des stations hydrométriques M'chouneche et Chemora (tableaux VIII-06 et VIII-07 et figures VIII-45 et VIII-46), montre une concordance acceptable en ce qui concerne les résultats d'érosions à l'échelle annuelle, Par contre, à l'échelle mensuelle, les résultats ne sont pas similaires.

Ce résultat est très important et logique du fait que le modèle *USLE* ou *RUSLE* est conçu spécialement pour l'estimation d'érosion à l'échelle annuelle.

Tableau VIII-6 : Variabilité mensuelle des quantités des apports solides érodées simulées et mesurées cas du bassin versant d'Oued Labiod (St de M'chouneche),

Mois	Ass (T /km ²)		As (T)		K = (3)/(4)
	Simulée (1)	Calculées à partir des mesures (2)	Simulée (3)	Calculées à partir des mesures (4)	
Septembre	128,88	215,27	135.450,9	226.247,8	0,60
Octobre	90,85	100,83	95.486,9	105.967,4	0,90
Novembre	91,34	52,60	96.001,7	55.281,4	1,74
Décembre	71,95	5,40	75.615,2	5.680,5	13,31
Janvier	63,04	3,44	66.255,0	3.610,4	18,35
Février	47,36	37,08	49.771,9	38.973,2	1,28
Mars	63,10	65,48	66.319,1	68.817,8	0,96
Avril	85,06	54,22	89.394,8	56.982,0	1,57
Mai	75,62	60,92	79.477,5	64.027,1	1,24
Juin	29,45	57,23	30.954,9	60153,7	0,51
Juillet	3,27	22,13	3.434,0	23.259,3	0,15
Aout	34,28	32,45	36.025,4	34.108,7	1,06
Total	784,19	707,05	824.187,1	743.109,4	1,11

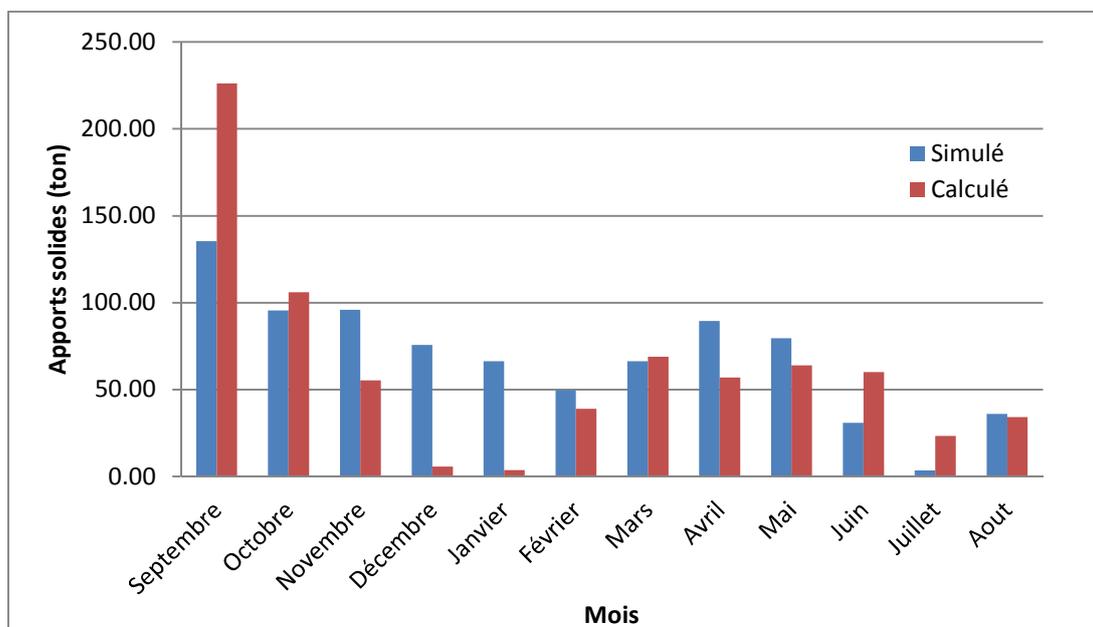
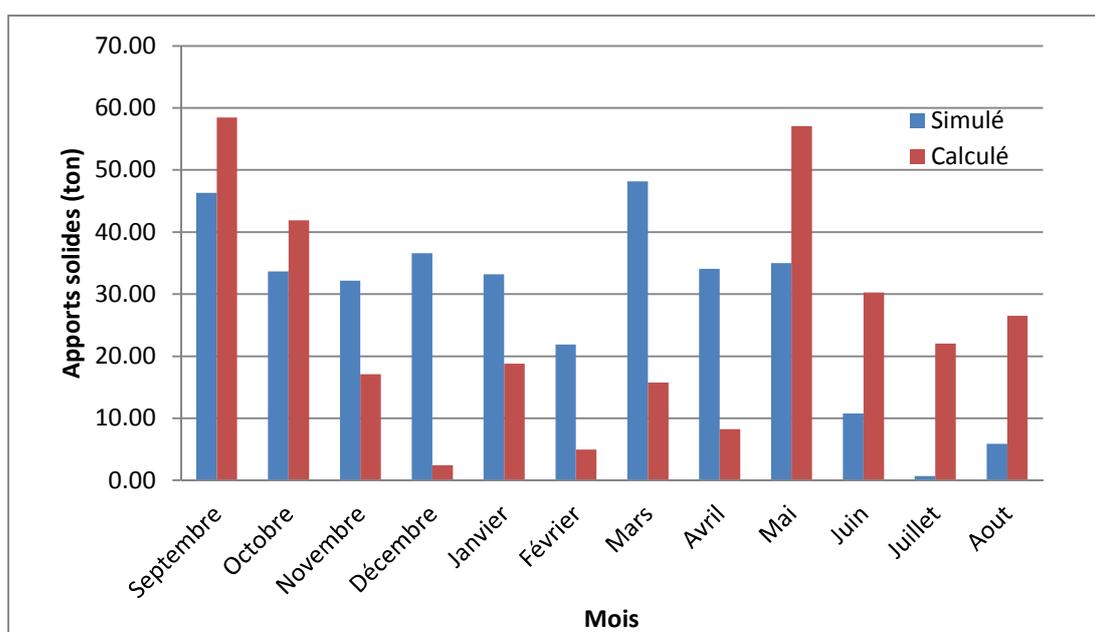
**Figure VIII-45** : Variation mensuelle des quantités des apports solides érodées simulées et mesurées cas du bassin versant d'Oued Labiod (St de M'chouneche)

Tableau VIII-7 : Variabilité mensuelle des quantités des apports solides érodées simulées et mesurées cas du bassin versant d'Oued Chemora (St de Chemora),

Mois	Ass (T /km ²)		As (T)		K = (3)/(4)
	Simulée (1)	Calculées à partir des mesures (2)	Simulée (3)	Calculées à partir des mesures (4)	
Septembre	62.5	78.90	46315.2	58466.2	0.79
Octobre	45.4	56.51	33640.2	41874.7	0.80
Novembre	43.4	23.07	32149.1	17091.7	1.88
Décembre	49.4	3.29	36609.1	2434.9	15.04
Janvier	44.8	25.39	33202.2	18814.7	1.76
Février	29.5	6.67	21875.9	4942.4	4.43
Mars	65.0	21.29	48190.4	15772.3	3.06
Avril	46.0	11.15	34065.3	8262.0	4.12
Mai	47.3	77.02	35019.3	57071.1	0.61
Juin	14.6	40.84	10789.1	30264.0	0.36
Juillet	0.9	29.77	684.7	22060.0	0.03
Aout	7.9	35.77	5883.7	26507.7	0.22
Total	456.7	409.7	338424.4	303561.7	1.12

**Figure VIII-46** : Variabilité mensuelle des quantités des apports solides érodées simulées et mesurées cas du bassin versant d'Oued Chemora (St de Chemora)

Pour conclure, la carte d'érosion finale obtenue (Figure VIII-60) montre que le taux d'érosion varie de 0 à 227 t/ha/an avec une moyenne de 6,99 t/ha/an pour le bassin d'Oued Labiod, et 4,57 t/ha/an pour le bassin d'Oued Chemora, d'une part, d'autre part, les plus faibles pertes en terre avec un taux d'érosion inférieur à 7,0 t/ha/an, selon la classification établie aux Etats-Unis fondée sur la tolérance des sols agricoles aux pertes (Sadiki, Saïdati, Auajjar, Faleh et Macaire 2004), présentent 88,13% de la surface du bassin versant Chemora et 84,93 % de la surface du bassin versant Oued Labiod. Elles se localisent en grande partie dans les zones où on a des terres plates à faibles pentes et des terrains à végétation dense qui maintient le sol et donc une résistance forte à l'érosion. Cependant, les parties de la superficie des bassins versants qui présentent des taux d'érosion au-delà de 20 t/ha/an, où la perte est forte et les sols sont très dégradés ce qui peut nuire à la production selon la même classification présentent 3,75% de la surface du bassin versant Chemora et 9,48 % de la surface du bassin versant Oued Labiod. Ce sont des zones à matériaux friables dénudées de végétation avec des terres accidentées ; elles se localisent dans les versants des chaînes montagneuses raides.

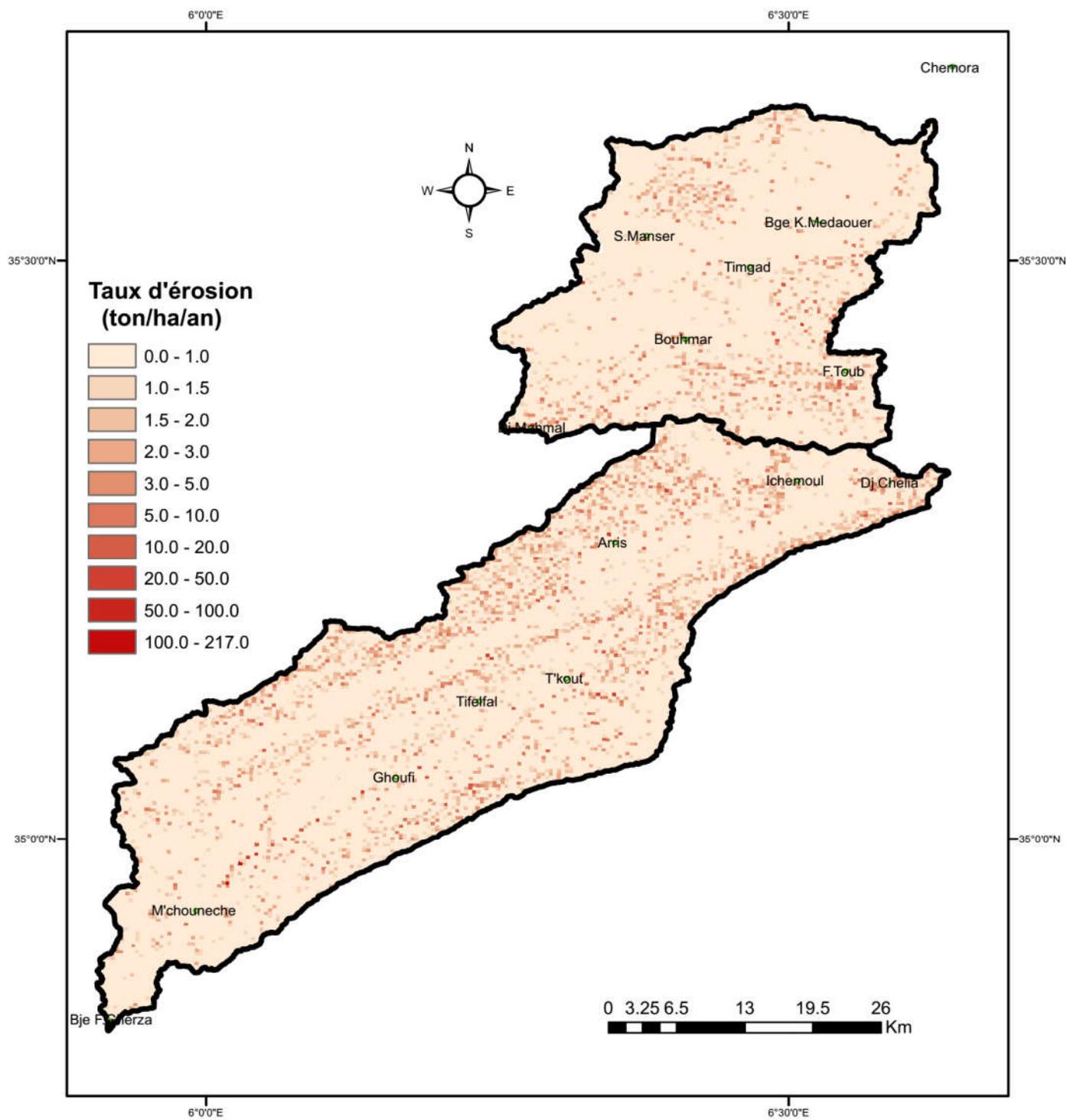
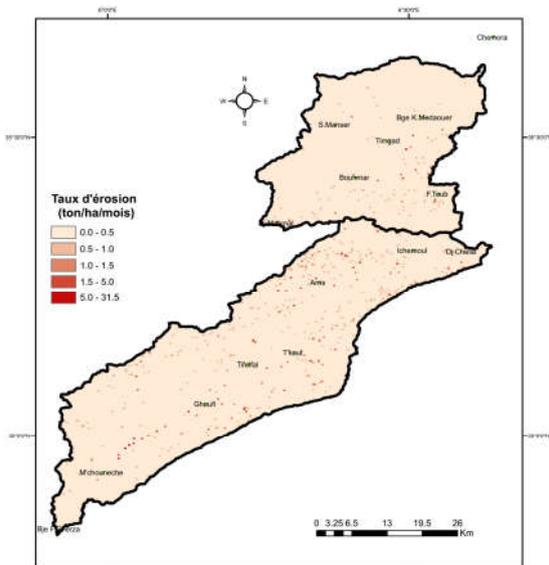
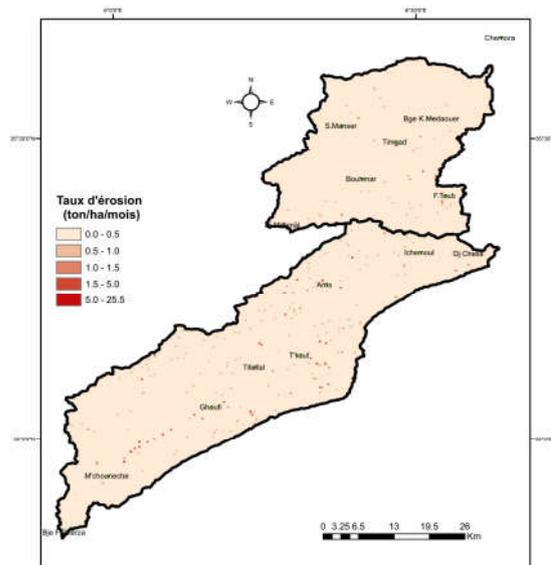


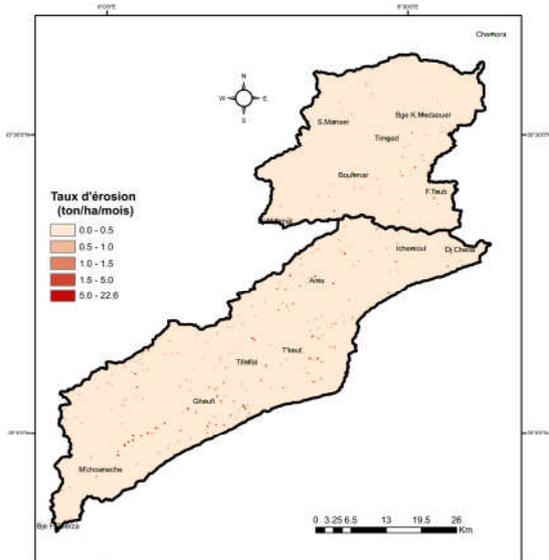
Figure VIII-47 : Carte du taux d'érosion calculé par RUSLE



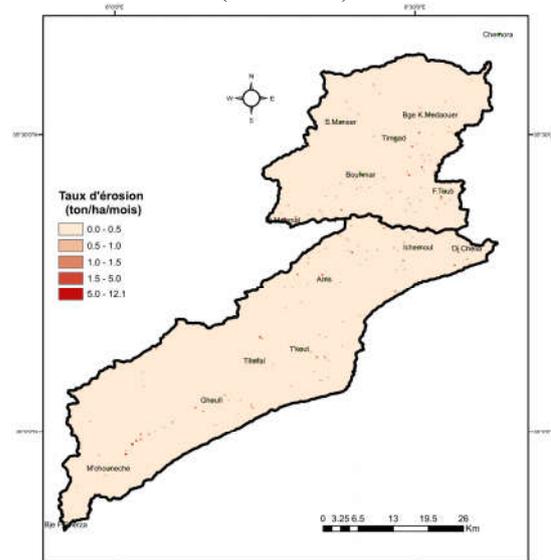
Figure, VIII-48 : Taux d'érosion du mois de Septembre (ton/ha/mois)



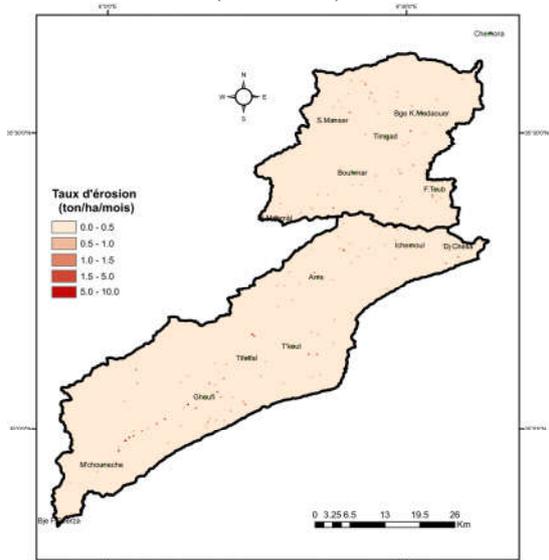
Figure, VIII-49 : Taux d'érosion du mois d'Octobre (ton/ha/mois)



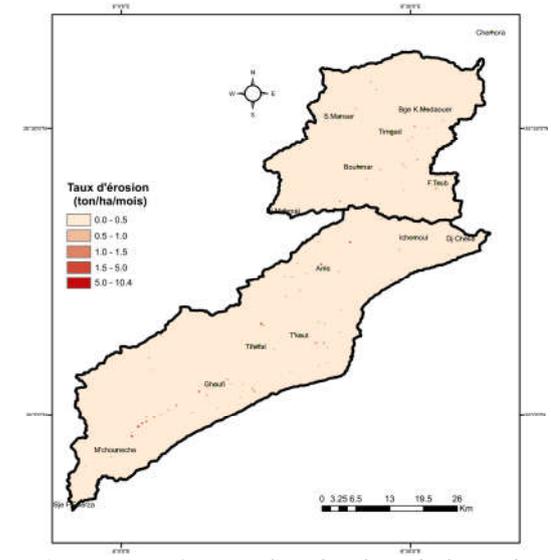
Figure, VIII-50 : Taux d'érosion du mois de Novembre (ton/ha/mois)



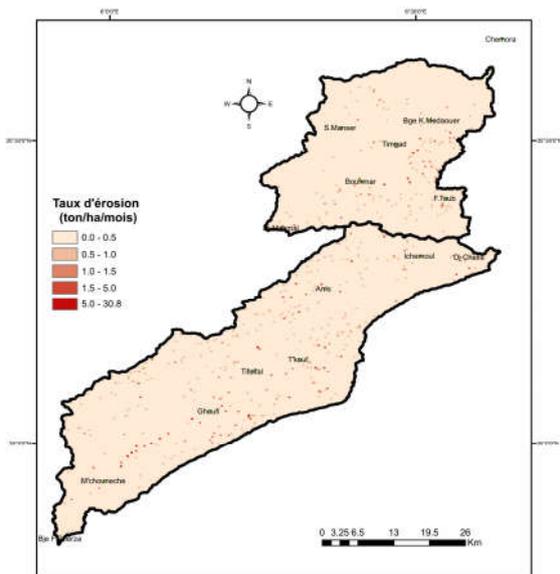
Figure, VIII-51 : Taux d'érosion du mois de Décembre (ton/ha/mois)



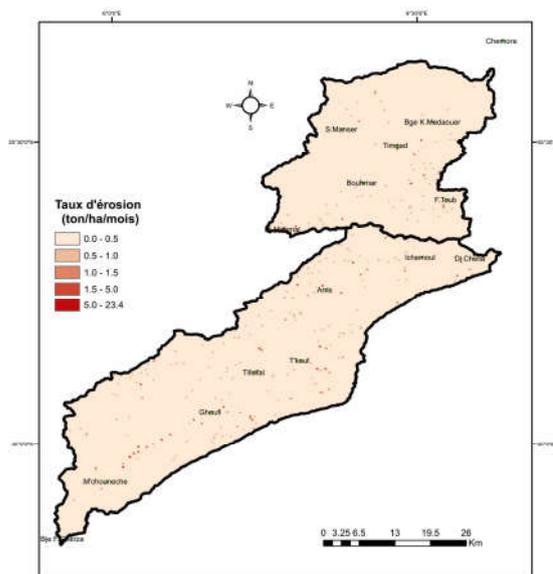
Figure, VIII-52 : Taux d'érosion du mois de Janvier (ton/ha/mois)



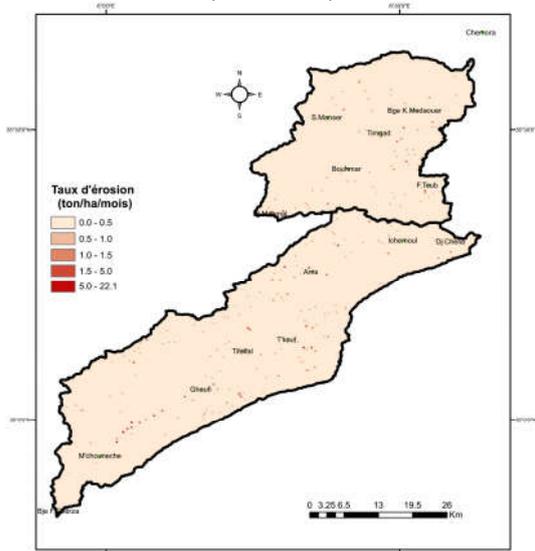
Figure, VIII-53 : Taux d'érosion du mois de Février (ton/ha/mois)



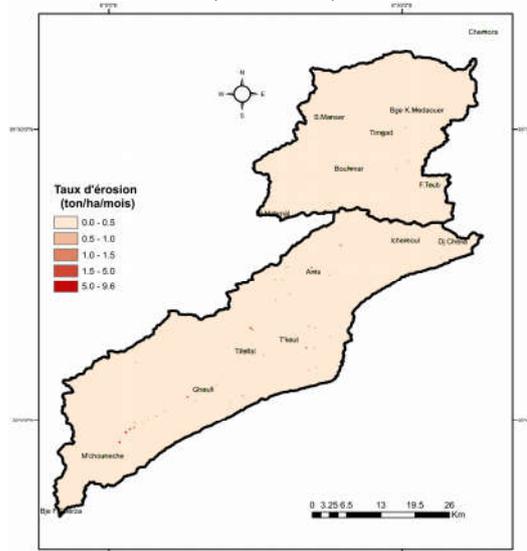
Figure, VIII-54 : Taux d'érosion du mois de Mars (ton/ha/mois)



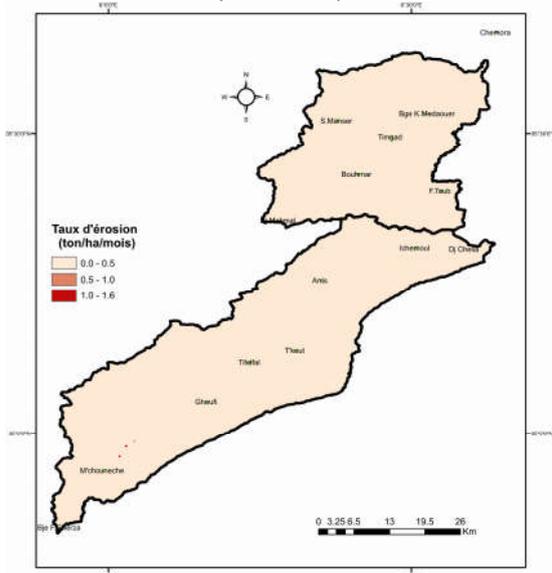
Figure, VIII-55 : Taux d'érosion du mois d'Avril (ton/ha/mois)



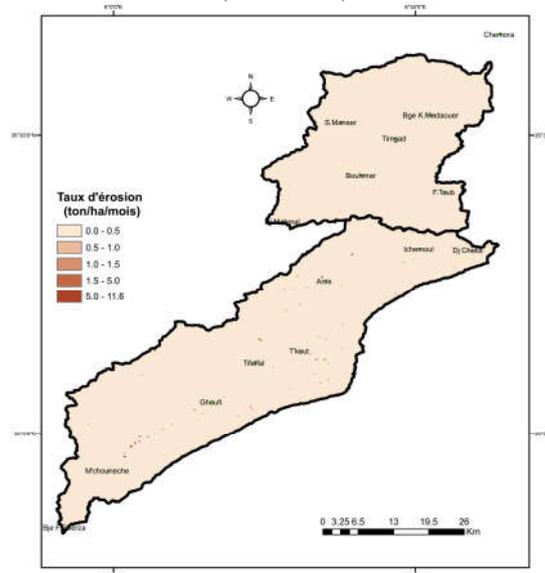
Figure, VIII-56 : Taux d'érosion du mois de Mai (ton/ha/mois)



Figure, VIII-57 : Taux d'érosion du mois de Juin (ton/ha/mois)



Figure, VIII-58 : Taux d'érosion du mois de Juillet (ton/ha/mois)



Figure, VIII-59 : Taux d'érosion du mois d'Aout (ton/ha/mois)

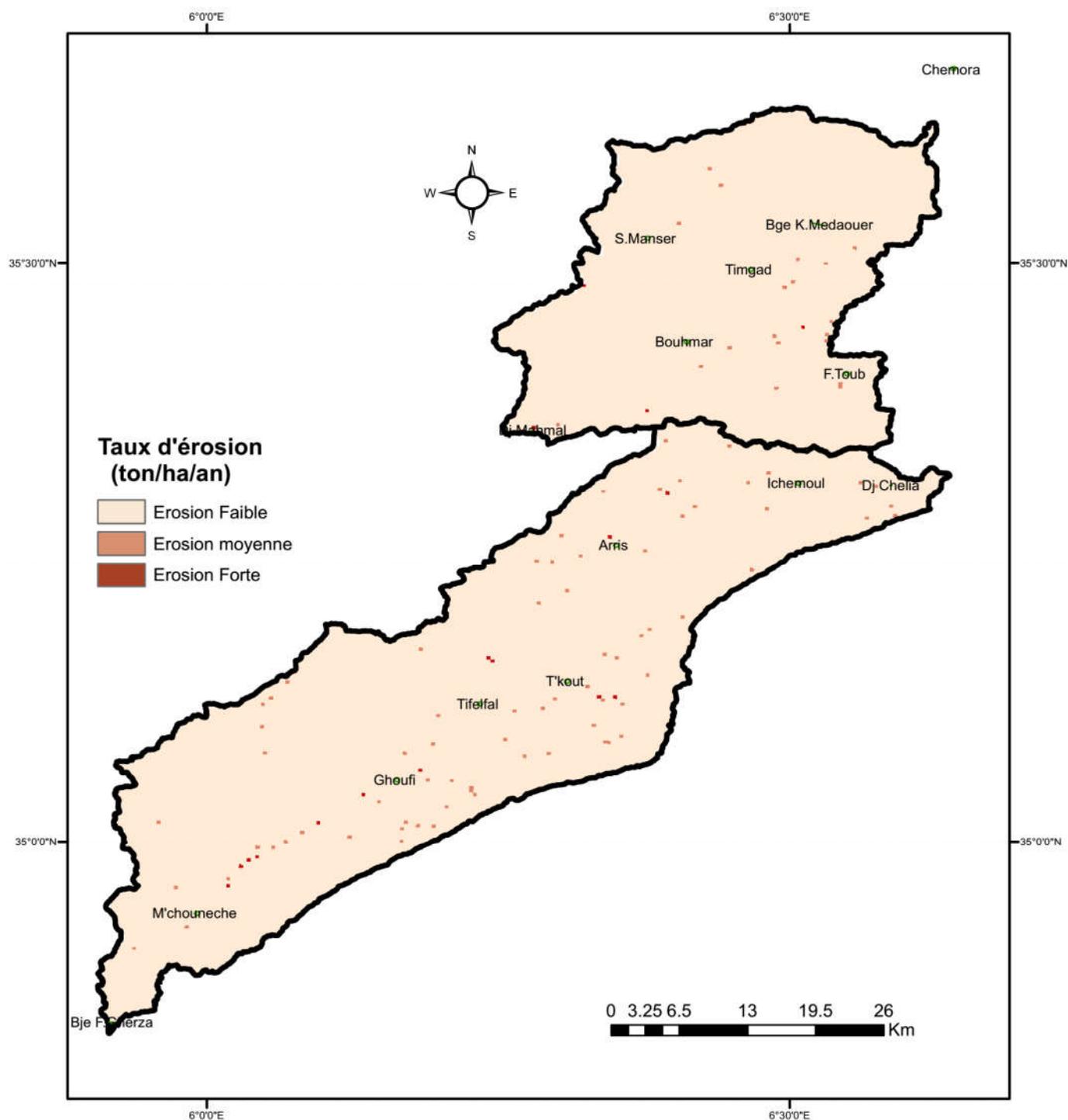


Figure VIII-60 : Carte du taux d'érosion calculé par RUSLE selon la classification établie aux Etats-Unis fondée sur la tolérance des sols aux pertes,

CHAPITRE IX : Application du modèle HEC HMS

IX-1- Modèle hydrologique précipitations - débits liquides

IX-1-1- La structure du modèle HEC-HMS choisie et les données d'entrée du modèle

Cette description portera sur la combinaison modulaire choisie pour modéliser les deux bassins (Labiod et Chemora), en expliquant ses concepts de base, en citant ses variables et ses paramètres et la façon dont nous allons les estimer et en listant ses avantages et ses limites, sans oublier la justification du choix à la fois du modèle et de la combinaison modulaire.

IX-1-1-1- Le type de modélisation

La modélisation continue est confrontée au problème d'absence des distributions temporelles des pluviographes. Ceci nous oblige à traiter l'alternative de modéliser les averses type NRCS décrite dans la partie ci-dessous.

IX-1-1-2- Le module météorologique : les averses NRCS

Le NRCS connu sous le SCS aussi, est un service attaché au département d'agriculture des États Unis, chargé de conserver, planifier et porter de l'assistance dans les domaines de la gestion du sol, l'eau, l'air, la faune et la flore. Dans cette optique, il a développé en 1986 ([Musy et Higy, 1998](#)) une méthode pour la construction d'averses de projet nécessaire pour la prévision des débits de projets des ouvrages hydrauliques ou des constructions en contact éventuel avec les cours d'eau, et pour la protection contre les inondations. Cette approche s'est basée sur l'analyse d'un nombre considérable d'observations d'averses sur tout le pays ([Musy et Higy, 1998](#)). Les averses de projet ainsi définies, attribuent une distribution temporelle à une hauteur de pluie donnée enregistrée pendant 24 heures.

Ces observations, faites à travers tout le territoire des États Unis d'Amérique, ont été analysées et ont finalement donné lieu à quatre types d'averses de projet selon la position géographique et donc, le climat dominant ([United States, Department of Agriculture, 1986](#)).

Pour assimiler la différence entre ces averses, la figure IX-1 présente la distribution d'une averse de 24 heures selon les quatre types ([Gourfi, 2014](#)) :

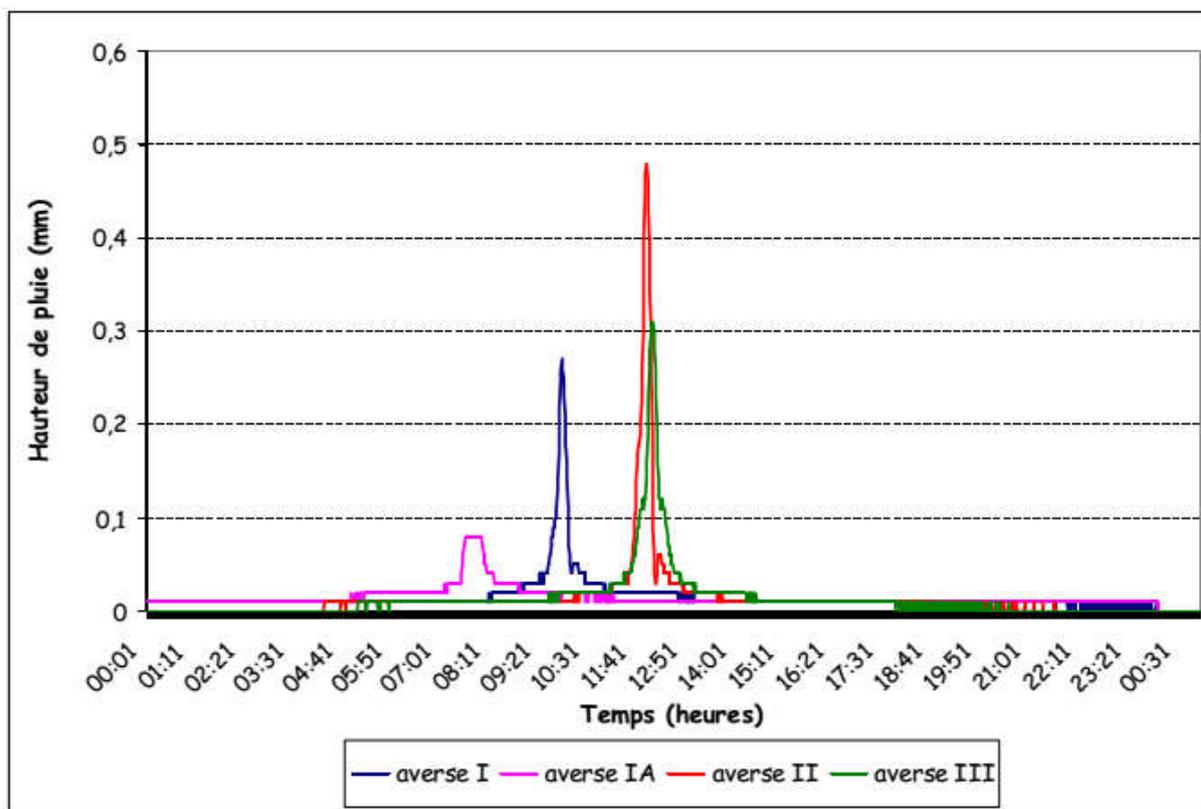


Figure IX-1 : Les distributions temporelles 24h des quatre averses de projet de la NRCS

Dès un premier aperçu, on remarque que les quatre types se distinguent par leurs intensités, leurs heures de pointe et par leurs formes. La propriété d'heure de pointe, va influencer sur l'heure du débit de pointe simulé qui va se manifester soit tôt soit tard, en fonction de l'heure de pointe réelle de l'averse qu'on aurait enregistrée si on possédait un pluviographe. Pour la forme, on voit que l'averse type IA est la plus éparpillée sur les 24h suivie par le type III, le type I et enfin le II qui est la plus serrée (Figure IX-1). La forme de l'averse va conditionner la forme de l'hydrogramme, puisque on connaît que la forme de ce dernier découle de celle de l'averse, par conséquent cette forme va soit sous-estimer soit surestimer le volume de la crue, tout dépend de la forme réelle de la distribution journalière de l'averse qu'on aurait enregistrée facilement si on avait un pluviographe (Figure IX-1).

Lors de la modélisation, nous allons utiliser les quatre types pour chaque événement, et essayer d'en déduire, en comparant les résultats de chaque type, l'averse la mieux appropriée à notre contexte.

IX-1-1-3- La fonction de production : la NRCS CN

IX-1-1-3-1- Le concept de base

De même que pour les averses, la mise en place de cette fonction a été réalisée par le NRCS en coopération, cette fois-ci, avec trois consultants : Horner, Horton et Sherman (Musy et Higy, 1998). Cette fonction de production apparue en 1950 et surnommée autrefois la SCS CN est le fruit de plus de deux décennies d'analyses des relations pluies-débits sur des petits bassins (USACE, 2013). Elle relie la pluie nette participante au ruissellement à trois facteurs fondamentaux : l'occupation du sol, le type de sol et l'humidité antécédente, selon l'équation suivante (USACE, 2013) :

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (IX-1)$$

Avec : Pe : les précipitations nettes au temps t ;

P : les précipitations brutes au temps t ;

Ia : l'abstraction initiale ;

S : le potentiel maximum de rétention.

Après avoir effectué de nombreuses expériences, le NRCS a proposé une relation empirique supplémentaire liant l'abstraction initiale d'un bassin versant au potentiel maximum de rétention (USACE, 2013) :

$$Ia = 0,2 \times S \quad (IX-2)$$

Ainsi, l'équation (IX-1) devient :

$$Pe = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (IX-2)$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de Pe au début et à la fin du pas de temps.

L'influence des deux premiers facteurs susmentionnés est estimée par le paramètre CN qui est relié à S par l'équation (USACE, 2013) :

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (IX-3)$$

Alors que pour intégrer l'influence de l'humidité antécédente, on fait appel à la hauteur de pluie tombée pendant les cinq derniers jours précédant l'événement de crue (NRCS). Ensuite, on définit soit un CN normal, sec ou humide, tout en respectant le tableau ci-après :

Tableau IX-1 : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN (d'après (Laborde, 2007))

Types de CN	Hauteur de pluie (mm) sur les 5 jours antérieurs		
	Base annuelle	Base saisonnière	
		Période de végétation	Période hivernale
CN(I) : conditions sèches	H<12.5	H<35	H<12.5
CN(II) : conditions normales	12.5<H<37.5	35<H<53	12.5<H<27.5
CN(III) : conditions humides	H>37.5	H>53	H>27.5

Donc, selon les conditions d'humidité antérieure propres à chaque événement, on est amené à convertir la valeur de CN normal (lue sur les tables NRCS) au CN sec (I) ou humide (III) en appliquant les formules ci-dessous (Chang, 2009) :

$$CN(I) = \frac{4,2 \times CN(II)}{10 - 0,058 * CN(II)} \quad (IX-4)$$

$$CN(III) = \frac{23 \times CN(II)}{10 + 0,13 * CN(II)} \quad (IX-5)$$

IX-1-1-3-2- Les variables

a- Découpage des bassins : Le découpage des deux bassins en sous bassins a été effectué de telle sorte à avoir des unités plus au moins homogènes des points de vues les différents facteurs exigés par le modèle (lithologique, hydrologique).

Pour cela, le bassin d'oued Chemora est découpé en dix (10) sous bassins et le bassin oued Labiod est découpé en 12 sous bassins.

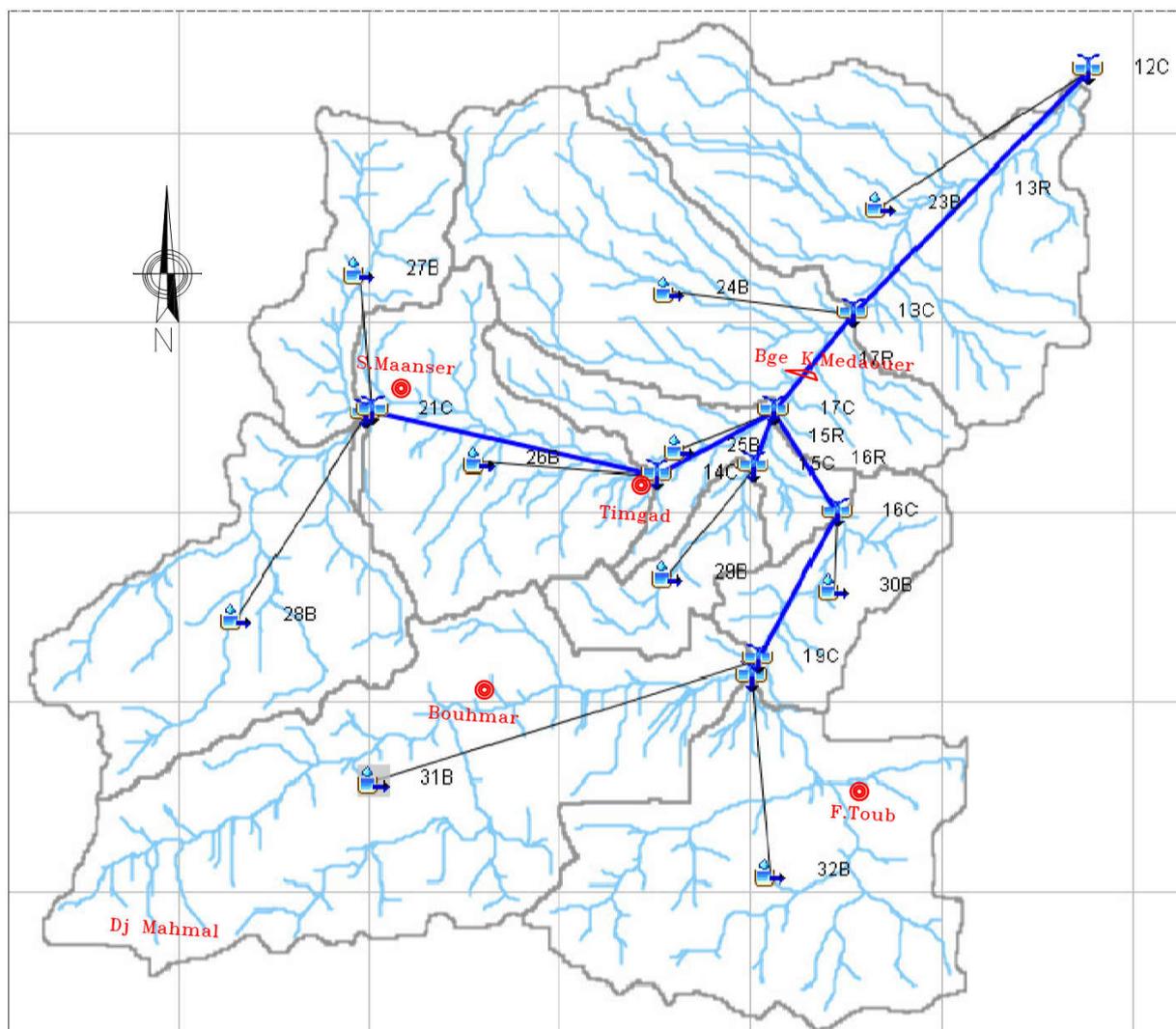


Figure IX-2 : Découpage du bassin versant oued Chemora.

Tableau IX-2 : Caractéristiques topographiques des sous bassins formant le bassin Oued Chemora

Bassin d'Oued Chemora				
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	Surface (km ²)	Pente du s/bassin (%)	Longueur du talweg (km)
CH01	28B	80.95	8.62	10.26
CH02	31B	155.37	9.46	19.31
CH03	32B	108.12	12.57	10.91
CH04	27B	40.86	4.52	9.26
CH05	26B	69.18	4.52	9.48
CH06	29B	21.64	6.01	6.90
CH07	30B	31.48	7.20	8.13
CH08	25B	32.60	3.79	4.16
CH09	24B	99.82	6.05	6.32
CH10	23B	100.98	4.88	6.59

Ces sous bassins sont drainés par un réseau hydrographique de caractéristiques suivantes :

Tableau IX-3 : Caractéristiques topographiques du réseau hydrographique du bassin oued Chemora

Bassin Oued Chemora						
Talweg	N° amont	N° aval	Cote amont (m)	Cote aval (m)	Longueur (m)	Pente (m/s)
20R	20 C	21 C	1120.08	1116.86	279	0.012
21R	21 C	14 C	1116.86	1112.23	11165	0.000
14R	14 C	17 C	1112.23	966.96	4907	0.030
15R	15 C	17 C	987.94	966.96	2222	0.009
18R	18 C	19 C	1075.52	1067.39	772	0.011
19R	19 C	16 C	1067.39	1010.85	6544	0.009
16R	16 C	17 C	1010.85	966.96	5469	0.008
17R	17 C	13 C	966.96	943.36	4801	0.005
13R	13 C	12 C	943.36	880.64	12779	0.005

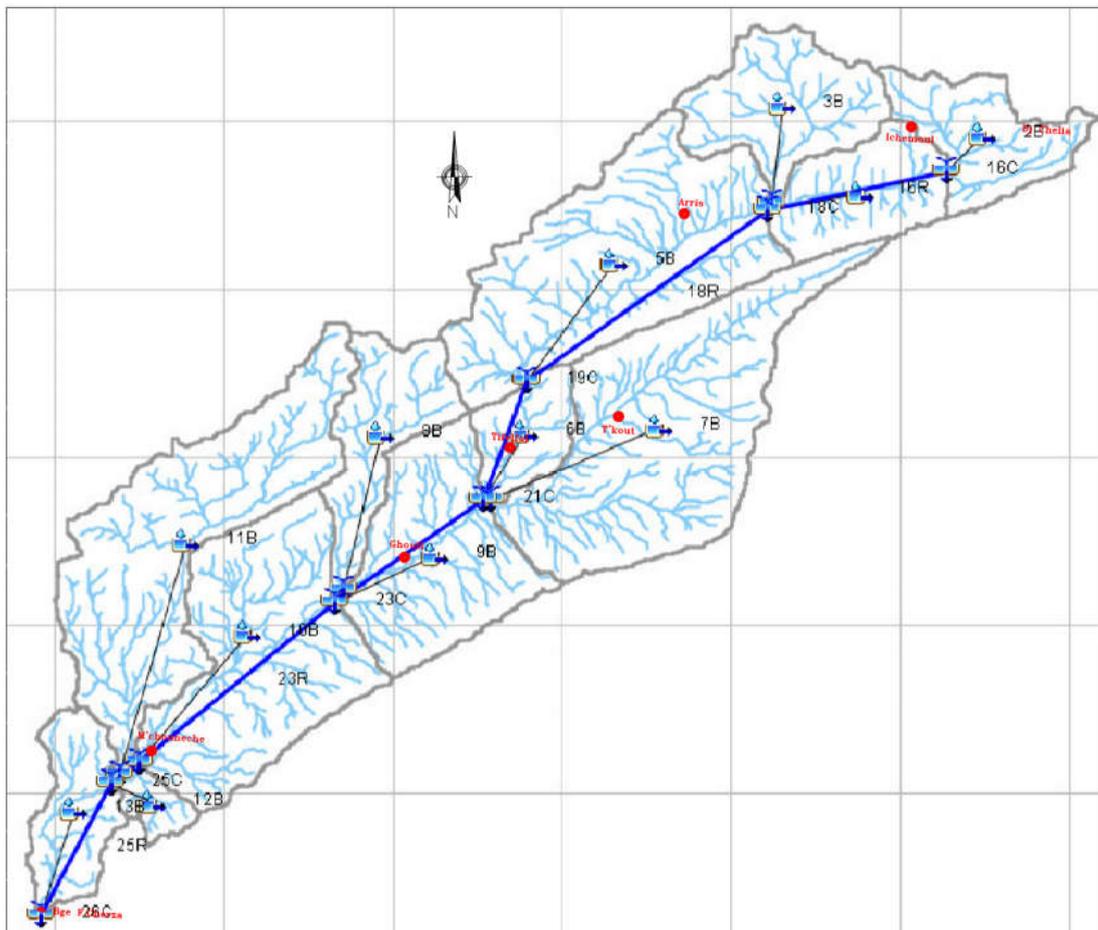


Figure IX-3 : Découpage du bassin versant oued Labiod.

Tableau IX-4 : Caractéristiques topographiques des sous bassins formant le bassin oued Labiod

Bassin Oued Labiod				
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	Surface (km ²)	Pente du s/bassin (%)	Longueur du talweg (km)
Lab01	2B	65.58	14.45	8.10
Lab02	3B	85.57	14.30	9.25
Lab03	4B	67.53	15.43	9.00
Lab04	5B	206.11	16.83	23.15
Lab06	6B	39.61	13.30	6.89
Lab05	7B	219.82	14.37	23.44
Lab07	8B	68.36	14.85	14.56
Lab08	9B	123.27	15.23	11.10
Lab10	10B	175.14	11.72	19.18
Lab09	11B	198.39	13.44	28.52
Lab11	12B	14.88	10.75	5.32
Lab12	13B	52.72	8.63	11.01

Ces sous bassins sont drainés par un réseau hydrographique de caractéristiques suivantes :

Tableau IX-5 : Caractéristiques topographiques du réseau hydrographique du bassin oued Labiod

Bassin Oued Labiod						
Talweg	N° amont	N° aval	Cote amont (m)	Cote aval (m)	Longueur (m)	Pente (m/s)
16 R	16 C	18 C	1362.00	1148.63	13131	0.016
17 R	17 C	18 C	1156.24	1148.63	651	0.012
18 R	18 C	19 C	1148.63	910.40	22117	0.011
19 R	19 C	21 C	910.40	727.85	9697	0.019
20 R	20 C	21 C	735.05	727.85	550	0.013
21 R	21 C	23 C	727.85	556.14	13354	0.013
22 R	22 C	23 C	606.25	556.14	742	0.068
23 R	23 C	15 C	556.14	286.79	41924	0.006
15 R	15 C	25 C	286.79	262.16	4952	0.005
24 R	24 C	25 C	273.17	262.16	674	0.016
25 R	25 C	26 C	262.16	123.86	24961	0.006

b- **La carte de sols** : cette donnée sert en combinaison avec la carte d'occupation des sols à déterminer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol. Elle doit être conforme à la classification NRCS qui définit les classes d'occupation du sol en quatre grands groupes.

Cette classification est la suivante (Cane, 1985) :

- Groupe "A" : sols à faible potentiel de ruissellement.

Les sols appartenant à ce groupe sont des sols de grande perméabilité, à vitesse d'infiltration rapide, même lorsqu'ils sont saturés. Relativement épais, ils sont généralement sableux ou graveleux. Ces sols possèdent le plus souvent une grande transmissivité ;

- Groupe "B" : sols présentant une vitesse d'infiltration modérée et une transmissivité moyenne ; d'épaisseur moyenne, ils ont, en général, une texture moyennement fine à grossière ;

- Groupe "C" : sols à vitesse d'infiltration lente et de transmissivité faible. Ils ont souvent de faible épaisseur, limitant les mouvements d'eau et à texture assez fine à fine ;

- Groupe "D" : sols à fort potentiel de ruissellement. Ce sont des sols à vitesse d'infiltration très lente et de transmissivité excessivement faible. Ils sont en général argileux, peu épais, reposant sur une couche imperméable et possèdent une nappe phréatique proche de la surface.

La carte n°IX-4 représente la projection de cette classification sur la carte lithologique des deux bassins

c- La carte d'occupation du sol ou du couvert végétal : Vu les exigences particulières de la combinaison modulaire choisie, plus précisément la méthode NRCS CN comme fonction de production, l'établissement d'une carte d'occupation du sol ou d'une carte du couvert végétal sur l'ensemble de la zone d'étude est indispensable. Toutefois, l'information supposée contenue dans cette carte devrait être authentique à la classification reconnue par le NRCS.

Les valeurs de ce paramètre peuvent être calibrées par le modèle HEC-HMS.

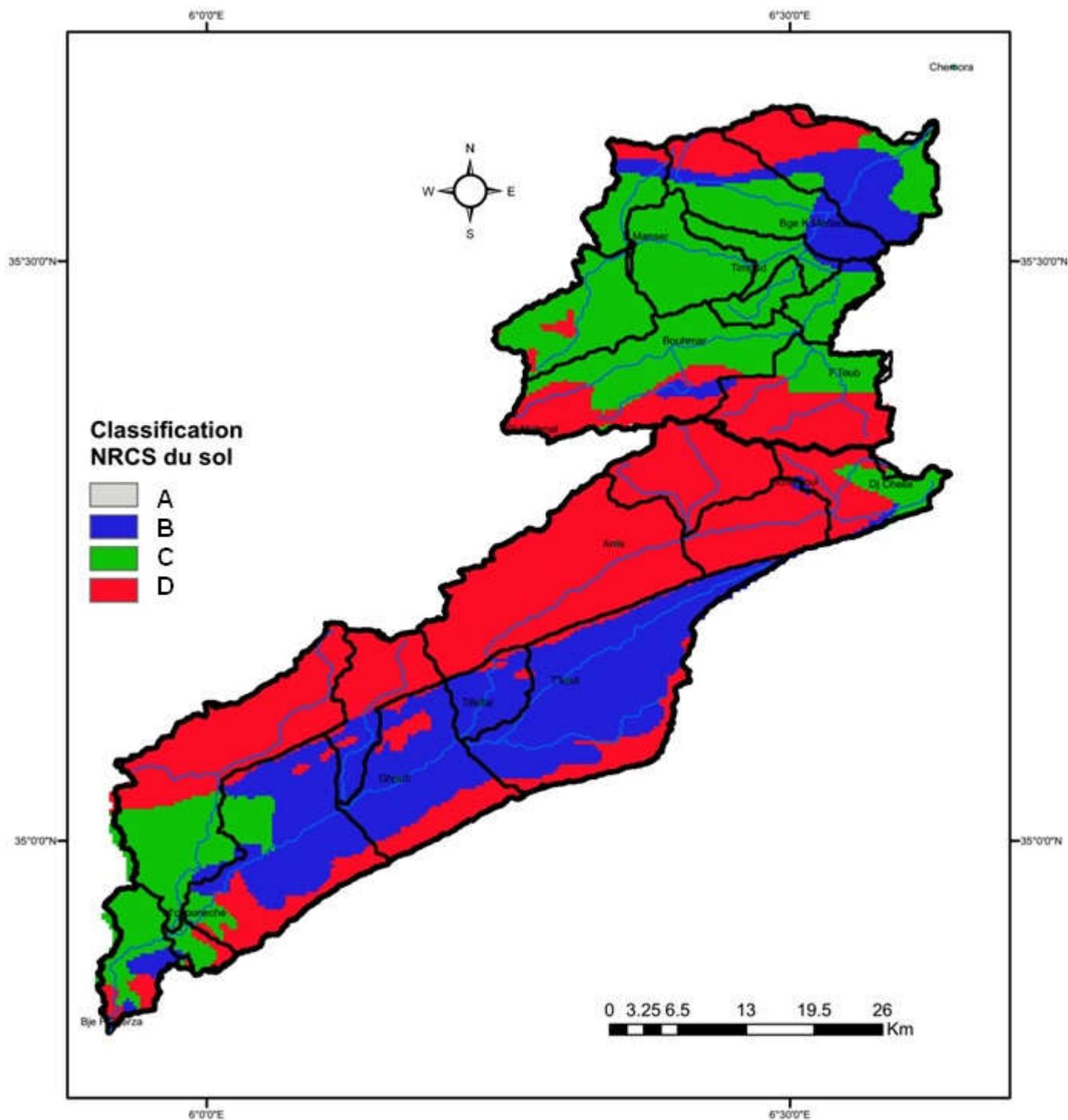


Figure IX-4 : la carte des sols type NRCS des bassins versants.

d- Le pourcentage d'imperméable : il désigne la portion de la surface du bassin considérée comme étanche et directement connectée au réseau de drainage. Ce pourcentage est déduit lors de l'élaboration de la carte d'occupation du sol.

IX-1-1-3-3- Les paramètres

a- Curve number CN : sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration (USACE, 2013). Il est déterminé pour un composé hydrologique de sol à partir de tables NRCS (Tableau IX-8), avec la combinaison des facteurs de la nature de l'utilisation du sol, de son traitement, des conditions hydrologiques avec le type de sol pour trouver la valeur de CN normal, qui va être utilisée directement dans les équations citées auparavant, ou après l'avoir convertie selon la hauteur de pluie tombée pendant les cinq jours avant l'événement (si on dispose de l'information).

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

$$CN_{composite} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (IX-6)$$

Où : $CN_{composite}$: le CN utilisé pour l'ensemble du bassin par la fonction de production ;

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

A_i : surface de drainage du composé hydrologique du sol.

L'approche utilisée dans cette étude pour le calcul des CN_i , est d'adapter les cartes du couvert végétal (C) élaborées dans le chapitre précédent à partir des cartes NDVI élaborées également à partir des images LANDSAT5 à la classification reconnue par le NRCS ; le paramètre utilisé dans cette approche est la densité de recouvrement végétale.

La valeur minimale du C reflète le pourcentage le plus élevé de la couverture végétale et représente aussi le bon état de la végétation. Les régions sans végétation (sol nu et plans d'eau) ont une forte valeur du C. par conséquent nous étions mené à faire des correspondances entre les classes de la NRCS et les informations des indices de végétation pour chaque type de sol.

Afin d'estimer les valeurs du facteur CN , on a utilisé la régression entre deux valeurs extrêmes en tenant compte des valeurs médianes, pour chaque type de sol ; ces valeurs sont tirées de tables NRCS (USACE, 2013) (table IX-8).

Les droites de régression trouvées des différents cas (Type de sol) sont :

$$\text{Sol de type A :} \quad CN = 71.429 \times C + 13 \quad (IX-7)$$

$$\text{Sol de type B :} \quad CN = 38.69 \times C + 47.94 \quad (IX-8)$$

$$\text{Sol de type C :} \quad \text{CN} = 19.345 \times \text{C} + 73.042 \quad (\text{IX-9})$$

$$\text{Sol de type D :} \quad \text{CN} = 26.19 \times \text{C} + 64.619 \quad (\text{IX-10})$$

Les cartes du facteur CN pour les différentes saisons et pour la moyenne annuelle représentées dans les figures IX-5, IX-6, IX-7, IX-8 et IX-9 sont générées en utilisant les droites de régression citées auparavant.

Tableau IX-6 : Tables NRCS des valeurs de CN (USACE, 2013)

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type and hydrologic condition	Average percent impervious area ²	A	B	C	D
<i>Fully developed urban areas</i>					
Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) ³ :					
Poor condition (grass cover < 50%)		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%)		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%)		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way)					
		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way)					
		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way)					
		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way)					
		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way)					
		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only) ⁴ . .					
		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders)					
		96	96	96	96
Urban districts:					
Commercial and business					
	85	89	92	94	95
Industrial					
	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size					
1/8 acre or less (town houses)					
	65	77	85	90	92
1/4 acre					
	38	61	75	83	87
1/3 acre					
	30	57	72	81	86
1/2 acre					
	25	54	70	80	85
1 acre					
	20	51	68	79	84
2 acre					
	12	46	65	77	82
<i>Developing urban areas</i>					
Newly graded areas (pervious areas only, no vegetation) ⁵					
		77	86	91	94
Idle lands (CN's are determined using cover types similar to those in table 2-2c					

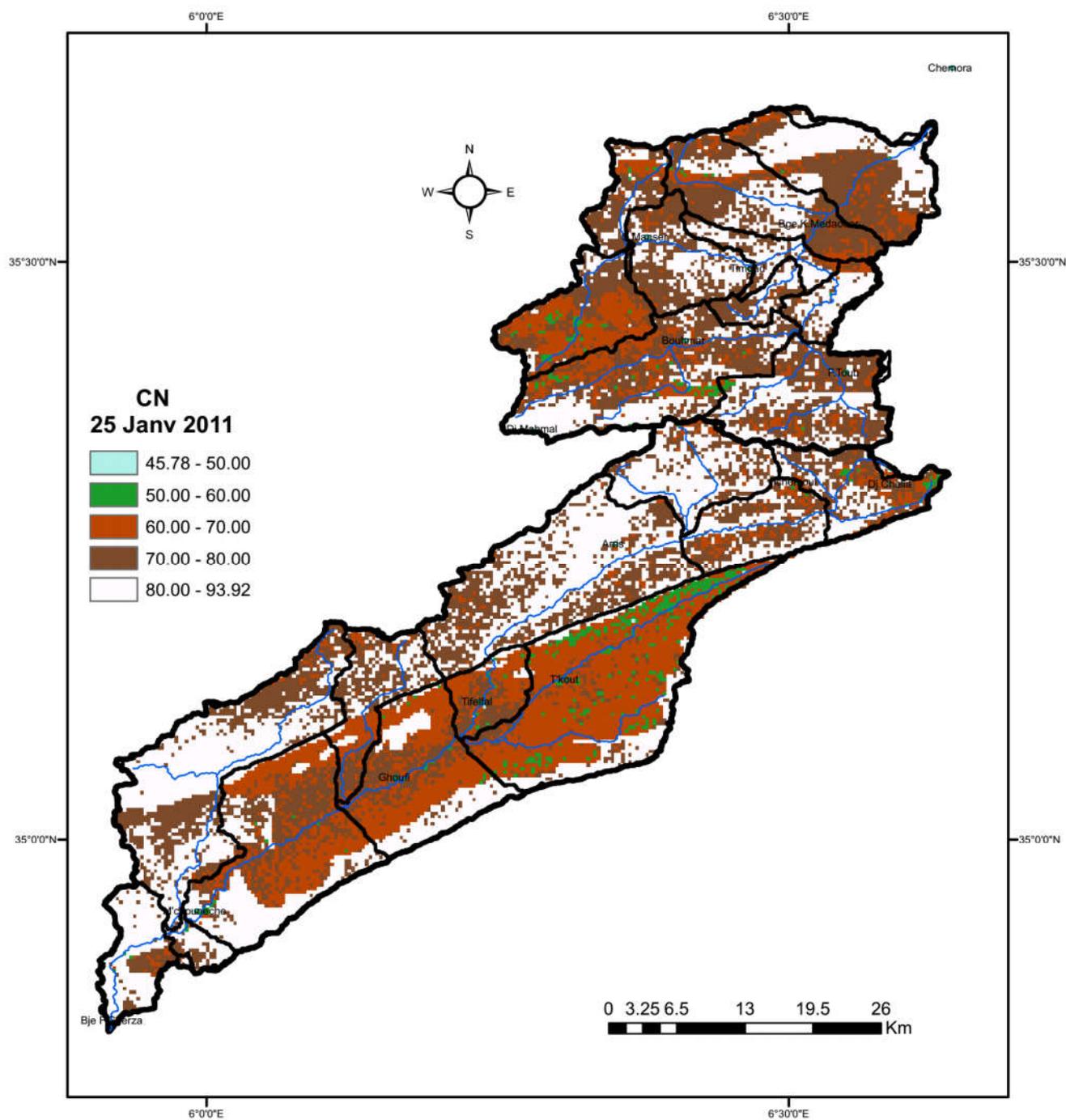


Figure IX-5 : Carte des valeurs de CN du 25 Janvier 2011.

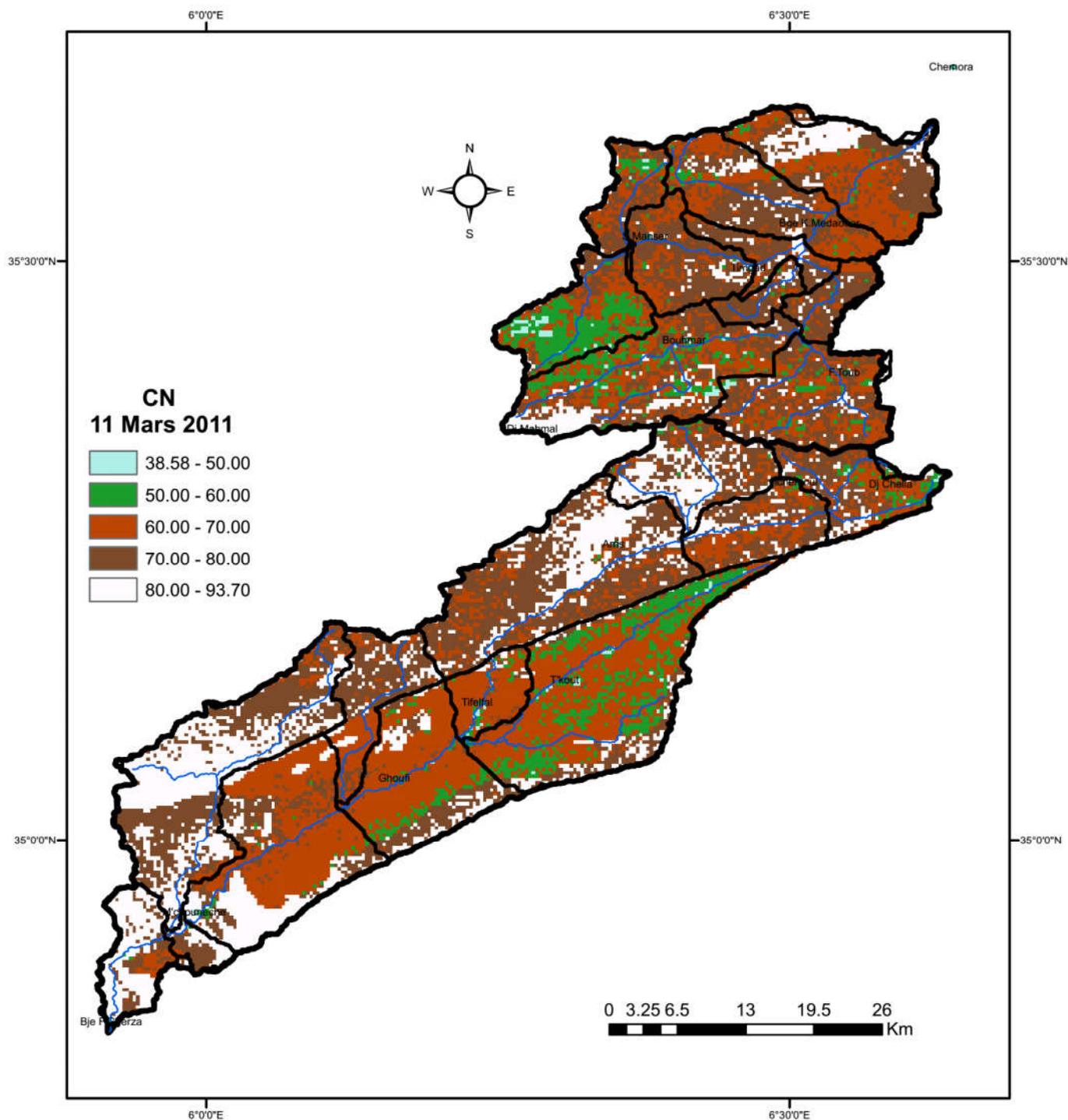


Figure IX-6 : Carte des valeurs de CN du 11 Mars 2011.

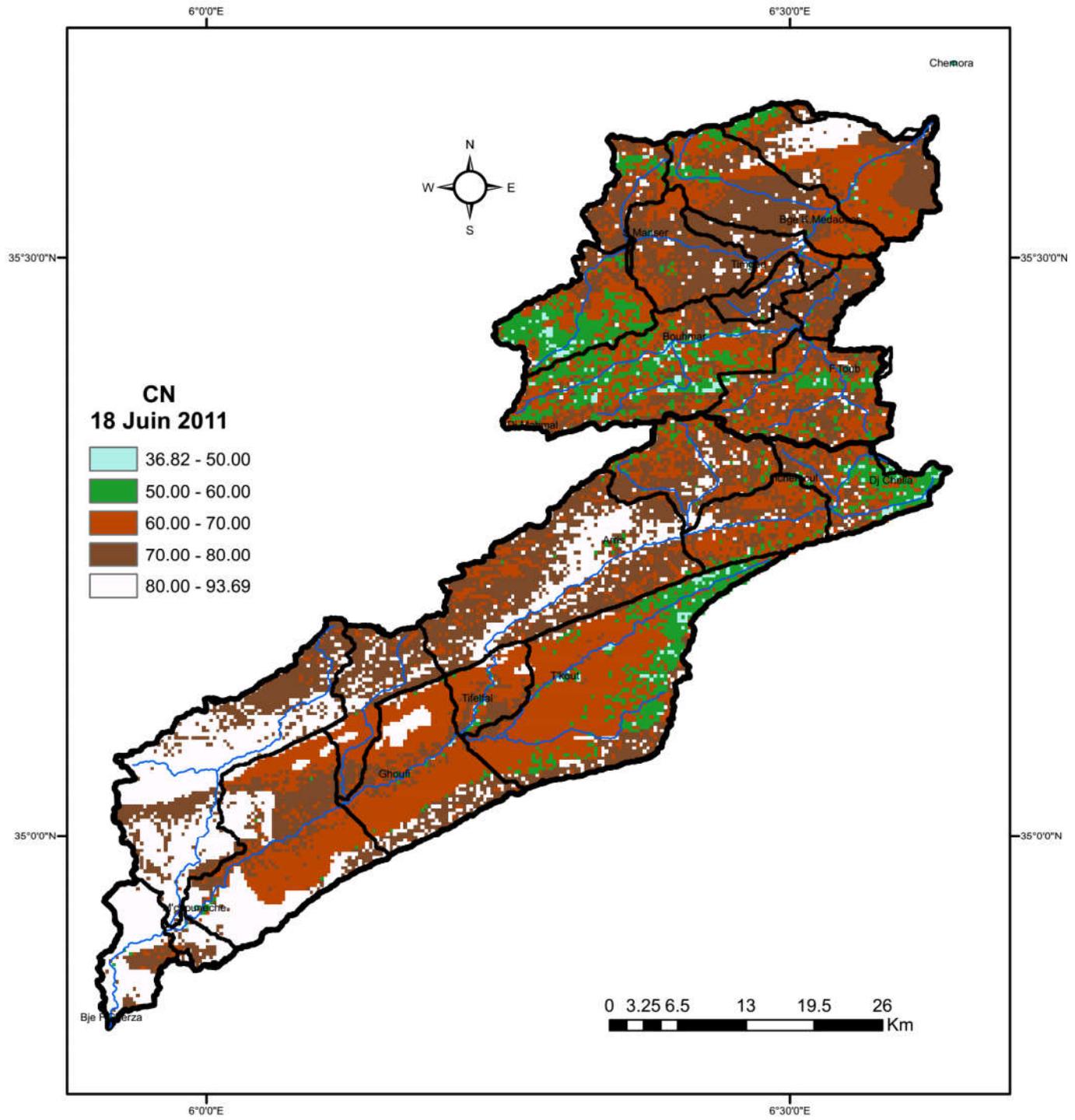


Figure IX-7 : Carte des valeurs de CN du 18 Juin 2011.

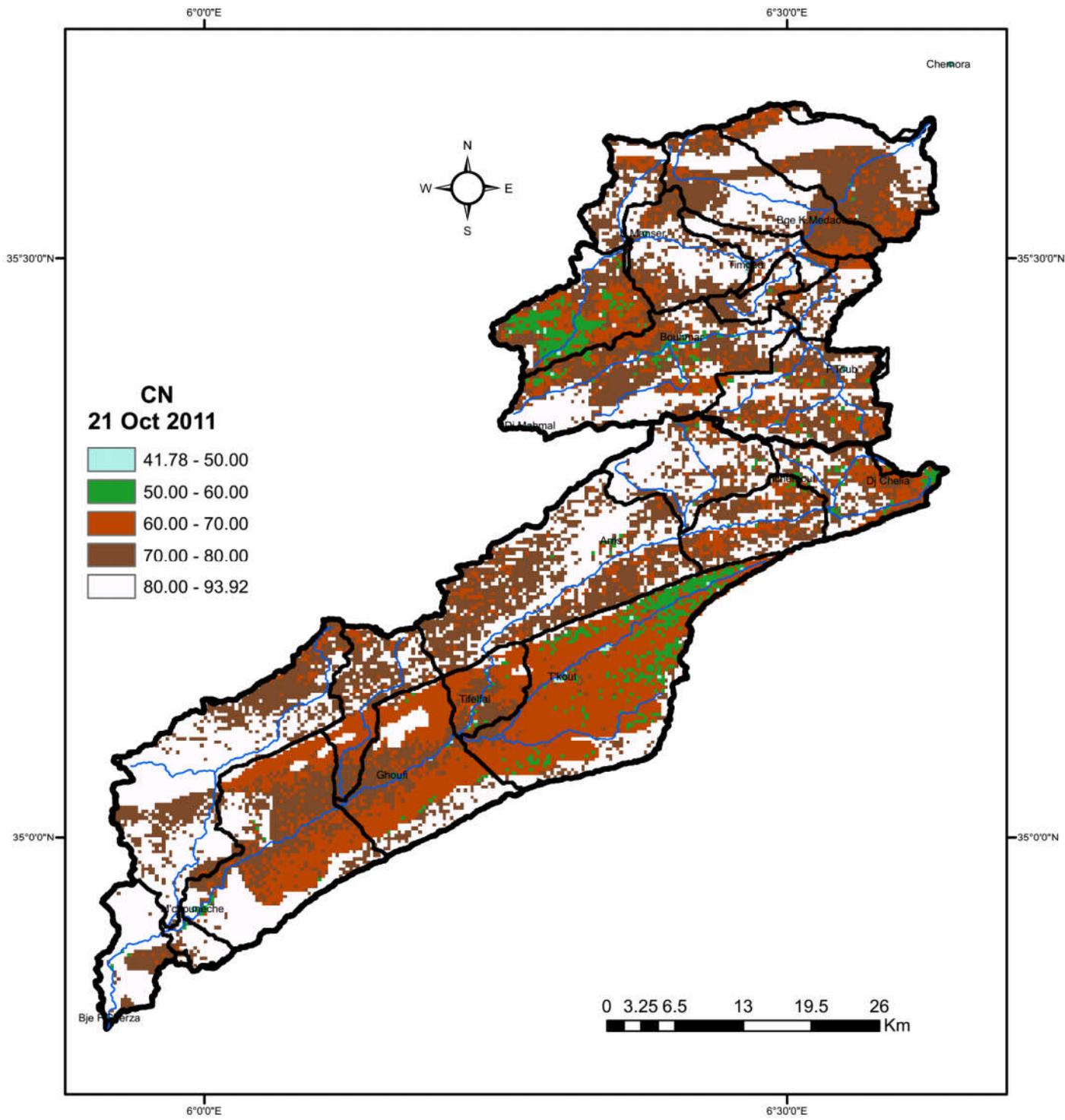


Figure IX-8 : Carte des valeurs de CN du 21 Octobre 2011.

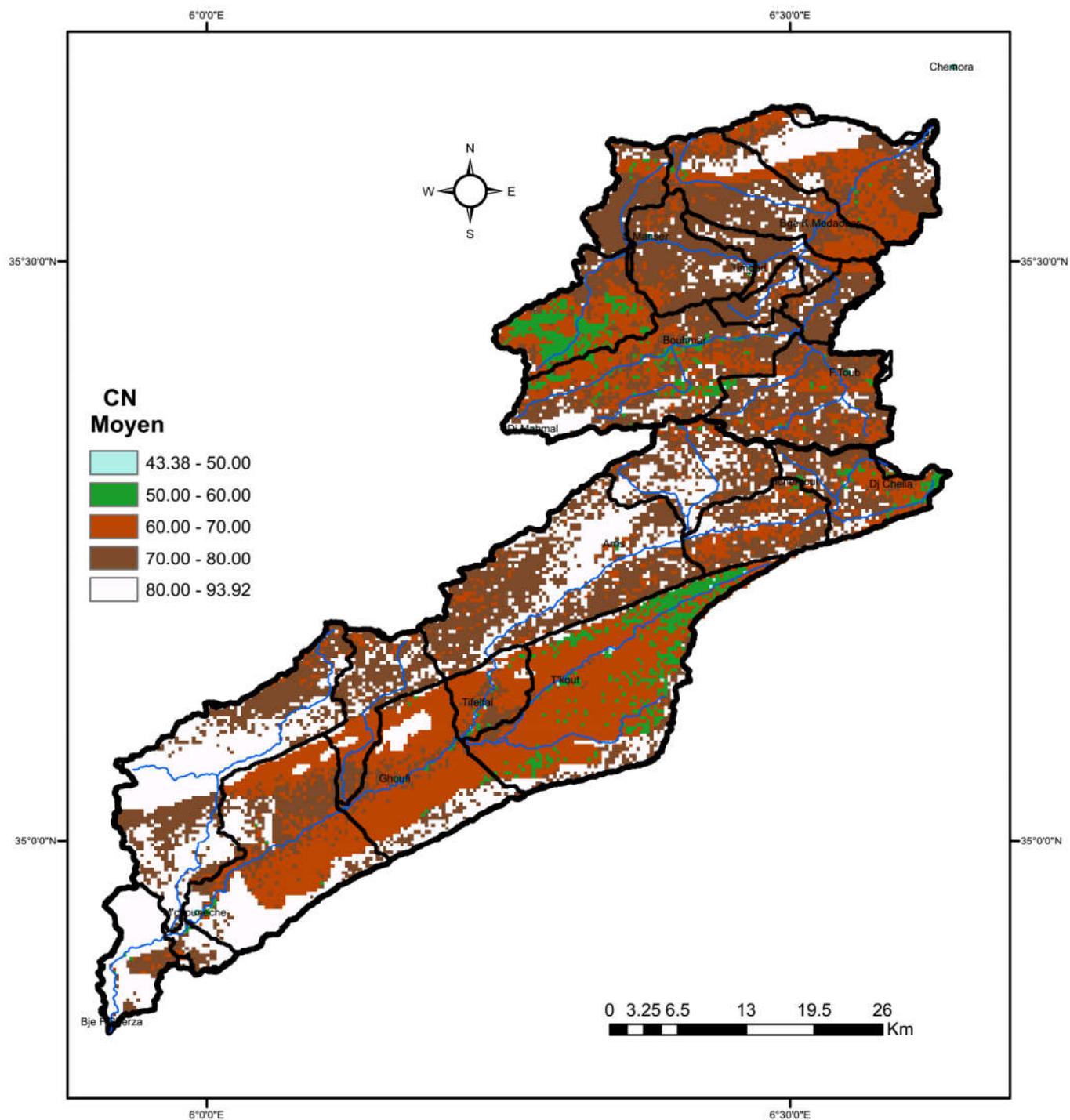


Figure IX-9 : Carte des valeurs moyenne de CN.

Résultats des valeurs de CN pour chaque sous bassins

Tableau IX-7 : Bassin Chemora : Les valeurs du CN

Bassin Oued Chemora						
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	CN 25/01/2011	CN 11/03/2011	CN 18/06/2011	CN 21/10/2011	CN Moyen
CH01	28B	70.09	61.52	61.51	67.56	65.17
CH02	31B	75.94	69.72	64.10	76.12	71.47
CH03	32B	78.02	70.53	67.94	76.56	73.26
CH04	27B	76.21	69.06	69.60	79.36	73.56
CH05	26B	78.52	72.69	72.85	78.61	75.67
CH06	29B	79.08	74.67	74.62	78.67	76.76
CH07	30B	79.37	73.49	72.09	78.19	75.79
CH08	25B	79.59	74.58	74.52	79.02	76.93
CH09	24B	76.21	71.56	70.08	77.86	73.93
CH10	23B	77.54	72.72	71.37	77.97	74.90

Tableau IX-08 : Bassin Labiod : Les valeurs du CN

Bassin Oued Labiod						
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	CN 25/01/2011	CN 11/03/2011	CN 18/06/2011	CN 21/10/2011	CN Moyen
LAB01	2B	76.63	70.61	64.56	74.35	71.54
LAB02	3B	82.64	77.92	71.86	81.06	78.37
LAB03	4B	78.98	73.73	69.66	76.49	74.72
LAB04	5B	81.58	76.91	76.55	78.97	78.50
LAB05	7B	68.25	64.56	64.30	66.85	65.99
LAB06	6B	69.68	66.20	68.41	68.99	68.32
LAB07	8B	76.64	74.05	74.82	75.47	75.25
LAB08	9B	73.85	68.86	70.90	72.42	71.51
LAB09	11B	81.41	80.05	81.10	81.01	80.89
LAB10	10B	75.68	74.05	75.13	75.72	75.14
LAB11	12B	82.84	80.80	82.37	83.16	82.29
LAB12	13B	82.02	80.96	81.85	82.31	81.79

b- Abstraction Initiale Ia : abstraction initiale en mm, elle correspond aux pertes initiales provenant durant la première phase de l'événement pluvieux, dû aux interceptions, au stockage naturel dans les dépressions,...etc. L'écoulement ne débute qu'une fois la pluie brute dépasse la valeur de Ia. On estime sa valeur le plus souvent par calibration, cependant il existe des tableaux qui donnent des ordres de grandeur de ce paramètre.

Les valeurs de ce paramètre ont été calibrées par le modèle HEC-HMS.

Tableau IX-09 : Les valeurs de l'abstraction initiale I_a des sous bassins formant le bassin oued Chemora:

Bassin Oued Chemora			
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	I_a (mm) (1)	I_a (mm) (2)
CH01	28B	4	14
CH02	31B	7	11
CH03	32B	8	12
CH04	27B	8	12
CH05	26B	9	14
CH06	29B	9	9
CH07	30B	9	9
CH08	25B	9	9
CH09	24B	8	8
CH10	23B	9	14

I_a (1): I_a donnée initiale.

I_a (2): I_a donnée calibrée par Hec Hms.

Tableau IX-10 : Les valeurs de l'abstraction initiale I_a des sous bassins formant le bassin oued Labiod

Bassin d'Oued Labiod			
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	I_a (mm) (1)	I_a (mm) (2)
LAB01	2B	7	46
LAB02	3B	8	31
LAB03	4B	8	30
LAB04	5B	9	31
LAB05	7B	5	21
LAB06	6B	7	21
LAB07	8B	9	21
LAB08	9B	8	21
LAB09	11B	8	27
LAB10	10B	9	21
LAB11	12B	8	27
LAB12	13B	8	27

I_a (1): I_a donnée initiale.

I_a (2): I_a donnée calibrée par Hec Hms.

c- La pluie

Pour chaque événement, la pluie devrait être saisie sous forme de la hauteur de pluie tombée sur le sous bassin pendant le jour où cet événement est survenu, au quelle nous associons chaque fois une des quatre distributions NRCS. Nous nous étions limités à la période 1969– 1995, pour être à

la base de laquelle se fera le choix des événements de simulation, et cela dû à la réalisation du barrage de Koudiet Medaouer après cette date, chose qui perturbe le fonctionnement hydrologique du bassin.

Après le balayage des débits et des pluies maximales journalières durant les périodes précisées, le nombre d'événements que nous avons choisi est de 3 pour chaque bassin, pour lesquelles les pluies mensuelles égales aux pluies maximales journalières du même mois.

Pour le bassin oued Chemora, les crues sélectionnées sont les suivantes : 20 Juin 1989, 31 Mars 1991 et 12 Mars 1995. Pour le bassin oued Labiod, les crues sélectionnées sont les suivantes : 02 Septembre 1979, 10 Novembre 1982 et 19 Juin 1989.

Nous appliquerons les pluies maximales journalières estimées aux sous bassins à partir des celles enregistrées aux stations pluviométriques situées dans le bassin durant les mêmes dates, comme variable d'entrée au modèle HEC-HMS.

Pour chaque événement, la pluie devrait être saisie sous forme de la hauteur de pluie tombée sur chaque sous bassin pendant le jour où cet événement est survenu.

Cette dernière est estimée pour chaque sous bassins par la moyenne pondérée des précipitations enregistrées aux niveaux des stations pluviométriques du bassin total.

Les poids des stations pluviométriques pour les différents sous bassins sont les suivants :

Tableau IX-11 : Les valeurs des poids des différentes stations pluviométriques pour le bassin oued Chemora

Bassin Oued Chemora					
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	S/ MANSAR	TIMGAD	ROBAE	BOUHMAR
CH01	28B	0.43	0.00	0.00	0.57
CH02	31B	0.00	0.05	0.00	0.95
CH03	32B	0.00	0.04	0.39	0.57
CH04	27B	1.00	0.00	0.00	0.00
CH05	26B	0.71	0.21	0.00	0.08
CH06	29B	0.00	0.90	0.03	0.07
CH07	30B	0.00	0.12	0.88	0.00
CH08	25B	0.21	0.50	0.29	0.00
CH09	24B	0.54	0.17	0.30	0.00
CH10	23B	0.17	0.01	0.82	0.00

Tableau IX-12 : Les valeurs des poids des différentes stations pluviométriques pour le bassin oued Labiod

Bassin Oued Labiod					
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	ICHEMOUL	TIFELFAL	TKOUT	A BG
LAB01	2B	1.00	0.00	0.00	0.00
LAB02	3B	1.00	0.00	0.00	0.00
LAB03	4B	1.00	0.00	0.00	0.00
LAB04	5B	0.14	0.12	0.73	0.00
LAB05	7B	0.05	0.15	0.80	0.00
LAB06	6B	0.00	0.72	0.28	0.00
LAB07	8B	0.00	1.00	0.00	0.00
LAB08	9B	0.00	1.00	0.00	0.00
LAB09	11B	0.00	0.51	0.00	0.49
LAB10	10B	0.00	0.54	0.00	0.46
LAB11	12B	0.00	0.00	0.00	1.00
LAB12	13B	0.00	0.00	0.00	1.00

Les précipitations maximales journalières enregistrées aux stations pluviométriques choisies et celles estimées aux différents sous bassins de oued Chemora sont les suivantes :

Tableau IX-13 : Les valeurs de la pluie du 20 Juin 1989 mesurées aux différentes stations pluviométriques et estimées aux différents sous bassins formant le bassin oued Chemora.

Bassin Oued Chemora événement du 20 Juin 1989						
N° S/Bassin	Station	S/ MANSAR	TIMGAD	ROBAE	BOUHMAR	Pjmax S/bassin
	S/Bassin schéma	17.50	15.50	21.20	40.00	
CH01	28B	7.54	0.00	0.00	22.76	30.30
CH02	31B	0.00	0.82	0.00	37.90	38.71
CH03	32B	0.00	0.64	8.23	22.82	31.69
CH04	27B	17.50	0.00	0.00	0.00	17.50
CH05	26B	12.36	3.29	0.00	3.28	18.92
CH06	29B	0.00	13.88	0.66	2.94	17.48
CH07	30B	0.00	1.89	18.62	0.00	20.51
CH08	25B	3.69	7.72	6.16	0.00	17.58
CH09	24B	9.36	2.57	6.34	0.00	18.28
CH10	23B	3.01	0.17	17.32	0.00	20.50

Tableau IX-14 : Les valeurs de la pluie du 31 Mars 1991 mesurées aux différentes stations pluviométriques et estimées aux différents sous bassins formant le bassin oued Chemora.

Bassin Oued Chemora événement du 31 Mars 1991						
N° S/Bassin	Station	S/ MANSAR	TIMGAD	ROBAE	BOUHMAR	Pjmax S/bassin
	S/Bassin schéma	27.50	49.20	21.80	37.00	
CH01	28B	11.85	0.00	0.00	21.06	32.91
CH02	31B	0.00	2.59	0.00	35.05	37.64
CH03	32B	0.00	2.03	8.46	21.11	31.60
CH04	27B	27.50	0.00	0.00	0.00	27.50
CH05	26B	19.42	10.43	0.00	3.03	32.88
CH06	29B	0.00	44.05	0.68	2.72	47.45
CH07	30B	0.00	5.99	19.15	0.00	25.13
CH08	25B	5.80	24.52	6.34	0.00	36.66
CH09	24B	14.72	8.15	6.52	0.00	29.39
CH10	23B	4.74	0.53	17.81	0.00	23.08

Tableau IX-15 : Les valeurs de la pluie du 12 Mars 1995 mesurées aux différentes stations pluviométriques et estimées aux différents sous bassins formant le bassin oued Chemora.

Bassin Oued Chemora événement du 12 Mars 1995						
N° S/Bassin	Station	S/ MANSAR	TIMGAD	ROBAE	BOUHMAR	Pjmax S/bassin
	S/Bassin schéma	18.80	8.90	15.00	33.50	
CH01	28B	8.10	0.00	0.00	19.06	27.17
CH02	31B	0.00	0.47	0.00	31.74	32.21
CH03	32B	0.00	0.37	5.82	19.12	25.30
CH04	27B	18.80	0.00	0.00	0.00	18.80
CH05	26B	13.28	1.89	0.00	2.74	17.91
CH06	29B	0.00	7.97	0.47	2.46	10.90
CH07	30B	0.00	1.08	13.18	0.00	14.26
CH08	25B	3.97	4.44	4.36	0.00	12.76
CH09	24B	10.06	1.47	4.49	0.00	16.02
CH10	23B	3.24	0.10	12.26	0.00	15.59

Les précipitations maximales journalières enregistrées aux stations pluviométriques choisies et celles estimées aux différents sous bassins de Oued Labiod sont les suivantes :

Tableau IX-16 : Les valeurs de la pluie du 02 Septembre 1979 mesurées aux différentes stations pluviométriques et estimées aux différents sous bassins formant le bassin oued Labiod.

Bassin Oued Labiod événement du 02 Septembre 1979						
N° S/Bassin	Station	ICHEMOUL	TIFELFAL	TKOUT	A BG	Pjmax S/bassin
	S/Bassin schéma	50.10	15.00	28.40	7.00	
LAB01	2B	50.10	0.00	0.00	0.00	50.10
LAB02	3B	50.10	0.00	0.00	0.00	50.10
LAB03	4B	50.10	0.00	0.00	0.00	50.10
LAB04	5B	7.01	1.80	20.73	0.00	29.55
LAB05	7B	2.51	2.25	22.72	0.00	27.48
LAB06	6B	0.00	10.80	7.95	0.00	18.75
LAB07	8B	0.00	15.00	0.00	0.00	15.00
LAB08	9B	0.00	15.00	0.00	0.00	15.00
LAB09	11B	0.00	7.65	0.00	3.43	11.08
LAB10	10B	0.00	8.10	0.00	3.22	11.32
LAB11	12B	0.00	0.00	0.00	7.00	7.00
LAB12	13B	0.00	0.00	0.00	7.00	7.00

Tableau IX-17 : Les valeurs de la pluie du 10 Novembre 1982 mesurées aux différentes stations pluviométriques et estimées aux différents sous bassins formant le bassin oued Labiod.

Bassin Oued Labiod événement du 10 Novembre 1982						
N° S/Bassin	Station	ICHEMOUL	TIFELFAL	TKOUT	A BG	Pjmax S/bassin
	S/Bassin schéma	67.20	24.00	18.30	22.00	
LAB01	2B	67.20	0.00	0.00	0.00	67.20
LAB02	3B	67.20	0.00	0.00	0.00	67.20
LAB03	4B	67.20	0.00	0.00	0.00	67.20
LAB04	5B	9.65	2.93	13.44	0.00	26.02
LAB05	7B	3.33	3.56	14.68	0.00	21.57
LAB06	6B	0.00	17.18	5.20	0.00	22.38
LAB07	8B	0.00	24.00	0.00	0.00	24.00
LAB08	9B	0.00	24.00	0.00	0.00	24.00
LAB09	11B	0.00	12.21	0.00	10.81	23.02
LAB10	10B	0.00	12.92	0.00	10.16	23.08
LAB11	12B	0.00	0.00	0.00	22.00	22.00
LAB12	13B	0.00	0.00	0.00	22.00	22.00

Tableau IX-18 : Les valeurs de la pluie du 19 Juin 1989 mesurées aux différentes stations pluviométriques et estimées aux différents sous bassins formant le bassin oued Labiod.

Bassin Oued Labiod événement du 19 Juin 1989						
N° S/Bassin	Station	ICHEMOUL	TIFELFAL	TKOUT	A BG	Pjmax S/bassin
	S/Bassin schéma	58.10	15.50	26.80	20.20	
LAB01	2B	58.10	0.00	0.00	0.00	58.10
LAB02	3B	58.10	0.00	0.00	0.00	58.10
LAB03	4B	58.10	0.00	0.00	0.00	58.10
LAB04	5B	8.34	1.90	19.68	0.00	29.92
LAB05	7B	2.88	2.30	21.50	0.00	26.68
LAB06	6B	0.00	11.09	7.62	0.00	18.71
LAB07	8B	0.00	15.50	0.00	0.00	15.50
LAB08	9B	0.00	15.50	0.00	0.00	15.50
LAB09	11B	0.00	7.88	0.00	9.93	17.81
LAB10	10B	0.00	8.34	0.00	9.33	17.67
LAB11	12B	0.00	0.00	0.00	20.20	20.20
LAB12	13B	0.00	0.00	0.00	20.20	20.20

IX-1-1-4- 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 découle d'un grand nombre de petits bassins sur tous les États Unis (Laborde, 2007). Il exprime le débit U_t comme proportionnel au débit de pointe U_p , pour chaque temps t , fraction du temps de pointe T_p .

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (\text{IX-11})$$

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 :

$$T_p = T_{lag} \frac{\Delta t}{2} \quad (\text{IX-12})$$

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 (IX-11), puis (IX-12) 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 :

$$T_{lag} = L^{0,8} \times \left(\left(\left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \right) + 1 \right)^{0,7} / (1900 \times \sqrt{Y}) \quad (\text{IX-13})$$

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 %.

Tableau IX-19 : Les valeurs des longueurs des cours d'eau, CN, pentes des sous bassins et des T_{lag} calculé et T_{lag} calibré par Hec-Hms pour le bassin oued Chemora.

Bassin d'Oued Chemora									
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	Longueur (m)	CN 25/01/ 2011	CN 11/03/ 2011	CN 18/06/ 2011	CN 21/10/ 2011	Pente du S/bassin (%)	T_{lag} (1) (min)	T_{lag} (2) (min)
CH01	28B	10258	70.09	61.52	61.51	67.56	8.62	59,6	62,88
CH02	31B	19310	75.94	69.72	64.10	76.12	9.46	74,4	70,15
CH03	32B	10905	78.02	70.53	67.94	76.56	12.57	40,4	39,83
CH04	27B	9264	76.21	69.06	69.60	79.36	4.52	54,3	57,31
CH05	26B	9484	78.52	72.69	72.85	78.61	4.52	56,6	56,60
CH06	29B	6899	79.08	74.67	74.62	78.67	6.01	38,0	46,78
CH07	30B	8130	78.19	73.49	72.09	78.19	7.20	40,2	49,30
CH08	25B	4156	79.59	74.58	74.52	79.02	3.79	31,5	22,42
CH09	24B	6319	76.21	71.56	70.08	77.86	6.05	36,2	35,77
CH10	23B	6589	77.54	72.72	71.37	77.97	4.88	41,5	41,83

T_{lag} (1): T_{lag} calculé.

T_{lag} (2): T_{lag} calibré par Hec Hms.

Tableau IX-20 : Les valeurs des longueurs des cours d'eau, CN, pentes des sous bassins et des T_{lag} calculé et T_{lag} calibré par Hec Hms pour le bassin oued Labiod.

Bassin d'Oued Labiod									
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	Longueur (m)	CN 25/01/ 2011	CN 11/03/ 2011	CN 18/06/ 2011	CN 21/10/ 2011	Pente du S/bassin (%)	T _{lag} (1) (min)	T _{lag} (2) (min)
LAB01	2B	8098	76.63	70.61	64.56	74.35	14.45	31,6	51,02
LAB02	3B	9250	82.64	77.92	71.86	81.06	14.30	28,9	30,56
LAB03	4B	9002	78.98	73.73	69.66	76.49	15.43	31,3	31,07
LAB04	5B	23149	81.58	76.91	76.55	78.97	16.83	59,2	58,60
LAB05	7B	6894	68.25	64.56	64.30	66.85	13.30	33,6	33,73
LAB06	6B	23443	69.68	66.20	68.41	68.99	14.37	91,1	137,13
LAB07	8B	14558	76.64	74.05	74.82	75.47	14.85	48,3	48,20
LAB08	9B	11103	73.85	68.86	70.90	72.42	15.23	41,9	41,93
LAB09	11B	19178	81.41	80.05	81.10	81.01	11.72	67,3	67,00
LAB10	10B	28520	75.68	74.05	75.13	75.72	13.44	73,5	73,50
LAB11	12B	5317	82.84	80.80	82.37	83.16	10.75	20,0	20,00
LAB12	13B	11012	82.02	80.96	81.85	82.31	8.63	41,1	41,10

T_{lag} (1): T_{lag} calculé.

T_{lag} (2): T_{lag} calibré par Hec Hms.

Les valeurs de ce paramètre ont été calculées en utilisant la formule IX-13, ensuite calibrées par le modèle HEC-HMS.

IX-1-1-5- Le débit de base : la récession exponentielle

IX-1-1-5-1- 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 (USACE, 2013) :

$$Q_t = Q_0 \times k^t \quad (\text{IX-14})$$

Où, Q_t : le débit au temps t ;

Q_0 : le débit initial ;

K : la constante de décroissance exponentielle.

En effet, avant le pic de l'hydrogramme, et connaissant le débit initial, l'équation (IX-14) s'active et commence à reproduire le débit total composé uniquement du débit de base du cours d'eau, jusqu'au point de début de la crue, depuis lequel ce module agira en parallèle avec le module de la fonction de transfert pour restituer le débit total composé à la fois d'un débit de base en décroissance et d'un débit de surface en forte action (USACE, 2013).

Ce constat demeure actif jusqu'à un certain point nommé seuil, où l'ampleur de participation dans le débit total se renverse. La figure ci-après illustre comment intervient ce module dans le ruissellement :

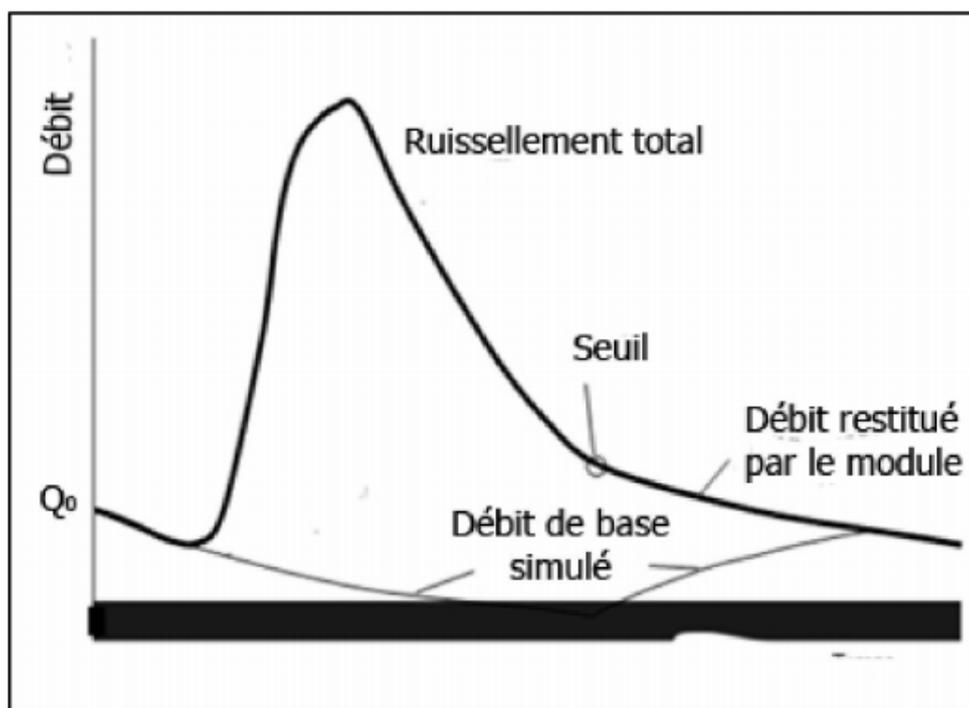


Figure IX-10 : L'illustration de la méthode de la récession exponentielle, d'après (USACE, 2013)

IX-1-1-5-2- La variable

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

IX-1-1-5-3- Les paramètres

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 (USACE, 2013).

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 (USACE, 2013).

IX-1-1-6- Les avantages de la combinaison modulaire choisie

- * Le module météorologique adopté a permis de surmonter le problème d'absence des données de pluviographe.
- * La méthode NRCS CN est simple, fidèle, ne nécessite pas d'énormes quantités de données, et dépend directement d'un seul paramètre qui renferme trois facteurs de base dans la modélisation pluie-débit (l'occupation du sol, les sols et l'humidité antécédente) (USAID, 2013).
- * La fonction de transfert sélectionnée n'exigent pas beaucoup de données, et montrent des résultats satisfaisants.
- * Le module de débit de base est le mieux adapté au contexte semi-aride, et va aider à mieux restituer les hydrogrammes de crues.
- * La combinaison ne contient que peu de paramètres ce qui diminue les erreurs causées par les phénomènes de compensation entre les paramètres et d'équi-finalité (USAID, 2013).

IX-1-1-7- Justification du choix du modèle

Le choix du modèle a été dicté par plusieurs contraintes de moyens et facteurs de privilège qui font de ce modèle un bon choix. Parmi ceux les plus importants :

- * Les données exigées par le modèle sont plus ou moins simples, accessibles et disponibles. Donc, le modèle peut donc tourner sans soucis (USAID, 2013).
- * Possibilité d'intégrer les majeurs facteurs affectant la transformation pluie-débit (morphométrie du bassin versant, occupation du sol, types de sols et humidité antérieure) et donc les résultats seront plus réalistes (USACE, 2013).

* La NRCS CN a été validée sur plusieurs bassins versants dans le monde, et ses résultats sont fiables et similaires aux modèles complexes (Motevalli, Hosseinzadeh, Esmaili, Derafshi et Gharehchahi, 2012).

IX-1-2- L'élaboration du modèle (pluie - débit liquide)

Avant de débiter la calibration, nous avons préparé tous les fichiers de simulation des deux événements préalablement présélectionnés pour chaque bassin, en prenant en compte les quatre types d'averses NRCS et pour analyser la sensibilité du modèle successivement aux types d'averse. Ainsi, nous avons 08 fichiers de simulation.

Pour chacun des 08 fichiers de simulation, on aura les données suivantes :

Tableau IX-21 : 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, pente, coef de Manning	m 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	-

IX-1-3- La calibration du modèle

Afin d'aboutir aux valeurs optimisées des paramètres du modèle, la calibration a été effectuée pour les 08 fichiers de simulations (pour chaque bassin) en utilisant le débit de pointe.

À partir des résultats de la calibration (annexe), nous pouvons constater d'une manière générale que les valeurs optimisées des paramètres, les débits de pointe et les volumes simulés varient tous en fonction de l'événement et du type de l'averse sélectionné.

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

*Les averses types IA ont été les mieux classé dans la restitution des caractéristiques de l'hydrogramme.

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

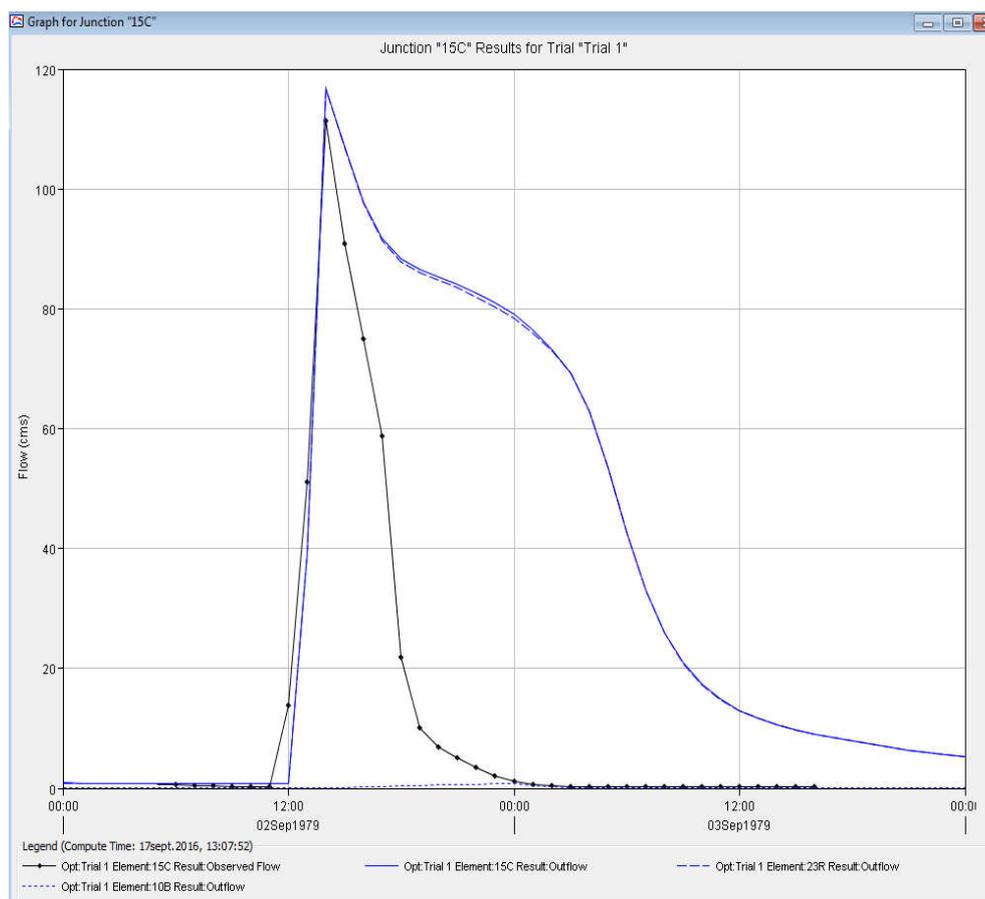


Figure IX-11 : Hydrogrammes de la crue simulée et la crue observée du 02 Septembre 1979 à la station de M'chouneche.

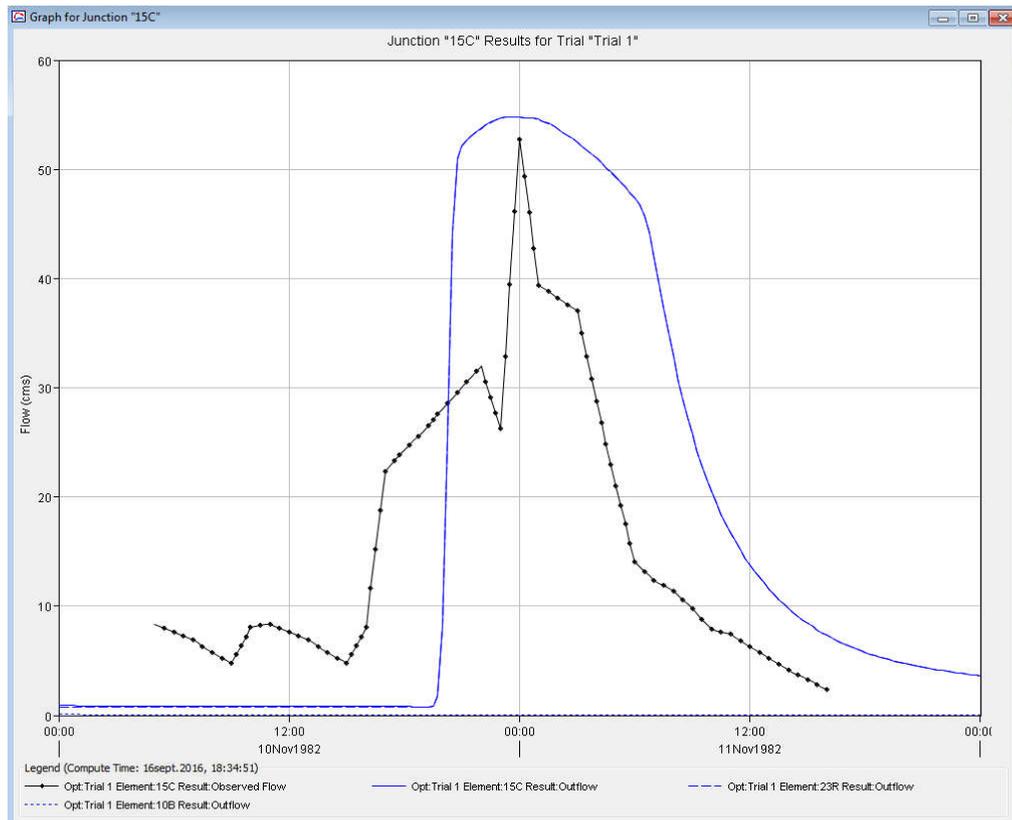


Figure IX-12 : Hydrogrammes de la crue simulée et la crue observée du 10 Novembre 1982 à la station de M'chouneche.

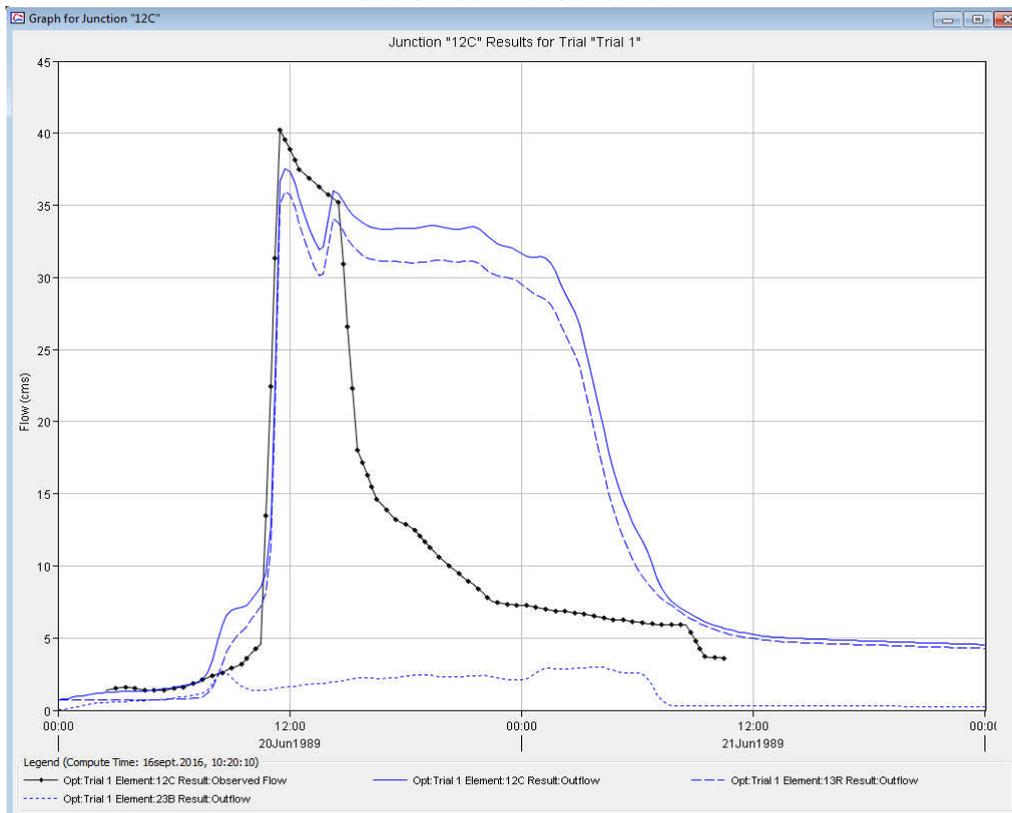


Figure IX-13 : Hydrogrammes de la crue simulée et la crue observée du 20 Juin 1989 à la station de Chemora.

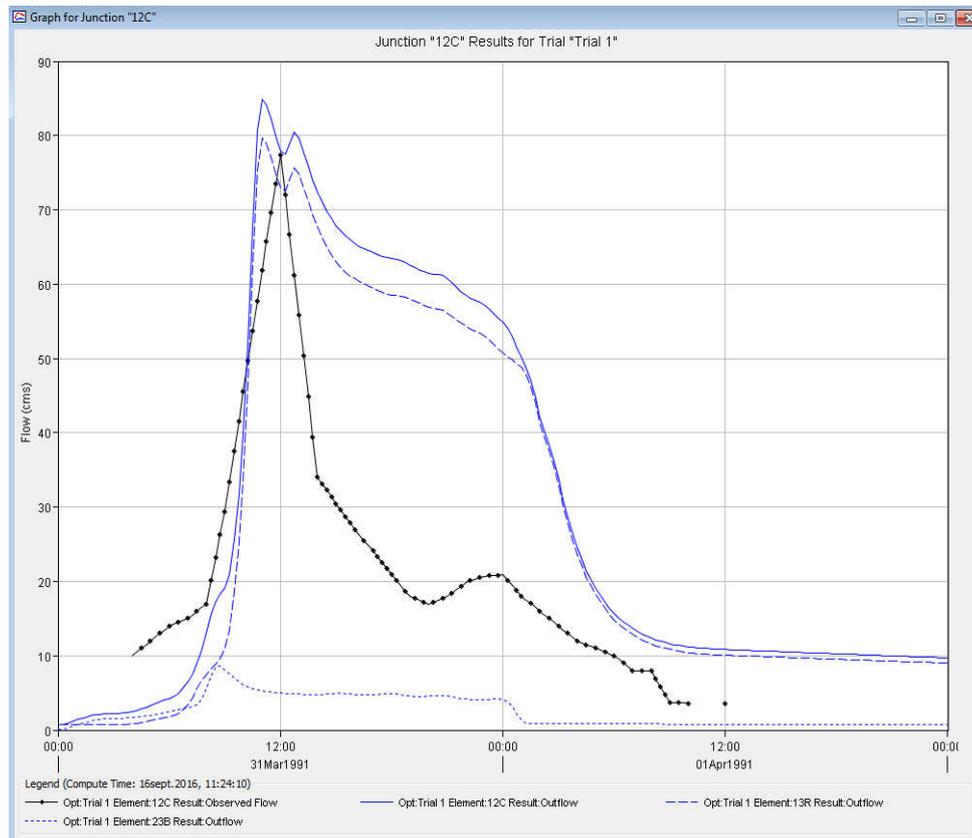


Figure IX-14 : Hydrogrammes de la crue simulée et la crue observée du 31 Mars 1991 à la station de Chemora.

Tableau IX-22 : les résultats de calibration

Événement	Q _p obs (m ³ /s)	Q _p simulé (m ³ /s)	Différence %
Bassin Oued Labiod (à la station de M'chouneche)			
02 Septembre 1979	111,3	116,8	4,94
10 Novembre 1982	52,7	54,8	3,98
Bassin Oued Chemora (à la station de Chemora)			
20 Juin 1989	40,2	37,5	-6,72
31 Mars 1991	77,4	84,9	9,69

IX-1-4- La validation du modèle

Après la calibration faite qui a donné des résultats satisfaisants en matière de la restitution des débits de pointe. Cette nouvelle validation effectuée sur le troisième événement pour chaque bassin.

En appliquant les jeux de paramètres résultats des calibrations aux événements de calibration, nous arrivons aux résultats suivants :

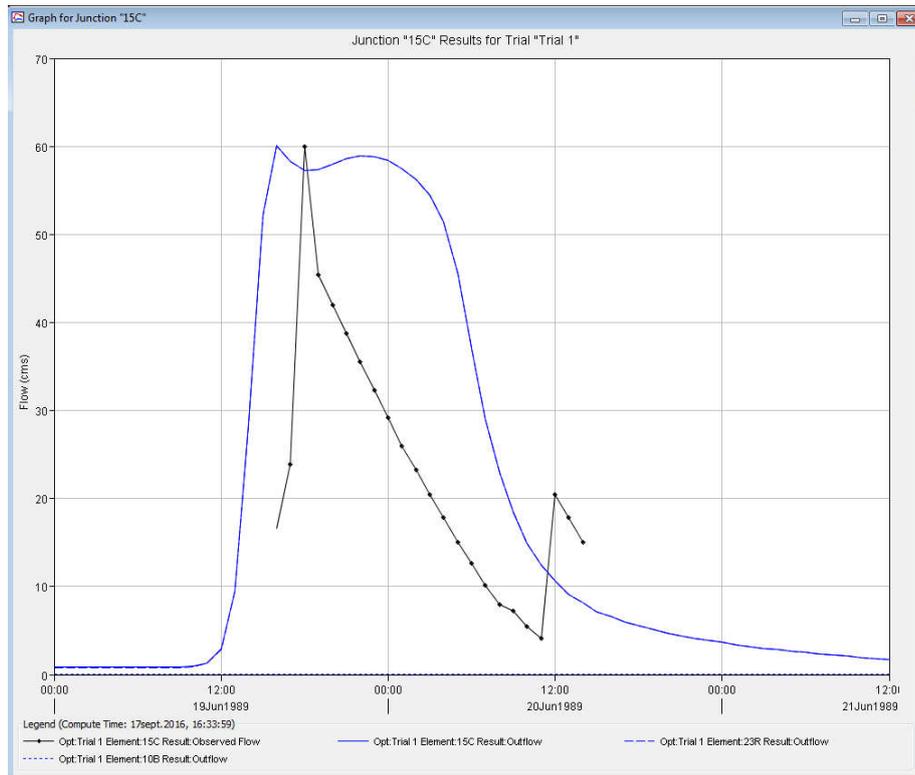


Figure IX-15 : Hydrogrammes de la crue simulée et la crue observées du 19 Juin 1989 à la station de M'chouneche.

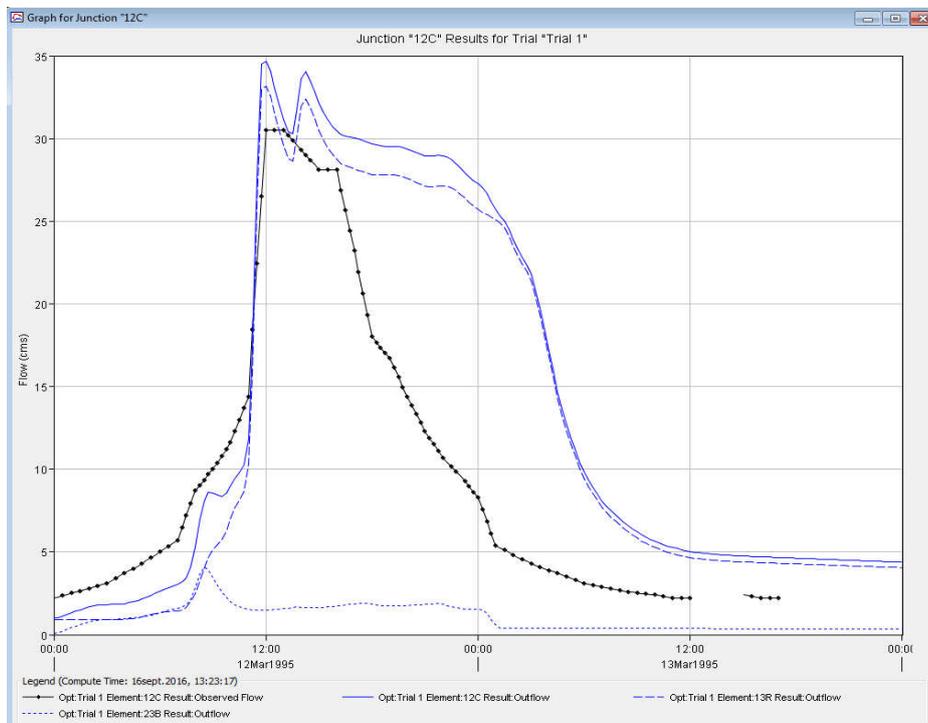


Figure IX-16 : Hydrogrammes de la crue simulée et la crue observées du 12 Mars 1995 à la station de Chemora.

Tableau IX-23 : Les résultats de la validation en appliquant le jeu de paramètre optimal de la calibration

Evénement	Q _p obs (m ³ /s)	Q _p simulé (m ³ /s)	Différence %
Bassin Oued Labiod (à la station de M'chouneche)			
02 Septembre 1979	111,3	116,8	4,94
10 Novembre 1982	52,7	54,8	3,98
19 Juin 1989	60,0	60,1	0,17
Bassin Oued Chemora (à la station de Chemora)			
20 Juin 1989	40,2	37,5	-6,72
31 Mars 1991	77,4	84,9	9,69
12 Mars 1995	30,5	34,6	13,44

IX-1-5- Synthèse sur la modélisation hydrologique

Les résultats de la simulation découle directement des données d'entrée que l'en lui introduit, et des méthodes des différentes étapes du transfert pluie – débit.

Les entrées du modèle

Avant de penser à valider un modèle, on doit vérifier si les données fournies sont représentatives, dans ce travail, la combinaison modulaire utilisée était la moins exigeante parmi celles offertes par le modèle HEC-HMS.

HEC HMS est un modèle à caractère global qui ne nécessite pas une grande précision dans la description du bassin, les données nécessaires pour ce modèle sont :

MNT crée à partir des images LANDSAT de précision 30 x 30m.

Carte d'occupation du sol ou carte du couvert végétal élaborée dans le chapitre précédent à partir des cartes NDVI élaborées également à partir des images LANDSAT adaptée à la classification reconnue par le NRCS.

Carte des sols type NRCS des bassins versants a été élaborée à partir de la carte lithologique élaborée dans le troisième chapitre (partie B) à partir de la carte géologique des Aurès.

La variable pourcentage d'imperméable a été élaborée à partir de la carte lithologique et calibrée par HEC HMS.

Les modules

Le module météorologique : l'utilisation d'averses NRCS destinées essentiellement à la détermination des débits de projet a permis la restitution des débits de pointe.

Le module de la fonction de production : le module de la fonction de production NRCS CN dépend du paramètre CN et de la répartition spatio-temporelle de la pluie.

Le premier paramètre CN a été calculé en adoptant les cartes du couvert végétal (C), élaborées dans le chapitre précédent à partir des cartes NDVI élaborées également à partir des images LANDSAT5, à la classification reconnue par le NRCS.

Les pluies des sous bassins ont été estimées par la méthode des moyennes pondérées en exploitant les pluies maximales journalières enregistrées aux niveaux de toutes les stations pluviométriques situées dans les deux bassins, qui sont réparties de manière relativement homogène.

Le module de la fonction de transfert : la fonction de transfert choisie « l'hydrogramme unitaire de la NRCS », est très utilisée dans la simulation du débit dans des contextes où l'occupation du sol et la topographie sont complexes, et elle donne de bons résultats.

Le module du débit de base : les deux paramètres du module ont été déterminés par calibration.

Les sorties

Les résultats de la modélisation hydrologique par HEC-HMS lors des phases de calibration et de validation sont assez satisfaisants, ils se résument en :

Les débits de pointe : ils sont bien reproduits pour tous les événements, pendant la calibration et la validation.

Les volumes de crue : Une surestimation des volumes des crues simulées est remarquée pour tous les événements. Elle est due essentiellement à l'utilisation des averses de projet NRCS au lieu des distributions réelles à partir des pluviographes.

En outre, la performance du modèle a été évaluée en comparant les débits de pointes simulés et ceux observés en terme d'erreur relative (Babel et al. 2004, Najim Et al, 2006). Les erreurs relatives calculées sont inférieures à 10%, sauf pour le cas de la crue du 12 Mars 1995 du bassin oued Chemora, elle est 13,44 %, ces erreurs sont jugées faibles et le modèle que nous avons établi nous donne finalement des résultats assez satisfaisants.

IX-2- Modèle hydro-sédimentologique (Apports solides) :

IX-2-1- L'élaboration du modèle hydro-sédimentologique (Apports solides)

HEC-HMS utilise 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 :

$$SY = 11,8 \cdot (Q \cdot qp)^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot Lv \quad (IX-15)$$

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

Q : volume de ruissellement consécutif à l'averse (m³) au niveau du bassin versant

Qp : débit de pointe (m³/s)

Lv : longueur du versant

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

Avant la calibration de cette partie du modèle, nous avons préparé les fichiers de simulations concernant les sédiments des deux 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 Hec Hms, pour analyser la sensibilité du modèle aux différentes combinaisons. Ainsi, nous avons 70 fichiers de simulation. Et pour chacun de ces fichiers de simulation, on aura les données suivantes :

Tableau IX-24 : 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	-

Tableau IX-25 : Les valeurs du facteur d'éordabilité (K), du facteur topographique (LS) et du facteur de couverture du sol (C) pour le bassin d'oued chemora

Bassin Oued Chemora							
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	K	LS	C 25/01/2011	C 11/03/2011	C 18/06/2011	C 21/10/2011
CH01	28B	0.34	10.37	0.72	0.53	0.53	0.66
CH02	31B	0.40	12.21	0.78	0.65	0.54	0.79
CH03	32B	0.35	15.16	0.75	0.59	0.54	0.72
CH04	27B	0.79	4.16	0.85	0.70	0.71	0.92
CH05	26B	0.77	4.35	0.91	0.79	0.79	0.91
CH06	29B	0.68	5.30	0.92	0.82	0.82	0.91
CH07	30B	0.92	6.54	0.95	0.82	0.79	0.92
CH08	25B	0.92	3.58	0.95	0.84	0.84	0.94
CH09	24B	0.74	6.34	0.88	0.78	0.75	0.92
CH10	23B	0.58	5.04	0.92	0.81	0.78	0.93

Tableau IX-26 : Les valeurs du facteur d'éordabilité (K), du facteur topographique (LS) et du facteur de couverture du sol pour le bassin d'oued Labiod

Bassin Oued Labiod							
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	K	LS	C 25/01/2011	C 11/03/2011	C 18/06/2011	C 21/10/2011
LA01	2B	0.33	17.59	0.74	0.62	0.48	0.69
LA02	3B	0.36	19.08	0.77	0.68	0.56	0.74
LA03	4B	0.29	20.39	0.71	0.60	0.52	0.66
LA04	5B	0.36	22.14	0.76	0.66	0.65	0.7
LA05	6B	0.43	18.58	0.81	0.72	0.72	0.78
LA06	7B	0.51	17.21	0.88	0.82	0.86	0.87
LA07	8B	0.43	18.26	0.77	0.71	0.73	0.75
LA08	9B	0.45	22.23	0.88	0.77	0.82	0.85
LA09	10B	0.58	16.66	0.84	0.81	0.83	0.83
LA10	11B	0.51	20.93	0.91	0.88	0.03	0.91
LA11	12B	0.72	15.10	0.94	0.89	0.93	0.95
LA12	13B	0.74	10.97	0.97	0.95	0.97	0.98

IX-2-2- La calibration du modèle hydro-sédimentologique (Apports solides)

Le jeu de paramètres cité auparavant a été appliqué aux deux événements (pour chaque bassin) présélectionnés auparavant ainsi que sept formules ont été utilisées par Hec-Hms pour prédire l'érosion et le transport solide, et quatre méthodes de calcul de la vitesse de chute. Ainsi, 35 combinaisons différentes qu'on a examinées pour chaque bassin et pour chaque événement. Les résultats de chacune de ces combinaisons ont été comparés avec les données naturelles (mesures à la station hydrométrique de Chemora pour le bassin oued Chemora et à la station hydrométrique de M'chouneche pour le bassin oued Labiod), et enfin la combinaison ayant les résultats plus proches des données naturelles a été choisie.

La combinaison de l'équation de Yang avec la méthode de calcul de vitesse de Van Rijn avec une couche active des lits des oueds moyenne de 50 cm était plus compatible avec les conditions naturelles du bassin oued Chemora, par contre celle de l'équation de Toffaleti avec la méthode de calcul de vitesse de Toffaleti avec une couche active des lits des oueds moyenne varie de 30 à 50 était plus compatible avec les conditions naturelles du bassin oued Labiod.

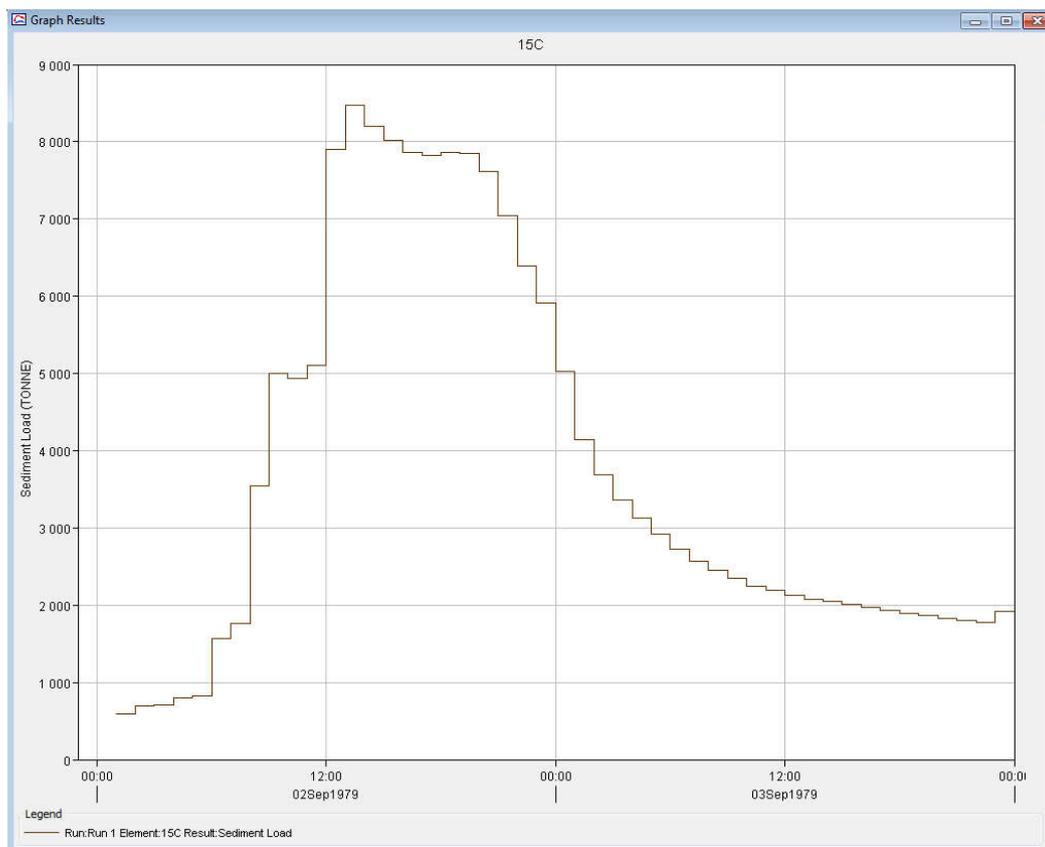


Figure IX -17 : Histogramme des apports solides de la crue simulée du 02 Septembre 1979 à la station de M'chouneche

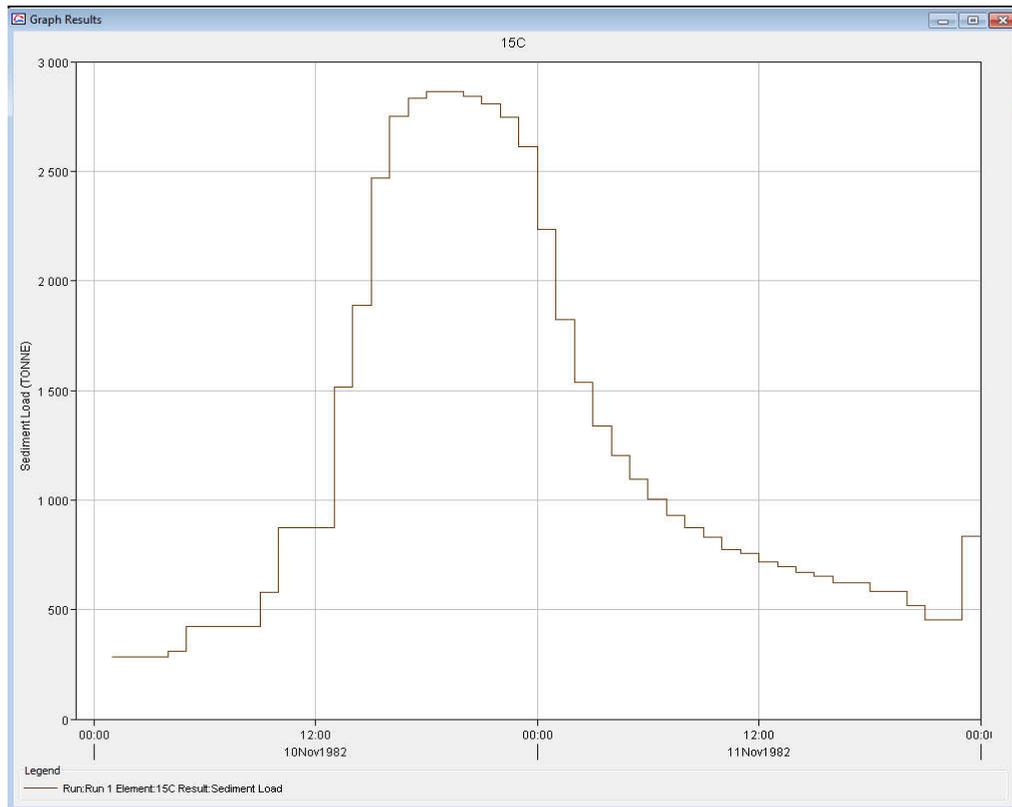


Figure IX -18 : Histogramme des apports solides de la crue simulée du 10 Novembre 1982 à la station de M'chouneche

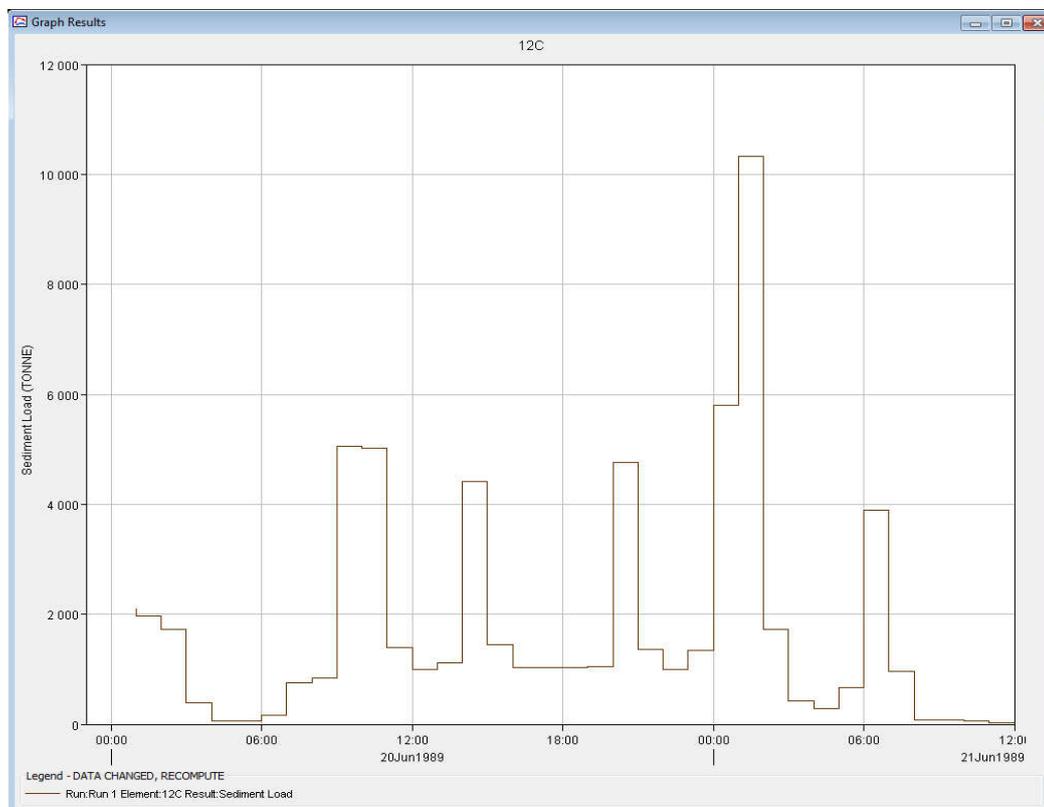


Figure IX -19 : Histogramme des apports solides de la crue simulée du 20 Juin 1989 à la station de Chemora

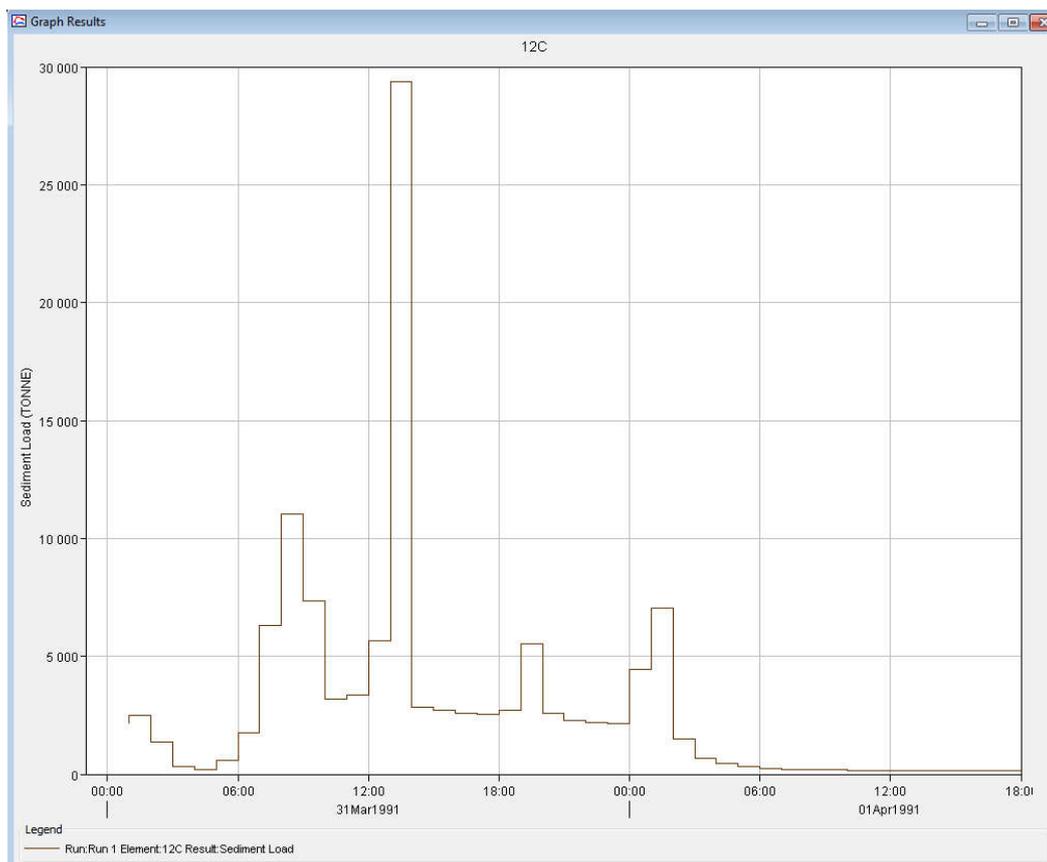


Figure IX -20 : Histogramme des apports solides de la crue simulée du 31 Mars 1991 à la station de Chemora

Tableau IX-27 : les résultats de calibration

Événement	A.S. obs (Tonnes)	A.S. sim (Tonnes)	Différence %
Bassin Oued Labiod (à la station de M'chouneche)			
02 Septembre 1979	189583.4	177083.9	-6.59
10 Novembre 1982	59971.8	56349.1	-6.04
Bassin Oued Chemora (à la station de Chemora)			
20 Juin 1989	68700.6	64467.3	-6.16
31 Mars 1991	125651.5	119711.1	-4.73

IX-2-3- La validation du modèle hydro-sédimentologique (Apports solides)

Après que la calibration est faite de bons résultats ont été trouvés en matière des apports solides transportés par les crues. Cette nouvelle validation effectuée sur le troisième événement pour chaque bassin.

En appliquant les combinaisons de l'équation de transport et la méthode de calcul de vitesse résultats des calibrations aux événements de calibration, nous arrivons aux résultats suivants :

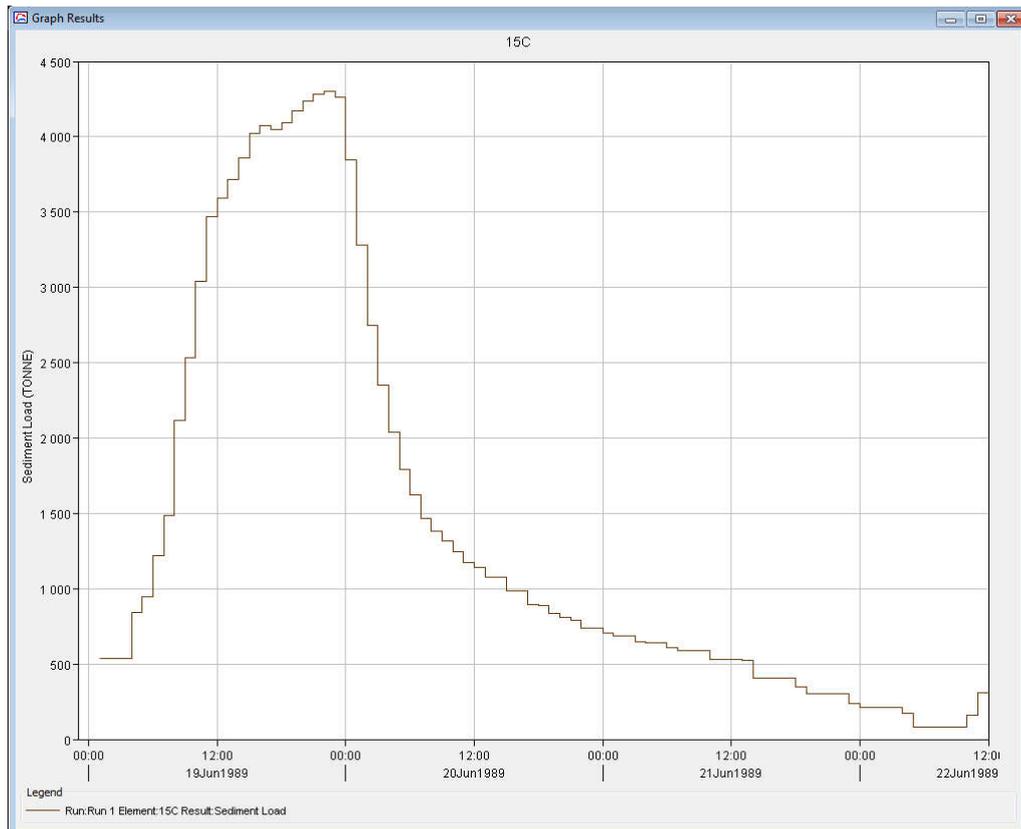


Figure IX -21 : Histogramme des apports solides de la crue simulée du 19 Juin 1989 à la station de M'chouneche

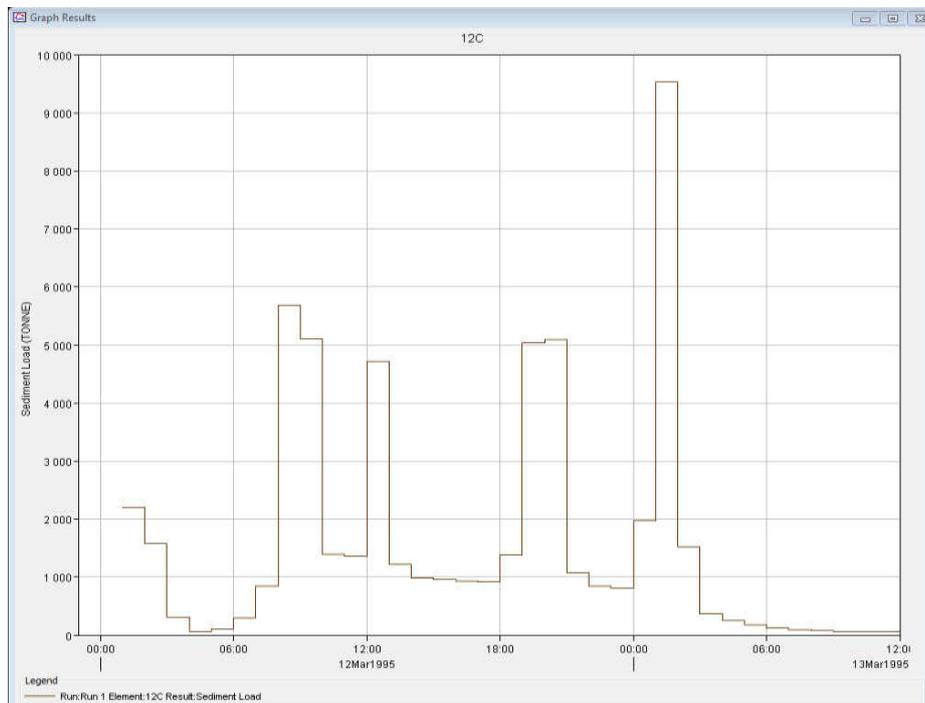


Figure IX -22 : Histogramme des apports solides de la crue simulée du 12 Mars 1995 à la station de Chemora

Tableau IX-28 : Les résultats de la validation en appliquant le jeu de paramètre optimal de la calibration

Événement	A.S. obs (Tonnes)	A.S. sim (Tonnes)	Différence %
Bassin Oued Labiod (à la station de M'chouneche)			
02 Septembre 1979	189583.4	177083.9	-6.59
10 Novembre 1982	59971.8	56349.1	-6.04
19 Juin 1989	141551.10	115499.3	-18.40
Bassin Oued Chemora (à la station de Chemora)			
20 Juin 1989	68700.6	64467.3	-6.16
31 Mars 1991	125651.5	119711.1	-4.73
12 Mars 1995	73054.3	59489.0	-18.57

IX-2-4- Synthèse sur la modélisation hydro- sédimentologique (Apports solides)

Les différentes étapes de cette partie de la modélisation se résument en ;

Les entrées du modèle

Les données nécessaires pour ce modèle sont :

Densité des matériaux du lit d'oued

Le poids volumique du sable et gravier

Le poids volumique de l'argile

Le poids volumique du limon

Les modules

Le module facteur d'érodabilité K : Le facteur d'érodabilité (K) a été calculé à partir de la carte (K), élaborée dans le chapitre précédent.

Le module facteur topographique LS : Le facteur topographique (LS) a été calculé à partir de la carte (LS), élaborée dans le chapitre précédent.

Le module facteur de culture C : Le facteur de culture (C) a été calculé à partir de la carte (C), élaborée dans le chapitre précédent.

Le module facteur de conservation et d'aménagement P : ce facteur est pris 1 (chapitre précédent).

Le module débit initial : Les valeurs du débit initial sont celles trouvées dans la première partie du chapitre.

Le module exposant de forme : ce facteur est pris 0,5.

Les sorties

Les résultats de la modélisation hydrolo- sédimentologique (Apports solide) par HEC-HMS lors des phases de calibration et de validation sont assez satisfaisants, ils se résument en :

Les volumes des sédiments produits par les crues : Les volumes simulés sont proches de ceux calculés à partir des mesures. Les erreurs relatives calculées sont inférieures à 10%, pour les crues de calibration et de l'ordre de 18 %, pour les crues de validation, ces résultats sont jugés acceptables.

IX-3- Estimation des débits liquides et solides des averses de différentes périodes de retour par HEC HMS

Dans cette partie, nous allons simulé l'effet des averses de différentes périodes de retour sur l'hydrogramme du débit liquide et solide aux deux stations hydrométriques contrôlant les deux bassins et aux deux sites des barrages Koudiet Medaouer et Foum El-Ghuerza ainsi que le débit et les apports solides produits par chaque sous bassin.

IX-3-1- Les données d'entrée

Les tableaux IX-31 et IX-32 résument les valeurs estimées de la pluie pour les différentes périodes de retour qui seront utilisées dans les simulations ainsi que les valeurs de C moyennes (les moyennes des quatre saisons).

Chaque hauteur de pluie sera additionnée au jeu de paramètres optimisés définis dans la validation du modèle hydrologique (pluie - débit liquide) pour configurer un fichier de simulation distinct pour chaque sous bassin avec la combinaison de l'équation de transport et la méthode de calcul de vitesse ainsi que les épaisseurs de la couche active résultats de la calibration et validation du modèle (MUSLE et transport solide) de chaque sous bassin.

Tableau IX-29 : Les valeurs des pluies maximales journalières fréquentielles, du facteur CN moyen et du facteur de couverture du sol C moyen pour le bassin Chemora

Bassin Oued Chemora							
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	Pluies maximales journalières				CN moy	C moy
		10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans		
CH01	28B	63.83	87.35	97.37	130.61	65.17	0.61
CH02	31B	68.22	93.63	104.48	140.63	71.47	0.69
CH03	32B	67.91	87.86	96.12	123.07	73.26	0.65
CH04	27B	55.06	75.63	84.28	113.01	73.56	0.79
CH05	26B	57.79	80.68	90.16	121.53	75.67	0.85
CH06	29B	55.08	75.12	83.61	111.57	76.76	0.87
CH07	30B	48.67	64.47	71.11	93.00	75.79	0.87
CH08	25B	50.16	69.15	77.21	103.92	76.93	0.89
CH09	24B	47.79	66.65	74.70	101.61	73.93	0.83
CH10	23B	42.97	60.29	67.63	92.68	74.90	0.86

Tableau IX-30 : Les valeurs des pluies maximales journalières fréquentielles, du facteur CN moyen et du facteur de couverture du sol C moyen pour le bassin Labiod

Bassin Oued Labiod							
N° S/Bassin	S/Bassin schéma	Pluies maximales journalières				CN moy	C moy
		10 ans	50 ans	100 ans	1000 ans		
LAB01	2B	80.36	112.10	125.64	171.24	71.54	0.63
LAB02	3B	78.99	111.45	125.76	175.56	78.37	0.69
LAB03	4B	85.20	124.88	143.50	208.53	74.72	0.62
LAB04	5B	71.46	105.80	122.34	181.37	78.50	0.69
LAB05	6B	79.21	128.36	152.72	244.84	65.99	0.76
LAB06	7B	60.12	90.59	103.96	150.44	68.32	0.86
LAB07	8B	53.45	75.27	84.21	112.73	75.25	0.74
LAB08	9B	58.93	89.54	102.96	149.70	71.51	0.83
LAB09	10B	52.51	73.11	81.26	106.28	80.89	0.83
LAB10	11B	56.69	83.81	95.26	133.40	75.14	0.68
LAB11	12B	59.27	88.79	101.26	142.63	82.29	0.93
LAB12	13B	58.82	87.18	98.97	137.22	81.79	0.97

IX-3-2- Les résultats de la simulation

Les résultats résumés dans le tableau IX-33 (les graphes à voir en annexe), présentent les valeurs estimées par le modèle HEC-HMS aux deux bassins en termes du pic de l'hydrogramme, du volume du ruissellement et des quantités des apports solides transportés jusqu'aux stations hydrométriques contrôlant les bassins ainsi qu'aux sites des barrages Koudiet Medaouer et Foug El-Gherza et aux exutoires des principaux oueds drainant les bassins.

Tableau IX-31 : les valeurs simulées du débit de pointe et du volume d'eau et des sédiments aux stations hydrométriques (M'chouneche et Chemora) et aux sites des barrages (F. Gherza et K. Medaouer) pour les averses quantiles

	T = 10 ans	T = 50 ans	T = 100 ans	T = 1000 ans
Bassin Oued Labiod (à la station de M'chouneche) $AS_{an} = 824,2 \times 10^3$ Tonnes				
$Q_p(m^3/s)$	191,2	310,7	396,4	597,8
Volume ($10^3 m^3$)	12995,3	15959,0	20555,3	29578,6
Apports solide (10^3 Tonnes)	210,1	267,6	325,4	438,2
Ass (T/km^2)	199,9	254,6	309,6	416,9
Bassin Oued Labiod (au barrage Foug El-Gherza) $AS_{an} = 920,2 \times 10^3$ Tonnes				
$Q_p(m^3/s)$	229,7	361,4	473,4	677,2
Volume ($10^3 m^3$)	14642,9	17400,2	24770,4	31330,6
Apports solide (10^3 Tonnes)	279,8	328,5	437,7	518,0
Ass (T/km^2)	212,5	249,4	332,3	393,3
Bassin Oued Chemora (à la station de Chemora) $AS_{an} = 338,4 \times 10^3$ Tonnes				
$Q_p(m^3/s)$	173,6	263,9	316,6	426,4
Volume ($10^3 m^3$)	11525,3	17456,3	20630,6	27823,7
Apports solide (10^3 Tonnes)	285,4	401,1	473,9	619,7
Ass (T/km^2)	385,2	541,3	639,5	836,3
Bassin Oued Chemora (au barrage Koudiet Medaouer) $AS_{an} = 140,9 \times 10^3$ Tonnes				
$Q_p(m^3/s)$	148,2	223,2	266,9	348,3
Volume ($10^3 m^3$)	9754,9	14566,2	17083,0	22867,9
Apports solide (10^3 Tonnes)	209,4	235,6	248,3	275,3
Ass (T/km^2)	327,2	368,1	388,0	430,2

Pour le bassin d'oued Labiod, et durant les crues fréquentielles de 10 ans à 1000 ans, la dégradation spécifique moyenne varie de 200 au 400 t/km². Elle est inférieure à la dégradation spécifique annuelle qui est dans l'ordre de 700 tonnes/km².

Par contre pour le bassin d'oued Chemora, et durant la crue fréquentielle de 10 ans, la dégradation spécifique moyenne est 380 t/km², elle est inférieure à la dégradation spécifique annuelle qui est dans l'ordre de 460 tonnes/km², pour le reste des crues de période de retour des

50 ans à 1000 ans elle est supérieure à la dégradation moyenne annuelle, ce résultat confirme le résultat trouvé par Dridi H, Kalla M et Annab R en 2011 (Dridi et al, 2011).

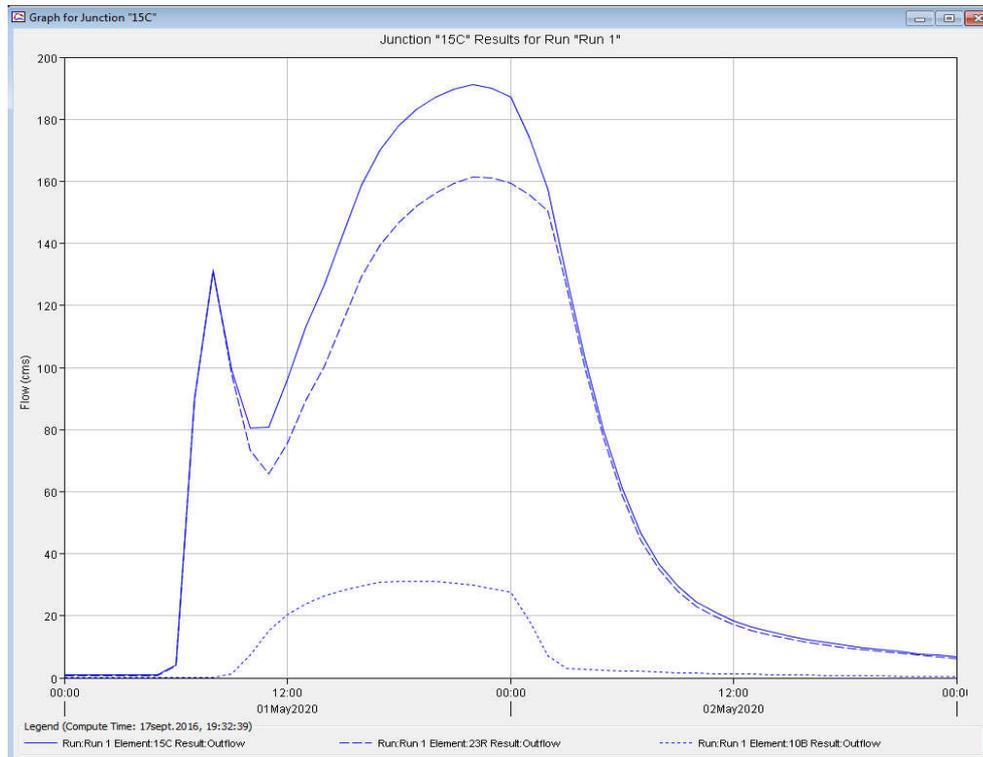


Figure IX -23 : Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à la station de M'chouneche

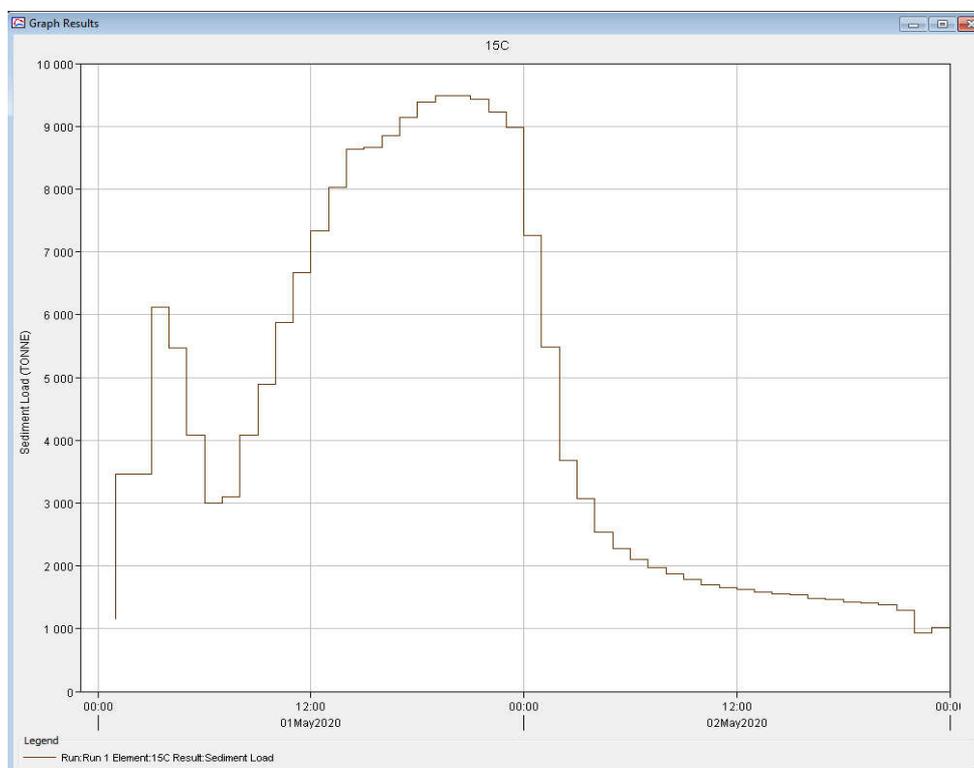


Figure IX -24 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 10 ans simulée à la station de M'chouneche

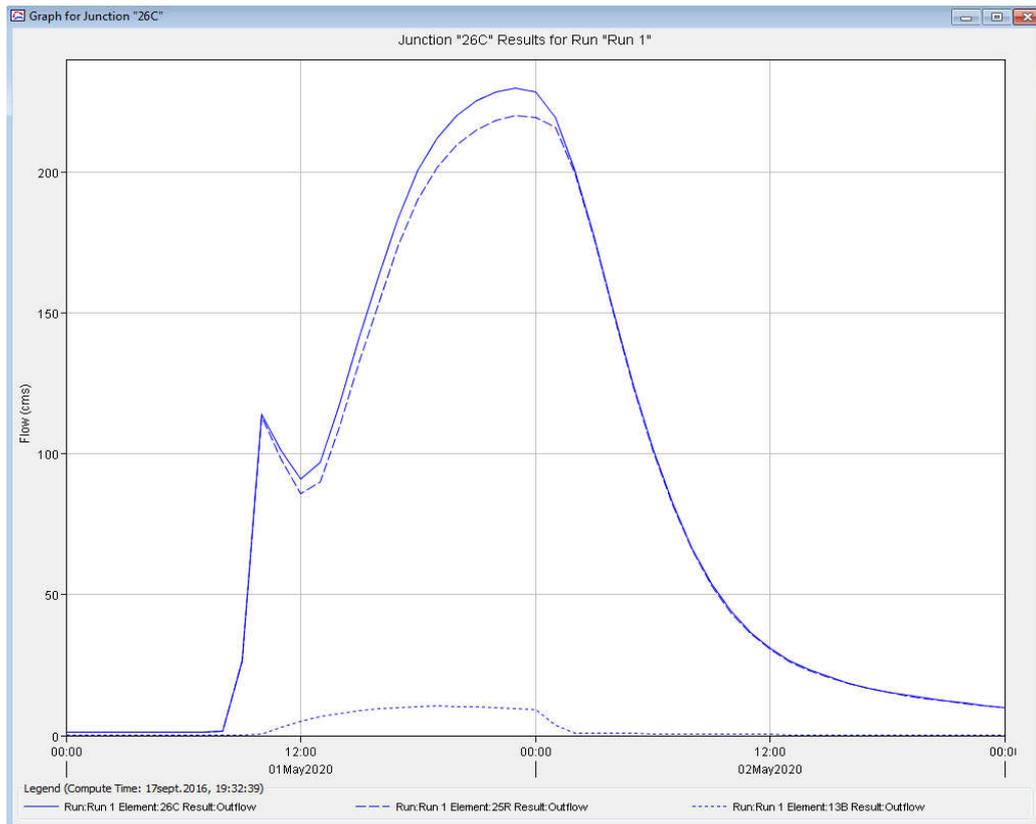


Figure IX -25 : Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée au site du barrage Foug El-Gherza

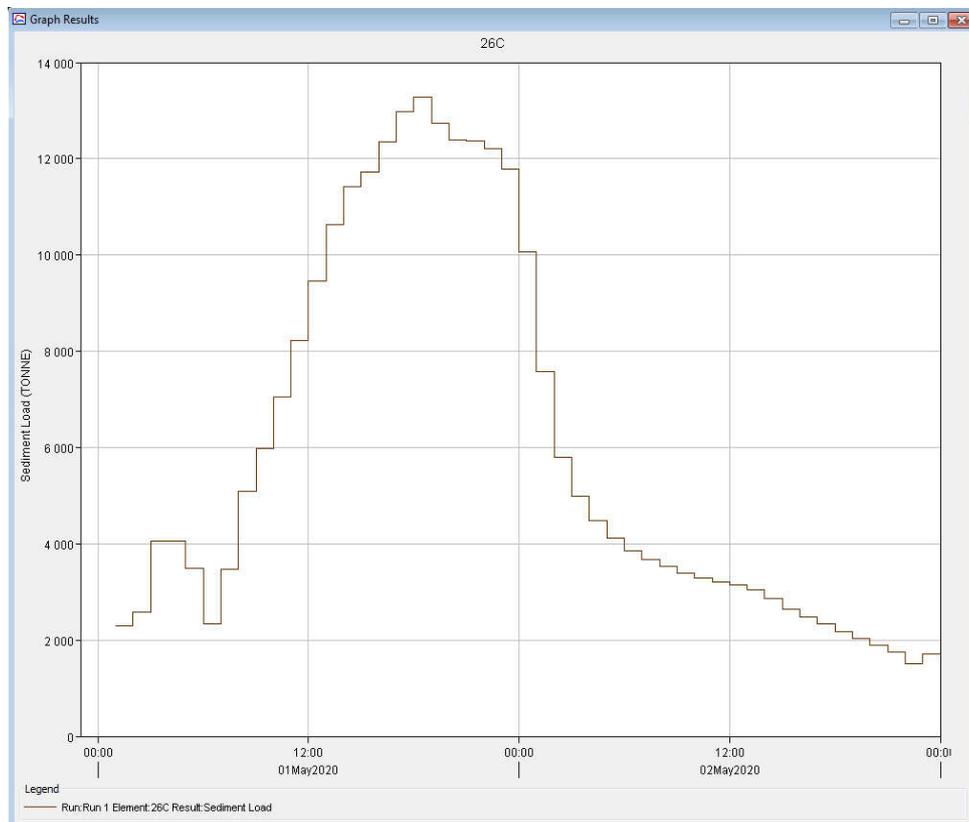


Figure IX -26 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 10 ans simulée à au site du barrage Foug El-Gherza

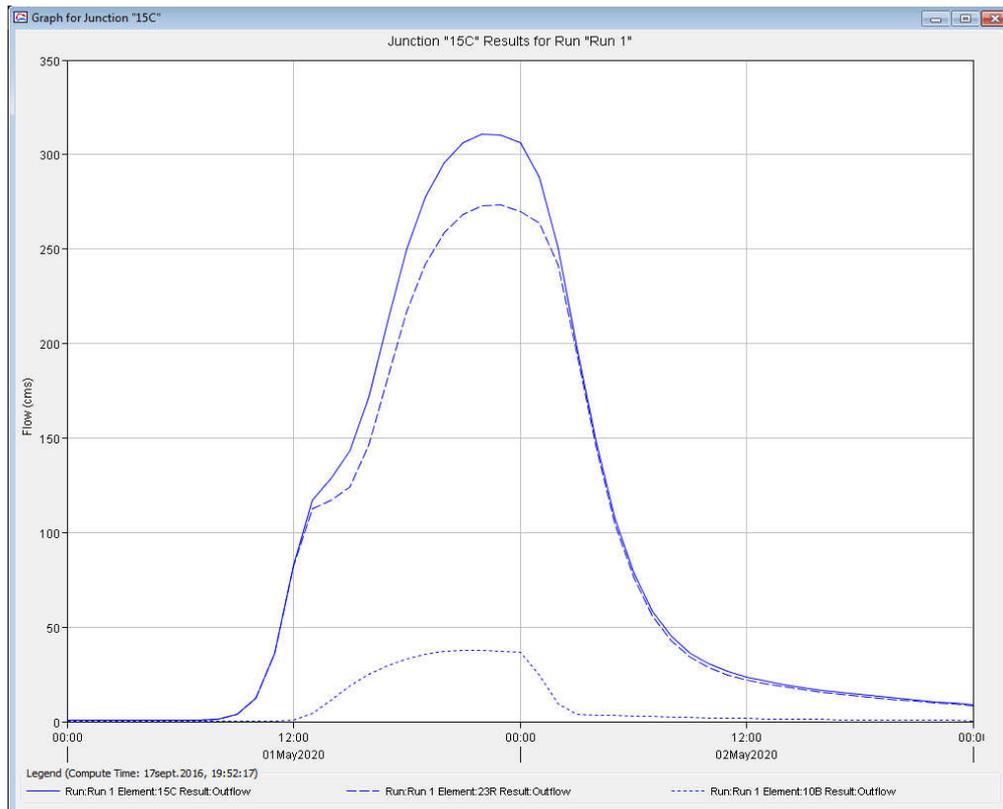


Figure IX -27 : Hydrogramme de la crue de période de retour 50 ans simulée à la station de M'chouneche

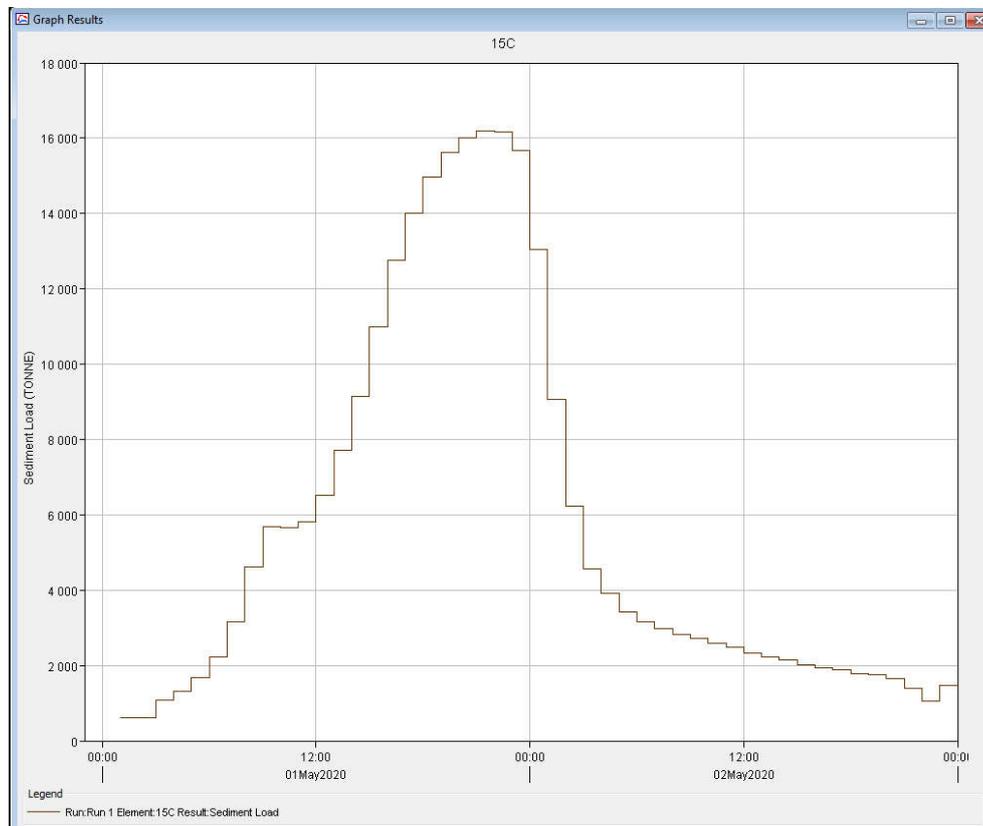


Figure IX -28 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 50 ans simulée à la station de M'chouneche

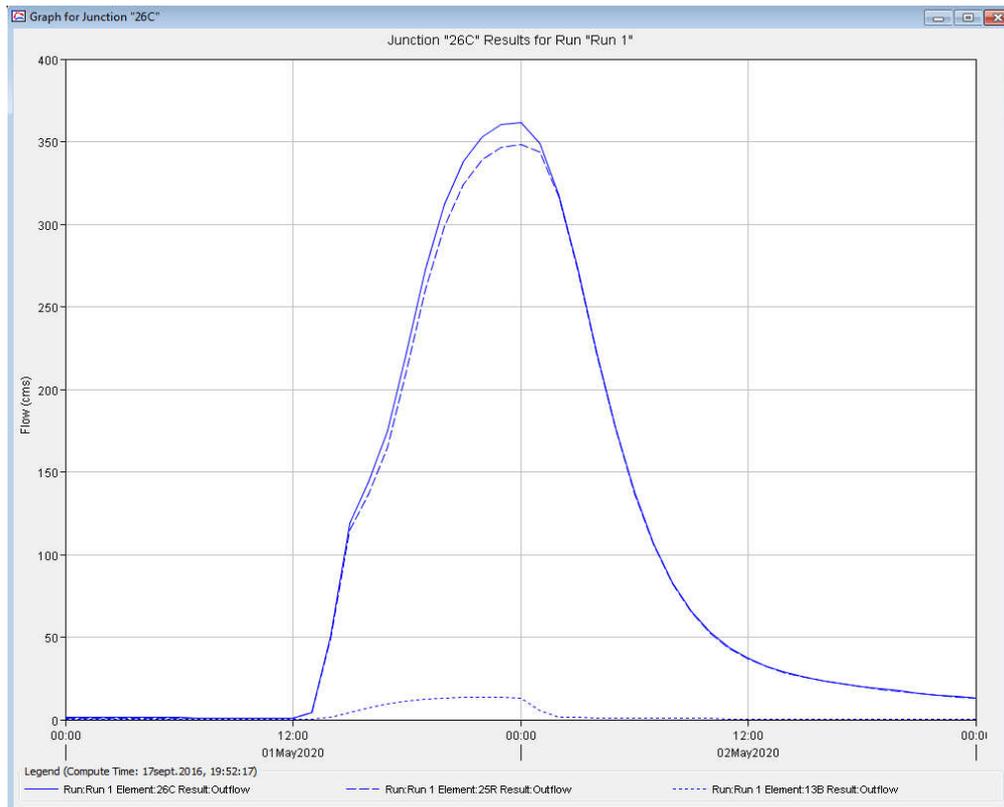


Figure IX -29 : Hydrogramme de la crue de période de retour 50 ans simulée au site du barrage Fom El-Gherza

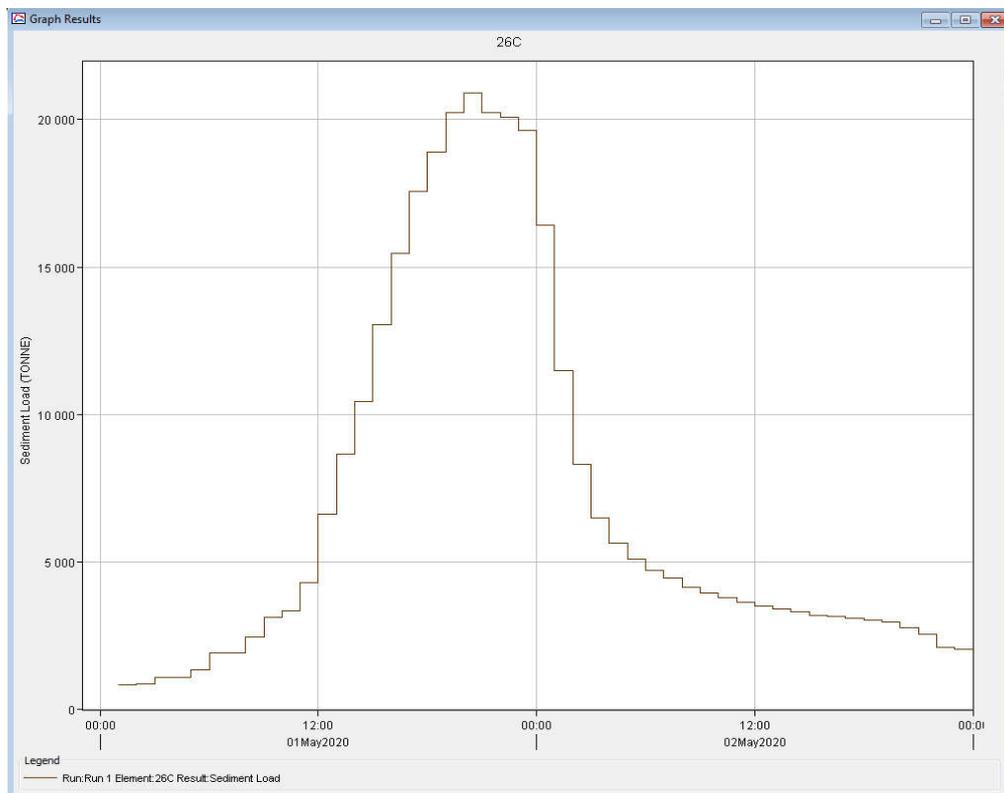


Figure IX -30 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 50 ans simulée à au site du barrage Fom El-Gherza

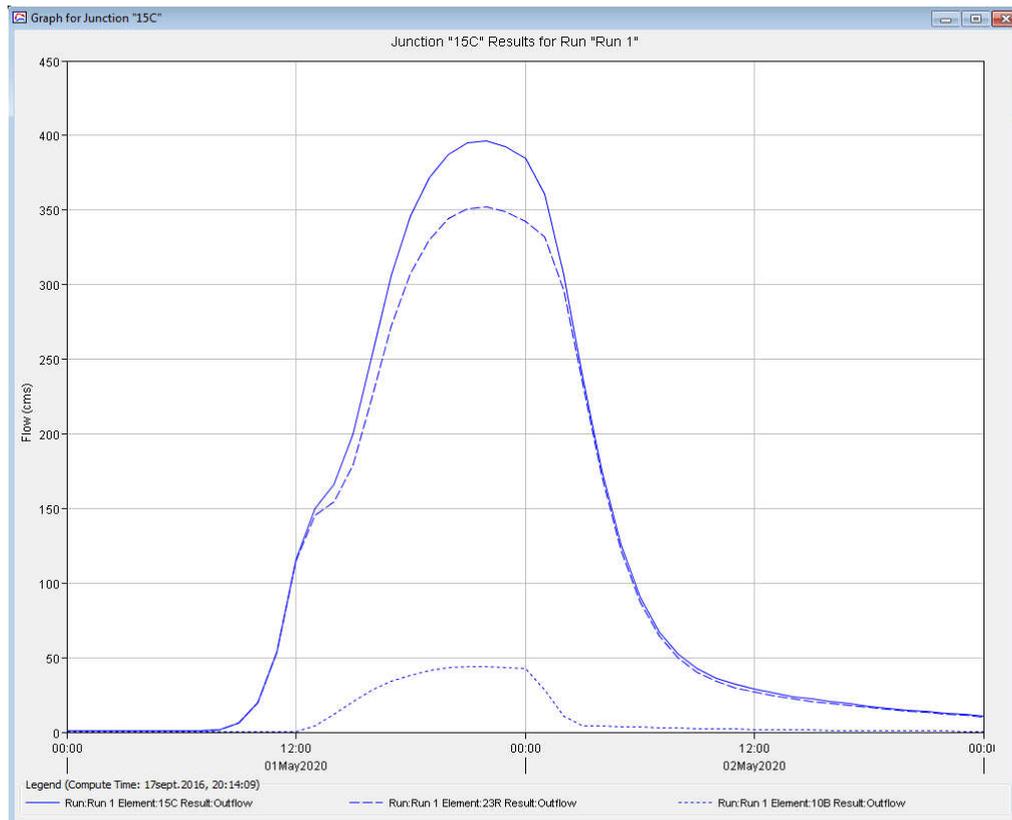


Figure IX -31 : Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à la station de M'chouneche

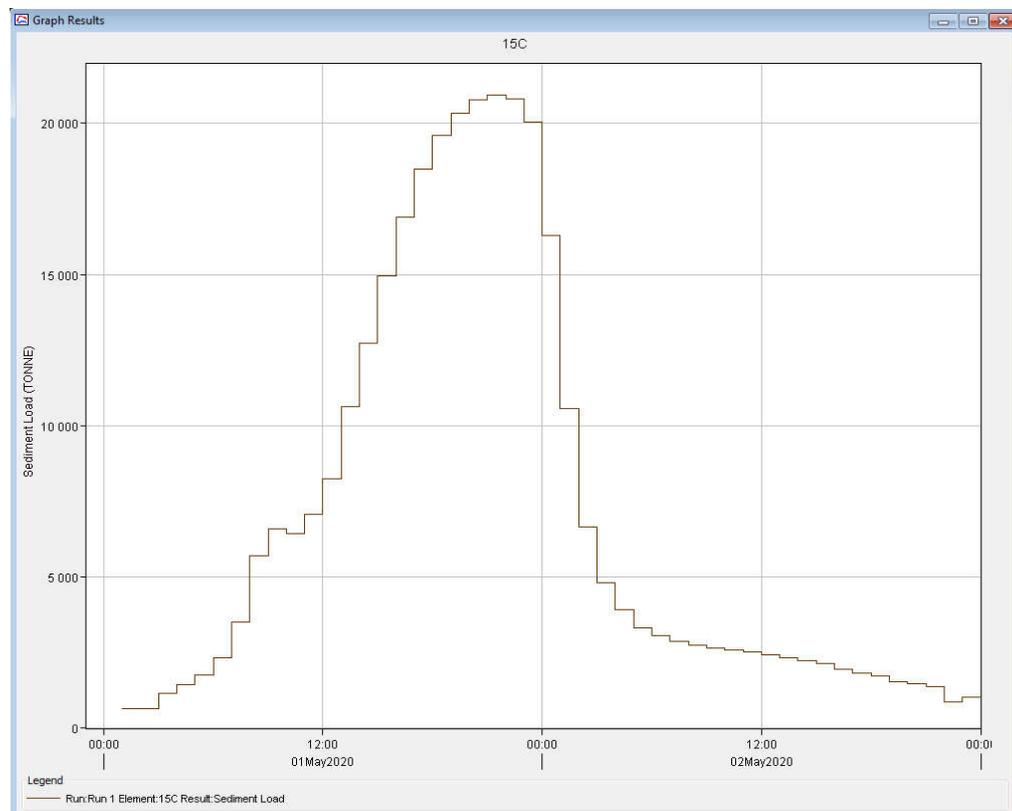


Figure IX -32 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 100 ans simulée à la station de M'chouneche

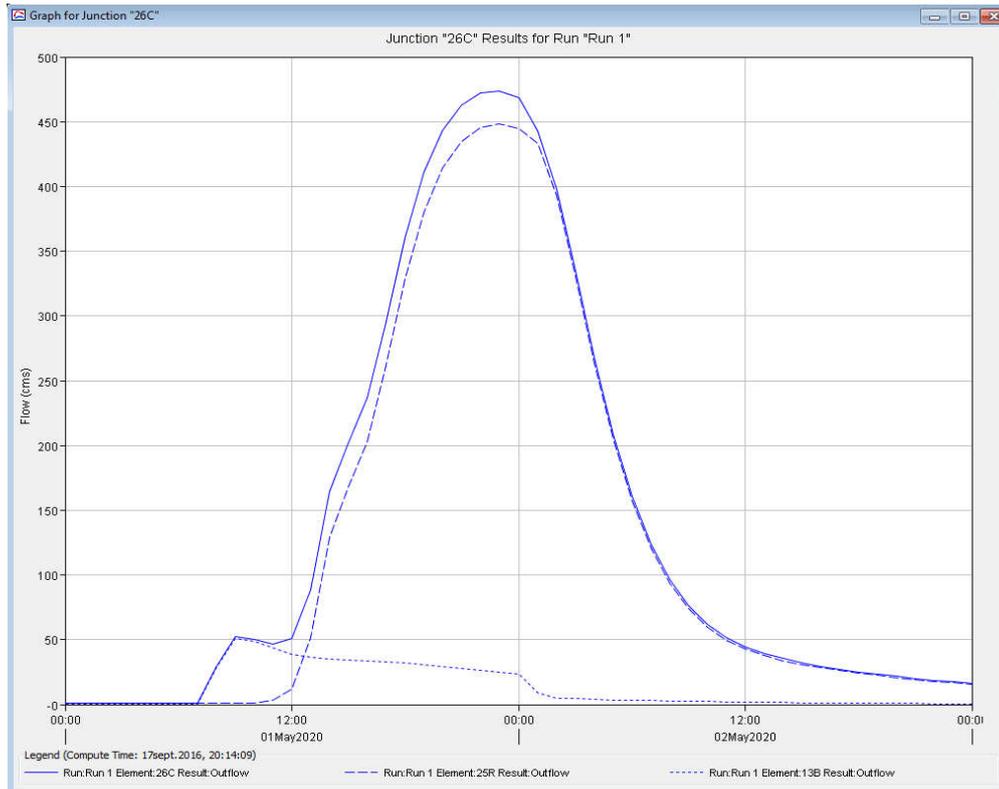


Figure IX -33 : Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée au site du barrage Fom El-Gherza

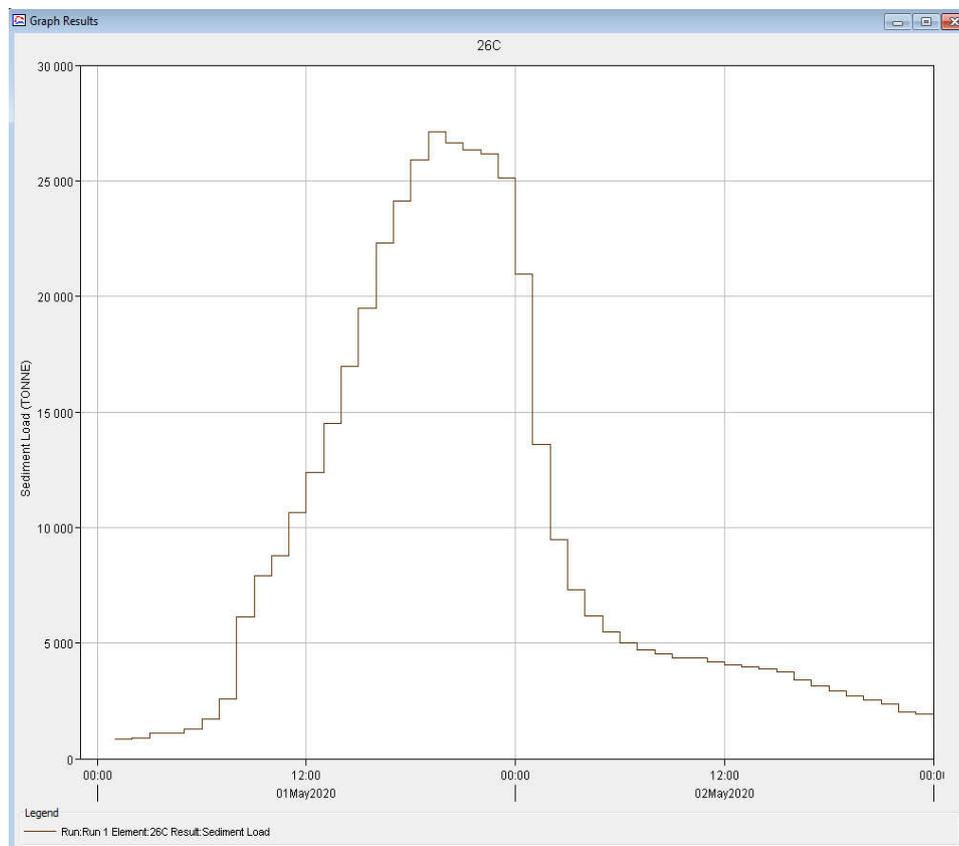


Figure IX -34 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 100 ans simulée à au site du barrage Fom El-Gherza

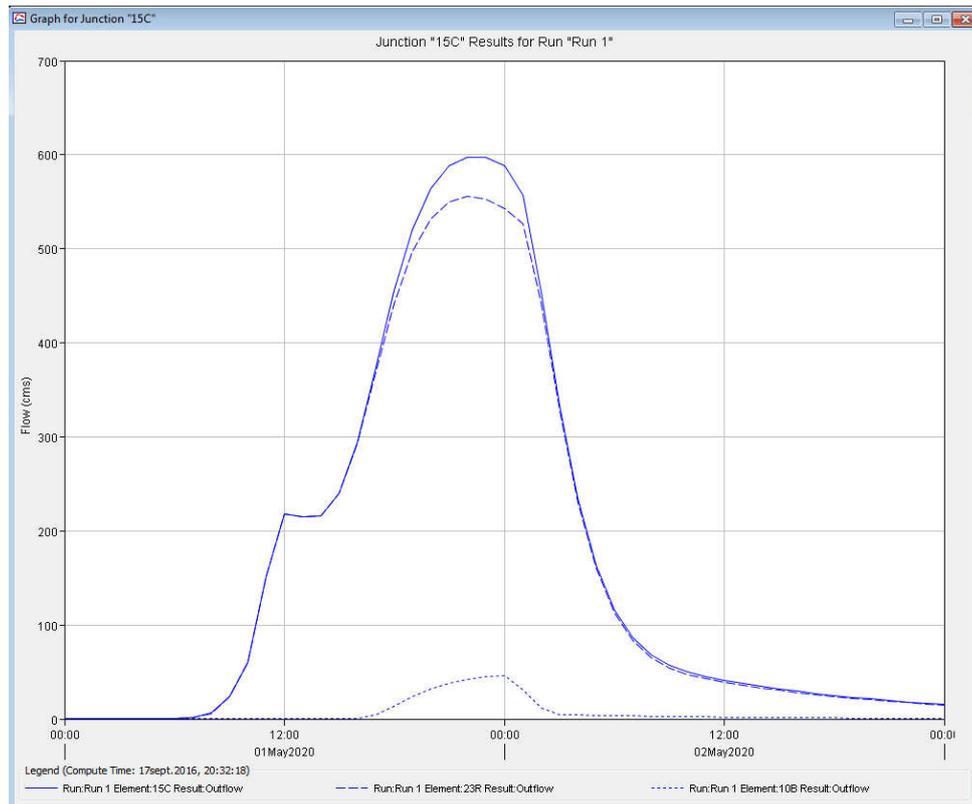


Figure IX -35 : Hydrogramme de la crue de période de retour 1000 ans simulée à la station de M'chouneche

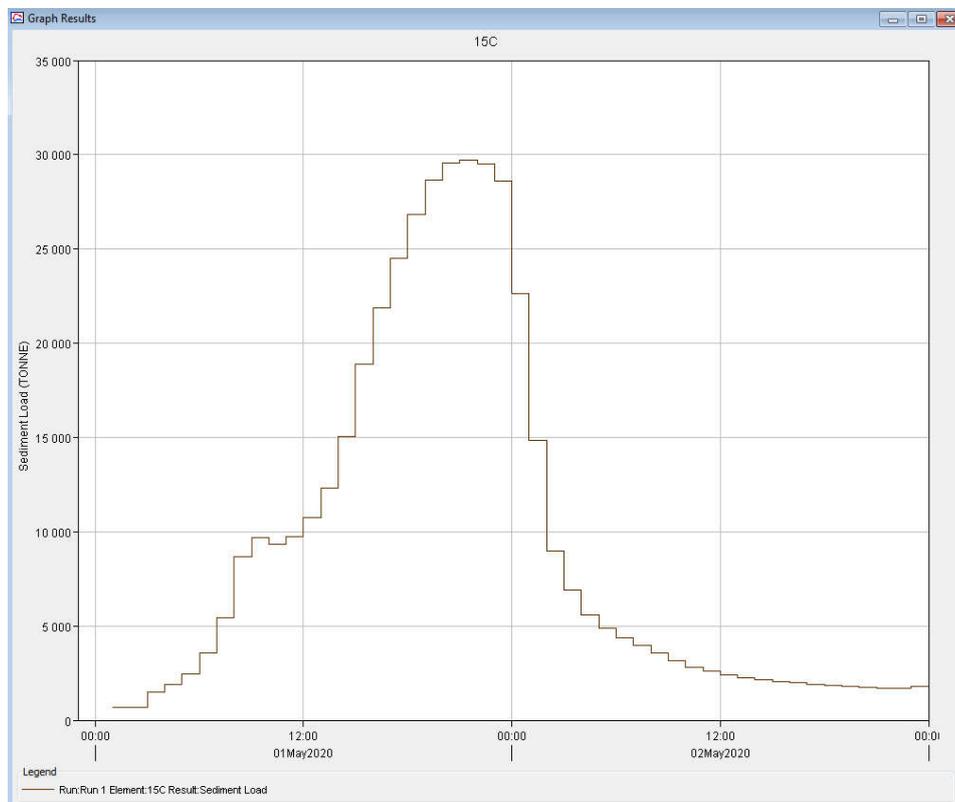


Figure IX -36 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 1000 ans simulée à la station de M'chouneche

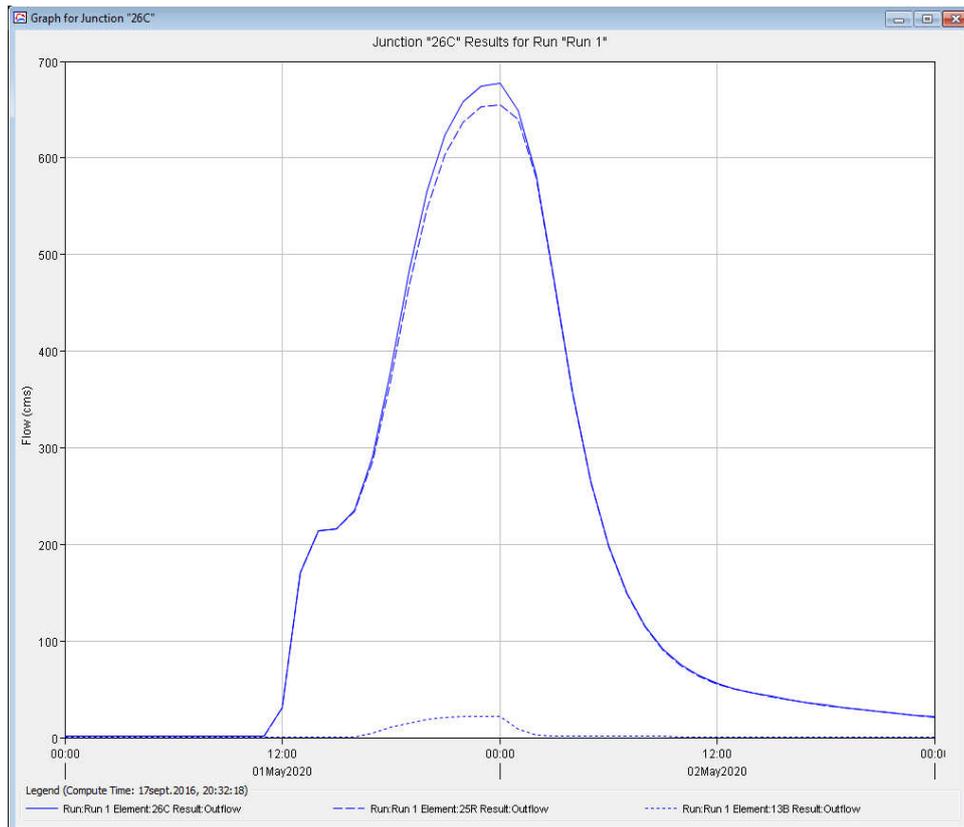


Figure IX -37 : Hydrogramme de la crue de période de retour 1000 ans simulée au site du barrage Foug El-Gherza

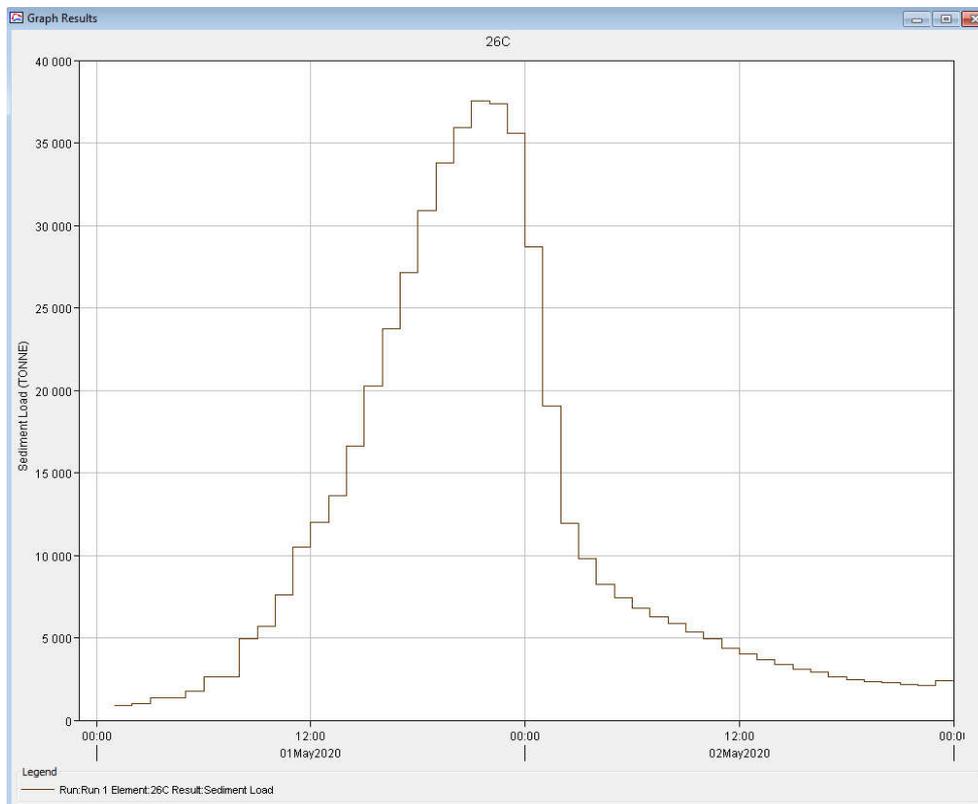


Figure IX -38 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 1000 ans simulée à au site du barrage Foug El-Gherza

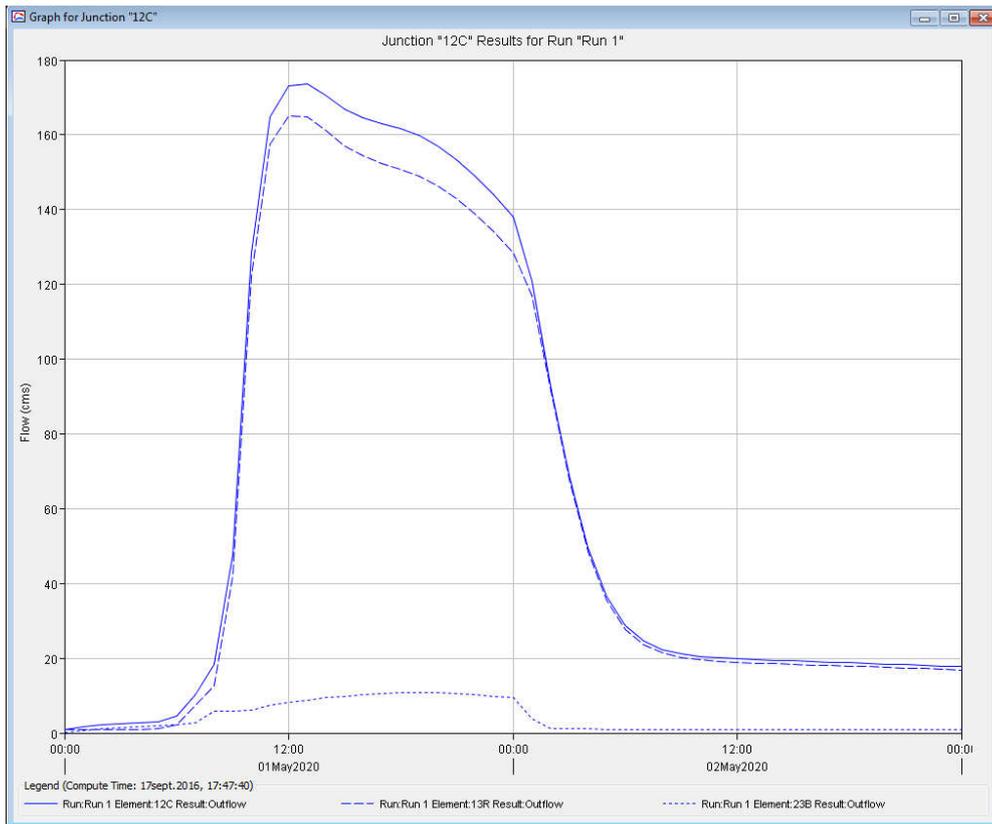


Figure IX -39 : Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée à la station de Chemora

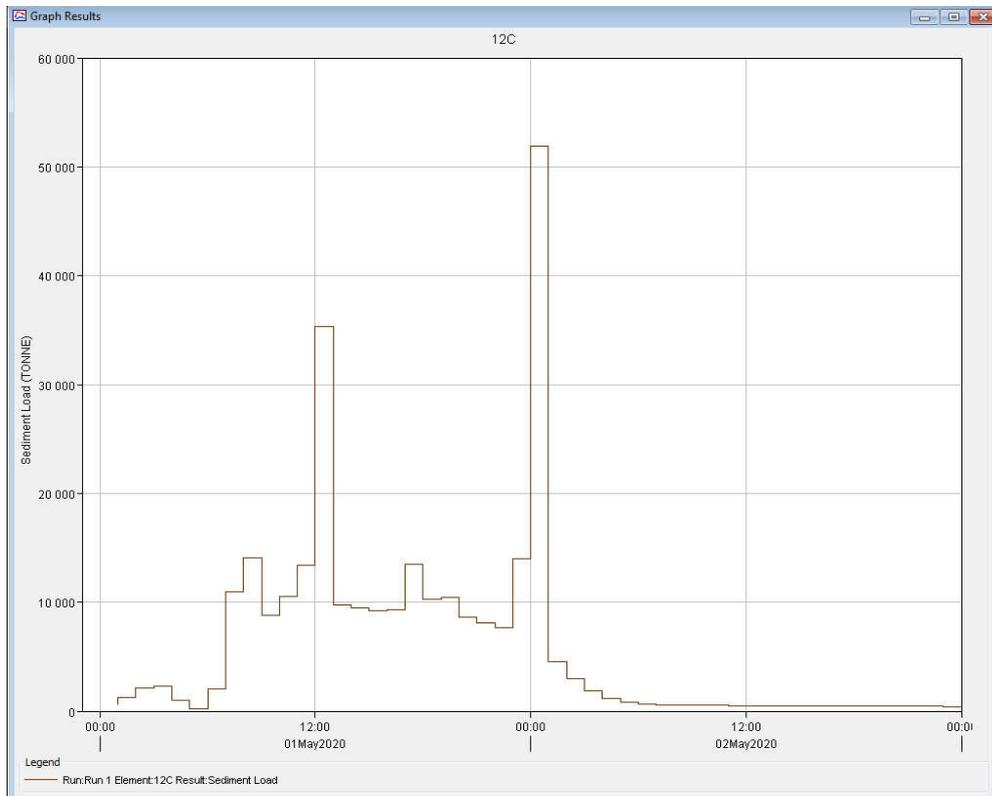


Figure IX -40 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 10 ans simulée à la station de Chemora

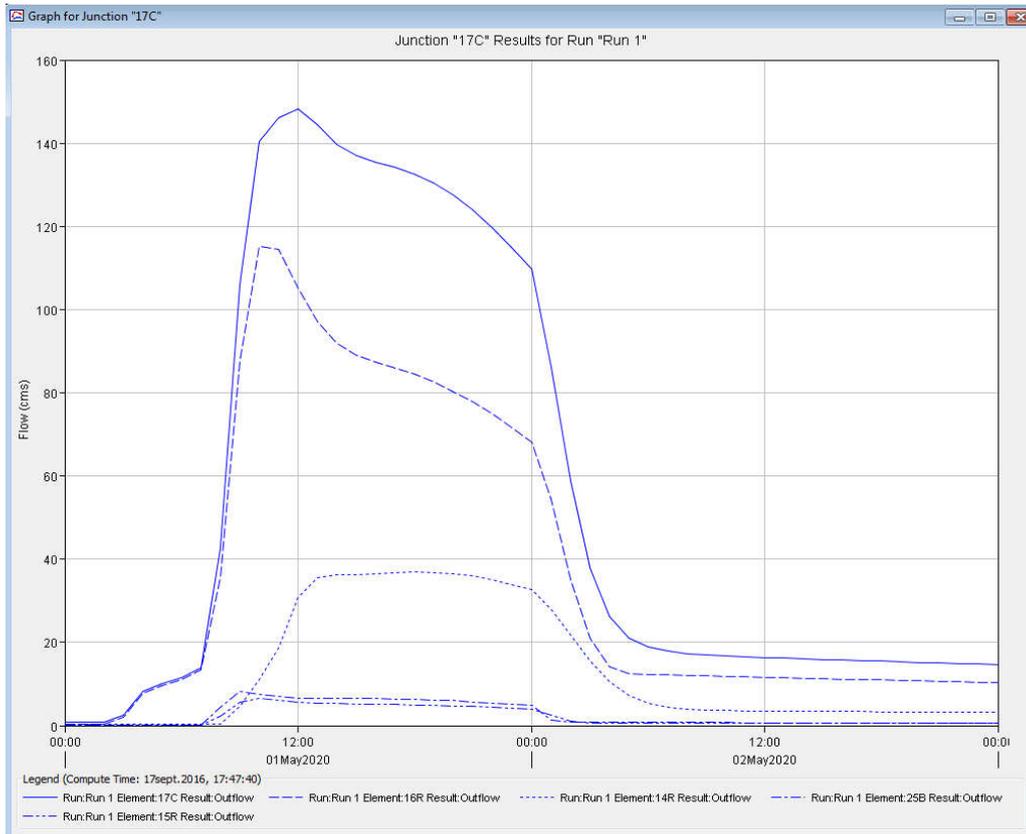


Figure IX -41 : Hydrogramme de la crue de période de retour 10 ans simulée au site du barrage Koudiet Medouer

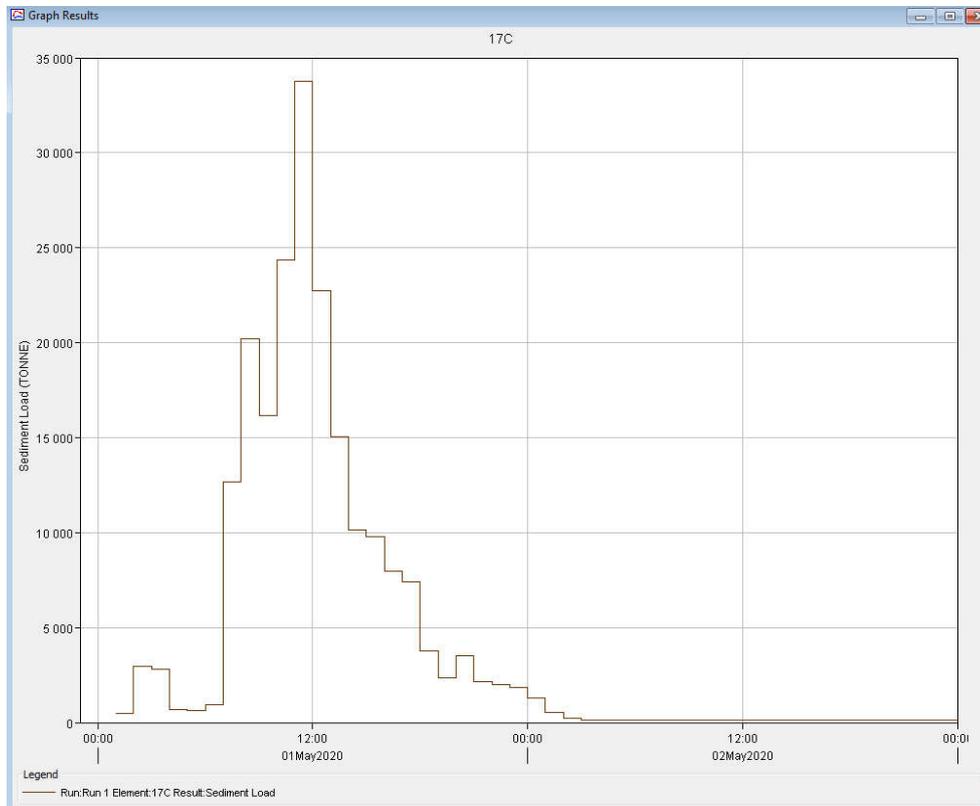


Figure IX -42 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 10 ans simulée au site du barrage Koudiet Medouer

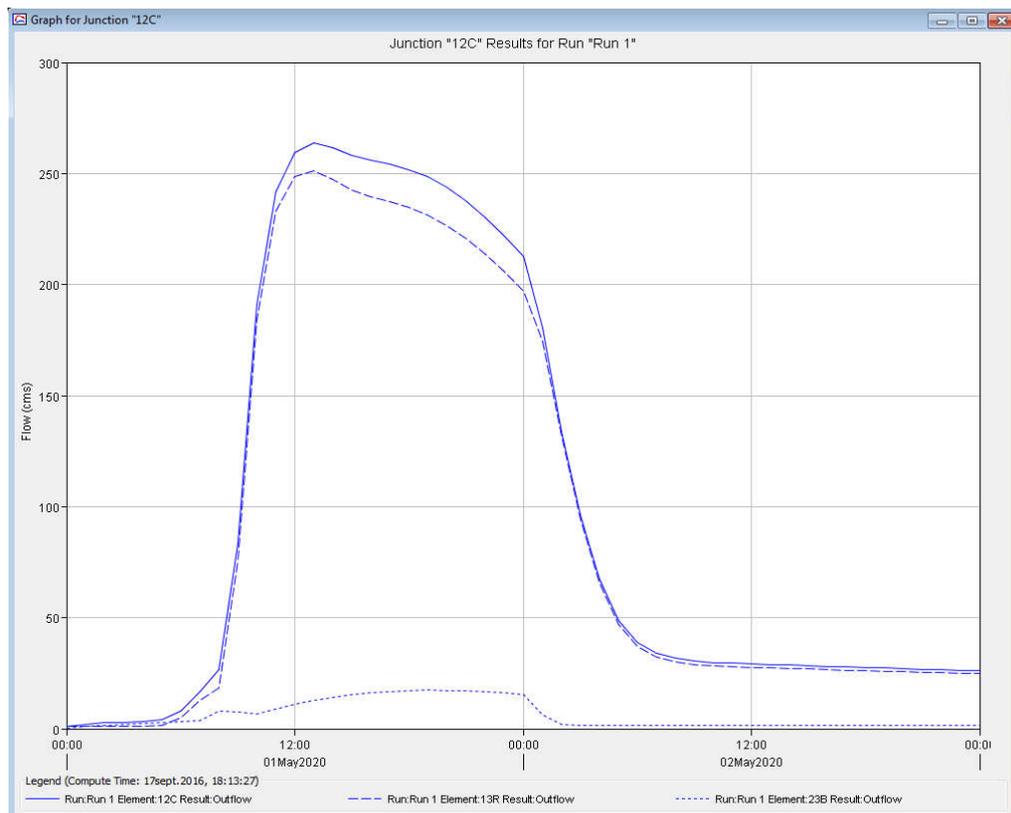


Figure IX -43 : Hydrogramme de la crue de période de retour 50 ans simulée à la station de Chemora

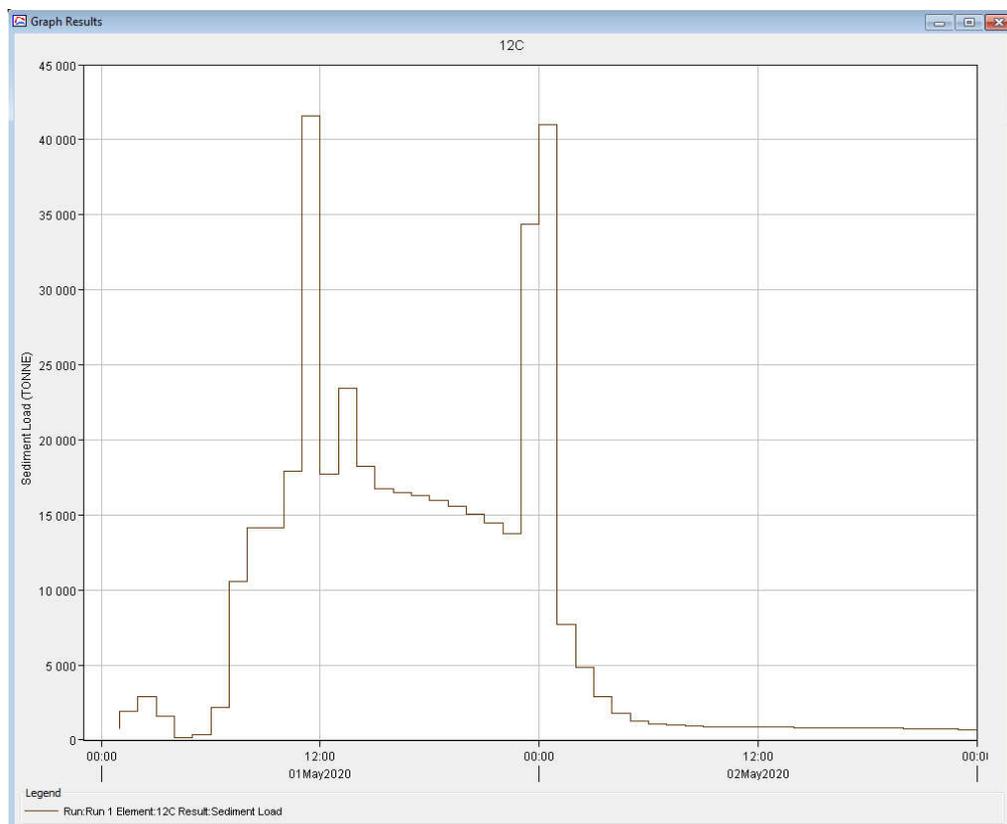


Figure IX -44 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 50 ans simulée à la station de Chemora

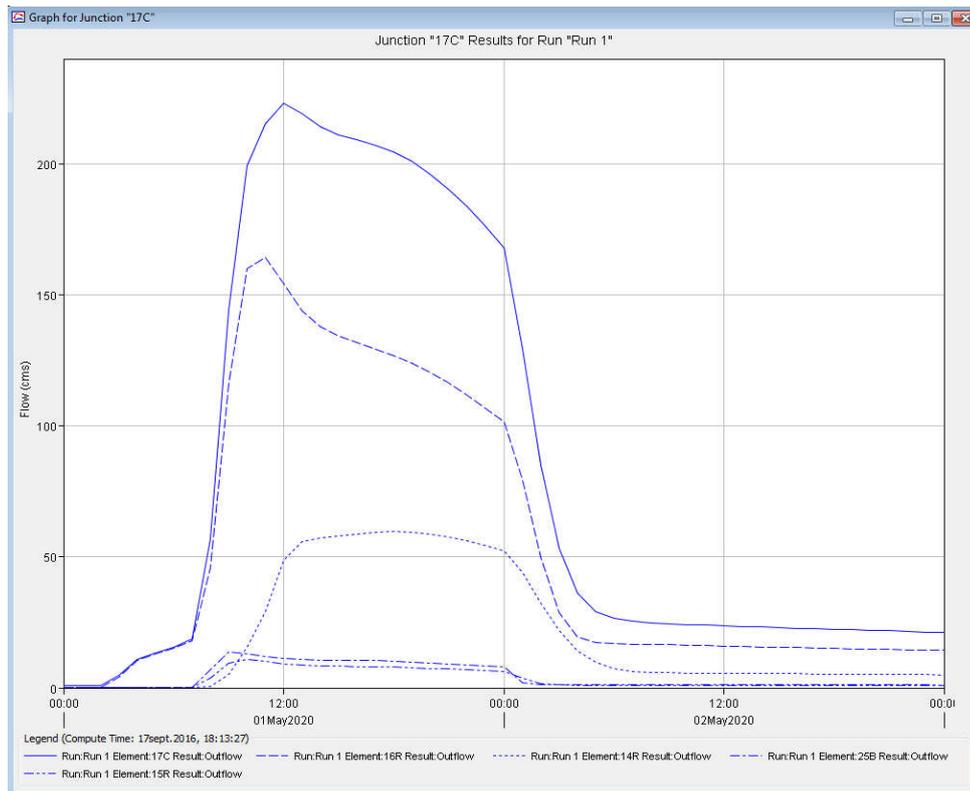


Figure IX -45 : Hydrogramme de la crue de période de retour 50 ans simulée au site du barrage Koudiet Medouer

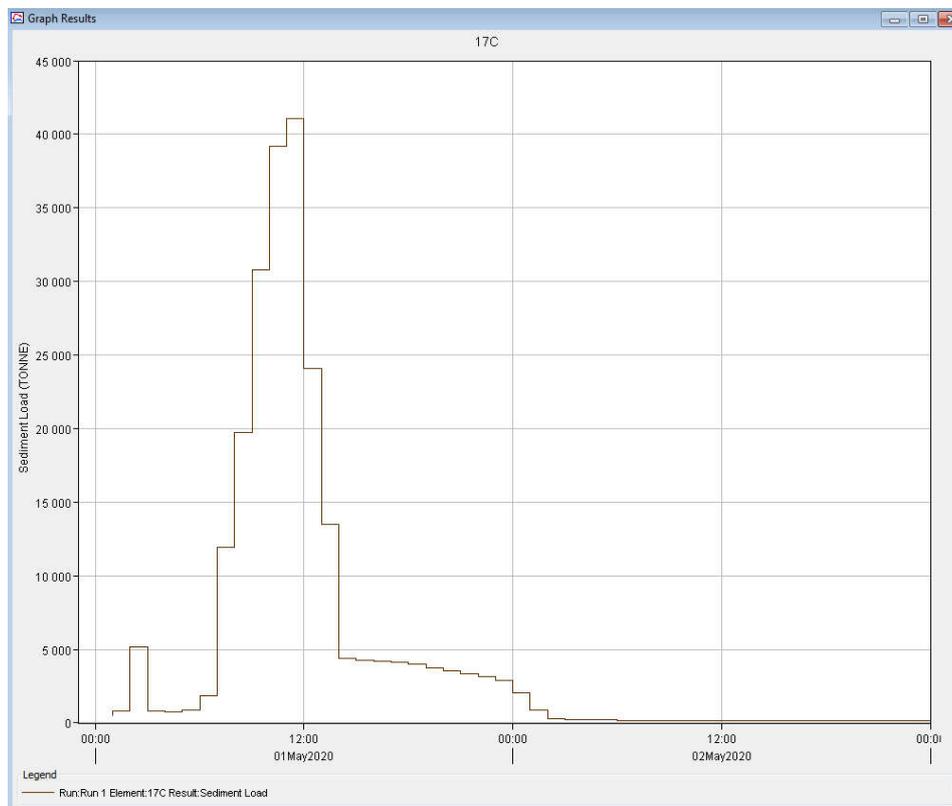


Figure IX -46 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 50 ans simulée au site du barrage Koudiet Medouer

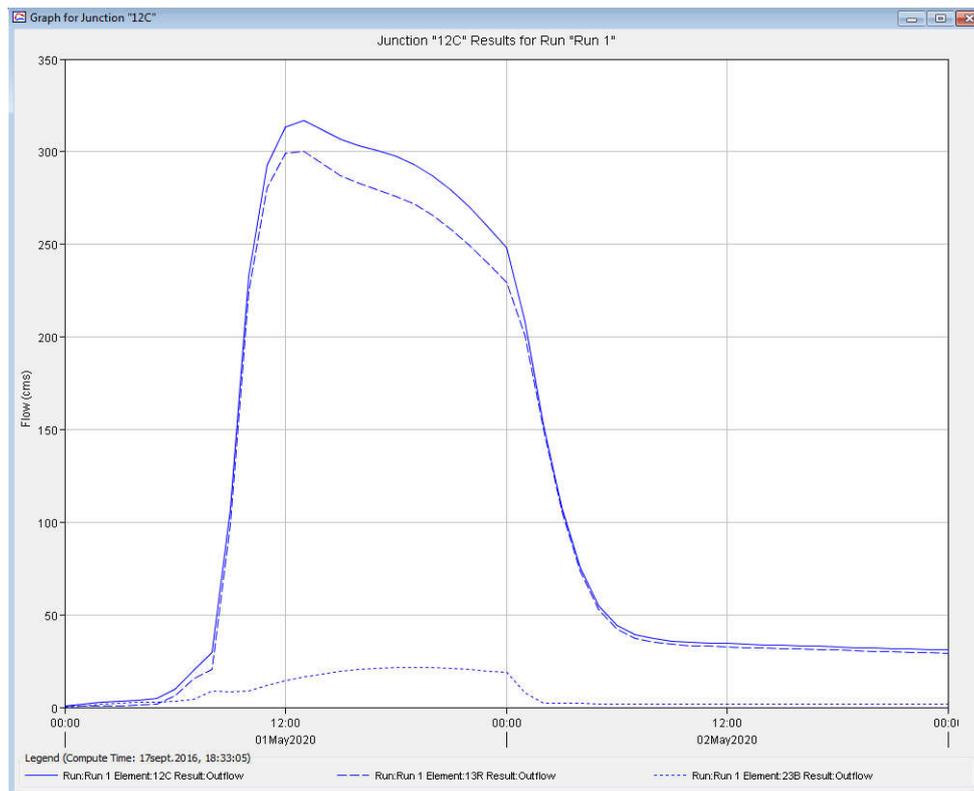


Figure IX -47 : Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée à la station de Chemora

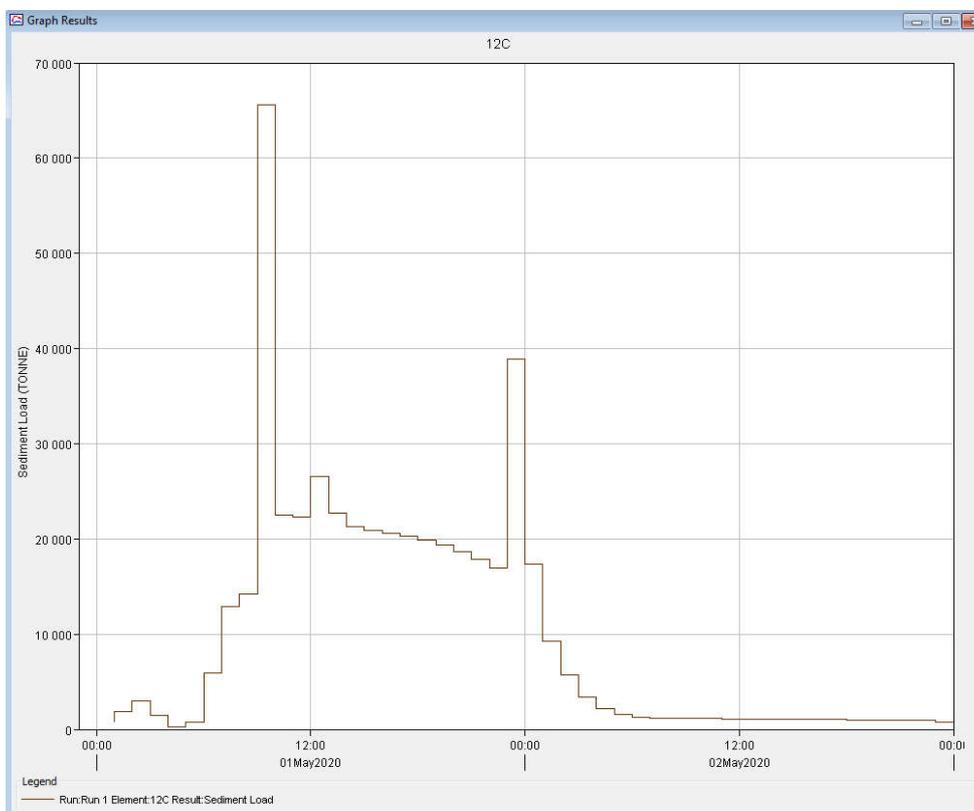


Figure IX -48 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 100 ans simulée à la station de Chemora

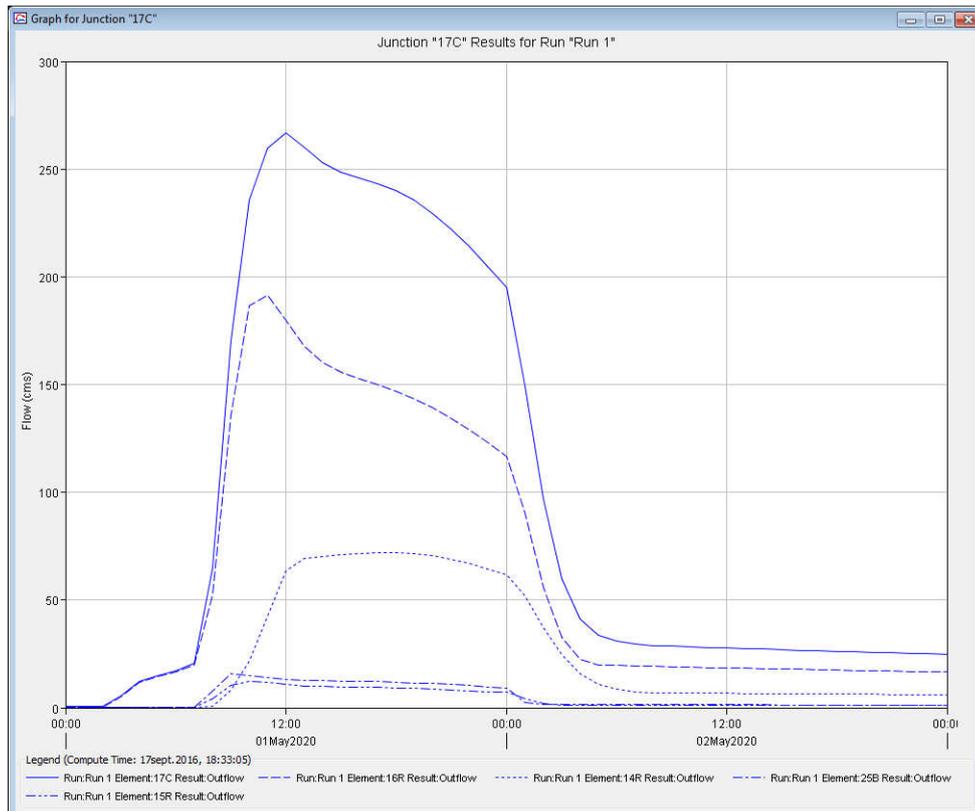


Figure IX -49 : Hydrogramme de la crue de période de retour 100 ans simulée au site du barrage Koudiet Medouer

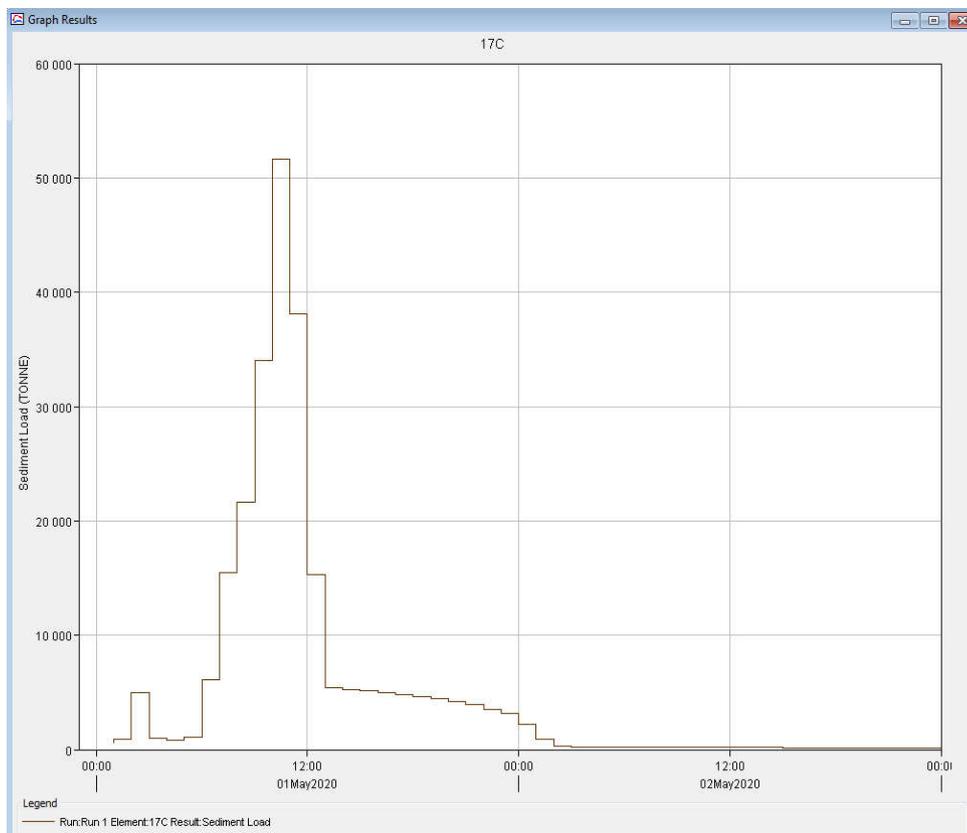


Figure IX -50 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 100 ans simulée au site du barrage Koudiet Medouer

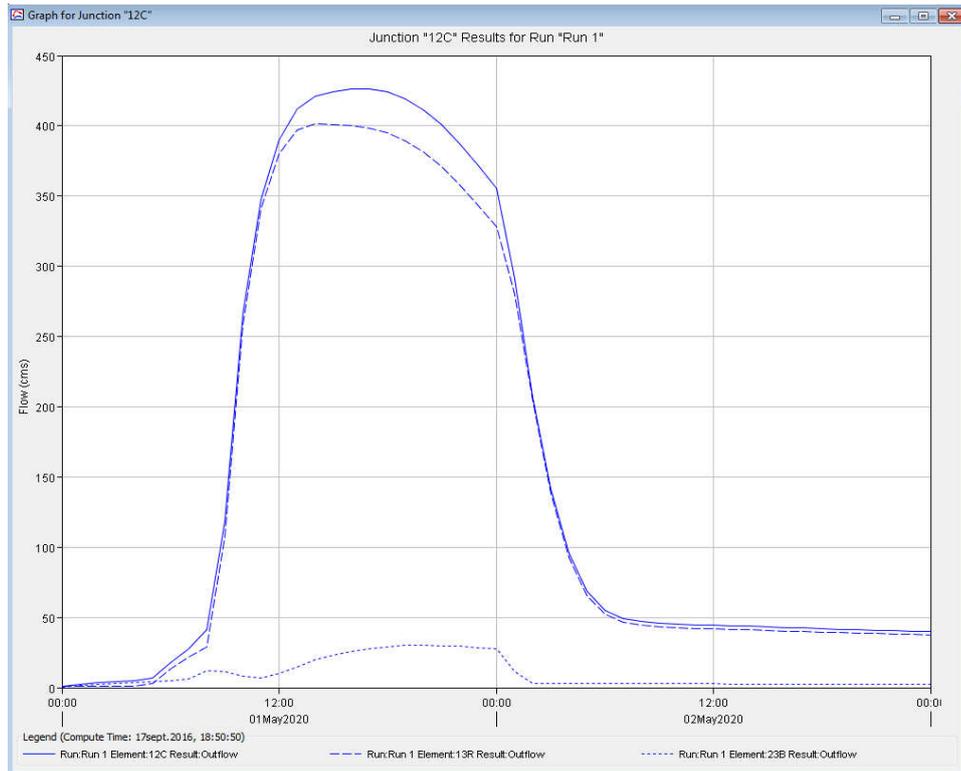


Figure IX -51 : Hydrogramme de la crue de période de retour 1000 ans simulée à la station de Chemora

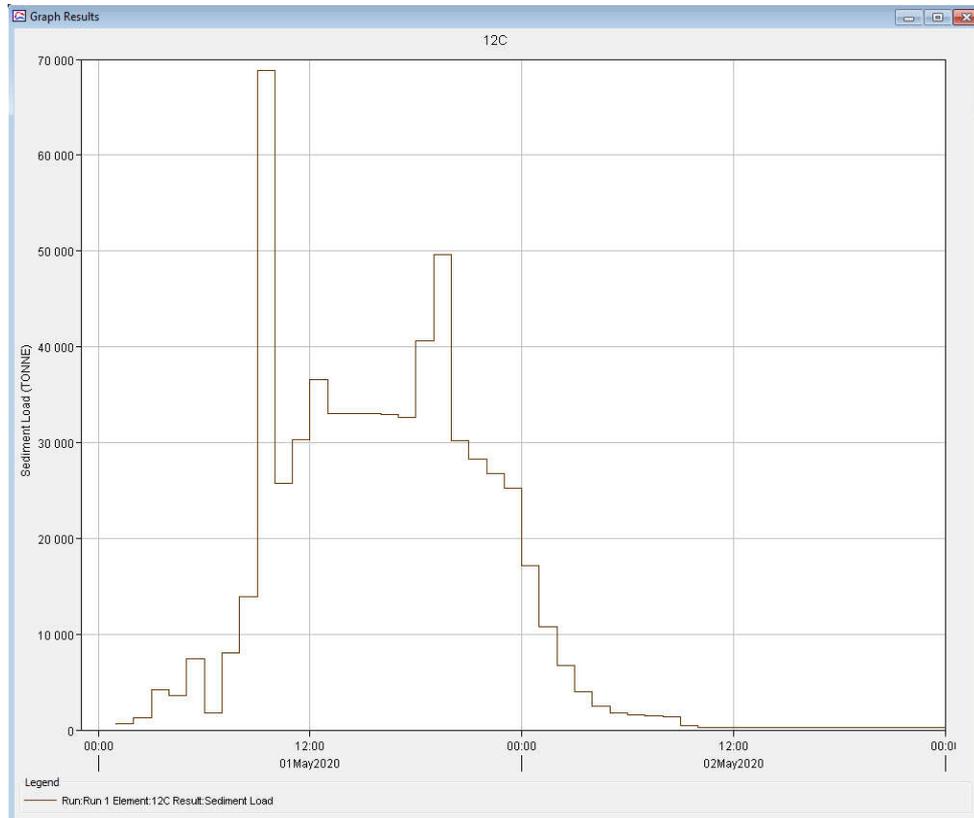


Figure IX -52 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 1000 ans simulée à la station de Chemora

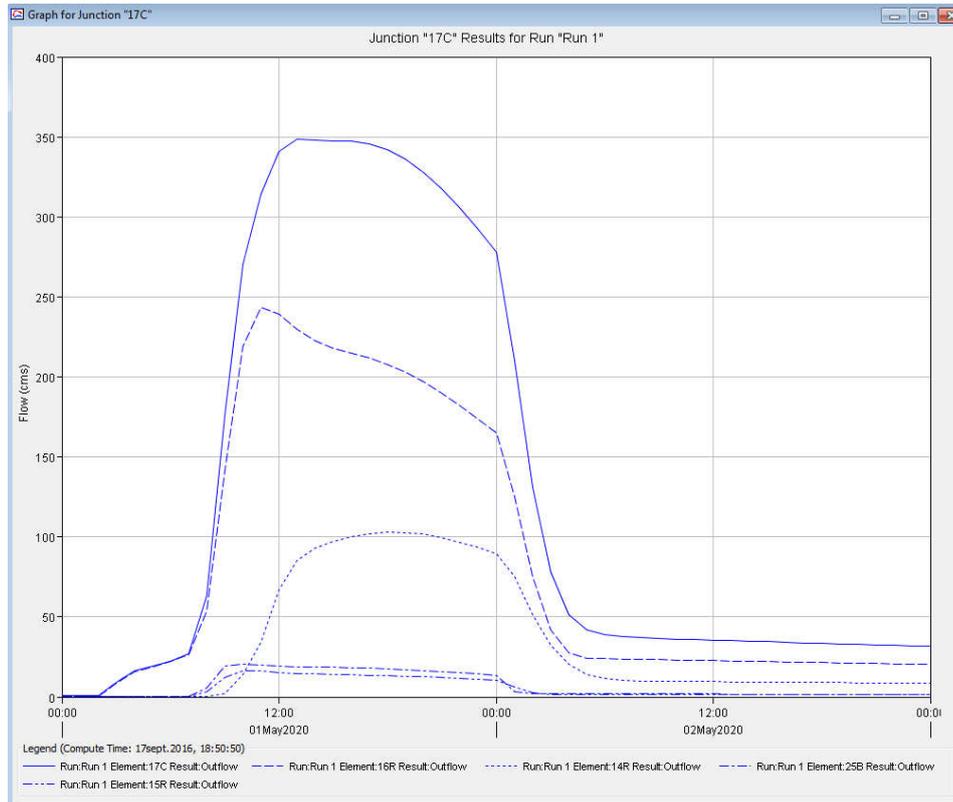


Figure IX -53 : Hydrogramme de la crue de période de retour 1000 ans simulée au site du barrage Koudiet Medouer

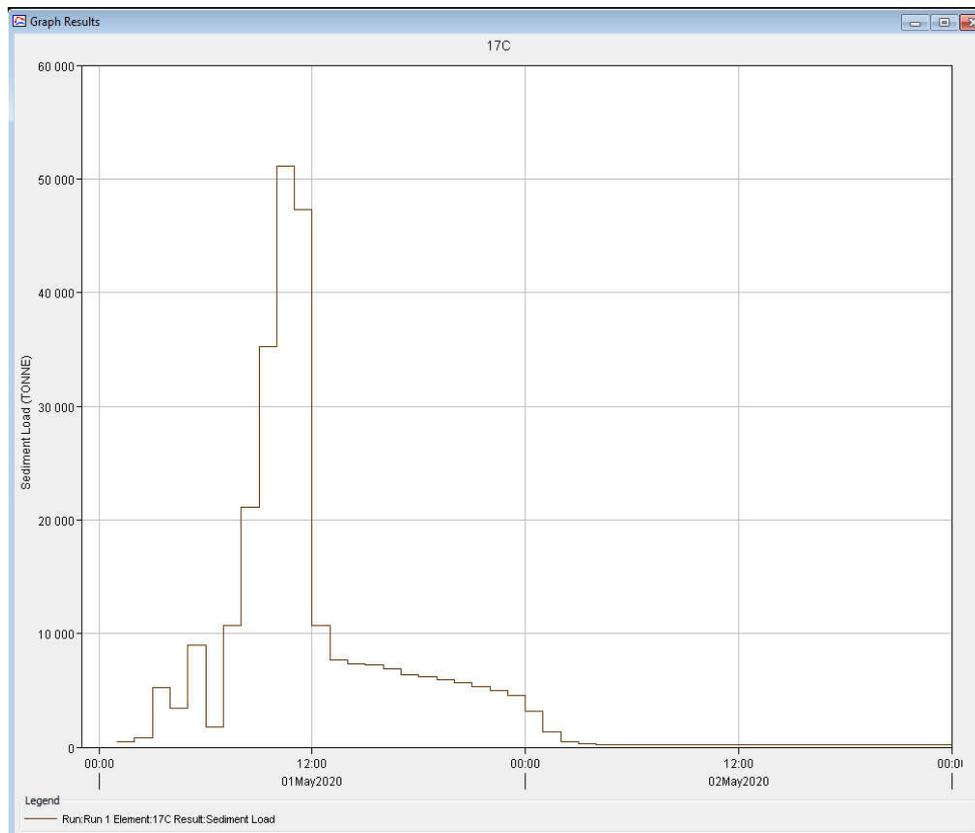


Figure IX -54 : Histogramme des apports solide de la crue de période de retour 1000 ans simulée au site du barrage Koudiet Medouer

La répartition spatiale des apports liquides et solides ainsi que les pics des crues est donnée dans le tableau IX-34.

Tableau IX-32 : les valeurs simulées du débit de pointe et du volume d'eau et des sédiments aux différents sites pour les averses quantiles

	T = 10 ans	T = 50 ans	T = 100 ans	T = 1000 ans
Bassin Oued Labiod (au gorges de Tighanimine) S=422,59 km ²				
Q _p (m ³ /s)	168,4	172,6	197,0	299,1
Volume (10 ³ m ³)	7449,9	8658,5	11181,8	15710,6
Apports solide (10 ³ Tonnes)	83,9	92,3	107,8	148,4
Ass (T/km ²)	198,60	218,48	255,17	351,11
Bassin Oued Labiod (Oued T'kout) S=257,50 km ²				
Q _p (m ³ /s)	33,8	56,2	72,1	119,6
Volume (10 ³ m ³)	1859,4	2738,4	3572,8	5577,1
Apports solide (10 ³ Tonnes)	20,4	33,8	45,1	76,9
Ass (T/km ²)	79,47	131,34	175,27	298,49
Bassin Oued Labiod (au gorges de Ghoufi) S=870,29 km ²				
Q _p (m ³ /s)	161,5	274,0	352,7	556,6
Volume (10 ³ m ³)	11503,5	14757,1	19214,3	28854,0
Apports solide (10 ³ Tonnes)	175,1	222,4	207,6	365,9
Ass (T/km ²)	201,23	255,57	238,55	420,49
Bassin Oued Labiod (entre Tighanimine et Ghoufi) S=190,20 km ²				
Volume (10 ³ m ³)	2194,2	3360,2	4459,7	7566,3
Apports solide (10 ³ Tonnes)	70,7	96,3	54,6	140,7
Ass (T/km ²)	371,93	506,16	287,28	739,80
Bassin Oued Labiod (entre Ghoufi et la st M'chouneche) S=180,71 km ²				
Volume (10 ³ m ³)	1491,8	1201,9	1341	724,6
Apports solide (10 ³ Tonnes)	35,0	45,2	117,8	72,3
Ass (T/km ²)	193,51	250,02	651,83	399,83

Bassin Oued Labiod (entre la st M'chouneche et barrage F.G.) S=266,00 km ²				
Volume (10 ³ m ³)	1647.6	1441.2	4215.1	1752.0
Apports solide (10 ³ Tonnes)	69.7	60.9	112.3	79.8
Ass (T/km ²)	262.03	228.95	422.18	300.00
Bassin Oued Chemora (Oued Soudhes) S=192,89 km ²				
Q _p (m ³ /s)	36,9	59,7	72,0	103,0
Volume (10 ³ m ³)	2329,7	3655,1	4444,9	5954,8
Apports solide (10 ³ Tonnes)	5184,5	8446,1	10399,7	14687,4
Ass (T/km ²)	26,88	43,79	53,92	76,14
Bassin Oued Chemora (Oued Morri) S=21,75 km ²				
Q _p (m ³ /s)	6,6	10,8	12,5	16,8
Volume (10 ³ m ³)	363,4	581,5	672,2	935,0
Apports solide (10 ³ Tonnes)	1295,5	2231,3	2626,3	3726,4
Ass (T/km ²)	59,56	102,59	120,75	171,33
Bassin Oued Chemora (Oued Rebôe) S=297,89 km ²				
Q _p (m ³ /s)	119,4	166,8	194,4	245,9
Volume (10 ³ m ³)	6649,9	9635,3	11151,9	14827,4
Apports solide (10 ³ Tonnes)	89572,5	107011,5	116747,1	136826,6
Ass (T/km ²)	300,69	359,23	391,91	459,32
Bassin Oued Chemora (entre barrage K. Medaouer et la st Chemora) S=101,00 km ²				
Volume (10 ³ m ³)	1770,4	2890,1	3547,6	4955,8
Apports solide (10 ³ Tonnes)	76,0	165,5	225,6	344,4
Ass (T/km ²)	752,48	1638,61	2233,66	3409,90

IX-4- Conclusion

Les valeurs obtenues, malgré leur apparente hétérogénéité, présentent une structure spatiale définie par la localisation spatiale des paramètres précédemment décrits (couvert végétal, pluviométrie, lithologie, pente).

L'essentiel du transport solide provient des oueds, ce résultat confirme les résultats trouvés par Heush en 1970 et Arabi et Arabi M et Roose E en 1989 (Heush, 1970 ; Arabi, M. et al. 1989).

Pour le bassin d'oued Labiod, et durant les crues de périodes de retour de 10 à 1000 ans, la dégradation spécifique varie de 200 à 400 t/km², pour la partie Nord Est (partie amont jusqu'aux gorges de Tighanimine et oued T'kout).

La partie centrale du bassin entre les gorges de Tighanimine et celles de Ghoufi, où les terrains sont dénudés pendant les fortes crues, la dégradation spécifique est plus forte, elle varie entre 370 et 740 t/km².

Dans la partie aval du bassin, entre les gorges de Ghoufi et le barrage de Foum El-Gherza, la dégradation spécifique moyenne, varie entre 200 et 650 t/km².

Pour le bassin d'oued Chemora, et durant les crues de périodes de retour de 10 à 1000 ans, la dégradation spécifique est faible, elle varie de 30 à 170 t/km², pour la partie Sud-Ouest (partie amont Oued Soudhes et Oued Morri).

La partie Est du bassin Oued Rebôe, où le couvert végétal est faible, la dégradation spécifique est plus forte, elle varie entre 370 et 740 t/km².

Dans la partie aval du bassin, entre le barrage de Koudiet Medaouer et la station de Chemora où les terrains sont dénudés pendant les fortes crues, la dégradation spécifique est très forte, elle varie entre 350 et 3400 t/km².

CHAPITRE X : Application du modèle hydrau-sédimentologique HEC-RAS

X-1- Introduction

L'application du modèle HEC-RAS pour la modélisation du transport solide à l'échelle de la crue est limitée au oued Chemora; cela est dû aux difficultés de l'application du modèle à l'oued Labiod à l'échelle de la crue, vue l'inexistence de la station hydrométrique en aval de l'oued pour la calibration et la validation du modèle.

Pour cela, nous avons utilisé les données hydrométriques (débits liquides et débits solides) enregistrées au niveau de quatre stations hydrométriques du bassin versant d'oued Chemora durant deux crues différentes (la première résulte d'une partie du bassin équipée de stations de jaugeage et la deuxième résulte de tout le bassin versant dont une partie non équipée de stations de jaugeage), le MNT de l'oued et les caractéristiques lithologiques de l'oued.

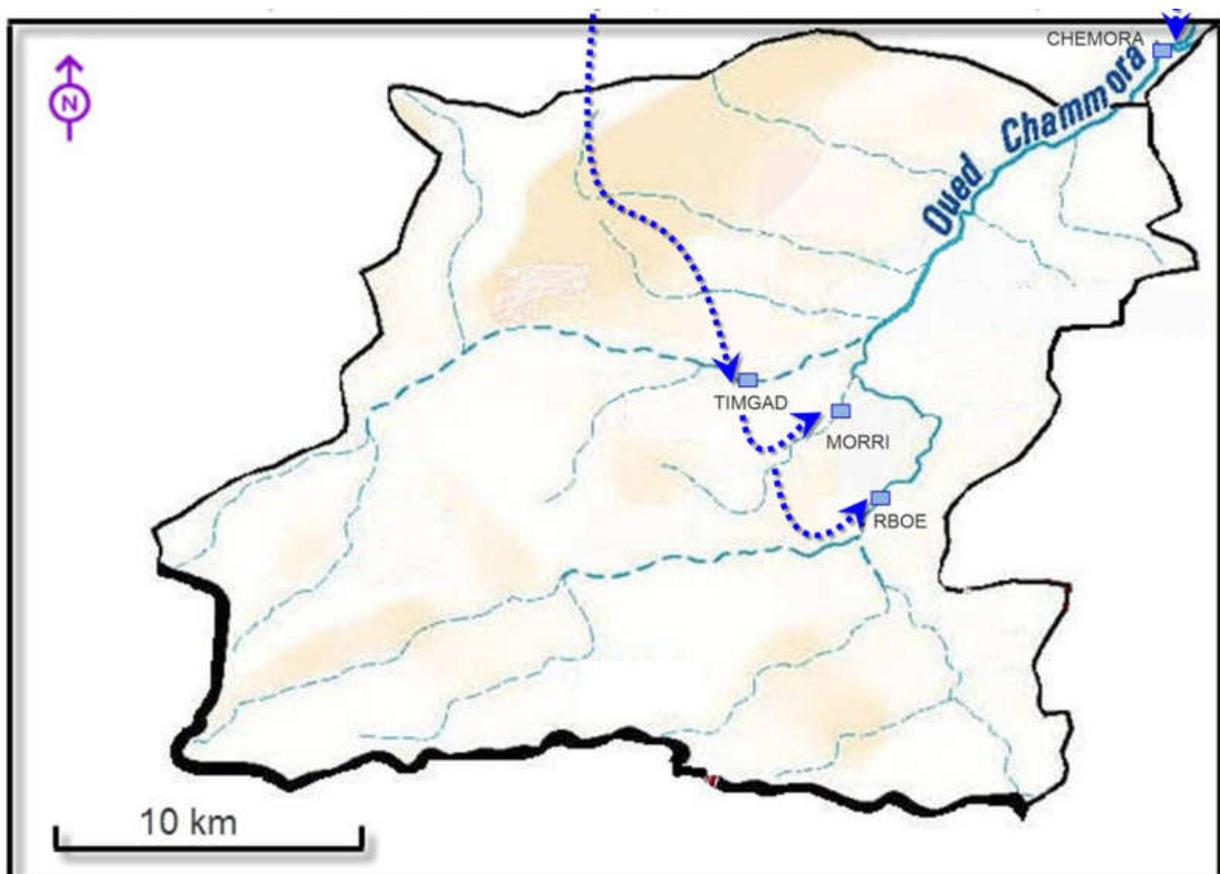


Figure X-1 : Système d'oued Chemora (oued Chemora et ses affluents) avec ses stations hydrométriques

Afin d'analyser les paramètres résultants le long du système d'oued chemora (oued Chemora et ses affluents) à savoir la capacité du transport des sédiments, la vitesse critique d'érosion, la

vitesse d'écoulement, le volume de sédiments entrant au système et arrivant à la fin du système, les zones sensibles à l'érosion et à la sédimentation.

Cette approche en utilisant cette technique a été largement utilisée dans le monde pour l'analyse d'évolution des sédiments. La quantification des apports solides et la détermination des zones sensibles à l'érosion et les zones de dépôt le long de lit d'oued, donc les changements morphologiques de l'oued dus à un écoulement en se basant sur la capacité du transport des sédiments (Haghiabi and Zare dehdasht (2012) en Iran ; Markowska (2012) en Pologne; Motalebian and Hassanpour (2013) en Iran ; Moradinejad and et al. (2014) en Iran; Haddad et al. (2014) en Algérie). Les résultats de ces travaux sont utiles pour tout projet d'aménagement.

X-2- Données

Les données à introduire dans le modèle correspondent :

- Aux données géométriques (topographiques) d'oued Chemora et ses affluents Rbôe, Morri et Soudhes (entre les stations hydrométriques situées en amont et la station du Chemora).
- Coefficients de Manning
- Débits liquides en aval (au niveau de la station hydrométrique de Chemora)
- Débits liquides et solides en amont (au niveau des stations hydrométriques Rbôe, Morri et Timgad) et au niveau des sections initiales des affluents qui se situent entre les stations hydrométriques amont (Rbôe, Morri et Timgad) et la station aval (Chemora).

X-2-1- Données géométriques

Les données géométriques comprennent les informations de connexion pour l'oued (conception schématique du système), données de sections transversales ainsi que des données de structures hydrauliques (USACE, 2010).

Dans notre étude, le système débute par trois oueds (aux sections de stations hydrométriques Rbôe, Morri et Timgad) et se termine par un oued (Chemora) à la section de la station hydrométrique Chemora (figure X-1).

Entre les stations amont et la station aval, 27 affluents débitent dans l'oued.

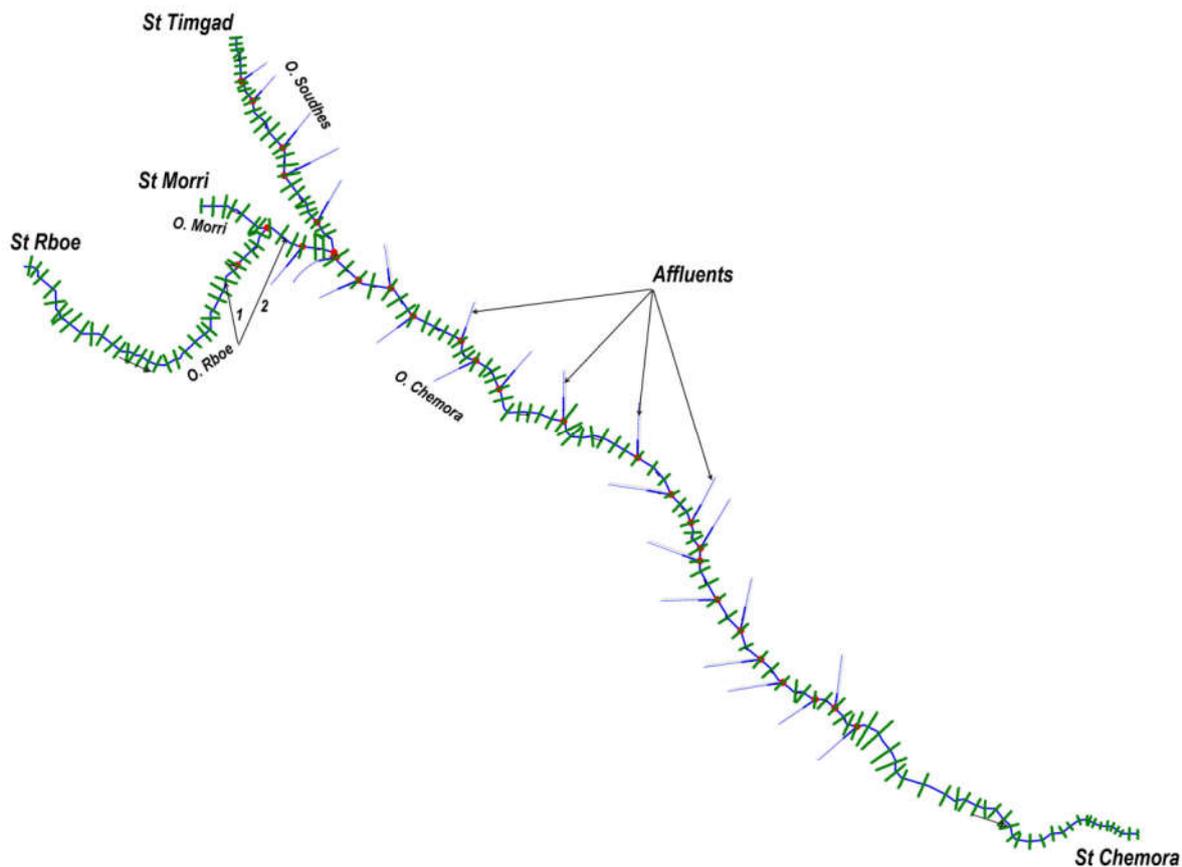


Figure X-2 : Conception schématique du système d'oued Chemora par Hec-Ras.

Les caractéristiques géométriques du système se résument en :

Oued Rbône 1 : De la station hydrométrique Rbône section 33567,05 à la jonction 10812 avec oued Morri d'une longueur de 7990 ml ; se compose de 35 sections transversales.

Oued Morri : De la station hydrométrique Morri section 1571,83 à la jonction 10812 avec oued Rbône 1 d'une longueur de 1630 ml ; se compose de 8 sections transversales.

Oued Rbône 2 : De la jonction 10812 oued Rbône 1 et oued Morri à la jonction 10985 avec oued Soudhes d'une longueur de 1630 ml ; se compose de 6 sections transversales.

Oued Soudhes : De la station hydrométrique Timgad section 5367,71 à la jonction 10985 avec oued Rbône 2 d'une longueur de 5470 ml ; se compose de 30 sections transversales.

Oued Chemora : De la jonction 10985 oued Rbône 2 et oued Soudhes à la station hydrométrique chemora section 13,18 d'une longueur de 23767 ml ; se compose de 96 sections transversales.

27 Affluents : chaque affluent se compose de deux sections transversales.

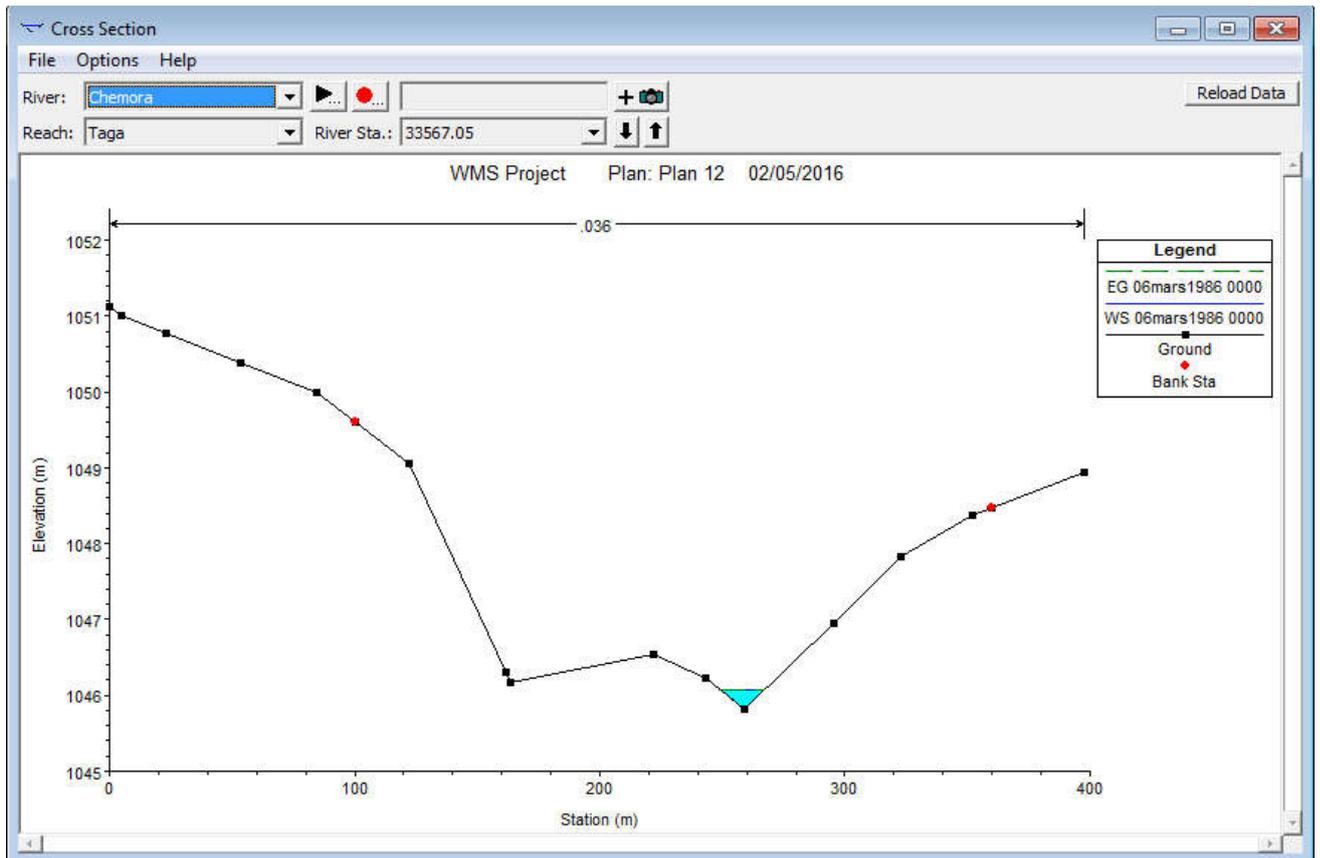


Figure X-3 : Conception d'une section par Hec-Ras.

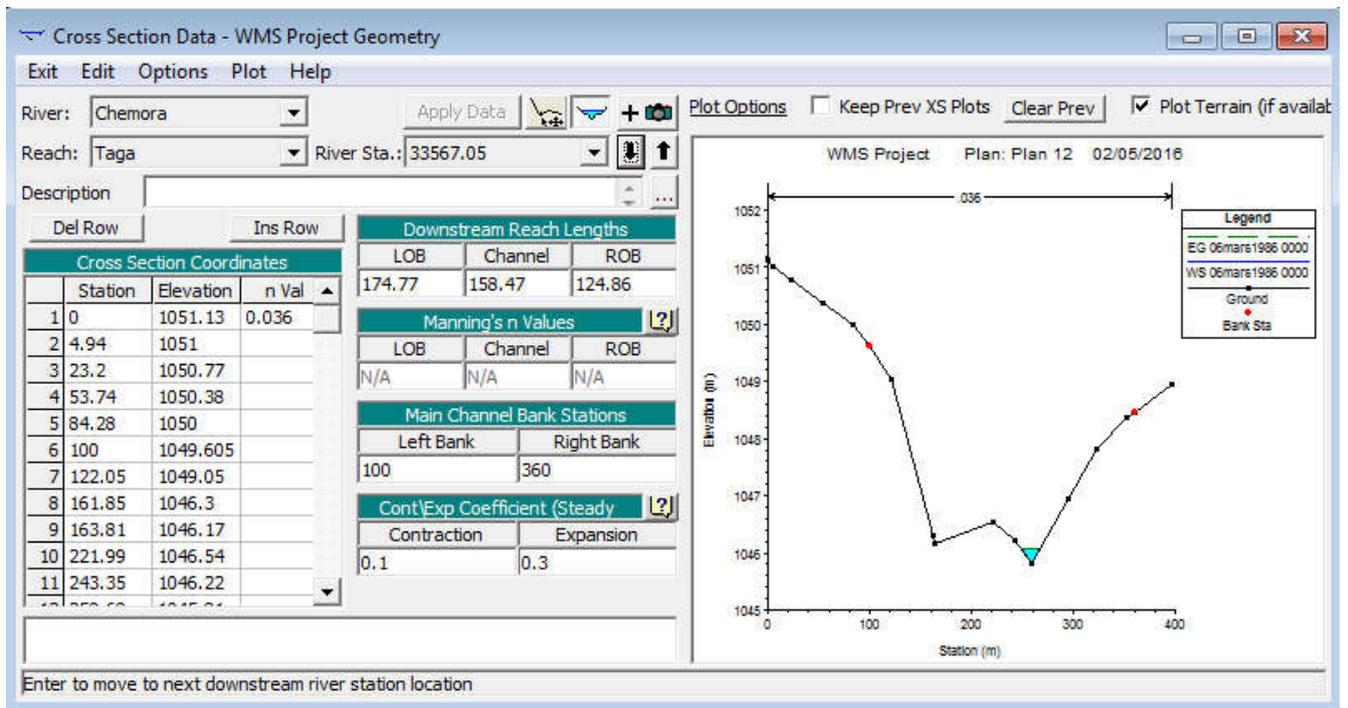


Figure X-4 : Conception d'une section par Hec-Ras avec ses données topographiques.

X-2-2- Données d'écoulement (débits liquides)

Après l'introduction des données géométriques, les données d'écoulement doivent être introduites au modèle.

Dans les études de modélisation du transport solide en utilisant le modèle Hec-Ras réalisées à ce jour, on ne tient pas compte de la répartition spatio-temporelle des apports liquides et solides dans l'introduction des données c'est à dire les conditions aux limites sont simplifiées, elles sont introduites aux deux sections amont et aval et les apports latéraux entre ces deux sections sont négligeables.

Dans notre cas, cette répartition spatio-temporelle des apports a été prise en considération, les conditions aux limites amont ont été introduites dans les trois sections initiales des trois affluents jaugés alimentant oued Chemora en utilisant les données observées et les conditions aux limites latérales ont été introduites dans les sections initiales de tous les affluents (non jaugés) situés entre les sections amont et la section aval en exploitant les résultats des études statistiques élaborées dans la région.

Le type de données des débits liquides utilisé par le logiciel Hec-Ras quasi-instable considère l'hydrogramme d'écoulement comme une série chronologique de débits (histogrammes) ([Stanford, Research Hydraulic Engineer, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2006](#)).

Pour cet objectif, les données utilisées pour notre étude dépendent du cas à étudier :

Le premier cas :

La crue résulte de la partie amont montagneuse (Sud) du bassin de Chemora ; la partie aval située entre les stations (Rbôe, Morri et Timgad) de l'amont et la station de Chemora de l'aval ne participe pas à la production de débits de la crue (pas de précipitations dans cette zone) ; la crue prise comme donnée pour ce cas est celle du 08 Avril 1990 produite des sous bassins versants Rbôe et Soudhes.

Les débits de cette crue mesurés aux stations hydrométriques Rbôe et Timgad sont considérés des conditions aux limites amont aux sections 33567,05 et 5367,72 (Flow series).

Et les débits de la même crue mesurés à la station de chemora sont considérés des conditions aux limites aval à la section 13,18 (stage series) ; les données de cette crue ont été utilisées pour l'étalonnage du modèle.

Le deuxième cas

La crue résulte de tout le bassin de Chemora ; la crue prise comme donnée pour ce cas est celle du 06 Mars 1986 produite par tout le bassin versant.

Les débits de cette crue mesurés aux stations hydrométriques (Rbône, Morri et Timgad) sont considérés des conditions aux limites amont aux sections 33567,05 ; 1571,83 et 5367,72 (Flow series).

Les débits des 27 affluents non jaugés situés entre les stations (Rbône, Morri et Timgad) de l'amont et la station de Chemora de l'aval sont estimés en fonction des surfaces de leurs sous bassins (débits proportionnels aux surfaces) sont considérés des conditions aux limites amont aux sections initiales de ces affluents (Flow series).

Et les débits de la même crue mesurés à la station de chemora sont considérés des conditions aux limites aval du système à la section 13,18 (stage series).

X-2-3- Données des sédiments (débits solides)

Les données de sédiments utilisées pour le modèle sont les quantités mesurées aux stations hydrométriques situées en amont du système ainsi que les données granulométriques des lits des oueds (USACE, 2010).

Pour le cas de la crue du 06 Mars 1986, les débits solides des 27 affluents non jaugés sont estimés en fonction de leurs débits liquides (l'analyse statistique des données du bassin d'oued Chemora a montré que $Q_s = 1,75 Q_l^{2,1}$ pour le mois de mars; (chapitre VI).

Ces données sont introduites comme conditions aux limites amont du système.

X-3- Étalonnage du model

X-3-1- Calibrage du modèle hydraulique

Dans le but de l'étalonnage, les niveaux d'eau et les débits liquides calculés par le modèle HEC-RAS (Motallebian et Hassanpour, 2013) et les niveaux d'eau et les débits liquides mesurés à la station hydrométrique Chemora durant l'évènement 08/04/1990 (toutes les conditions aux limites sont des données mesurées) ont été utilisés. Après simulation et calculs d'erreurs (entre les variables simulées et les variables mesurées), les coefficients de Manning ont été choisis de telle sorte que l'erreur soit plus faible (Le coefficient de rugosité de Manning obtenus pour les lits d'oueds était 0,036).

X-3-2- Calibrage de modèle de sédiments

Huit formules ont été utilisées par Hec-Ras pour prédire le transport solide, et cinq méthodes de calcul de la vitesse de chute. Ainsi, 40 combinaisons différentes qu'on a examinées dans cette étude. Les résultats de chacune de ces combinaisons ont été comparés avec les données naturelles (Motallebian et Hassanpour, 2013) (mesures à la station hydrométrique de Chemora de l'évènement 08/04/1990), et enfin la combinaison ayant les résultats plus proches des données naturelles a été choisie.

La combinaison de l'équation de Yang et la méthode de calcul de vitesse de Van Rijn était plus compatible avec les conditions naturelles de la zone d'étude ; c'est la même combinaison trouvée par Hec Hms.

X-4- Application du modèle

En total les données géométriques liées aux 229 sections transversales citées précédemment sont recueillies et introduites dans le modèle.

La répartition spatio-temporelle des apports a été prise en considération, les conditions aux limites amont ont été introduites dans les trois sections initiales des trois affluents jaugés alimentant oued Chemora en utilisant les données observées et les conditions aux limites latérales ont été introduites dans les sections initiales de tous les affluents (non jaugés) situés entre les sections amont et la section aval en exploitant les résultats des études statistiques élaborées dans la région.

Pour le calibrage du modèle, On a comparé les données des niveaux d'eau et des débits liquides de la station de Chemora mesurées avec les données de sortie liées aux niveaux de l'eau et aux débits liquides calculées, en changeant le coefficient de rugosité de Manning pour l'évènement 08/04/1990 (crue produite par les deux sous bassins amont Rbôe et Soudhes). Enfin le meilleur coefficient de rugosité de Manning obtenus pour les lits d'oueds était 0,036. L'erreur maximale pour ce coefficient était 25,3 cm pour les niveaux d'eau et 6,20 % pour les volumes d'eau totaux qui a été jugée acceptable.

Pour calibrer le modèle de sédimentation, 40 différentes combinaisons de transport des sédiments et de méthodes de calcul de vitesse de chute ont été analysés par le logiciel dans cette étude.

Les résultats ont montré que la combinaison de l'équation de Yang et la méthode de calcul de vitesse de Van Rijn était plus compatible avec les conditions naturelles de la zone d'étude

(l'erreur pour la quantification des apports solides à la station de Chemora est 6,10 % jugée acceptable).

Données

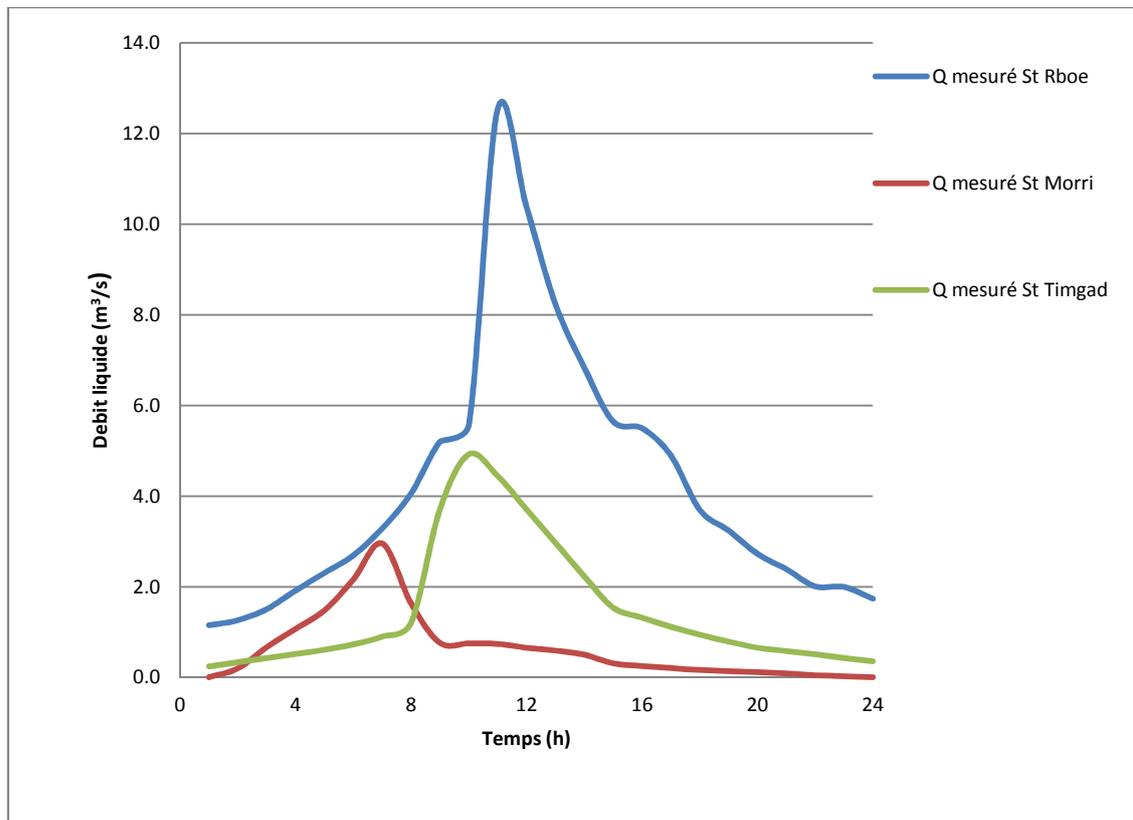


Figure X-5 : Débits liquides mesurés aux stations de : Rboe, Morri et Timgad pour l'évènement 06/03/1986.

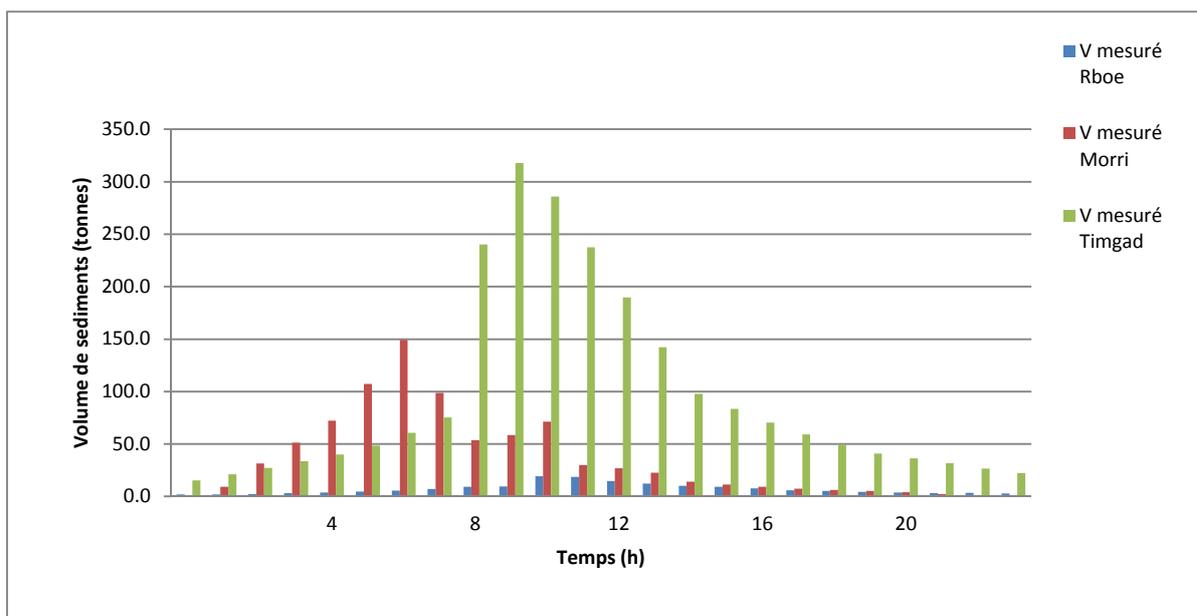


Figure X-6 : Volumes des sédiments mesurés aux stations de : Rboe, Morri et Timgad pour l'évènement 06/03/1986.

Après l'étalonnage de débit et de sédiments pour le premier évènement (09/04/1990), le modèle a été utilisé pour simuler l'écoulement et la sédimentation pour le deuxième évènement 06/03/1986 (crue produite par l'ensemble du bassin et les données des affluents non jaugeés ont été complétés).

Tableau X-1 : Caractéristiques topographiques des affluents non jaugeés de l'amont vers l'aval et de la droite vers la gauche.

Affluent	Section de jonction	Surface BV (km ²)	Longueur de l'affluent (km)	H _{min} S/BV (m)	H _{moy} S/BV (m)
Soudhes1	4393	2.551	1.13	1009.32	1093.65
Soudhes2	3874	1.185	0.56	1005.16	1079.35
Soudhes3	2628	3.108	1.48	992.00	1075.65
Soudhes4	2029	12.979	6.18	990.30	1090.25
Soudhes5	780	1.903	0.91	978.00	1074.52
Chemora1	26686	5.437	2.59	992.01	1092.65
Chemora2	24753	3.462	1.65	978.35	1063.52
Chemora3	23945	3.645	1.74	972.16	1066.54
Chemora4	23262	3.645	1.74	970.11	1076.35
Chemora5	22538	23.700	10.20	965.45	1056.52
Chemora6	21756	2.612	1.24	959.30	1045.54
Chemora7	20589	56.563	24.96	952.04	1043.56
Chemora8	19984	10.944	5.21	948.85	1043.56
Chemora9	19150	6.479	3.09	943.61	1035.42
Chemora10	17378	11.430	5.44	931.00	1031.32
Chemora11	15423	52.695	25.09	923.17	1021.35
Chemora12	14325	4.293	2.04	917.69	1013.35
Chemora13	13570	8.393	4.00	910.77	1003.35
Chemora14	12959	3.888	1.85	907.03	1012.56
Chemora15	12677	2.086	0.99	904.50	1021.62
Chemora16	11748	5.912	2.82	902.22	1005.56
Chemora17	10907	10.033	4.78	896.37	997.23
Chemora18	10128	1.377	0.66	893.00	1017.32
Chemora19	9435	7.502	3.57	890.47	994.65
Chemora20	8617	3.290	1.57	888.00	995.46
Chemora21	8116	1.124	0.54	885.86	1005.62
Chemora22	7462	0.506	0.24	881.00	1052.45

Tableau X-2 : Caractéristiques hydrauliques des affluents non jaugés de l'amont vers l'aval et de la droite vers la gauche.

Affluent	Section de jonction	Tc (heurs)	Q _{lmax} (m ³ /s)	Q _{Smax} (T/s)
Soudhes1	4393	1.10	0.098	0.013
Soudhes2	3874	0.75	0.046	0.003
Soudhes3	2628	1.27	0.120	0.020
Soudhes4	2029	2.96	0.500	0.408
Soudhes5	780	0.88	0.073	0.007
Chemora1	26686	1.65	0.209	0.066
Chemora2	24753	1.34	0.133	0.025
Chemora3	23945	1.32	0.140	0.028
Chemora4	23262	1.24	0.140	0.028
Chemora5	22538	4.55	0.913	1.445
Chemora6	21756	1.12	0.101	0.014
Chemora7	20589	8.82	2.179	8.981
Chemora8	19984	2.70	0.422	0.285
Chemora9	19150	1.93	0.250	0.095
Chemora10	17378	2.71	0.440	0.313
Chemora11	15423	8.41	2.030	7.740
Chemora12	14325	1.45	0.165	0.040
Chemora13	13570	2.28	0.323	0.163
Chemora14	12959	1.30	0.150	0.032
Chemora15	12677	0.84	0.080	0.009
Chemora16	11748	1.72	0.228	0.078
Chemora17	10907	2.47	0.386	0.238
Chemora18	10128	0.64	0.053	0.004
Chemora19	9435	2.00	0.289	0.129
Chemora20	8617	1.16	0.127	0.023
Chemora21	8116	0.58	0.043	0.002
Chemora22	7462	0.31	0.019	0.000

Les données des résultats de la simulation de cet évènement sont très proches de celles mesurées ; l'erreur pour les niveaux d'eau maximale était 22,7 cm, pour les volumes d'eau 7,45 % et pour les apports solides 5,99 % ; erreurs jugées acceptables.

Les données des résultats de l'écoulement et de la sédimentation de la simulation pour l'évènement 06/03/1986 sont illustrées dans les figures 07, 08, 09, 10, 11, 12 et 13.

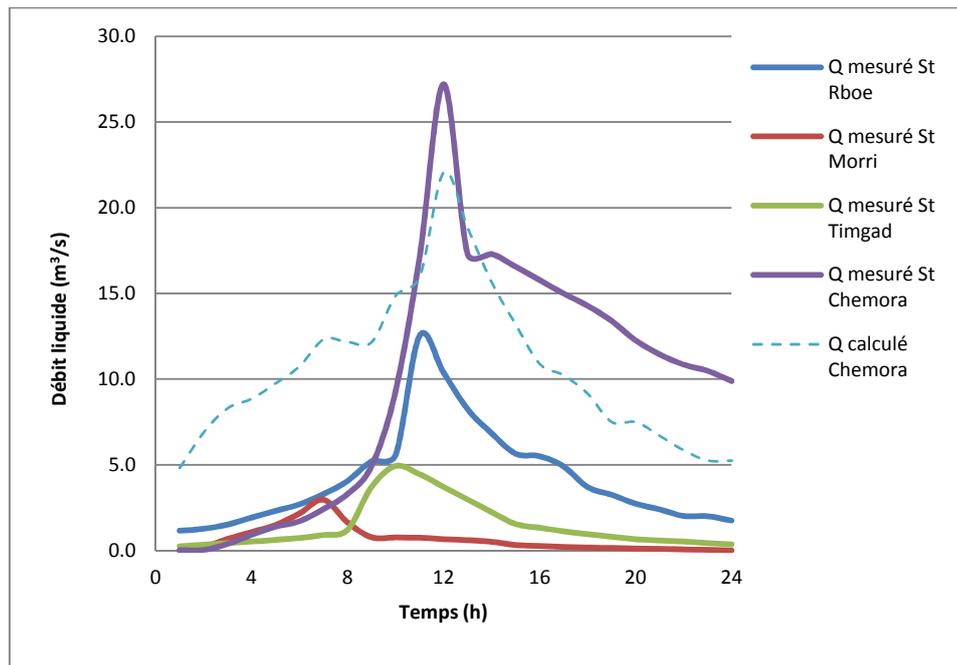


Figure X-7 : Débits liquides mesurés et calculés par Hec-Ras aux différentes stations pour l'évènement 06/03/1986.

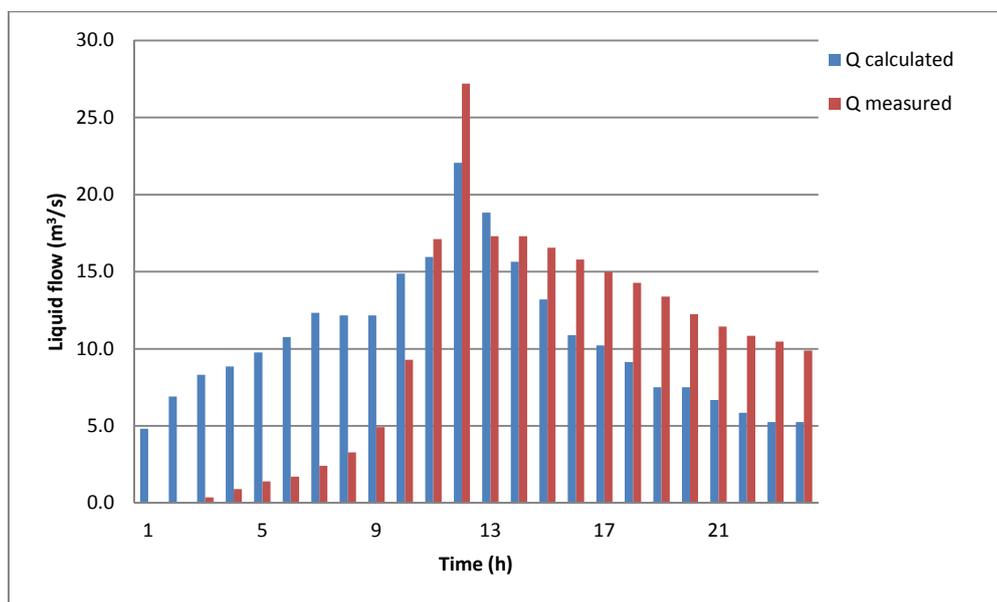


Figure X-8 : Débits liquides mesurés et calculés par Hec-Ras à la station de Chemora pour l'évènement 06/03/1986.

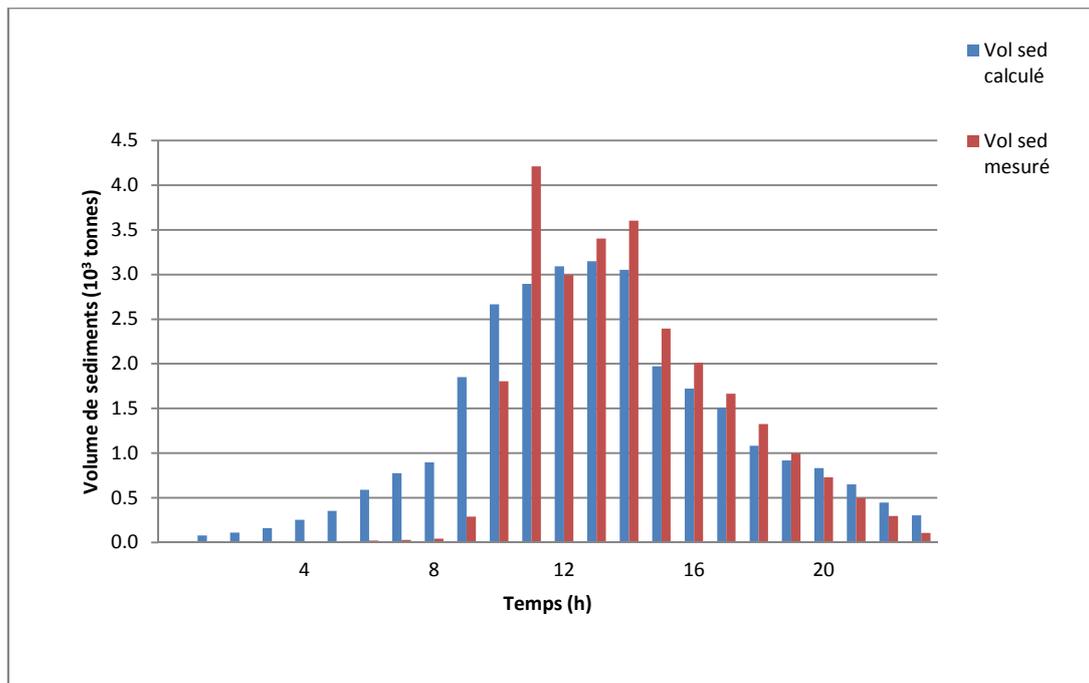


Figure X-9 : Volumes des sédiments mesurés et calculés par Hec-Ras à la station de Chemora pour l'évènement 06/03/1986.

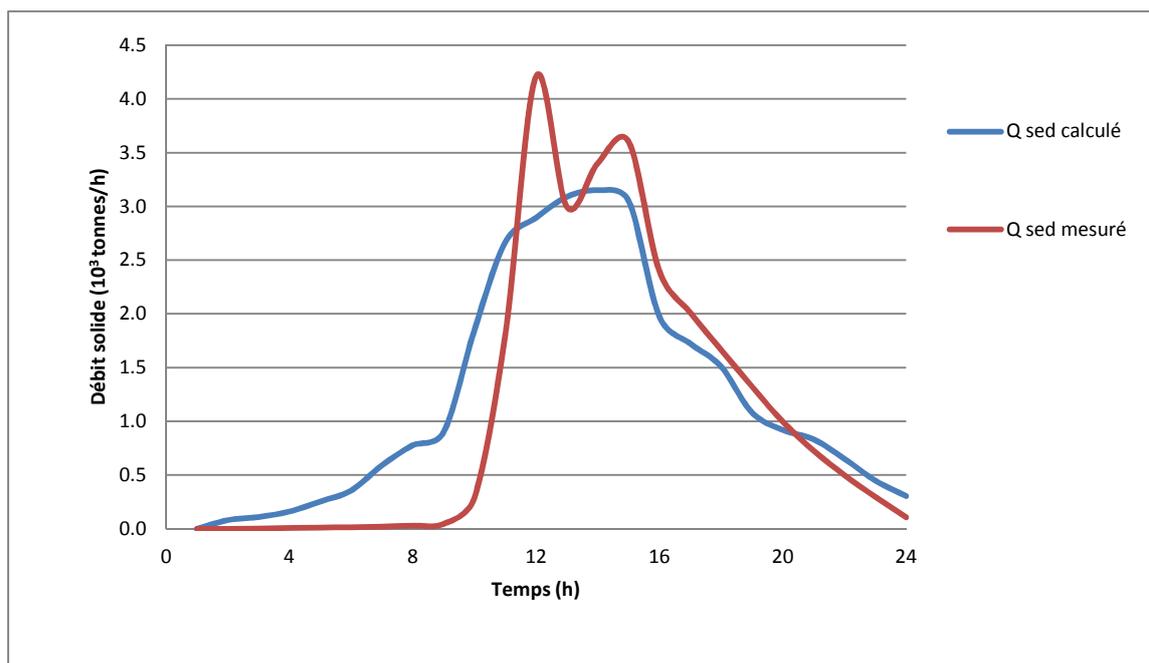


Figure X-10 : Débits solides mesurés et calculés par Hec-Ras à la station de Chemora pour l'évènement 06/03/1986.

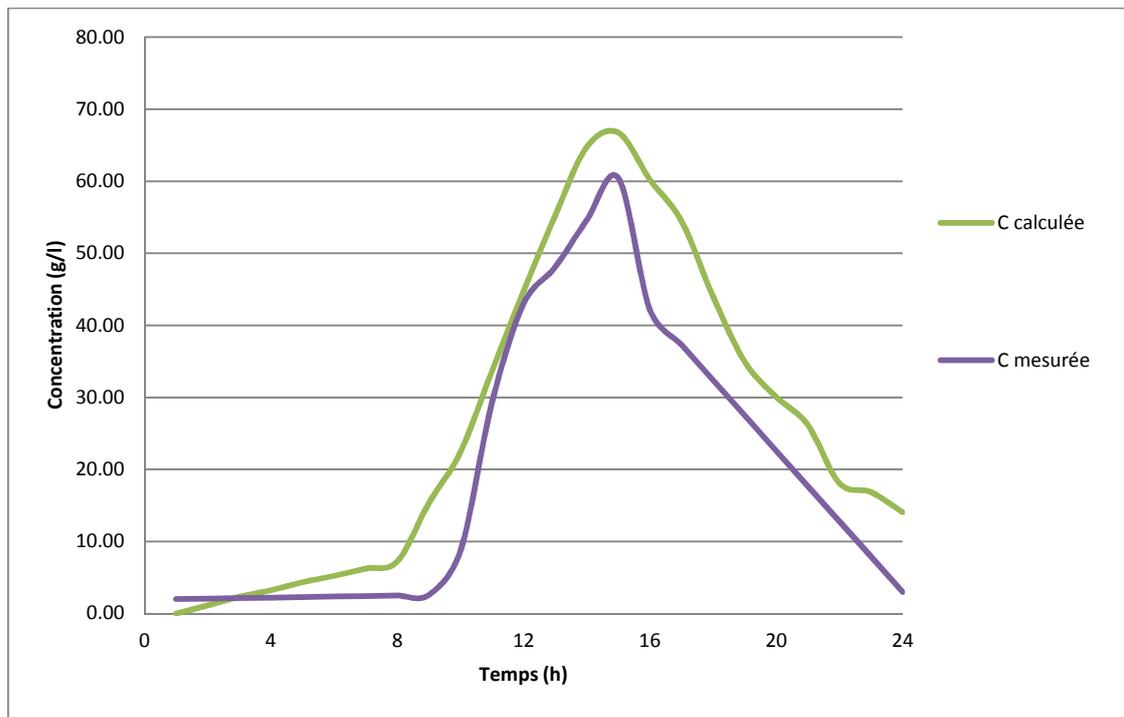


Figure X-11 : Concentrations mesurées et calculées par Hec-Ras à la station de Chemora pour l'évènement 06/03/1986.

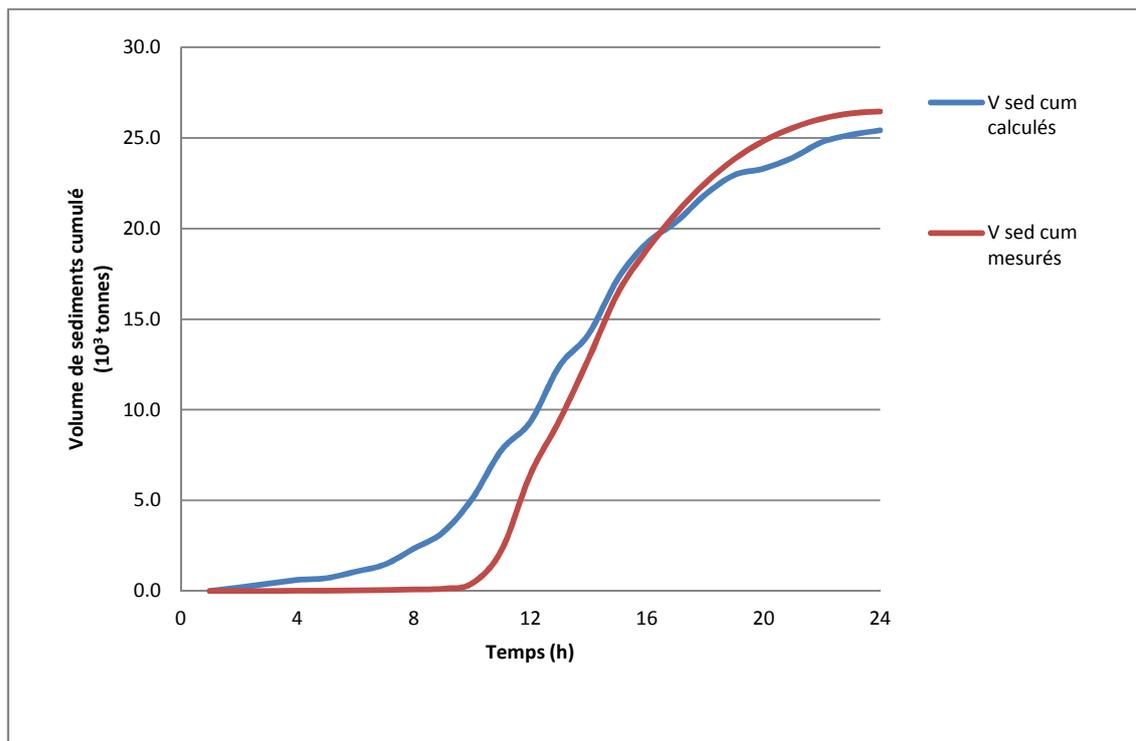


Figure X-12 : Cumul des volumes mesurés et calculés par Hec-Ras à la station de Chemora pour l'évènement 06/03/1986.

Le profil longitudinal d'oued Chemora avant et après la crue du 06/03/1986 est illustré à la Figure X-13, montrant des changements importants dans le profil longitudinal d'oued après le

passage de la crue. Sur 96 sections, 50 ont été érodées et 46 ont été sédimentées. Le dépôt s'est produit sur une longueur totale de 11987 ml avec une hauteur de sédimentation moyenne de 6,1 cm, le dépôt maximum dans la section d'oued 713,36 avec une hauteur de 82 cm.

L'érosion s'est produite sur une longueur totale de 11780 ml avec une hauteur érodable moyenne de 29,2 cm, l'érosion maximum dans la section 14325,02 avec une hauteur érodable de 92 cm.

Le cumul des sédiments entrants dans oued Chemora (Rbône, Morri, Timgad et les 27 affluents) durant l'évènement 06/03/1986 est 3968 tonnes dont 3269 tonnes mesurés aux stations hydrométriques de Rbône, Morri et Timgad ; le cumul des sédiments traversant la station hydrométrique de Chemora (sortants) mesuré est de 26462 tonnes, (et celui calculé est de 28048)

La différence entre les sédiments entrant (au système) et les sédiments sortant (du système) dans l'ordre 23193 tonnes représente 85 % des apports sortants (sédiments produits par le bassin) ; ce qui explique le résultat de l'érosion important trouvé par la simulation dans le lit d'oued (hauteur moyenne érodable de 29,2 cm sur une longueur de 11780 ml dans l'oued) ; et la Figure 13 montre les quantités érodées et déposées importantes le long d'oued à la fin de la crue de 06/03/1986.

Ce résultat confirme le résultat trouvé en utilisant le modèle Hec Hms au chapitre IX, et les résultats trouvés par Heush en 1970 et Arabi et Arabi M et Roose E en 1989 ([Heush, 1970](#) ; [Arabi, M. et al. 1991](#)).

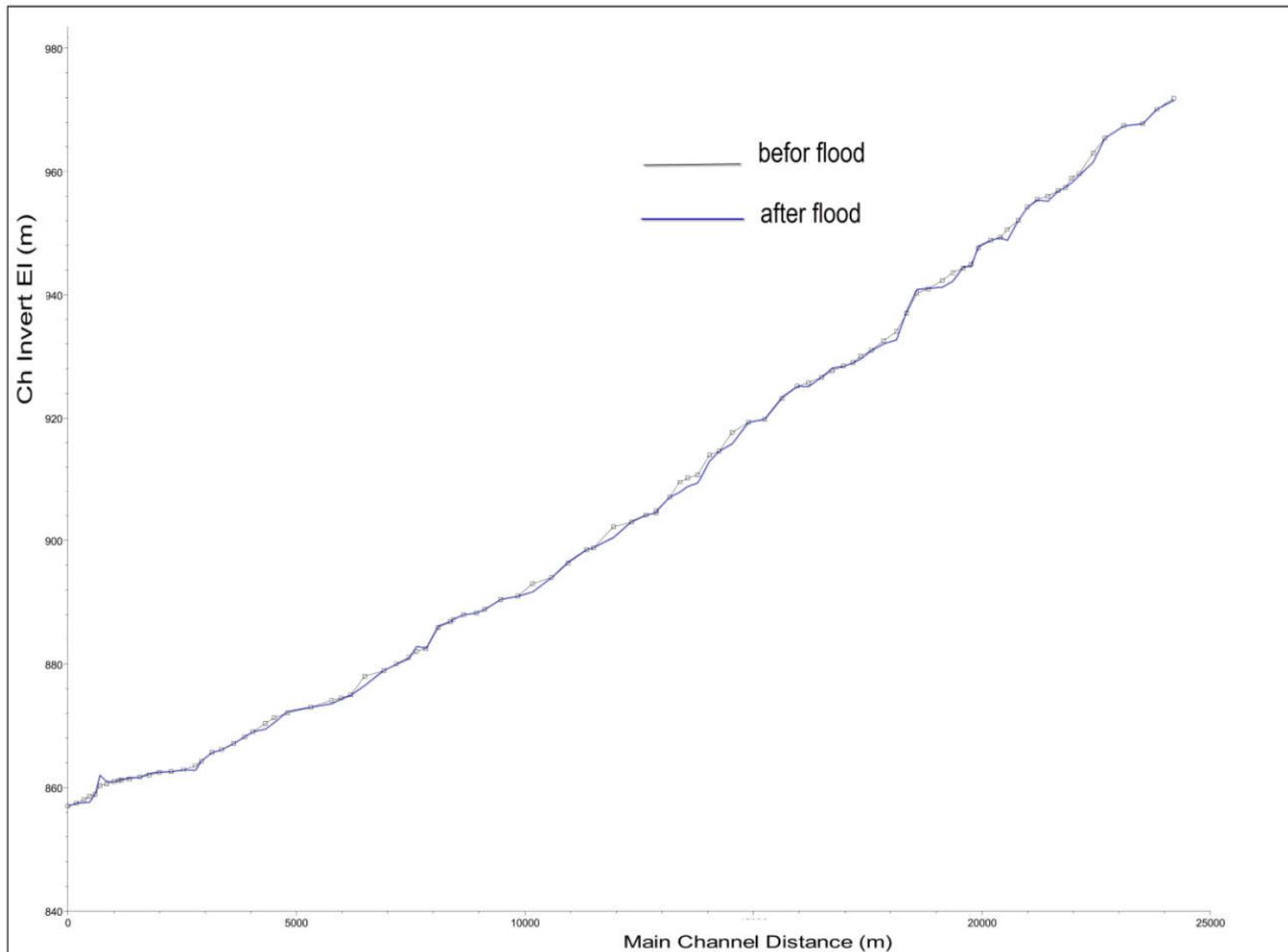


Figure X-13 : Profil d’oued Chemora avant et après le passage de la crue 06/03/1986.

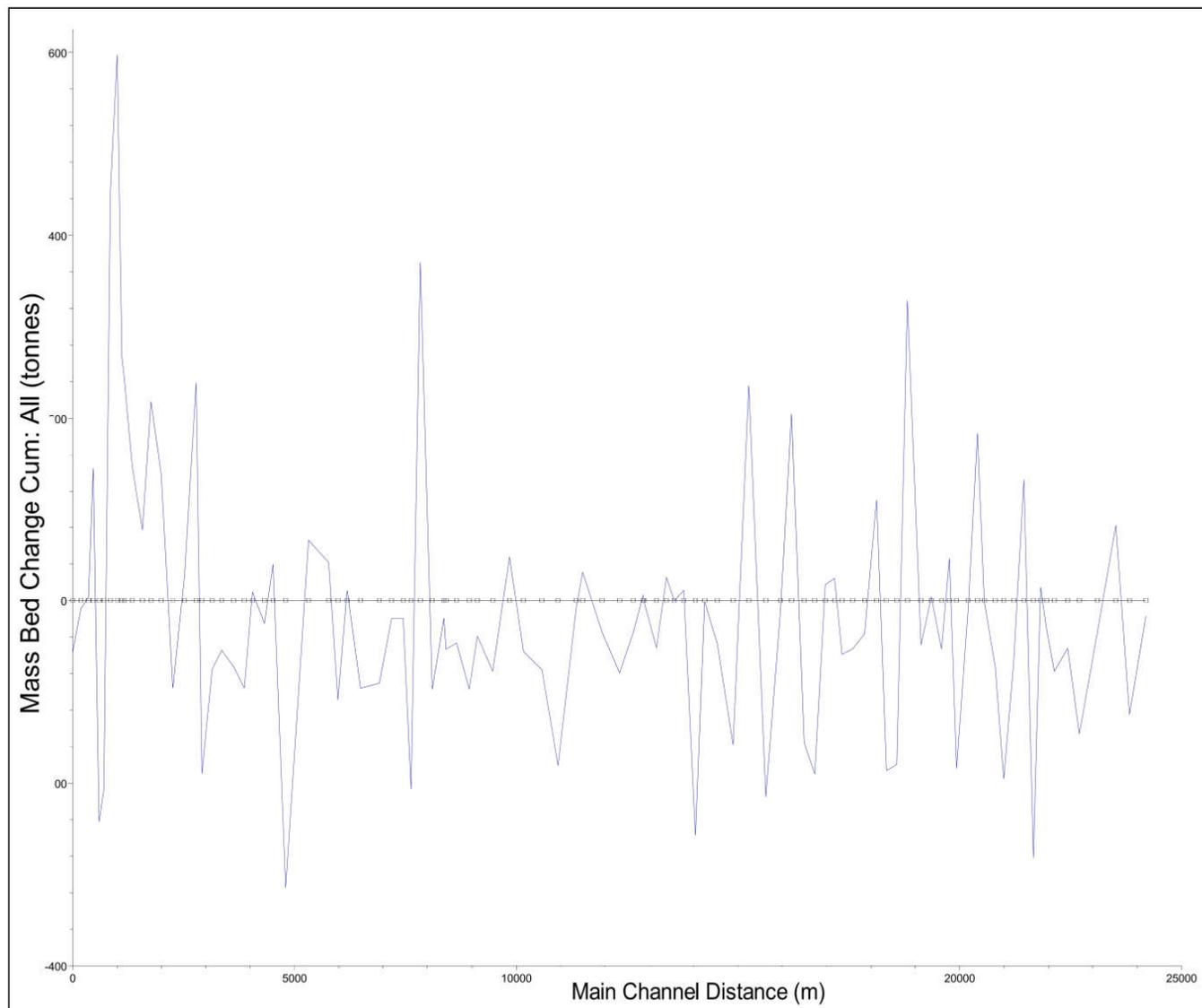


Figure X-14 : Poids cumulatif des sédiments à la fin de la crue 06/03/1986.

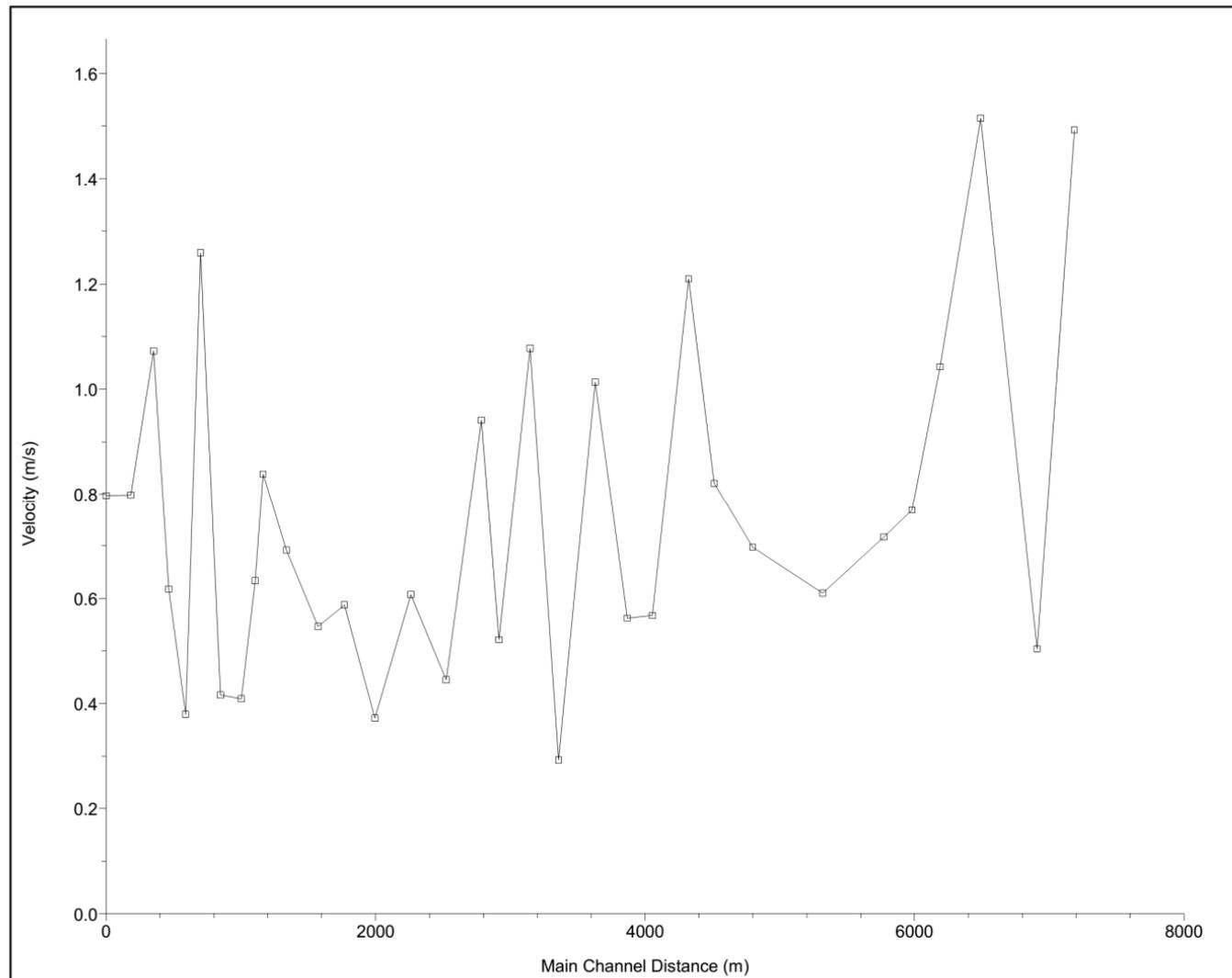


Figure X-15 : Vitesse d'écoulement à t = 17:30.

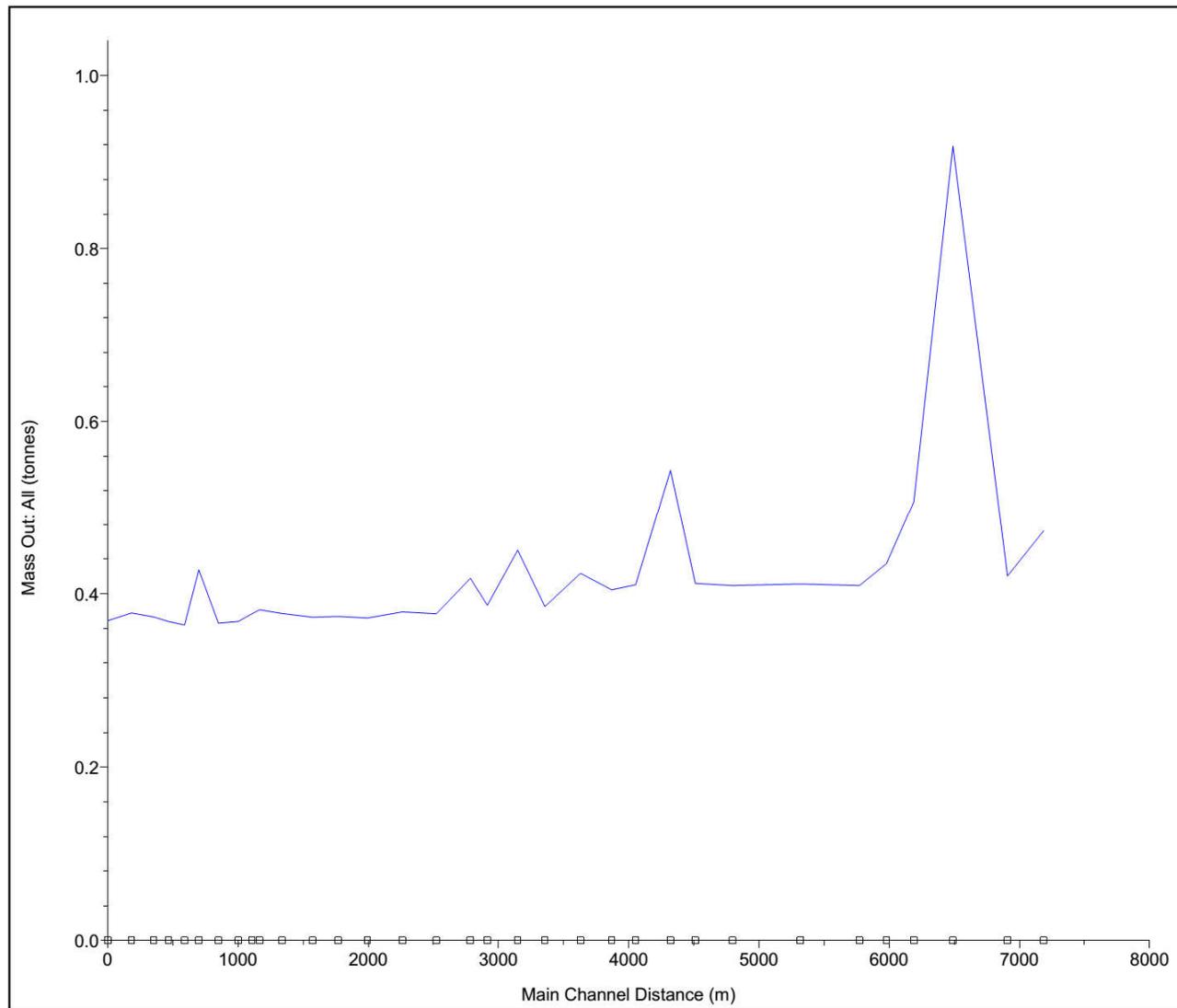


Figure X-16 : Sédiments produits à t = 17:30.

X-5- Conclusion

Dans ce chapitre, une distance de 33,4 km d'oued Chemora a été étudiée en exploitant les données géométriques, lithologiques et les données des débits liquides et solides des deux événements 08/04/1990 et 06/03/1986, mesurées aux stations de jaugeage et complétées pour les affluents non jaugeés pour l'évènement 06/03/1986. Le modèle a été étalonné en utilisant les données du premier événement (crue 08/04/1990 produite par les deux sous bassins amont Rbôe et Soudhes ayant des données complètes), les données d'écoulement (niveaux d'eau et débits liquides) pour choisir le meilleur coefficient de Manning qui été pour notre cas 0,036 et les données des sédiments pour choisir la formule de calcul du transport solide et la méthode de calcul de la vitesse de chute. Les résultats ont montré que la combinaison de l'équation de Yang et la méthode de calcul de vitesse de Van Rijn était plus compatible avec les conditions naturelles de la zone d'étude (l'erreur pour la quantification des apports solide à la station de Chemora est 5,99 % jugée acceptable).

Ensuite le modèle a été utilisé pour simuler les débits et leurs sédiments de l'évènement (crue 06/03/1986 produite dans l'ensemble du bassin et les données des affluents non jaugeés ont été complétés). Les résultats ont montré que sur 96 sections, 50 ont été érodées et 46 ont été sédimentées. Le dépôt s'est produit sur une longueur totale de 11987 ml, avec une hauteur de sédimentation moyenne de 6,1 cm, et l'érosion s'est produite sur une longueur totale de 11780 ml avec une hauteur érodable moyenne de 29,2 cm.

En résumé l'érodabilité d'oued de Chemora est très importante ; l'apport total des sédiments produit de son lit d'oued (tronçon de longueur 23,7 km) représente 85 % de l'apport total produit par le bassin versant (surface de 763,4 km²).

Ce résultat confirme le résultat trouvé en utilisant le modèle Hec Hms au chapitre IX, et les résultats trouvés par Heush en 1970 et Arabi et Arabi et Roose en 1989 ([Heush, 1970](#) ; [Arabi, et al. 1991](#)).

Les sédiments produits par le lit d'oued et la capacité du transport solide de l'oued dépendent essentiellement des pentes du fond de l'oued ; la pente critique pour laquelle le débit solide produit est sensiblement supérieure au débit déposé est dans l'ordre de 0,004 m/m.

Il a été mis en évidence la répartition spatio-temporelle de l'érodabilité et de dépôt, et de donner une base de données pour tout travail de rééquilibrage des oueds le long du système d'oued Chemora. (Oued Rbôe (9.6 km), Oued Morri (1.6 km), Oued Soudhes (5.5 km) et Oued Chemora (23.8 km)).

Conclusion de la troisième partie

Dans cette partie consacrée à la modélisation du transport solide à différentes échelles, nous avons commencé en premier lieu par une présentation des deux modèles HEC HMS et HEC RAS au chapitre VII, suivi par l'application de l'équation universelle des pertes de sol révisée (RUSLE) pour prédire le potentiel d'érosion moyen annuel sur une base d'un pixel, dans le huitième chapitre.

Les apports solides produits simulés par le bassin versant oued Labiod (jusqu'à la station de M'chouneche) sont de l'ordre de 824000 tonnes/an, avec un taux spécifique de 784 tonnes/km², et ceux produits simulés par le bassin versant oued Chemora (jusqu'à la station de Chemora) sont dans l'ordre de 338000 tonnes/an, avec un taux spécifique de 457 tonnes/km².

La comparaison entre les sédiments simulés et les ceux mesurés aux niveaux des stations hydrométriques M'chouneche et Chemora montre une concordance acceptable en ce qui concerne les résultats d'érosions à l'échelle annuelle (erreur inférieure à 12 %). Par contre, à l'échelle mensuelle, les résultats ne sont pas similaires. Ce résultat est très important et logique du fait que le modèle USLE ou RUSLE est conçu spécialement pour l'estimation d'érosion à l'échelle annuelle.

A l'échelle de la crue, la calibration du modèle hydrologique Hec Hms a été effectuée pour les 08 fichiers de simulations (pour chaque bassin) en utilisant le débit de pointe, qui a conduit aux résultats suivants :

- Les averses types IA ont été les mieux classés dans la restitution des caractéristiques de l'hydrogramme.
- Pour tous les événements, l'hydrogramme simulé était de même forme que celui observé.

Les valeurs des débits extrêmes des crues fréquentielles estimées par le modèle hydrologique Hec Hms sont proches de celles trouvées par la méthode Gradex et de la formule empirique régionale de Meddi et Toumi (2016).

La calibration du modèle hydro-sédimentologique HEC-HMS donne la combinaison de l'équation de Yang avec la méthode de calcul de vitesse de Van Rijn avec une couche active des lits des oueds moyenne de 50 cm était plus compatible avec les conditions naturelles du bassin oued Chemora, par contre celle de l'équation de Toffaleti avec la méthode de calcul de vitesse de Toffaleti, avec une couche active des lits des oueds moyenne variant de 30 à 50 cm était plus compatible avec les conditions naturelles du bassin oued Labiod.

L'application du modèle avec le jeu de paramètres optimal durant les crues de périodes de retour de 10 ans à 1000 ans, donne une dégradation spécifique qui varie de 200 à 400 t/km², (apports solides produits varient entre 210000 et 438000 tonnes) pour le bassin d'oued Labiod à la station de M'chouneche, et une dégradation spécifique qui varie de 380 à 840 t/km², (apports solides produits varient entre 285000 et 620000 tonnes) pour le bassin d'oued Chemora à la station de Chemora.

Dans le dernier chapitre, une distance de 33,4 km d'oued Chemora a été étudiée en exploitant les données géométriques, lithologiques et les données des débits liquides et solides de deux évènements différents, mesurées aux stations de jaugeage et complétées pour les affluents non jaugés. L'étalonnage du modèle hydrau-sédimentologique a montré que la combinaison de l'équation de Yang et la méthode de calcul de vitesse de Van Rijn était plus compatible avec les conditions naturelles de la zone d'étude, avec une erreur pour la quantification des apports solide à la station de Chemora de l'ordre de 6 %.

Les résultats ont montré que sur 96 sections, 50 ont été érodées et 46 ont été sédimentées. Le dépôt s'est produit sur une longueur totale de 11987 ml avec une hauteur de sédimentation moyenne de 6,1 cm, et l'érosion s'est produit sur une longueur totale de 11780 ml avec une hauteur érodable moyenne de 29,2 cm.

Les résultats des deux modélisations hydro-sédimentologique par Hec-Hms et hydrau-sédimentologique par Hec-Ras, ont montré que l'essentiel du transport solide provient des oueds, ce résultat confirme les résultats trouvés par Heush en 1970 et Arabi et Arabi et Roose en 1989 ([Heush, 1970](#) ; [Arabi, et al. 1989](#)).

Conclusion et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les deux bassins Oued Labiod et Oued chemora qui sont confrontés au problème de dégradation des sols, et par conséquent l'érosion et l'envasement des barrages Foum El-Gherza et Kodiet Medaouer, ont fait l'objet d'un travail de recherche relatif à la quantification des totaux exportés hors ces deux bassins, ainsi que la simulation du phénomène d'érosion à l'échelle de la crue.

Ces deux bassins offrent 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 formations prédominantes dans les bassins versants étudiés, sont celles du quaternaire dans les grandes plaines et vers les oueds sont bien développés. Les terrains imperméables et semi-perméables sont majoritaires dans les bassins, à cette faible perméabilité vient s'ajouter les conditions morphologiques favorables au ruissellement. Le couvert végétal rencontré à travers les bassins est de type dégradé.

Les écoulements dans les deux Oueds des deux bassins, ayant un caractère irrégulier.

Les débits extrêmes des crues ont été estimés par différentes méthodes. Ces débits sont très importants.

Les apports solides moyens annuels produits par le bassin versant d'oued Labiod mesurés au niveau de la station hydrométrique de M'chouneche, sont de l'ordre de 743000 tonnes/an avec un taux spécifique de 707 tonnes/km², et ceux produits par le bassin versant d'oued Chemora mesurés au niveau de la station hydrométrique de Chemora, sont dans l'ordre de 304000 tonnes/an avec un taux spécifique de 410 tonnes/km², pour la période (1979-1996) pour l'oued Labiod et pour la période (1971-1996) pour l'oued Chemora.

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 révisée (RUSLE) pour prédire le potentiel d'érosion moyen annuel, suivi d'une modélisation hydro-sédimentologique à l'échelle de la crue en appliquant le modèle Hec Hms, ensuite une modélisation hydro-sédimentologique à l'échelle de la crue en appliquant le modèle Hec Ras.

Les apports solides moyens annuels produits estimés par RUSLE, pour le bassin versant d'oued Labiod (jusqu'à la station hydrométrique de M'chouneche) sont de l'ordre de 824000 tonnes/an avec taux spécifique de 884 tonnes/km², et ceux produits par le bassin versant d'oued Chemora (jusqu'à la station hydrométrique de Chemora) sont dans l'ordre de 338000 tonnes/an avec taux spécifique de 457 tonnes/km².

La comparaison entre les résultats des sédiments estimés par RUSLE arrivant aux exutoires des bassins, et ceux mesurés aux niveaux des stations hydrométriques M'chouneche et Chemora montre une concordance acceptable en ce qui concerne les résultats d'érosions à l'échelle annuelle (l'erreur inférieure à 12 %). Par contre, à l'échelle mensuelle, les résultats ne sont pas similaires. Ce résultat est très important et logique du fait que le modèle USLE ou RUSLE est conçu spécialement pour l'estimation d'érosion à l'échelle annuelle.

La calibration du modèle hydrologique HEC HMS a été effectuée pour les 08 fichiers de simulations (pour chaque bassin) en utilisant le débit de pointe, elle a conduit aux résultats :

- Parmi les quatre types d'averses proposés par Hec Hms, les averses de type IA ont été les mieux classés dans la restitution des caractéristiques de l'hydrogramme.
- Pour tous les événements, l'hydrogramme simulé était de même forme que celui observé.

Les valeurs des débits extrêmes des crues fréquentielles estimées par le modèle hydrologique Hec Hms sont proches de celles trouvées par le traitement statistique des données de mesures, par la méthode Gradex et par la formule empirique régionale de Meddi et Toumi (2016).

La combinaison de l'équation du transport de Yang avec la méthode de calcul de la vitesse de Van Rijn, pour une couche active moyenne de 50 cm des lits des oueds, était plus compatible avec les conditions naturelles du bassin d'oued Chemora. Par contre, celle de l'équation de Toffaleti, avec la méthode de calcul de la vitesse de Toffaleti pour une couche active moyenne des lits des oueds variant de 30 à 50cm, était plus compatible avec les conditions naturelles du bassin d'oued Labiod.

L'application du modèle avec le jeu de paramètres optimal, pour les crues de périodes de retour de 10 à 1000 ans, donnent les résultats de la dégradation spécifique qui varient entre 200 et 420 t/km² (apports solides produits varient entre 210000 et 438000 tonnes) pour le bassin d'oued Labiod à la station de M'chouneche et du 380 à 840 t/km² (apports solides produits varient entre 285000 et 620000 tonnes) pour le bassin d'oued Chemora à la station de Chemora.

L'étalonnage du modèle HEC RAS (Modèle hydrau-sédimentologique) a montré que la combinaison de l'équation de Yang et la méthode de calcul de vitesse de Van Rijn avec une couche active des lits des oueds moyenne de 50 cm (même que celle trouvée par HEC HMS) était plus compatible avec les conditions naturelles de la zone d'étude avec une erreur pour la quantification des apports solides à la station de Chemora de l'ordre de 6 % .

Les résultats ont montré que l'essentiel des sédiments provient des oueds (confirme le résultat trouvé par Hec Hms), et sur la distance étudiée de 33,4 km et de 96 sections d'oued Chemora, 50 ont été érodées et 46 ont été sédimentées. Le dépôt s'est produit sur une longueur totale de 11987 ml avec une hauteur de sédimentation moyenne de 6,1 cm et l'érosion s'est produit sur une longueur totale de 11780 ml avec une hauteur érodable moyenne de 29,2 cm.

En conclusion, on peut dire que nous avons essayé d'exploiter au maximum les données disponibles, pour commencer à comprendre la dynamique de la production d'érosion sur les deux bassins. On a élaboré quatre modèles : Le premier à l'échelle annuelle, basé sur l'équation universelle des pertes en sol révisée "RUSLE" (chapitre VIII), le second hydrologique (pluie - débit), dont les résultats ont été utilisés pour élaborer le troisième modèle hydro-sédimentologique de production d'érosion par Hec Hms (chapitre IX). Dans ce modèle, les bassins versants ont été découpés en sous-bassins et biefs ; Les premiers sont modélisés par une loi de production d'érosion (MUSLE) et les seconds, par une fonction de transport associée à une méthode de calcul de vitesse de chute. Le dernier modèle est hydrau-sédimentologique de production, de transport et dépôt des matériaux par Hec Ras dans le lit d'oued (chapitre X), qui prend en compte la capacité du transport de l'écoulement.

L'application de ces modèles indique que la formulation adoptée peut conduire à des bons résultats, dès qu'on a des données représentatives.

Perspectives :

A titre de perspectives, quatre points importants sont à développer pour améliorer la qualité des données, par conséquent avancé dans la modélisation des phénomènes d'érosion et du transport solides :

- a.** Amélioration des données du facteur d'érodabilité du sol (K) en analysant un nombre suffisant d'échantillons afin de déterminer leurs propriétés intrinsèques à savoir leurs textures, leurs structures et leurs perméabilités.
- b.** Amélioration des données du curve nombre (CN) en exploitant des cartes d'occupation du sol plus précises.
- c.** Adaptation des données de précipitations mensuelles (éventuellement journalières) de l'ANRH aux données de précipitations ponctuelles utilisées par HEC HMS afin d'étudier la modélisation hydrologique et hydro-sédimentologique sur des longues durées par Hec Hms (simulation continue).
- d.** Exploitation des levés bathymétriques du barrage Foum El-Gherza et les données de gestion et d'exploitation du barrage (si elles existent) afin d'étudier la modélisation hydro-sédimentologique sur des longues durées par Hec Ras à plusieurs pas du temps.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Achite M., Meddi M. 2004. Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest Algérien). *Sécheresse*. 15(4) :367-373.
- Achite M. & Meddi M. 2005. Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin de l'oued Mina (Nord-Ouest Algérien *Rev. Sci. Eau*. 18 (spécial), p: 37-56.
- Ackers, P., and White, W. R.,1973. "Sediment transport: new approach and analysis," *Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Vol. 99, No. HY11, pp. 2040-2060.
- Ackers P., White W.R., 1978. *Weirs and flumes for flow measurement*. John Wiley and Sons. UK.
- Amir Hamzeh Haghiabi, 2012. Evaluation of HEC-RAS Ability in Erosion and Sediment Transport Forecasting; *World Applied Sciences Journal* 17 (11): 1490-1497, 2012, ISSN 1818-4952© IDOSI Publications, 2012.
- Amir Hamzeh Haghiabi and Ehsan Zaredehdasht. 2012. Application of hec-ras model for estimating changes in watercourse geometry during floods *Joanna Markowska; studia geotechnica et mechanica*, Vol. XXXIV, No. 2, DOI: 105277/sgm021206.
- Amir Moradinejad, Amir Hamzeh Haghabi, HasanTorabi, Azadeh Jabari. 2014. Qara – Chai River sediment survey of the Markazi province numerical model HEC-RAS.4; *International Research Journal of Applied and Basic Sciences* © 2014 Available online at www.irjabs.com ISSN 2251-838X / Vol, 8 (10):1628-1636 Science Explorer Publications.
- Annuaire pluviométrique de l'Algérie 1973. Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique sous-direction des ressources en eau, service hydrologie année 1972 – 1973.
- Annuaire hydrologique de l'Algérie (de 1946-47 à 1960-61), Alger, Gouvernement général de l'Algérie, Direction du Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, DSCH-SCEGGT, Service des Etudes Scientifiques.
- Annuaire hydrologique de l'Algérie Alger, A.N.R.H. Annuaire pluviométrique de l'Algérie, Alger, A.N.R.H.
- ANRH, 2002. "Carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie au 1/500 000" (2 feuilles, notice de 42 pages). Ministère des Ressources en Eau, éd. I.N.C.T., Alger,

- ANRH 2005. Carte du réseau hydro climatologique et de la surveillance de la qualité des eaux ANRH ; Alger
- ANRH, 1993. "Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500000" (2 feuilles, une notice de 49 p.). Ministère de l'Équipement, éd. I.N.C., Alger
- A.N.R.H., 1986, Inventaire des sols d'Algérie 1963-1986, Atlas cartographique, A.N.R.H. Alger.
- A.N.R.H., 1986, Ressources en eau de surface, ressources en sols, Rapport interne, Alger, 23 p.
- Anser A., 1998, la pluviométrie en Algérie du Nord : évolution et variabilité (1931-1995), Thèse de doctorat d'état, Université de Constantine, Institut des Sciences de la terre, 260 p.
- Arabi M., Roose E ; 1989. Influence de quatre systèmes de production de moyenne montagne méditerranéenne Algérienne .Bull. Réseau Erosion ; 9 :39-51.
- Armanini, A. 1992. "Variations of bed and sediment load mean diameters due to erosion and deposition processes," Dynamics of Gravel Bed Rivers, Edited by P. Billi, R. G. Hey, C. R. Thorne, and P. Tacconi, pgs. 351-359.
- Armanini, A. & Di Silvio, G. (1988) Un modèle filaire en régime non permanent du transport de sédiments de granulométrie étendue, J. Hydraul. Res., 26(3), 275-292
- Arnoldus, H.M.J. 1977 Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. Cahiers FAO: Conservation des sols N°1, p. 99-124 FAO
- Arnoldus, H.M.J. 1977 Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. FAO bulletin pédagogique 34, p. 39-51. FAO.
- Auzet V., Lilin C., Paulet B. (1987). L'Érosion des sols par l'eau dans les régions de grandes cultures: aspects agronomiques. Paris: Ministère de l'Environnement / Ministère de l'Agriculture, 60 p.
- Auzet V., 1987, L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques, Min. Env./Min. Agri., CEREG-UA95 CNRS, 60 p.
- Babel, M.S., Najim, M.M.M., Loof, R., 2004. Assessment of agricultural nonpoint source model for a watershed in tropical environment. Journal of Environment Engineering 130 (9), 1032 e 1041.
- Ballais J.L. (1981) – Recherches géomorphologique dans les Aurès, Thèse ès –lettres, Université de Paris I, 566 p

- Barlier J.-F. (1977). Les Sols sur molasse dans la région toulousaine. Etude des phénomènes de lessivage et de remaniements. Université de Toulouse III, thèse de 3^e cycle, 107 p.
- Belagoune Fares 2012. Etude et modélisation des crues des cours d'eaux en milieu semi aride « Cas des grands bassins versants 05, 06 et 07 »; Mémoire de magister; Université Kasdi Merbah OUARGLA.
- Belleudy, P., Valette A., Graff B., 2009. Passive hydrophone monitoring of bedload in River beds: first trials and exploration: USGS. Scientific Investigations Report.
- Bell, R.G. & Sutherland, A.J. (1983) Nonequilibrium bedload transport by steady flows, J. Hydraul. Eng., 109(3), 351-367
- Benaïcha Amar Cherif 2008. Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages ; Mémoire de magister ; Université Hadj Lakhdar BATNA
- Benkhaled A. et Remini B. 2003 -Analyse de la relation puissance débit solide –débit liquide à l'échelle du bassin -versant de l'oued Wahrane (Algérie). Revue des Sciences de l'eau, 16 (3).
- Blanco H. & Lal R., 2008. Principles of Soil Conservation and Management Springer Science and Business Media B.V.
- Body. K., 1981 : Analyse fréquentielle des pluies de l'Algérie, Synthèse régionale (complétée et corrigée par SARVARY, 1985).
- Bonell M., Williams J., 1987. - Infiltration and redistribution of overland flow and sediment on a low relief landscape of semi-arid, tropical Queensland. IAHS Publ. 167 : 199-211.
- Bonn F. 1998. «La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: possibilités, erreurs et limites». Cahier Sécheresse, vol. 9, n° 3, p 185-192.
- Bouanani A. 2005, Hydrologie, Transport Solide et Modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW- Algérie). Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen.
- Boudjadja A., Messahel M., Pauc H., 2003, Ressources hydriques en Algérie du Nord. Revue des Sciences de l'Eau. 16/3 :286-304.
- Browning, G. M., C. L. Parish, J. Glass, 1947. A method for determining the use and limitations of rotation and conservation practices in the control of soil erosion in Iowa. J. Am. Soc. Agron. 39(1). p. 65-73.

- Brunet R. 1957. «L'érosion accélérée dans le Terrefort toulousain». *Revue de Géomorphologie Dynamique*, n° 3-4, p. 33-40.
- Bruno J-F., FOX D. 2004. «L'érosion en rigoles dans les coteaux du Sud-Ouest». *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*. Paris : INRA, p. 13-26.
- Bryan R.B., Poesen J., 1989. - Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14 : 2 11-23 1.
- Catherine Cane 1985. Etude d'un modele pluie-debit type scs. (Soil Conservation Service) application au bassin versant de l'Aille (VAR) Bureau de Recherches Geologiques et Minieres Département Geologie Marine et Sedimentologie Dynamique Atelier Sedimentologie Dynamique
- Cavaillé A. 1965. Notice explicative de la carte géologique de Villefranche-de-Lauragais (XXI-44). Paris : Ministère de l'Industrie, Service de la carte géologique en France, 8 p.
- Chang C.W. 2009: Application of SCS CN Method in HEC-HMS in ShihMen Watershed - Simulation of RainfallRunoff Hydrologic Model. *Electronic Theses, Treatises and Dissertations, Paper 3900*. 96p.
- Charruyer S. 1996. Érosion hydrique et pratiques culturales : le cas des coteaux du Sud-Ouest. Mémoire de fin d'études. Toulouse : INRA, 57 p. + annexes.
- Chaumont M. et Paquin C., 1971. Carte pluviométrique de l'Algérie, éch. 1/50 000. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord, Alger. 4 feuilles. 1 notice
- Chauvin et Danion 1963. Mesure du débit solide des cours d'eau par charriage au moyen de traceurs. Centre de Recherches et d'Essais de Chuto France
- Chebbani R., Djilli K., Roose E., 1999. Étude des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. Algérie. *Bulletin Réseau Erosion*. 19.85-95.
- Chih T. Y., Yang P. E., 2006. *Erosion and Sedimentation manual*, U.S. Department of the Interior, Denver, Colorado. p. 578.
- Christiansen, C., P. Andersen, S. Schwaerter et J.S. Laursen, 1989 Sammenhaenge mellem hydrografi og målt forureningsbelastning i kystnaere farvande. *Vand et Miljo*. 6: 181-183.
- Cote M., 1998a, Les régions bioclimatiques de l'Est algérien, *Rhumel*, n° 6, pp. 57-71.

- Courjault-Radé P, Le Caro P., Maire E., Schwal B. 2001. «Le Lauragais, une entité géologique et géographique». Couleur Lauragais, n° 30. [En ligne]
- Coutagne A., 1948, Contribution à l'étude de l'écoulement en Algérie, Annuaire hydrologique de l'Algérie 1947/48, DSCH SCEGGT, Alger, pp 3-55.
- Couvert et al 1999. Guide méthodologique de gestion du transport solide et des atterrissements SOGREAH. Les Etudes des Agences de l'Eau n°65
- Daubert, A. & Lebreton, J.C. 1967. Etude expérimentale et sur modèle mathématique de quelques aspects des processus d'érosion des lits alluvionnaires, en régime permanent et non permanent, Proc. 12ème Congrès de l'A.I.R.H., Vol 3
- Degoutte G., 2012. Cours d'hydraulique, dynamique et morphologie fluviale. Sciences et technologies Paris VI.
- Degoutte, G., 2006. Aide-mémoire d'hydraulique a surface libre, Edition ENGREF.
- Dekker Marcel, and Basel. 1996 Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation Menachem Agassi Soil Erosion Research Station Soil Conservation and Drainage. DMsion Ministry of Agriculture.
- Demmak A., 1982, Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie Septentrionale. Thèse de Docteur- Ingénieur. Université Paris 6. France. 323 P. + Cartes.
- Demmak A., 1982. Recherche d'une relation empirique entre les apports solides et les paramètres physico-climatiques des bassins. AISH. 144 :403-414.
- Denholm, K. A. And Scott, L. W (1993). Field Manual for Describing Soils in Ontario; 4th Edition (ISBN: 0889553408) ; Revised Edition. Hard Cover. Book Condit...)
- De Ploey, J., 1989. -Soil erosion map of Western Europe. Cartes et poster édités par Catena Verlag.
- DGACTA, 1995. Guide de conservation des eaux et du sol. Tunis : Ministère de l'Agriculture tunisienne, Direction de la Conservation des Eaux et des Sols, Projet PNUD/FAO, TUN/86/020.
- Dridi H., Khalla M. et Annab R. 2011. Modélisation de l'érosion dans le bassin de oued Reboa et son impact sur le barrage de Timgad- approche multicritères ; FIG Working Week 18-22 May 2011 in Marrakech, Morocco.
- Dubreuil, P. 1974. Initiation à l'analyse hydrologique, Paris, France.

- Duley F., Ackerman F., 1934. - Run-off and erosion from plots of different lengths. *Journal of Agricultural Research* 48 : 505-510.
- Einstein, H.A. 1950. The bed load function for sediment transportation in open channels. Washington, U.S. Department of Agriculture. 78 p. (Soil Conservation Service. Technical Bulletin 1026).
- El Garouani, Hao, Lawrence, Tribak et Abharour 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG Idrisi Au Nord-Est du Maroc. *Revue Télédétection*; Vol. 8, N° 3, P. 193-201
- Engelund, F. & Fredsoe, J. 1976. A sediment transport model for straight alluvial channels, *Nordic Hydrol.* 7, 293-306
- Engelund, F. & Hansen, E. 1967. A Monograph on sediment transport in alluvial channel streams, Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark
- Eric Roose 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique de la FAO* 70
- Exner, F.M. 1925. Über die Wechsel Wirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen, *Sitzungsber. Akad. Wissenschaft*, pt. Ha, Bd. 134, Vienne, Autriche
- Foster, G. R. 1991. Advances in wind and water erosion prediction. *J. Soil Water Conserv.* 46: 27-29.
- Foster, G. R., and Lane, L. J. 1987. User requirements: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report No. 1, National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-ARS, W. Lafayette, IN.
- Foster, G. R., Lane, L. J., Nowlin, J. D., Laflen, J. M., and Young, R. A. 1981. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. *Trans. ASAE.* 24: 1253-1262.
- Foster, G. R., McCool, D. K., Renard, K. G., and Moldcrnhauer, W. G. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *J. Soil. Water Conserv.* 3fr 355-359.
- Foster, G.R., and Meyer, L.D. 1975. Mathematical simulation of upland erosion using fundamental erosion mechanics. In *Present and Predictive Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, Report No. ARS-S-40, U.S. Dept. of Agric, Agric. Res. Serv., Washington, DC, pp.177-189.

- Foster, G. R., and WISCHMBIW, W. H., 1974; Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 12,305-309.
- Hydraulics of Sediment Transport by W. H. Graf (1971, Hardcover)
- Fournier, F. 1960. Climat et Erosion. Presses Universitaires de France, Paris. Gregory, S. M. (1982).
- Fournier, F., 1960 : Climat et érosion, P.U.F. France 198 P. F.A.O. (1979) : Conservation des sols, N04.Italie.104 P.
- Fox D.M., Bryan R.B. 1999. «The Relationship of Soil Loss to Slope Angle for Interrill Erosion». Catena, 38, p. 211-222.
- Fox D.M., LE Bissonnais Y. 1998. «A process-based analysis of the influence of aggregate stability on surface crusting, infiltration, and interrill erosion». Soil Sci. Soc. Am. J., 62, p. 717-724.
- Gausse H., 1948."Carte des précipitations de l'Algérie (moyenne 1913-47), échelle 1/500 000" (4 feuilles). I.G.N., Paris,
- Gautier, M. 1948. Hydrologie Algérienne, Recueil des observations de 1924 à 1946.
- Gibson, S.A.1, Pak, J.H.2, and Fleming, M.J.3 2011. Modeling watershed and riverine sediment processes with HEC-HMS and HEC-RAS;; Watershed Management 2010 © ASCE
- Gravier, J., Larue, J.P., Verague, J., 1989. Erosion des sols et catastrophes naturelles : le cas du bassin du Dué dans l'est du département de la Sarthe. Rapport G.E.D.E.C. pour le Ministère de l'environnement, 45 p.
- Graf W.H. (1971; 1984): Hydraulics of Sediment Transport McGraw-Hill, New York; Water Res. Publ., Littleton, CO, USA. 513 pages
- Graf W., 2000. Hydraulique Fluviale. Presse Polytechnique Romande.
- Graf, W.H. & L. Suszka, 1985. Unsteady flow and its effect on sédiment transport, Proc. 21ème Congrès de l'A.I.R.H, Melbourne, Australie, 19-23 août 1985, 539-544
- Graf, W.H. & M.S. Altinakar, 1996. Hydraulique fluviale tome 2 : Ecoulement non permanent et phénomènes de transport. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 378 pp.
- Graf W.H. and Altinakar M.S.; 2009, FRESH SURFACE WATER – Vol. II - *Transport of Sediments* – Edited by James C.I. Dooge; EOLSS Publishers/UNESCO.

- Gregory, S. M. 1982. Soil cover prediction with various amounts and types of crop residue. *Trans. ASAE*. 25: 1333-1337.
- Goodwin P. 1986. *Sédiment Transport in Unsteady Flows*, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, California, U.S.A
- Gourfi Abdelali 2014. Application des modelés USLE et heusch pour l'estimation de la perte en sol et l'envasement du barrage du bassin versant de l'Assif El Mal (TENSIFT ALHAOUZ). - Mémoire de projet de fin d'étude. Université Kadi Ayyad Marrakech Maroc
- Guidoum Azeddine 2004. Etude hydrologique du bassin versant de oued Chemorah à la station de Chemorah W. de Batna, Est Algérien. Mémoire de magister ; Université de Batna.
- Haddad Ali, Remini Boualem, Remaoun Mohamed; 2014. Numerical modelling of solid transport caused 5 by an extreme flood: Case of the Hamiz dam failure (Algeria); *JKSUES* 150 No. of Pages 16 14 August 2014 King Saud University Journal of King Saud University – Engineering Sciences.
- Haghiabiand A.H., Zaredehdasht E. 2012. Evaluation of HEC-RAS ability in erosion and sediment transport forecasting. *World Applied Sciences Journal*. Vol. 17. Iss. 11 p. 1490–1497.
- Haoues, C. 2008. Evaluation par analyse multicritères du risque d'érosion dans la vallée de l'Oued Labiod (Approche systémique), thèse de magister, faculté des sciences, département des sciences de la terre, université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie.
- Henine Hocine 2005. Interfaçage entre un modèle hydrologique /modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG; Mémoire de magister en hydraulique; Ecole Nationale Polytechnique Alger.
- Hénin S. et Gobillot T. 1950. L'érosion en France. *C.R. Acad. Sci. Paris*.
- Heusch B. & millies-lacrois A. 1971. Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin : application au Maghreb. *Mines et géologie* 33, pp: 21-39
- Hjulström, F., 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. *Bulletin of the Geological Institute, University of Uppsala*, 25 ; p. 221-527.
- Horton(R.), 1945. - Erosion al development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.* 56 : 275-370.

- Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, March 2000. Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System HEC-HMS, Applications Guide, December 2002.
- Jayshree Talreja; Dr. S. M. Yadav ; Sahita Waikhom April 2013: Estimating the Sediment Transport Capacity Using HEC-RAS; Volume : 2; Issue : 4; ISSN No 2277 - 8160; GRA - GLOBAL RESEARCH ANALYSIS X 94
- Jean-Louis Ballais 1982. Les critères de reconnaissance des phases arides quaternaires du Maghreb : l'exemple des Aurès (Algérie) (Arid quaternary phases in the Aurès, Algérie). Bulletin de l'Association de géographes français Volume 59 Numéro 483 pp. 45-47
- Jensen, 2000 Jensen, J. R. 2000. Remote sensing of the environment: An earth resource perspective. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Jetten V., De Roo A., Favis-Mortlock D. 1999. «Evaluation of field-scale and catchment soil erosion models». Catena, 37, p. 521-541.
- Kadik B., 1987. Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) En Algérie : Ecologie, dendrométrie, morphologie. Ed. OPU. Alger., 581 p.
- Kanwar, 1982. Bulletin of the international society of soil science de l'association internationale de la science du sol ; Wageningen. Netherlands.
- Kassoul M, Abdelgader A, Belorgey M, 1997. Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. Revue scientifique de l'eau 10(3):339-358
- Kilinc M., Richardson E., 1973. - Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. Hydrology papers Colorado State University, 63, 54 p
- King D. LE Bissonnais Y.; 1992. Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du Nord de l'Europe. C. R. acad. Agric. Fr., 78(6):91-105.
- Kinnell. P. I. A. 2001 ; Earth Surface Processes and Landforms.
- Klein E., 1997. Les processus de l'érosion hydrique dans les coteaux du Sud-Ouest. Mémoire de fin d'études. Toulouse : ENSA-INRA, 50 p. + annexes.
- Ko, Y. 1990. Simulation of dam break wave along erodible channels, Proc. Int. Conf. on river flood hydraulics 17-20 septembre 1990, 239-256
- Laborde J.P. 2007. Éléments d'hydrologie de surface. Éditions de l'École polytechnique de l'université de Nice -Sophia Antipolis. 207p.

- Laborde, J.P. 2003. Etude de synthèse sur les ressources en eaux de surface de l'Algérie du Nord. "Service Etude" de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Alger (ANRH).
- 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 1/200000^e.
- Laflen, J. M., Lane, L. J., and Foster, G. R. 1991. WEPP—A new generation of erosion prediction technology. *J. Soil Water Conserv.* 46: 34-38.
- Laflen, J. M., Foster, G. R., and Onstad, C. A. 1985. Simulation of individual storm soil loss for modeling impact of soil erosion on crop productivity. In *Soil Erosion and Conservation* (S.A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer, and A. Lo, eds.), Soil Cons. Soc. Am., Ankcny, IA, pp. 285-295.
- Lagrée 2016. Equations de Saint Venant et application aux mouvements de fonds erodables. *Ecoulements en milieux naturels* Cours MSF12, M1 UPMC; P.-Y. CNRS & UPMC Univ Paris 06, UMR 7190, Institut Jean Le Rond.
- Lahlou A. 1994. Envasement des barrages au Maroc. Casablanca (Maroc) ; Editions Wallada, 277p.
- Laursen, E. M. 1958. "Total sediment load of streams," *Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Vol. 84, No. HY 1, pp. 1530:1- 1530:36.
- LE Bissonnais, Y., Benkhadra, H., Gallien, E., Eimbeck, M., Fox, D., Martin, P., Douyer, C., Ligneau, L., Ouvry, J.F., 1996. Genèse de ruissellement et de l'érosion diffuse des sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m² au bassin-versant élémentaire agricole. *Géomorphologie*, 3, p. 51-64.
- Lebreton, J-C. 1974. *Dynamique fluviale*, Eyrolles, Paris
- Lebrun P. 2000. Évaluation technico-économique des mesures anti-érosives installées sur un versant du Lauragais. Rapport de stage. Toulouse: INRA-SAD, 25 p. + annexes.
- Little and Mayer. 1972. "The role of sediment gradation on channel armoring," Publication ERC-0672, Georgia Institute of Technology: School of Engineering, 105p.
- Loup (J) 1974 : *Eaux terrestres : hydrologie continentale*. Paris.
- Mahdi Motallebian, Farzad Hassanpour ; 2013. A study of the locus of the erosion and sedimentation in Sistan River using HEC-RAS model. *International Journal of*

Manser Amor ; Erosion et envasement des barrages-réservoirs ; ANBT Algerie

Markowska J., Markowski J., Drabiński A. 2012. Application of HEC-RAS model for estimating changes in water course geometry during floods. *Studia Geotechnica et Mechanica*. Vol. 34. No. 2 p. 63–72.

Mccool D., Brown L., Foster G., Mutchler C., Meyer L. 1987. «Revised slope stepness factor for the Universal Soli Loss Equation». *Trans. Am. Soc. Ag. Eng.*, 30, p. 1387-1396.

Mcissac G., Mitchell J., Hirschi M. 1987. «Slope stepness effects on soil loss from distributed lands». *Trans. Am. Soc. Ag. Eng.*, 30, p. 1005-1013.

Mebarki, A. 2002."Apports des cours d'eau et bilans hydrologiques des bassins de l'Est algérien", *Bulletin des Sciences Géographiques*, Alger, I.N.C.T. , n°10, pp. 45-54.

Meddi M. 1992. -Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie). *Doct. Thèse. Uniq., Université Louis Pasteur - Strasbourg*, 285 p.

Meddi M, Khaldi A, Meddi H, 1998. Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord. Paper presented at the Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes, Vienna,

Meddi M. 2015. Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du Nord ; *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°24, Décembre 2015, pp. 315-336

Meddi M et Toumi S ; 2016. Application of the L-moments approach to the analysis of regional flood frequency in Northern Algeria. *Int. J. Hydrology Science and Technology*, Vol. X, No. Y, xxxx

Meunier, M. 1991. *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Montagne 1, Coll. Etudes, Cemagref, Antony, France, 278 pp.

Meyer, L.D. 1984. Evolution of the universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv* 39: 99-104.

Meyer, L.D. 1965. Mathematical relationships governing soil erosion by water. *Journal of Soil and Water Conservation* 20: 149-50.

Meyer-Peter, B. and Muller, T. 1948. "Formulas for bed load transport," Report on Second Meeting of International Association for Hydraulics Research, Stockholm Sweden, pp. 39-64.

- Michael C. Slattery, Timothy P. Burt. 1997. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow; *Earth Surface Processes and Landforms*; Volume 22. Model. A Watershed Analysis Tool. United States Department of Agriculture, Conservation Research Report 35.
- Moore. I. D. Y Burch G. J. 1986. Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *Trans ASAE*, 29 1624-1630, 1640.
- Moradinejad A., Haghahi A.H., Torabi H., Jabari A. 2014. Qara-Chai River sediment survey of the Markazi province numerical model HEC-RAS.4. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*. Vol. 8. Iss. 10 p. 1628–1636.
- Motallebian M., Hassanpour F. 2013. A study of the locus of the erosion and sedimentation in Sistan River using HEC-RAS model. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. Vol. 4. Iss. 10 p. 1377–1386.
- Motevalli S., Hosseinzadeh M., Esmaili R., Derafshi K. et Gharehchahi S. 2012: Assessing the Effects of Land use Change on Hydrologic Balance of Kan Watershed using SCS and HEC-HMS Hydrological Models – Tehran, IRAN. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(8): 510-519, 2012. ISSN 1991-8178.
- Musgrave. G. W. 1947. The quantitative evaluation of factors in water erosion, a first approximation. *Journal Sol and Water conservation*. 2(3), 133-138.
- Musy A. et Higy C. 1998. *Hydrologie appliquée*, Edition *H*G*A*, Bucarest,. ISBN: 973-98530-8-0. 369p.
- Najim, M.M.M., Babel, M.S., Loof, R., 2006. AGNPS model assessment for a mixed forested watershed in Thailand. *Science Asia* 32, 53^e 61.
- Ouazar, D. 2001 : *Modélisation des problèmes d'hydrologie et d'hydraulique*, Notes de cours, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat.
- Parker, G., P. C. Klingeman, and D. G. McLean (1982), Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 108(HY4).
- Pierce F.J. et W.W. Frye; 1998. *Advances in Soil and Water Conservation* ISBN 1-57504-083-2 Copyright Sleeping Bear Press, Inc.
- Phillips, B.C. & A.J. Sutherland 1985. Numerical modelling of spatial and temporal lag effects in bed load sédiment transport, 21ème Congrès de l'A.I.R.H., Melbourne, Australie, 19-23 août, 572-576

- Poesen (J.), 1984. - The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Zeit. Geom. Suppl. Bd. 49*: 117-131.
- Poesen(J.), 1987. - The role of slope angle in surface seal formation. In : V. Gardiner (editor), *International Geomorphology II* : 437-448.
- Poesen J.W.A., R.B. Bryan. Influence de la longueur de pente sur le ruissellement : rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation Fond national de la Recherche scientifique, Laboratoire de Géomorphologie expérimentale.
- Probst, J.L., and Amiotte Suchet, P. 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrol. Sci. Journal 37*, 621–637.
- Rahuel, J.L., F.M. Holly, J.P. Chollet, P.J. Belleudy et G. Yang 1989. Modeling of riverbed evolution for bedload sediment mixtures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(11), 1521, 1542 et discussion par G. Di Silvio et A. Armanini (1991), 117(7), 949-951
- Ramez, P. 1995. Erosion et transport solide en rivière, Tome 1 : Guide pour la compréhension des phénomènes, GMA 8, Coll. Etudes, Cemagref, Antony, France, 130pp.
- Ree, W.O. 1949. Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways. *Agr. Eng. Vol. 30*: 184--187, 189.
- Remini B., 1999. Les conséquences de l'envasement des barrages : quelques exemples Algériens. *Revue Techniques Sciences Méthodes. 4* :55-62.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder. 1996. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *USDA Agriculture Handbook #703*. Washington, D.C. 384 p.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., and Porter, J. P. 1991. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv. 46*: 30-33.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies G.A. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *USDA Agricultural Handbook No. 703*, 404 pp.
- Renard K.G., Freimund J.R. 1994. «Using monthly précipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE». *Journal of hydrology*, 157, p. 287 – 306.

- Renschler, C.S. and Harbor, J. 2002. Soil erosion assessment tools from point to regional scales — the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology* 47, 189—209.
- Roche Marcel 1963. *Hydrologie de surface* Gauthier-Villars ORSTOM, Paris.
- Roose, 1994. FAO. *Bulletin pédologique de la FAO* 70,
- Roose E. 1977. *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest: vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Bondy: ORSTOM, coll. «Travaux et documents», 108 p.
- Roose E. 1994. «Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)». *Bulletin pédologique de la FAO* 70. Première consultation: décembre 2001,
- Rose C., 1985. - *Developments in Soil Erosion and Deposition Models*. *Advances in Soil Science*, 2 : 1-63.
- Revel J.-C., Coste N., Cavalié J., Costes J.-L. 1989. «Premiers résultats expérimentaux sur l'entraînement mécanique des terres par le travail du sol dans le terrefort Toulousain (France)». *Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie*, vol. XXV, n° 1-2, p. 111-118.
- Revel J.-C., 1982. *Formation des sols sur marnes. Étude d'une chrono séquence et d'une topo séquence complexe dans le terrefort toulousain*. Toulouse: thèse INP, 249 p.
- Revel J.-C., Rouaud M. 1985. «Mécanismes et importance des remaniements dans le terrefort toulousain (Bassin Aquitain, France)». *Pédologie*, XXXV-2, p. 171-189.
- Sadiki Abdelhamid, Saïdati Bouhlassa, Jamal Auajjar, Ali Faleh & Jean-Jacques Macaire. *Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab*; *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, n°26, p. 69-79.
- SAGE INGENIERIE et LPEE (CEH), 2008 : *Élaboration des standards d'ADM en assainissement, Mission 1 : Préparation et recueil des données, Analyse critique & Methodologies*. Document interne. 80p.
- Sari A., 2002, *Initiation à l'hydrologie de surface*. Cours, Alger, Ed. Houma, 224 p.
- Sary. M., 1976 : *Géographie Physique d'une haute plaine steppique Algérienne : Le Hodna*. Thèse de doctorat 3emecycle, université de Louis Pasteur, France, 284 P.

- Schwab, G. O., R. K. Frevert, T. W. Edminster, and K. K. Barnes. 1966. p 209-211. In: Soil and water conservation engineering. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Seltzer P., 1946, "Le climat de l'Algérie. Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe", Carbonnel, 219 p., 2 cartes hors-texte.
- Shen, H.W. and Julien, P.Y. 1993. Erosion and Sediment Transport, in R. Maidment (ed.), Handbook of Hydrology, McGraw-Hill, New York.
- Shields, A. 1936. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, communication PVWES, Berlin, 26
- SICOVAL Toulouse Sud-Est, Chambre D'agriculture De La Haute-Garonne, 2000. Protection raisonnée du ruisseau du Tissié. Fonds de gestion de l'espace rural, 27 p + annexes.
- Smith, D. D., and Whilt, D. M. 1948. Evaluating soil losses from field areas. Agric. Eng. 29: 394-396.
- SOGREAH, 1983. Erosion et transport solide au Maghreb. Analyse bibliographique. Rap. Proj. RAB/80/011/PNUD.
- Soil Conservation Service. (SCS). 1978. Soil survey of Dixon County, NE. USDA-SCS.
10. Soil Conservation Service. (SCS). 1980. Soil survey of Lancaster County, NE. USDA-SCS.
- Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, United States Government Printing Office, Washington, D.C.
- Soutter, M., Mermoud, A. and Musy, A., 2007. Ingénierie des sols et des eaux, processus et aménagements. PPUR, Lausanne.
- Slattery, M.C., and Burt, T.P. 1997. "Particles Size Characteristics of Suspended Sediment in Hillslope Runoff and Stream Flow." Earth Surface. Processes Landforms, 22, 7
- Stanford, Research Hydraulic Engineer, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2006. Sediment Transport Computations With HEC-RAS; Stanford Gibson, Research Hydraulic Engineer, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA 95616,
- Tate, J.T., and R.C. Berger. 2006. ADH Sedi ment Module Testing. System-Wide Water Resources Program. ERDC-TN-SWWRP-06-6.

- Terfous A., Meghnooui A. et Bouanani A. 2003. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*. 14(2): 173 –185
- Thomas, W. A. 1994. "Sedimentation in Stream Networks, HEC-6T user's manual," Mobile Boundary Hydraulics Software, Inc., Clinton, MS.
- Tidjani Ahmed et Ali Khorsi et Ziani. Detection de la végétation à partir d'une image satellitaire ; MEMOIRE DE FIN D'ETUDES En vue de l'obtention du diplôme licence LMD En électronique Filière : Electronique Option : Licence (STR) UNIVERSITE AMAR THELIDJI LAGHOUAT ; Algérie
- Tixeront, J. 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. In IAHS Publications. 53: 26-42.
- Toffaleti, F. B. 1968. "Technical report No. 5. A procedure for computation of total river sand discharge and detailed distribution, bed to surface," Committee on Channel Stabilization, U.S. Army Corps of Engineers.
- Touabia B., Aidaoui A., Gomer Dieter & Achite M. 2001. Quantification et variabilité de l'écoulement solide en zone semi-aride, de l'Algérie du Nord. *Revue des sciences hydrologiques*, 46(1), pp: 41-53.
- Toumi Samir 2013. Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued MINA; thèse de doctorat ENSH Blida Algérie
- Touré Mamadou 2004. CES pour les ingénieurs de l'équipement rural et de l'agronomie. Site créé par : MR Touré Mamadou (Webmaster) avec la collaboration de Mr Karambiri Harouna.
- United States, Department of Agriculture 1986. United States, Department of Agriculture 1986: Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55(TR-55). (Second Edition). Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division. 160p.
- Unité hydrographique Aquin - Saint Luis du Sud 2010. Rapport de l'étude sur l'érosion des sols MUSLE.
- Univ. Nice, 2008. La dégradation des sols dans le monde ; Université Nice Sophia Antipolis site internet.
- USAID, 2013. Concepts de base de la modélisation hydrologique et hydraulique ; apports et principes d'utilisation des outils hec, Hec-Hms et Hec-Ras, plateforme d'intégration

WMS et outil ribasim Fascicule 2 : modélisation en hydrologie – Hec-Hms
programme compétitivité économique du Maroc 8, rue du rif; Souissi 10 000 Rabat
Maroc.

USAID, 2013. Concepts de base de la modélisation hydrologique et hydraulique ; apports et principes d'utilisation des outils hec, Hec-Hms et Hec-Ras, plateforme d'intégration WMS et outil ribasim Fascicule 5 : modélisation en hydraulique des écoulement à surface libre – Hec-Ras programme compétitivité économique du Maroc 8, rue du rif; Souissi 10 000 Rabat Maroc.

US Army Corps of Engineers (USACE), 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual version 3.5. Hydrologic Engineering Center. 138 p.

US Army Corps of Engineers (USACE), 2010. HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 4,1. US Army Corps of Engineers; Institute for Water Resources; Hydrologic Engineering Center; 609 Second Street; Davis, CA 95616 USA

US Army Corps of Engineers (USACE), 2013. Hydrologic Modeling System HEC-HMS Version 4,0. US Army Corps of Engineers; Institute for Water Resources; Hydrologic Engineering Center; 609 Second Street; Davis, CA 95616 USA

US. Army Corps of Engineers (USACE), 1993. "Scour and deposition in rivers and reservoirs: HEC-6 user's manual," Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

Vanoni, V.A., 1984. "Fifty Years of Sedimentation" Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 8 ASCE.

Vanoni V.A., 1977. Sedimentation engineering. ASCE, Hydraulic Division.

Vanoni. V. A. 1975. "Sedimentation engineering," ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54, 745 p.

Vanoni, V.A., 1946. "Transportation of Suspended Sediment by Water", Trans. A.S.C.E., Vol. III.

Van Rijn, L.C., 1984. "Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 10, ASCE.

Van Rijn L.C. 1984. Sédiment transport, part II: Suspended load transport, J. Hydraul. Eng., 110(11), 1613-1641

Wall, G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle et I.J. Shelton 2002. RUSLE-CAN ; Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada Manuel pour l'évaluation des

pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada; CRECO - Numéro de contribution 02-92, AAFC Numéro de contribution AAFC/AAC2244F.

Williams, J. R. 1975. Sediment – yield prediction with universal equation using runoff energy factor. Proceedings of the sediment- Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi.

Williams, J.R., Jones, C.A. y Dyke, P.T. 1984. A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng. 27: 129144.

Williams, J.R., Nicks, A.D. y Arnold, J.G. 1988. SWRRB, a simulator for water resources in rural basins. 1. Hydraulic Eng. 111: 970-986.

Williams, J.R. y Renard, K.G. 1985. Assessments of soil erosion and crop productivity with process models. pp. 67-103. In R.F. Follett and B.A. Stewart, eds. Soil Erosion and Crop Productivity. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Wischmeier, W.H. 1975. Estimating the soil loss equations cover and a management factor for undisturbed lands. In Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, ARS-S-40, Agr. Res. Serv., U.S. Dept. of Agr., Washington, DC, pp. 118-125.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses--A guide to conservation planning: Agricultural Handbook no. 537, Sci. and Educ. Admin., U.S. Dept. Agr., Washington, D.C.

Wischmeier, W. H. 1975. Estimating the soil loss equations cover and management factor for undisturbed lands. In Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, ARS-S-40, Agr. Res. Serv., U.S. Dept. of Agr., Washington, DC, pp. 118-125.

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. Agriculture Handbook 537. United States Department of Agriculture. Science and Education Administration. 58 pp.

Woodruff, N.P. y Siddoway, F.H. 1965. A wind erosion equation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29: (S): 602-608.

Yalin, M.S., 1963. "An Expression for Bed Load Transportation", ASCE 89, HY3.

Yalin, M.S. 1977. Mechanics of Sediment Transport, 2eme Ed., Pergamon Press, New York U.S.A.

- Yalin, Y. S. 1963. An expression for bed-load transportation. J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civil. Eng. 89: 221-250.
- Yang, C.T., 1973. "Incipient Motion and Sediment Transport", Proc. ASCE 99, HY10, 1679-1704.
- Yang, C.T., 1996. "Sediment Transport: Theory and Practice", MC Graw-Hill, New York
- Yang, C.T., 1972. "Unit Stream Power and Sediment Transport", Proc. ASCE, 98, HY10, 1805-26.
- Young, R. A., and Wiersma, J. L. 1973. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. Water Resour. Res. 9: 1629-1636.
- Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., and Anderson, W. P. 1987. AGNPS, Agricultural non-point-source pollution model: watershed analysis tool. Conservation Research Report No. 35, USDA-ARS, Washington, DC.
- Zaher Hafida 2010. Conservation des sols et de l'eau. Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs Département Sol Eau Biodiversité, Tabriquet, Salé, MAROC
- Zingg, A. W. 1940. Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Runoff. Agric. Eng., 21(2), 59-64.

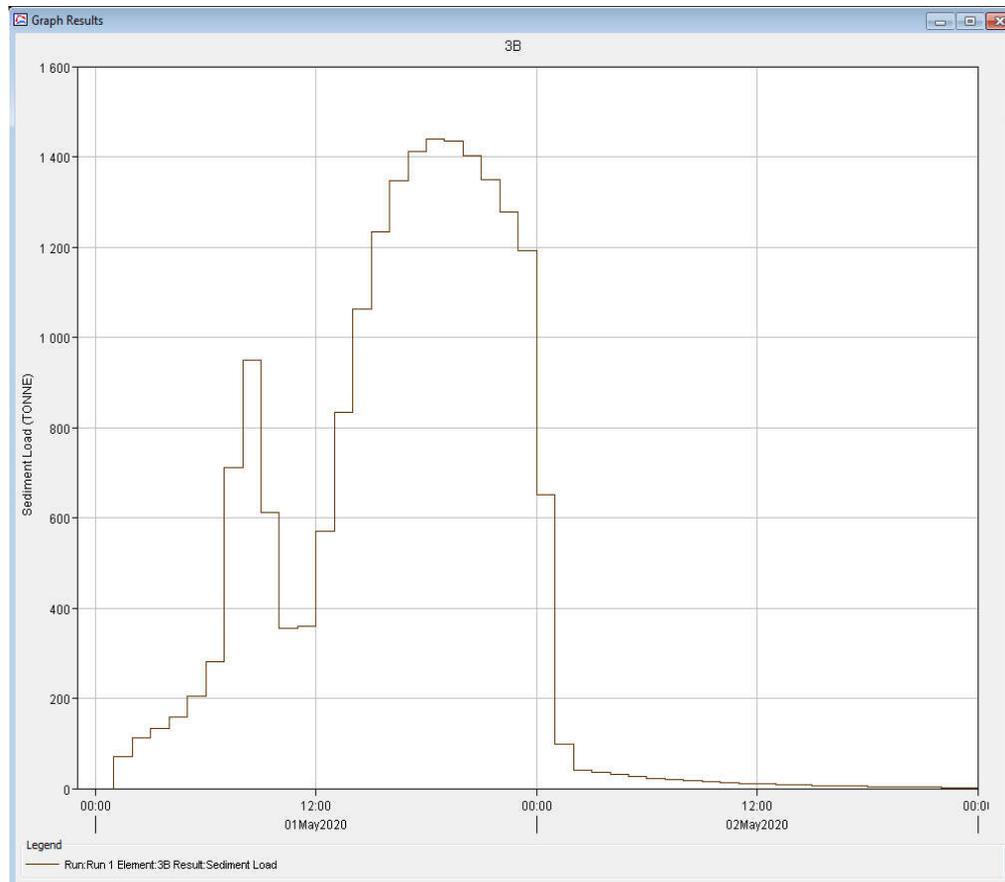
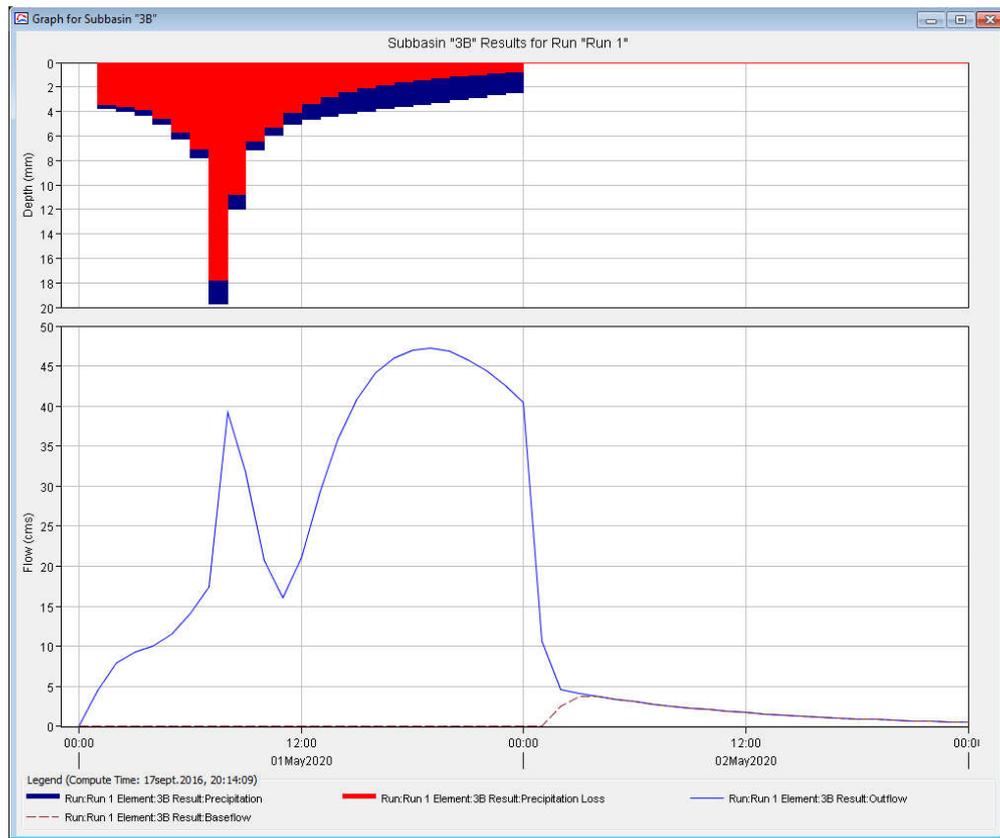
Annexes

A- Cas du Bassin Oued Labiod: Crue centennale

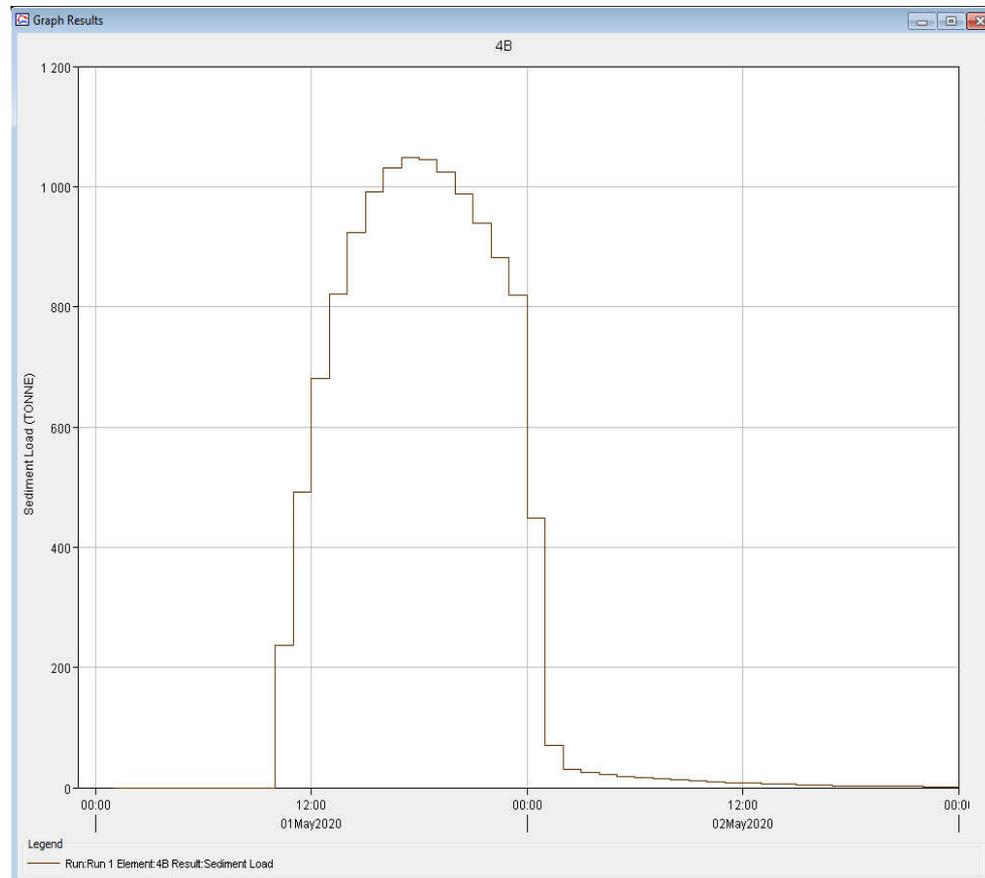
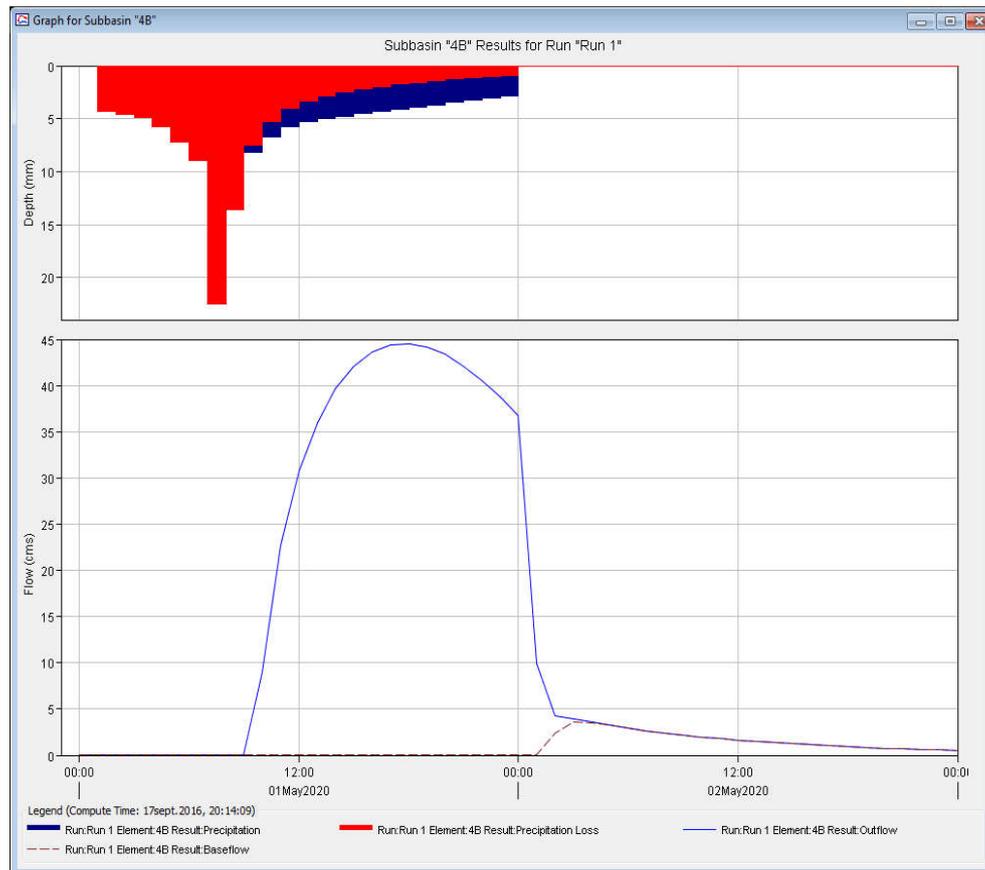
Apports liquides par sous bassins

Élément hydrologique	Surface drainante (km ²)	Débit (m ³ /s)	Temps	Volume (mm)	Volume (10 ³ m3)
3B	85.6	47.2	01mai2020. 04:00	32.37	2769.7
17C	85.6	47.2	01mai2020. 04:00	32.37	2769.7
17R	85.6	47.2	01mai2020. 04:00	32.39	2771.8
4B	67.5	44.5	01mai2020. 18:00	32.53	2196.6
2B	65.6	6.1	01mai2020. 23:00	1.34	87.8
16C	65.6	6.1	01mai2020. 23:00	1.34	87.8
16R	65.6	5.6	02mai2020. 00:00	1.30	85.4
18C	218.7	91.5	01mai2020. 04:00	23.11	5053.8
18R	218.7	91.5	01mai2020. 04:00	22.97	5023.9
5B	206.1	105.7	01mai2020. 19:00	29.88	6157.9
19C	424.8	197.0	01mai2020. 04:00	26.32	11181.8
19R	424.8	196.8	01mai2020. 05:00	26.28	11163.3
7B	219.8	72.1	01mai2020. 20:00	16.25	3572.8
20C	219.8	72.1	01mai2020. 20:00	16.25	3572.8
20R	219.8	72.1	01mai2020. 20:00	16.26	3573.7
6B	39.6	32.6	01mai2020. 10:00	45.76	1812.4
21C	684.2	295.8	01mai2020. 05:00	24.19	16549.4
21R	684.2	295.0	01mai2020. 05:00	24.09	16484.5
9B	123.3	44.3	01mai2020. 18:00	17.58	2166.9
8B	68.4	14.0	01mai2020. 19:00	8.23	562.4
22C	68.4	14.0	01mai2020. 19:00	8.23	562.4
22R	68.4	14.0	01mai2020. 19:00	8.23	562.8
23C	875.9	352.7	01mai2020. 21:00	21.94	19214.3
23R	875.9	352.3	01mai2020. 22:00	21.51	18838.4
10B	175.1	44.1	01mai2020. 19:00	9.80	1716.9
15C	1051.0	396.4	01mai2020. 22:00	19.56	20555.3
15R	1051.0	396.1	01mai2020. 22:00	19.53	20527.7
11B	198.4	45.3	01mai2020. 21:00	7.76	1539.4
24C	198.4	45.3	01mai2020. 21:00	7.76	1539.4
24R	198.4	45.3	01mai2020. 21:00	7.77	1540.7
12B	14.9	17.2	01mai2020. 19:00	46.44	691.0
25C	1264.3	448.6	01mai2020. 22:00	18.00	22759.5
25R	1264.3	448.2	01mai2020. 23:00	17.78	22483.7
13B	52.7	51.2	01mai2020. 19:00	43.37	2286.7
26C	1317.0	473.4	01mai2020. 23:00	18.81	24770.4

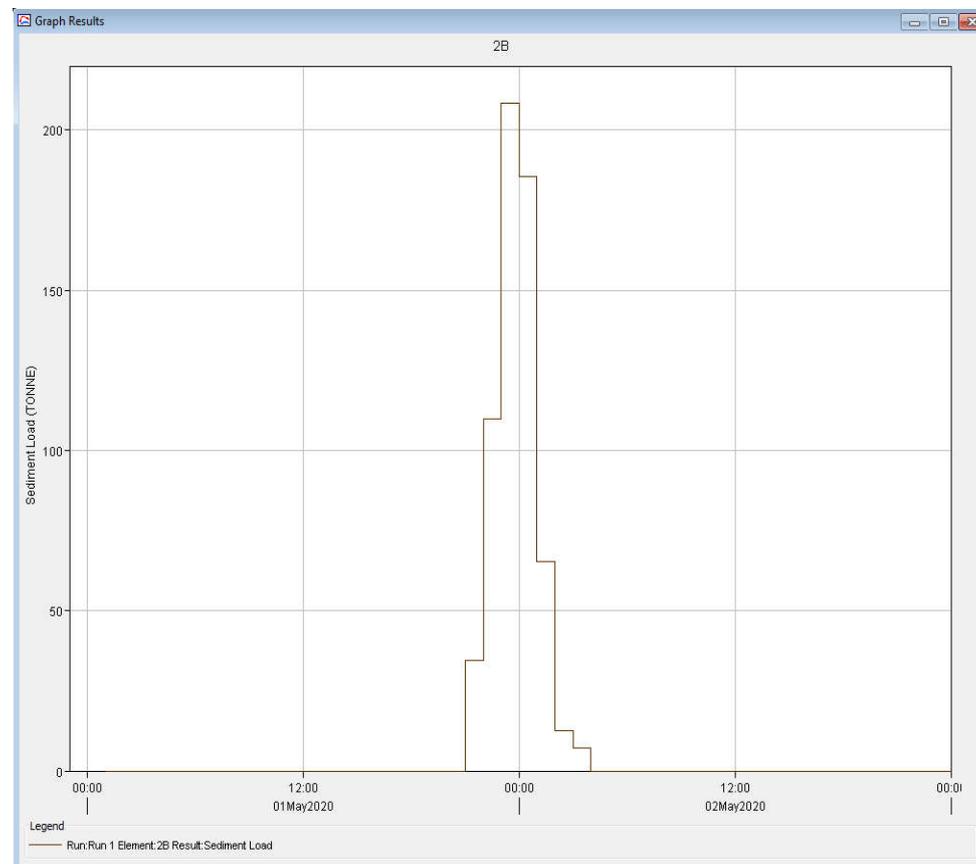
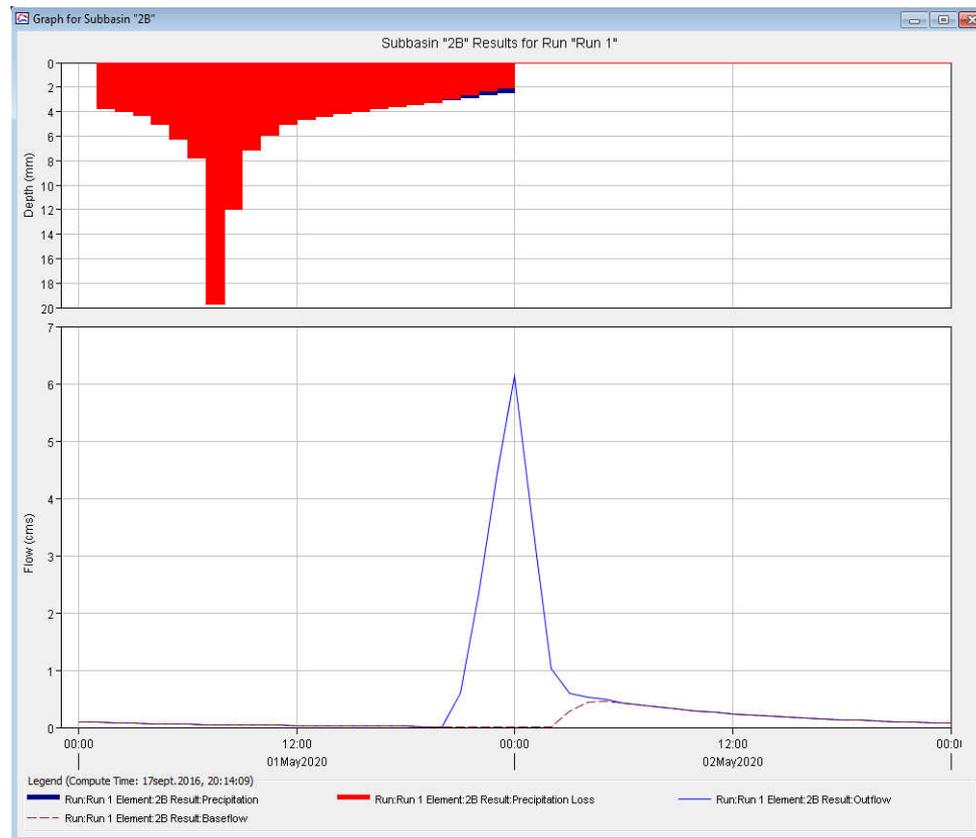
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 3:



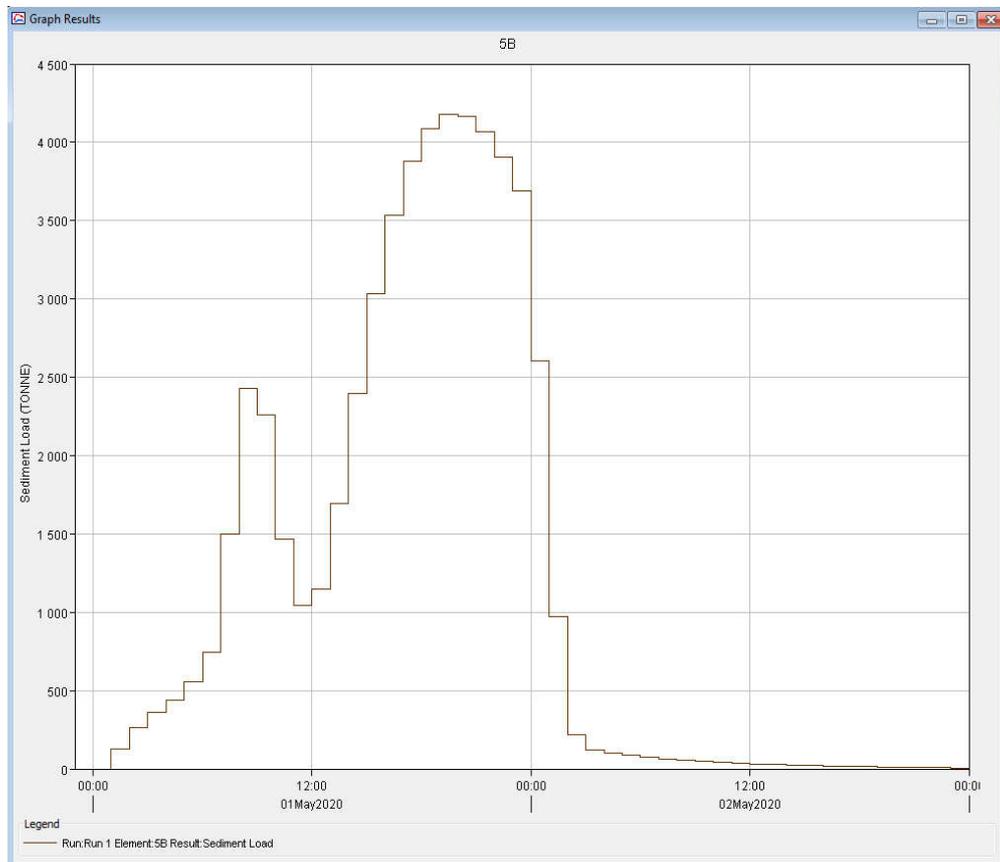
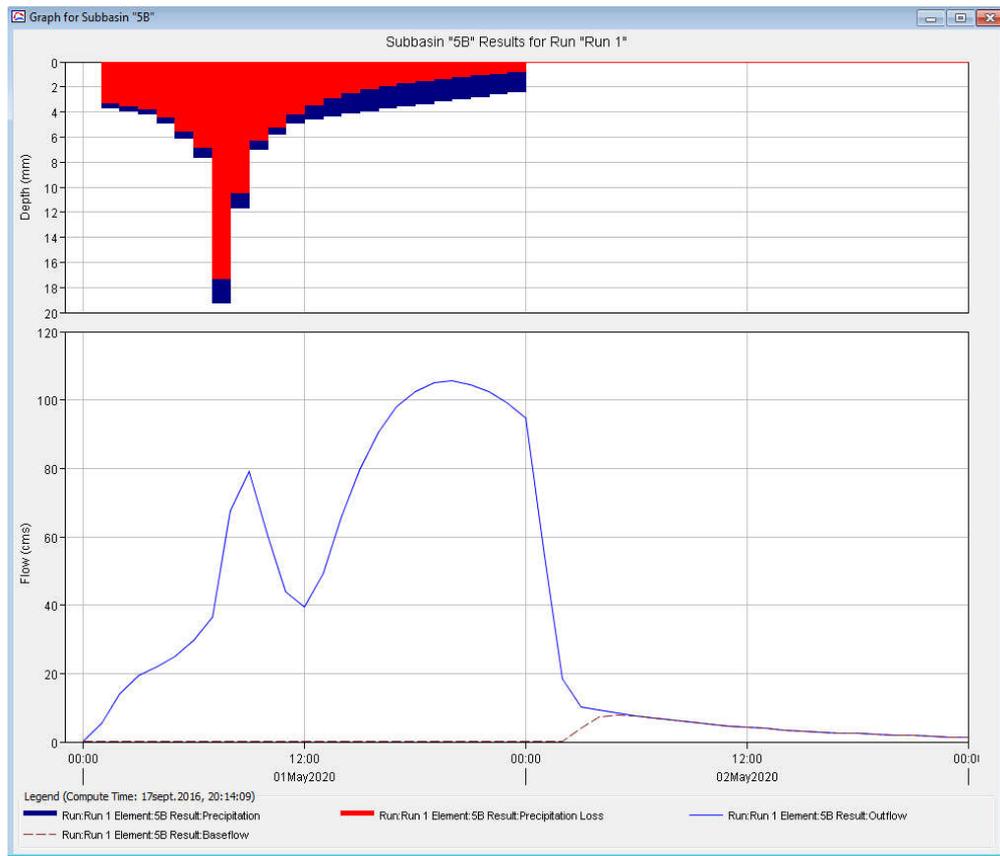
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 4:



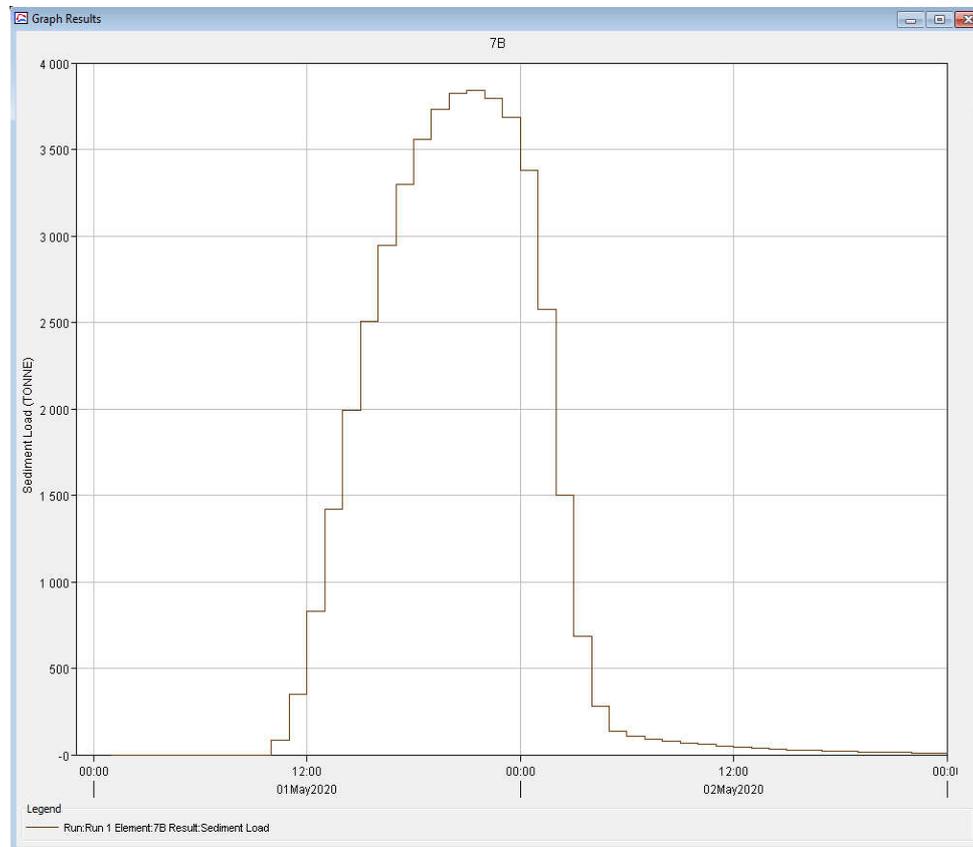
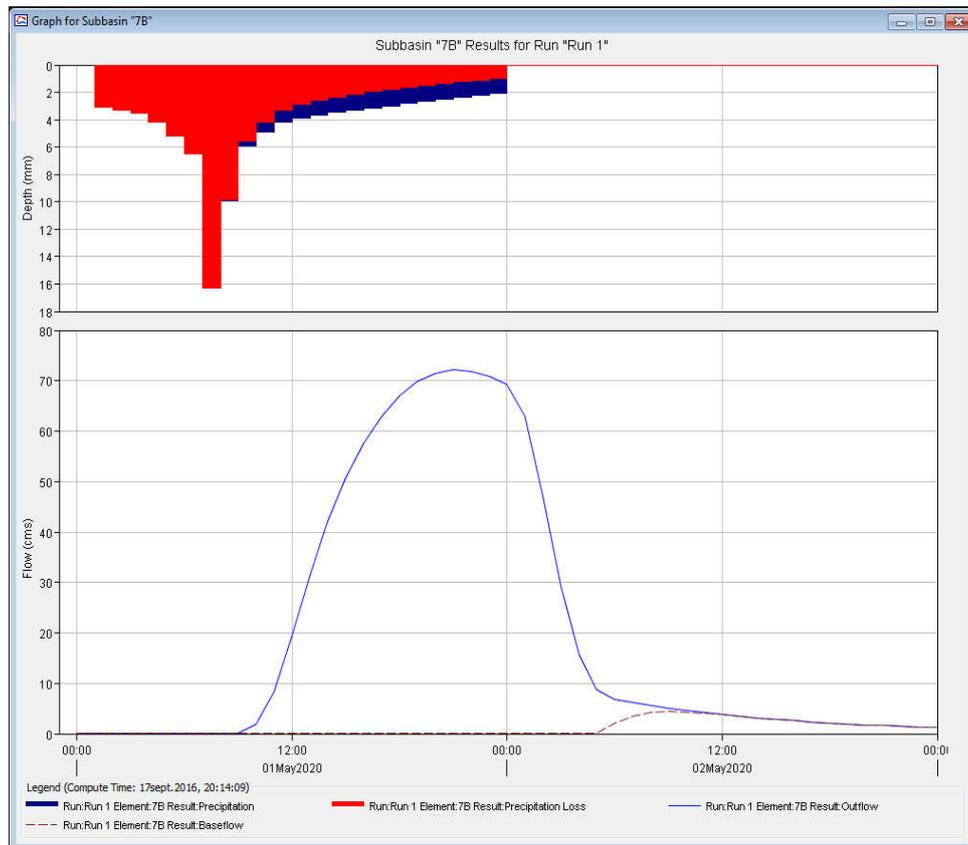
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 2:



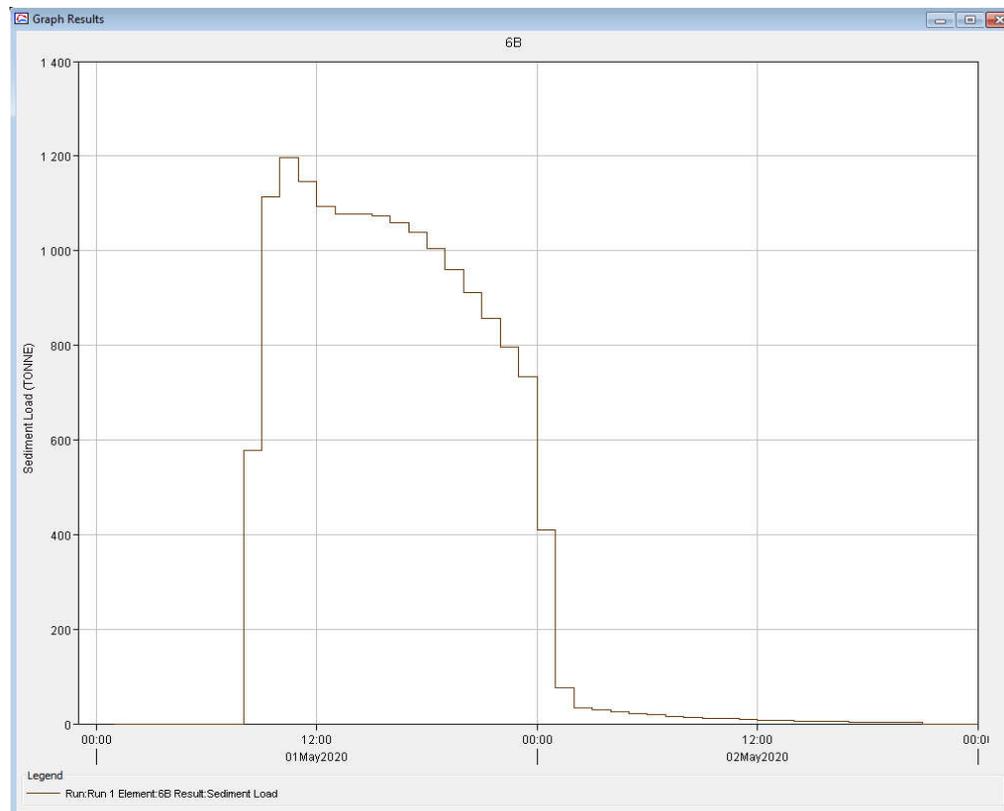
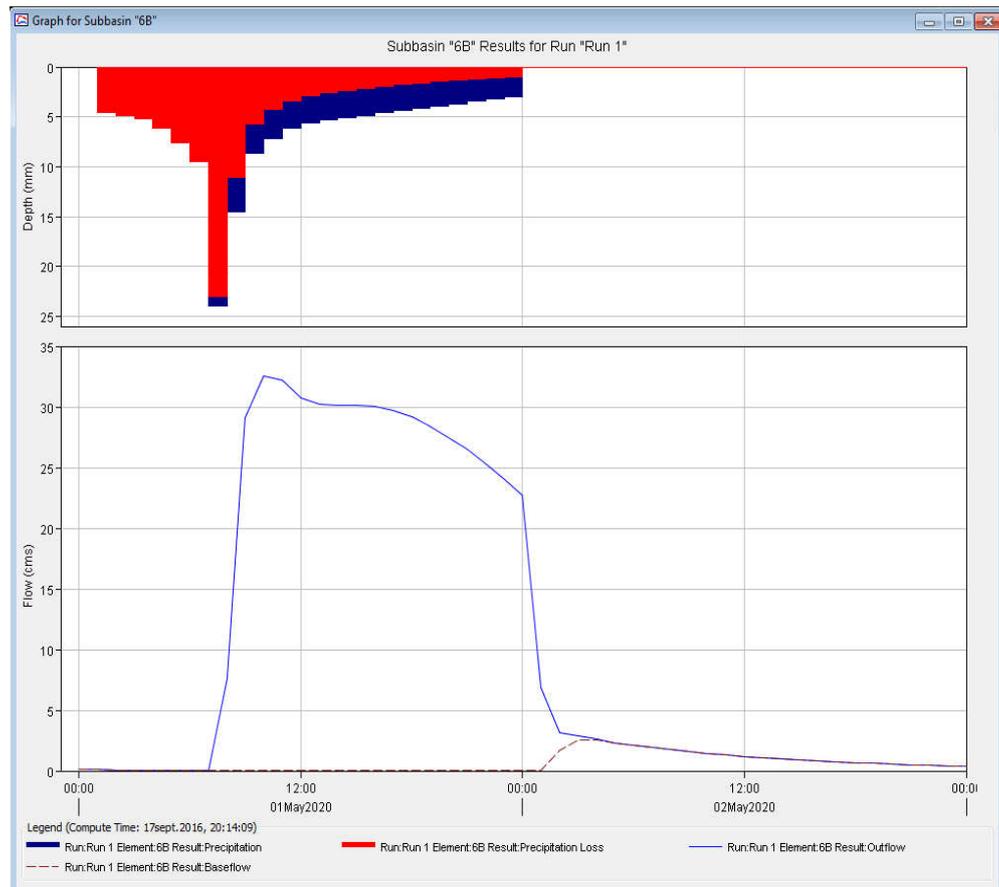
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 5:



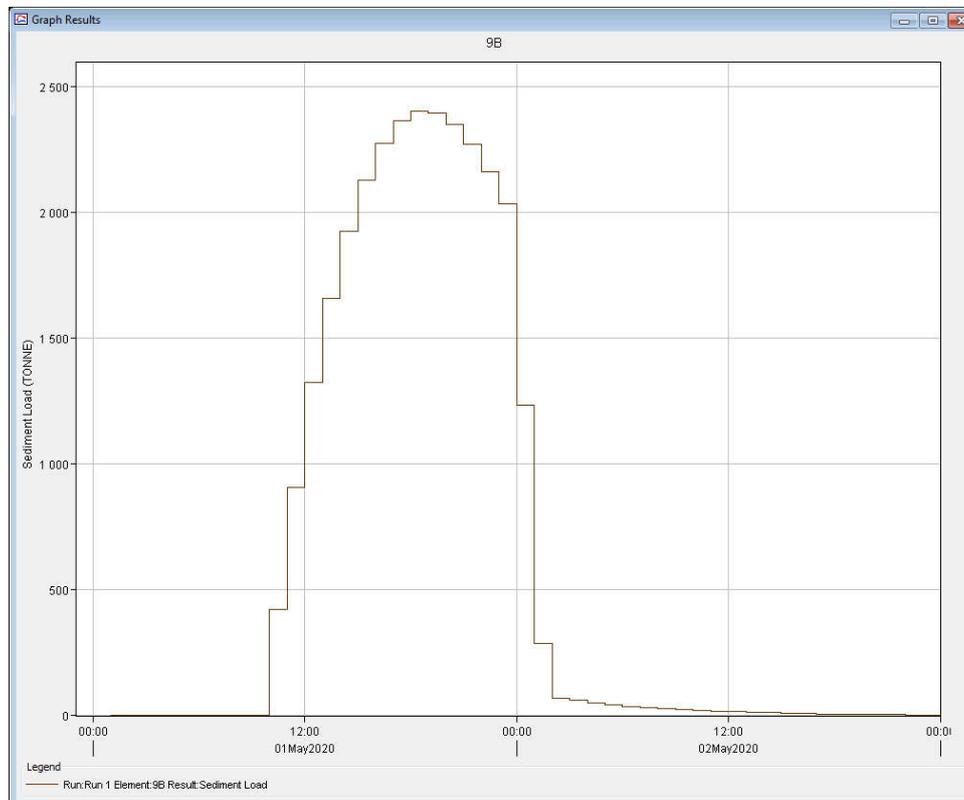
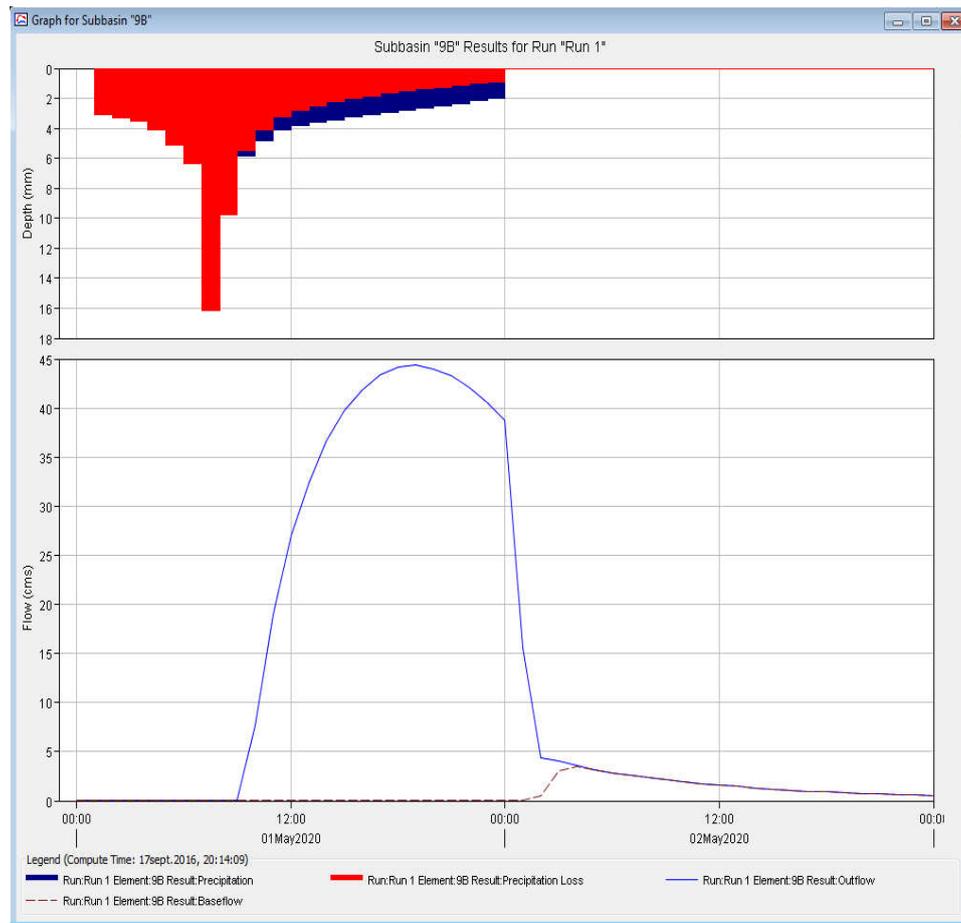
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 7:



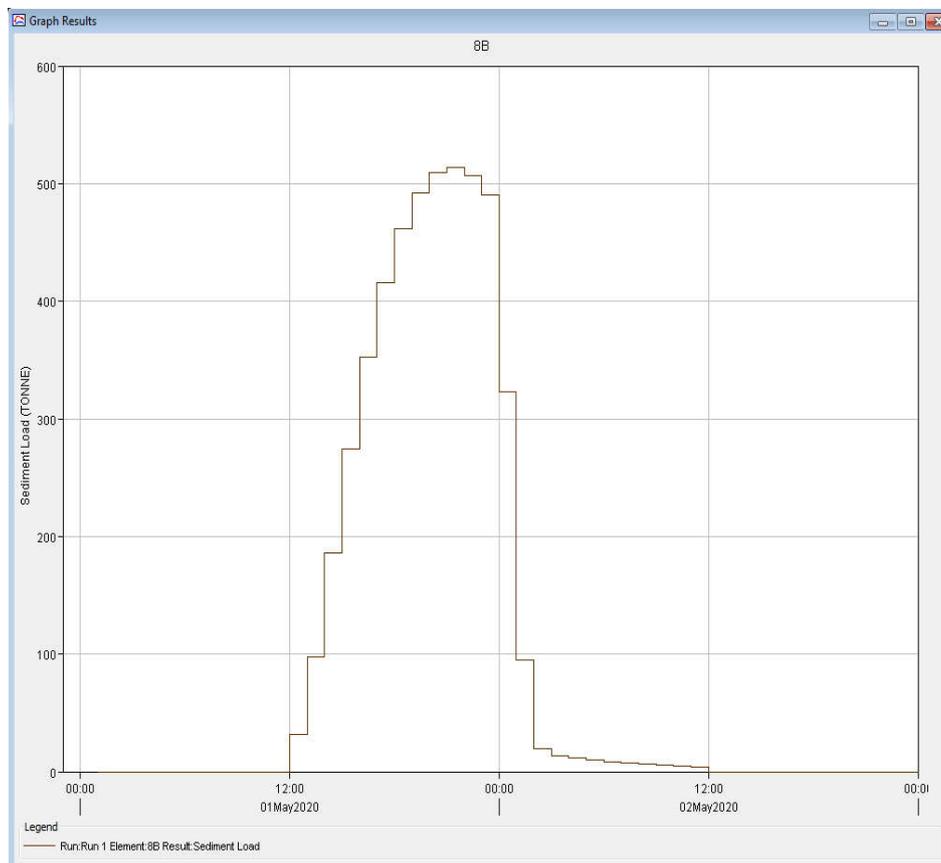
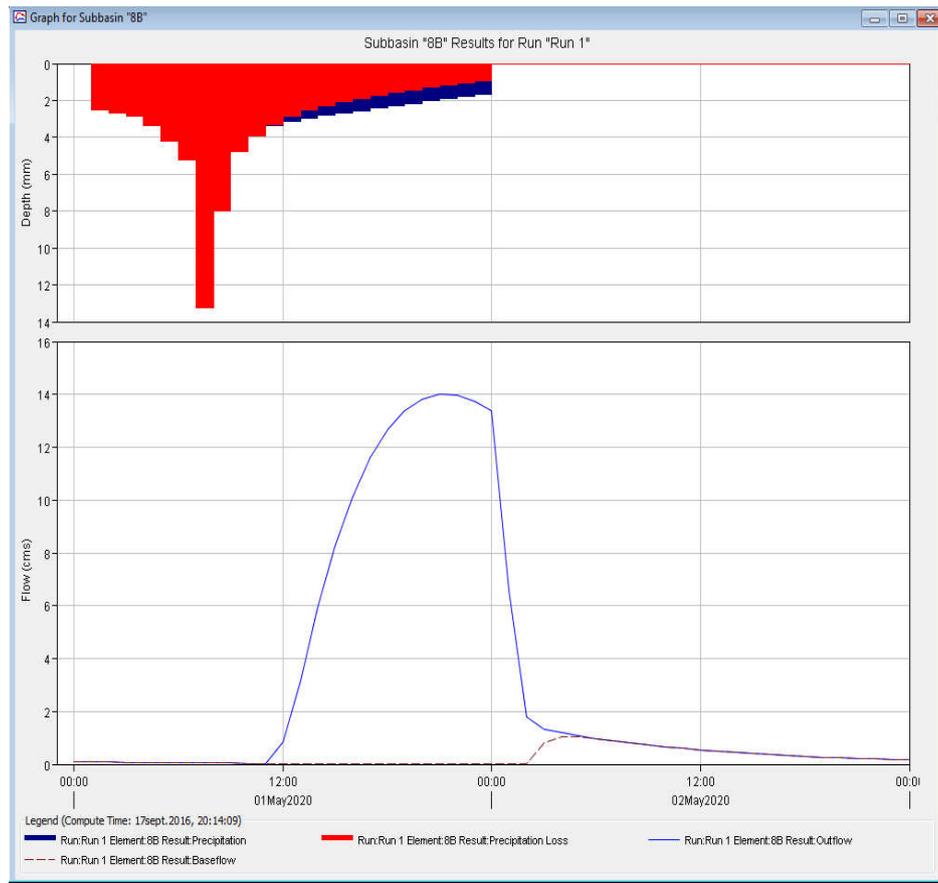
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 6:



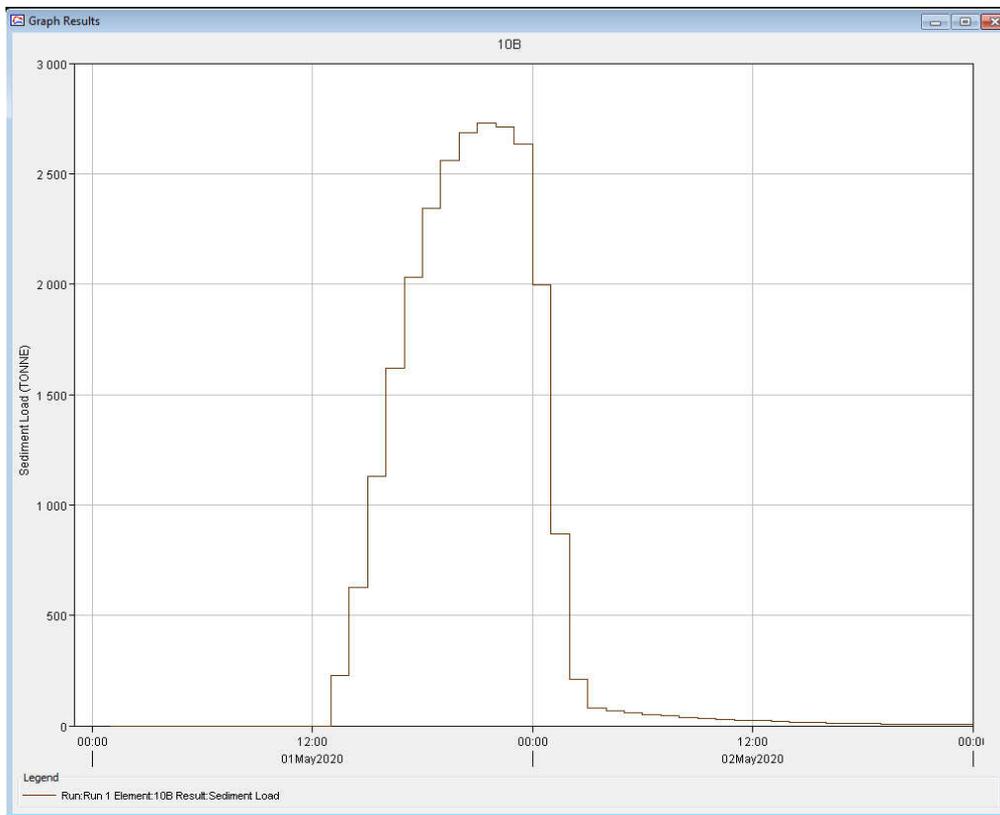
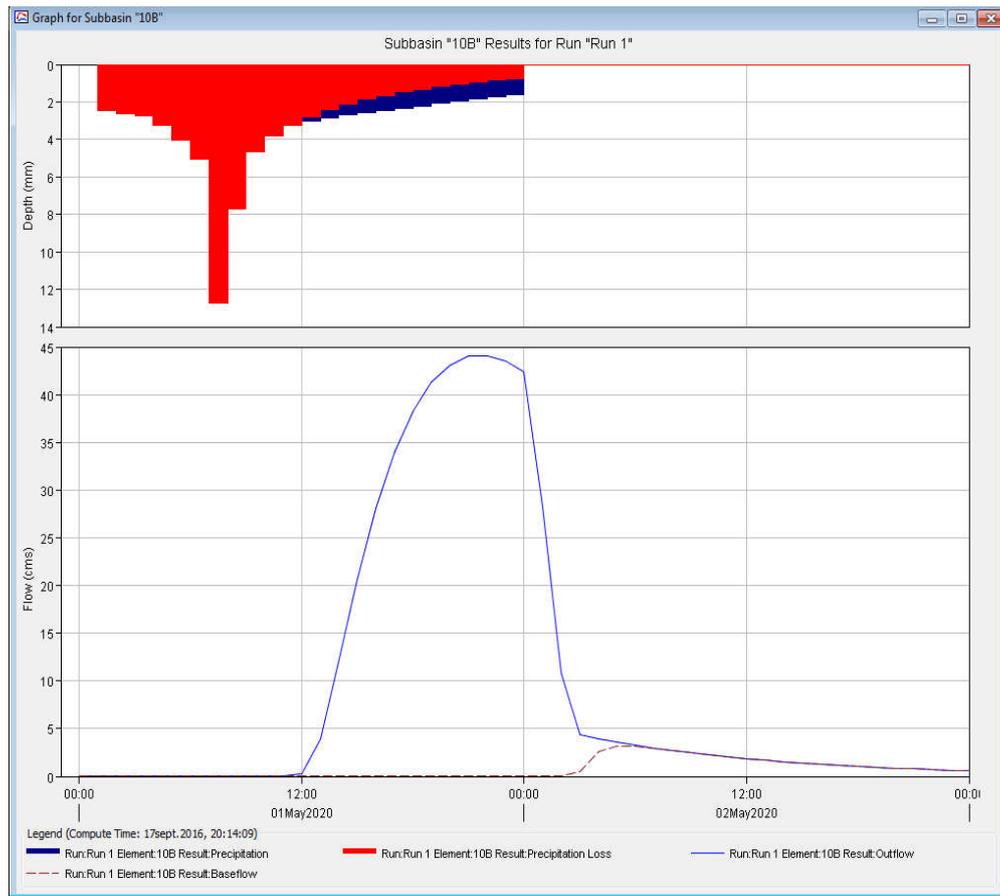
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 9:



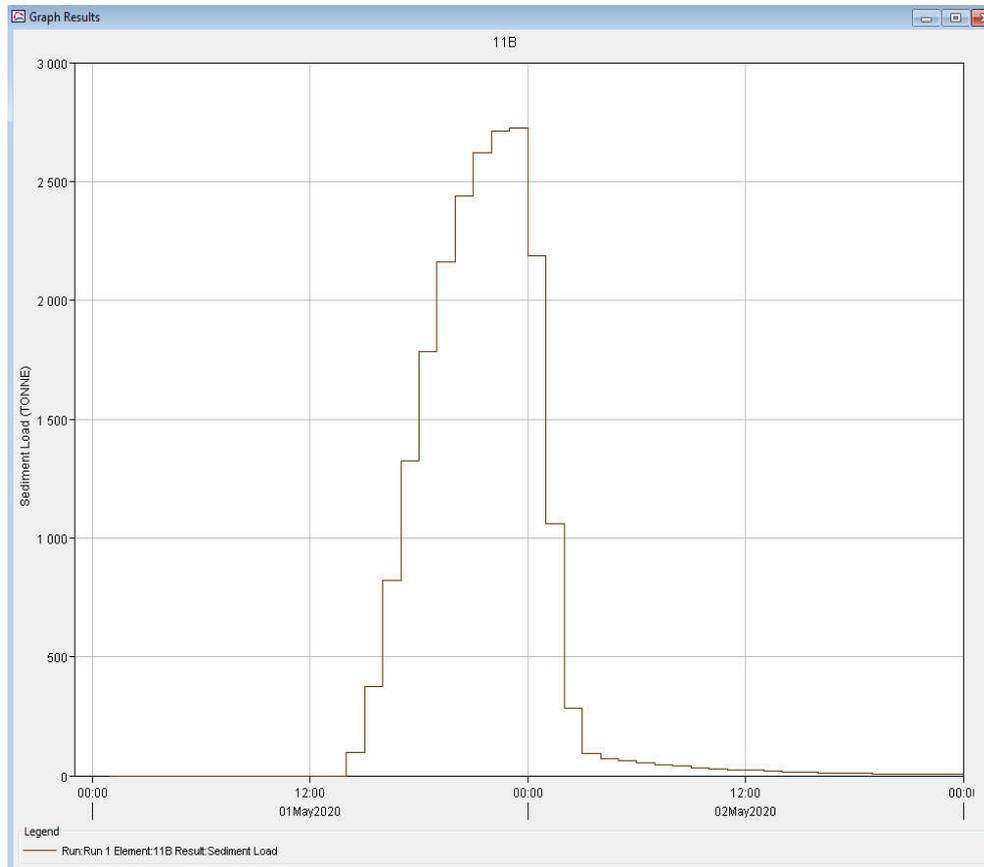
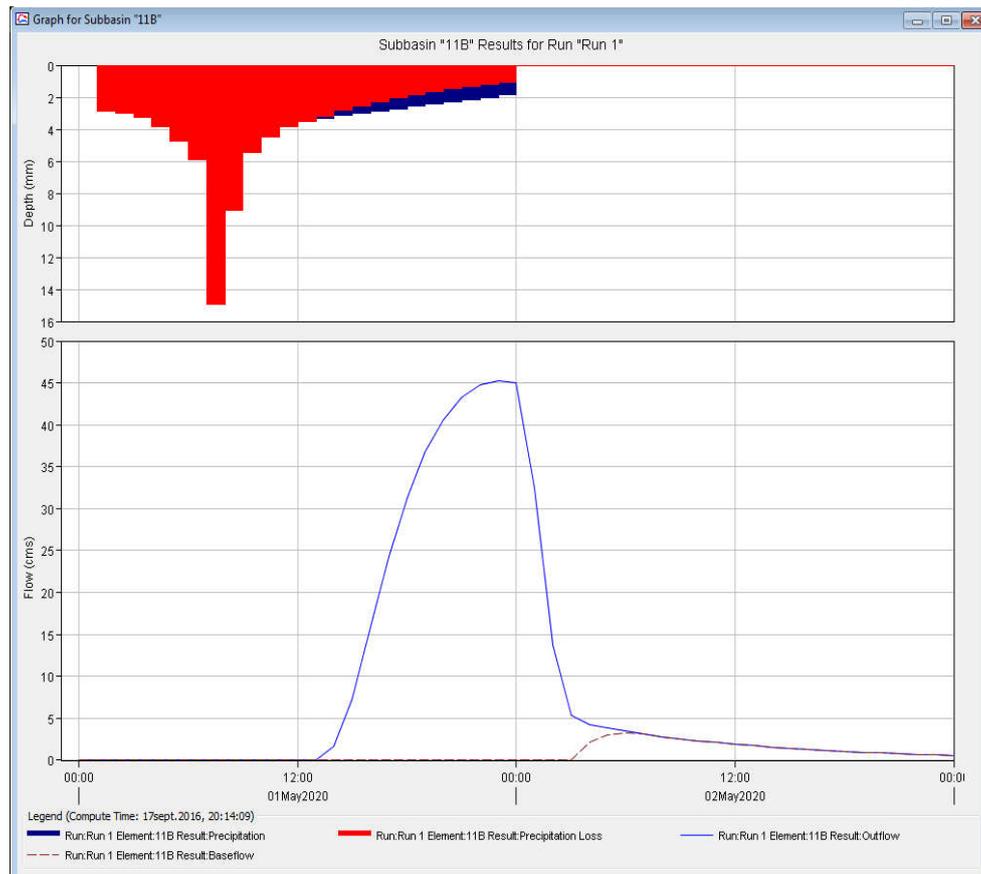
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 8:



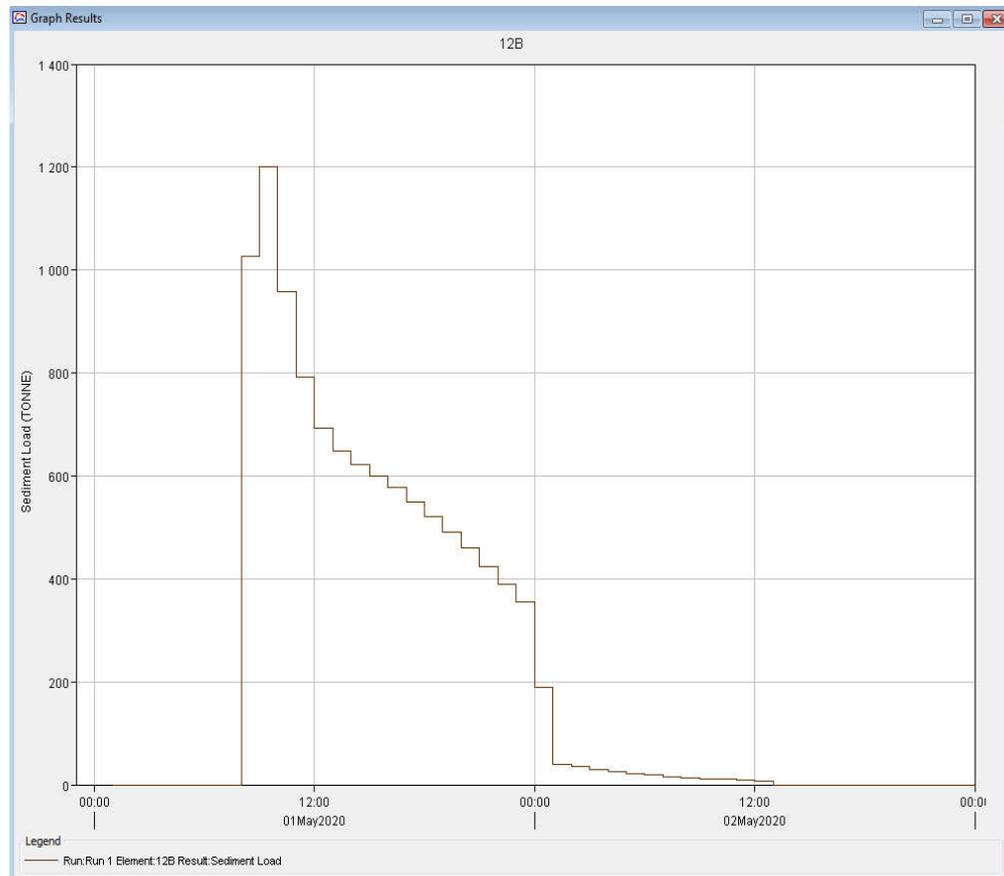
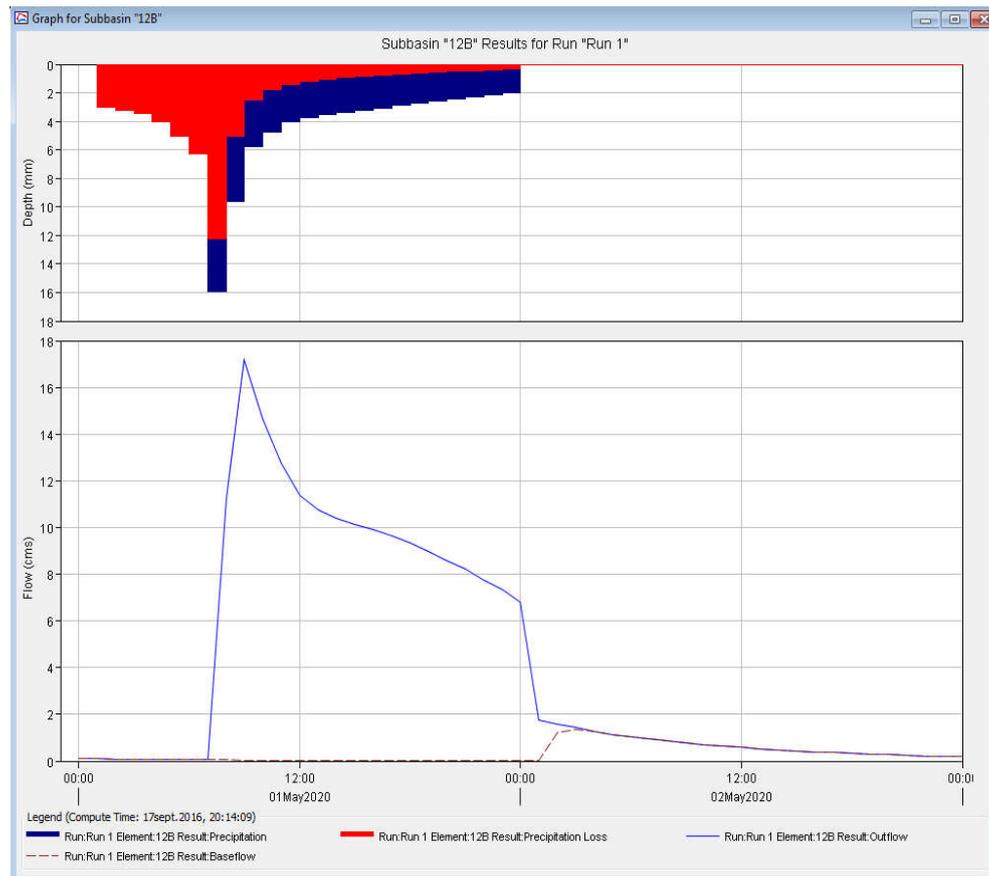
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 10:



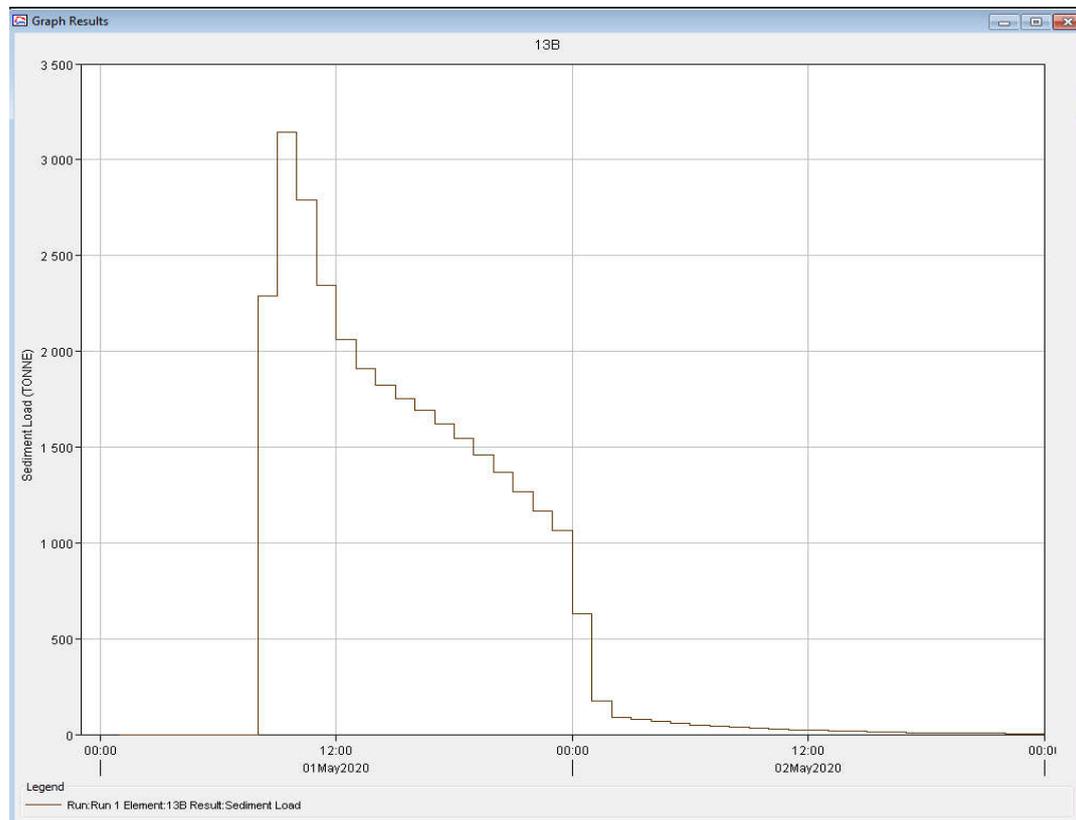
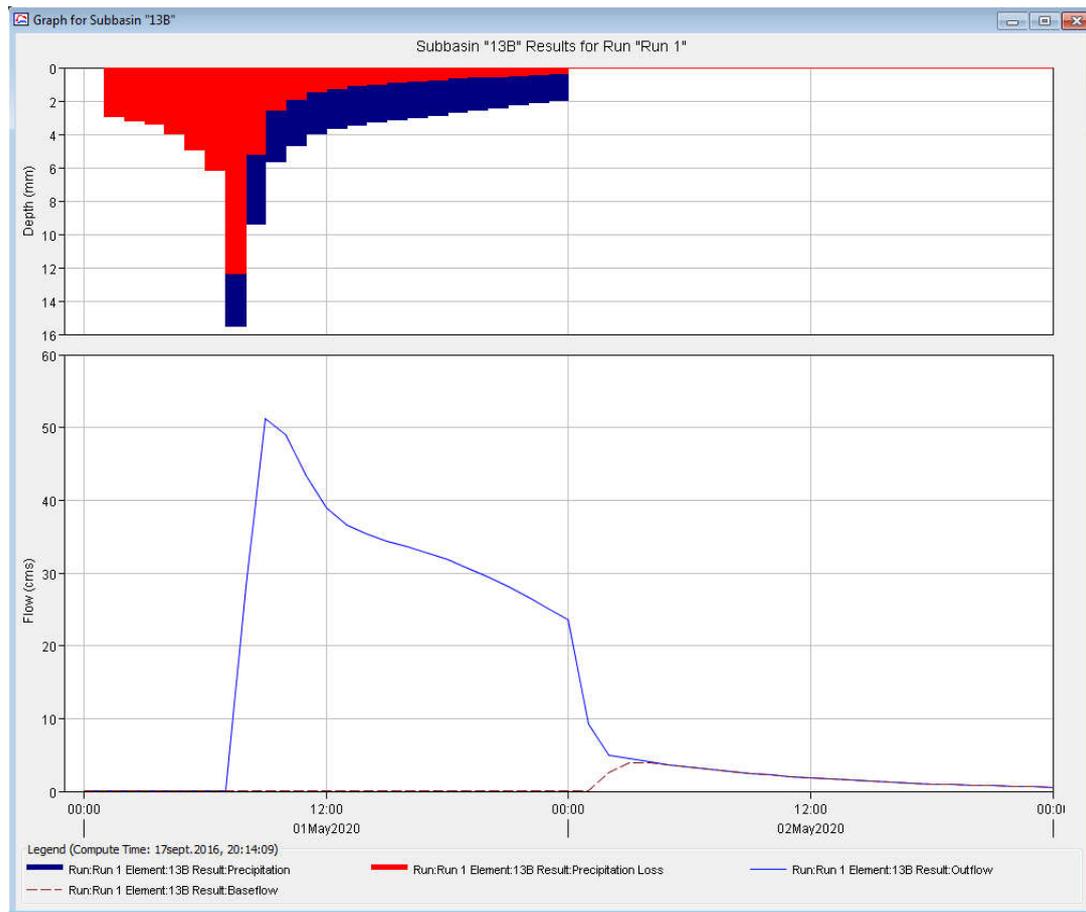
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 11:



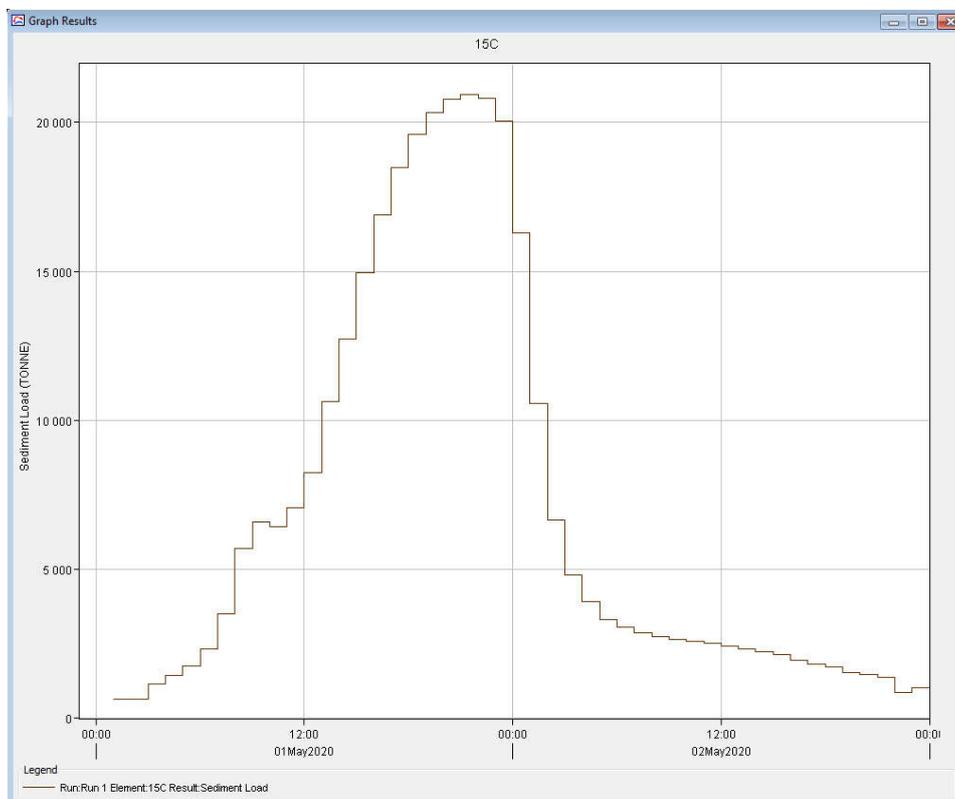
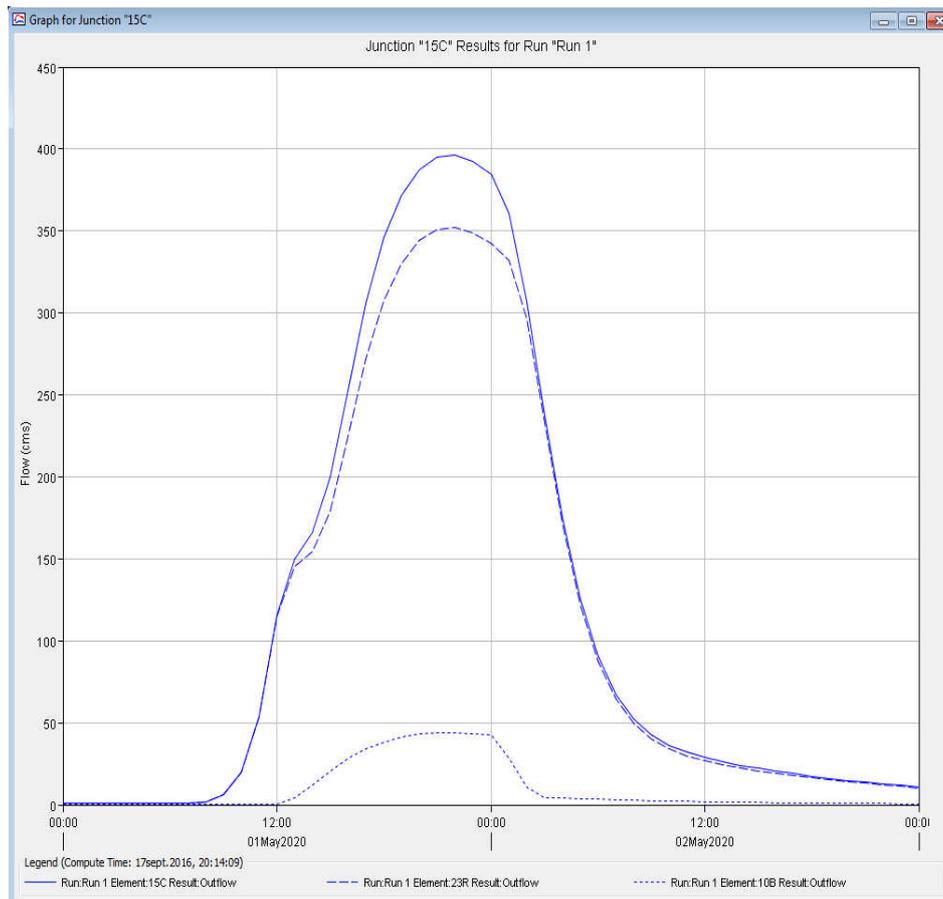
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 12:



Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 13:



Débits liquides et apports solides simulés au nœud 15C (Station M'chouneche)



Summary Results for Junction "15C"

Project: L crue 100 ans Simulation Run: Run 1
 Junction: 15C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
 End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 17sept.2016, 20:14:09 Control Specifications:WMS Control Info

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge:396,4 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge:01mai2020, 22:00
 Volume: 19,56 (MM)

Summary Results for Junction "15C"

Project: L crue 100 ans Simulation Run: Run 1
 Junction: 15C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
 End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 17sept.2016, 20:14:09 Control Specifications:WMS Control Info

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge:396,4 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge:01mai2020, 22:00
 Volume: 20555,3 (1000 M3)

Débits liquides durant la crue à la Station M'chouneche

Date	Temps	Débit entrant (m ³ /s)	Débit du bassin (m ³ /s)	Débit sortant (m ³ /s)
01-mai-20	00:00	0.8	0.1	0.9
01-mai-20	01:00	0.8	0.1	0.9
01-mai-20	02:00	0.8	0.1	0.9
01-mai-20	03:00	0.8	0.1	0.9
01-mai-20	04:00	0.8	0.1	0.9
01-mai-20	05:00	0.8	0.1	0.9
01-mai-20	06:00	0.8	0.1	0.9
01-mai-20	07:00	0.8	0.1	0.9
01-mai-20	08:00	1.5	0.0	1.6
01-mai-20	09:00	6.0	0.0	6.1
01-mai-20	10:00	19.6	0.0	19.7
01-mai-20	11:00	53.8	0.0	53.8
01-mai-20	12:00	115.0	0.3	115.2
01-mai-20	13:00	145.7	3.9	149.6
01-mai-20	14:00	154.5	11.9	166.4
01-mai-20	15:00	179.5	20.6	200.0
01-mai-20	16:00	224.8	28.1	252.8
01-mai-20	17:00	271.8	33.9	305.8
01-mai-20	18:00	307.0	38.3	345.3
01-mai-20	19:00	330.2	41.3	371.5
01-mai-20	20:00	344.1	43.1	387.2
01-mai-20	21:00	350.9	44.0	394.9
01-mai-20	22:00	352.3	44.1	396.4
01-mai-20	23:00	349.1	43.5	392.7
02-mai-20	00:00	342.1	42.4	384.6
02-mai-20	01:00	332.2	28.3	360.6
02-mai-20	02:00	296.1	10.8	306.9
02-mai-20	03:00	233.2	4.4	237.6
02-mai-20	04:00	171.1	4.0	175.0
02-mai-20	05:00	122.0	3.6	125.6
02-mai-20	06:00	87.6	3.3	90.9
02-mai-20	07:00	64.6	3.0	67.6
02-mai-20	08:00	49.5	2.7	52.2
02-mai-20	09:00	40.1	2.5	42.5
02-mai-20	10:00	34.0	2.2	36.2
02-mai-20	11:00	29.9	2.0	31.9
02-mai-20	12:00	26.9	1.8	28.7
02-mai-20	13:00	24.5	1.7	26.2
02-mai-20	14:00	22.5	1.5	24.1
02-mai-20	15:00	20.8	1.4	22.1
02-mai-20	16:00	19.1	1.3	20.4
02-mai-20	17:00	17.7	1.1	18.9

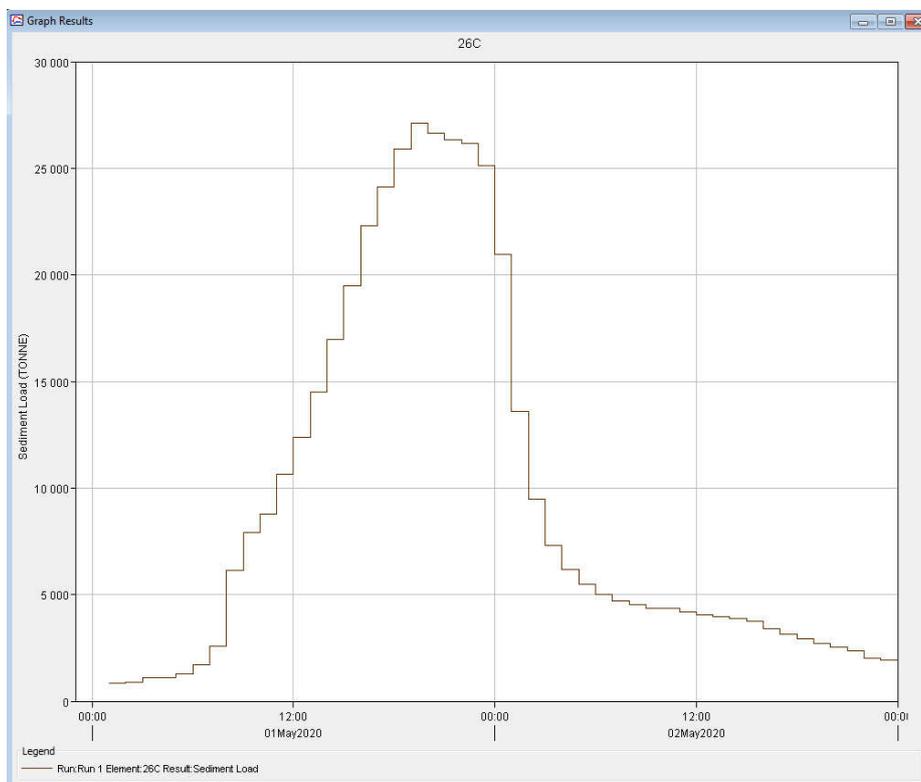
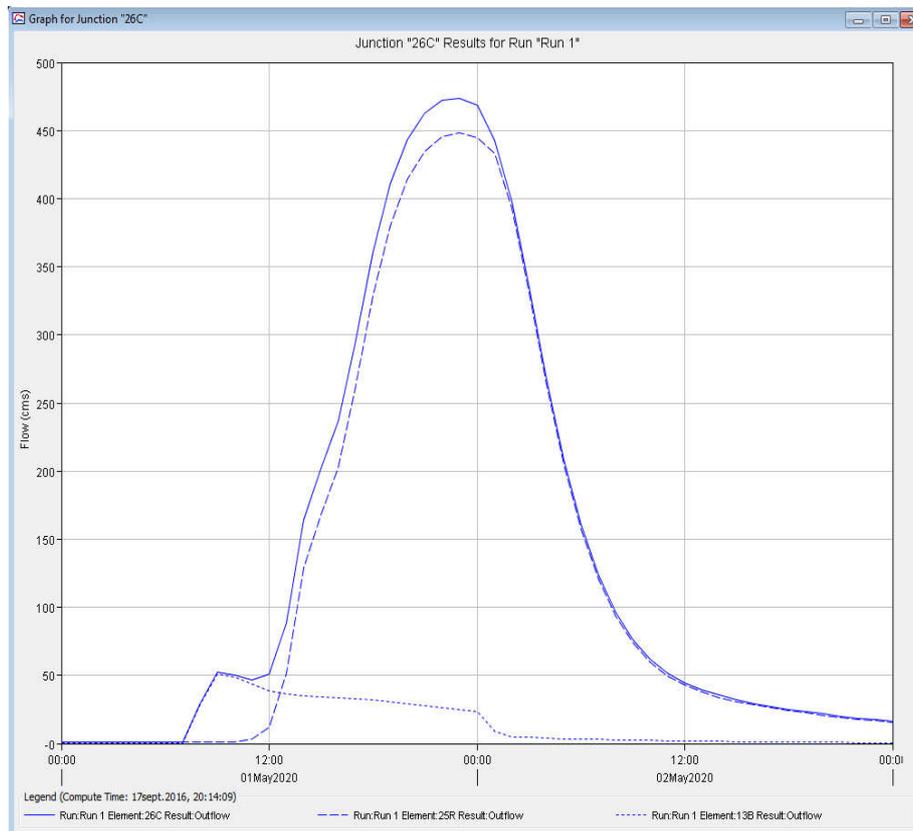
02-mai-20	18:00	16.4	1.0	17.4
02-mai-20	19:00	15.1	0.9	16.1
02-mai-20	20:00	14.0	0.9	14.9
02-mai-20	21:00	13.0	0.8	13.8
02-mai-20	22:00	12.0	0.7	12.8
02-mai-20	23:00	11.2	0.6	11.8
03-mai-20	00:00	10.4	0.6	11.0

Apports solides durant la crue à la Station M'chouneche

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	
01-mai-20	01:00	636.3
01-mai-20	02:00	636.3
01-mai-20	03:00	636.3
01-mai-20	04:00	1171.9
01-mai-20	05:00	1430.7
01-mai-20	06:00	1770.1
01-mai-20	07:00	2328.1
01-mai-20	08:00	3507.9
01-mai-20	09:00	5712.0
01-mai-20	10:00	6589.2
01-mai-20	11:00	6451.5
01-mai-20	12:00	7067.3
01-mai-20	13:00	8260.3
01-mai-20	14:00	10633.4
01-mai-20	15:00	12736.3
01-mai-20	16:00	14943.0
01-mai-20	17:00	16911.8
01-mai-20	18:00	18479.1
01-mai-20	19:00	19597.1
01-mai-20	20:00	20344.4
01-mai-20	21:00	20770.1
01-mai-20	22:00	20934.4
01-mai-20	23:00	20814.6
02-mai-20	00:00	20035.0
02-mai-20	01:00	16278.5
02-mai-20	02:00	10557.6
02-mai-20	03:00	6652.4
02-mai-20	04:00	4819.4
02-mai-20	05:00	3911.0
02-mai-20	06:00	3317.4
02-mai-20	07:00	3053.7
02-mai-20	08:00	2879.4
02-mai-20	09:00	2752.6
02-mai-20	10:00	2661.7
02-mai-20	11:00	2590.9
02-mai-20	12:00	2527.8
02-mai-20	13:00	2435.3
02-mai-20	14:00	2337.2
02-mai-20	15:00	2248.9
02-mai-20	16:00	2159.1
02-mai-20	17:00	1961.1

02-mai-20	18:00	1838.1
02-mai-20	19:00	1741.6
02-mai-20	20:00	1550.9
02-mai-20	21:00	1467.6
02-mai-20	22:00	1389.3
02-mai-20	23:00	866.9
03-mai-20	00:00	1036.4
Total		325431.9

Débits liquides et apports solides simulés au nœud 26C (Site du barrage Foum El-gherza)



Summary Results for Junction "26C"

Project: L crue 100 ans Simulation Run: Run 1
 Junction: 26C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
 End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 17sept. 2016, 20:14:09 Control Specifications: WMS Control Info

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 473,4 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 23:00
 Volume: 18,81 (MM)

Summary Results for Junction "26C"

Project: L crue 100 ans Simulation Run: Run 1
 Junction: 26C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
 End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 17sept. 2016, 20:14:09 Control Specifications: WMS Control Info

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 473,4 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 23:00
 Volume: 24770,4 (1000 M3)

Débits liquides durant la crue au site du barrage Foum El-gherza

Date	Temps	Débit entrant 25 R (m³/s)	Débit entrant 13 B (m³/s)	Débit sortant 26 C (m³/s)
01-mai-20	00:00	1.1	0.1	1.2
01-mai-20	01:00	1.1	0.1	1.2
01-mai-20	02:00	1.1	0.1	1.2
01-mai-20	03:00	1.1	0.1	1.2
01-mai-20	04:00	1.1	0.1	1.2
01-mai-20	05:00	1.1	0.1	1.2
01-mai-20	06:00	1.1	0.1	1.2
01-mai-20	07:00	1.1	0.1	1.2
01-mai-20	08:00	1.1	28.2	29.3
01-mai-20	09:00	1.1	51.2	52.3
01-mai-20	10:00	1.2	49.0	50.2
01-mai-20	11:00	3.2	43.4	46.6
01-mai-20	12:00	12.2	39.0	51.2
01-mai-20	13:00	51.7	36.6	88.3
01-mai-20	14:00	128.9	35.3	164.2
01-mai-20	15:00	167.9	34.4	202.2
01-mai-20	16:00	202.7	33.6	236.3
01-mai-20	17:00	262.2	32.7	294.9
01-mai-20	18:00	328.7	31.8	360.5
01-mai-20	19:00	379.8	30.7	410.5
01-mai-20	20:00	414.1	29.4	443.5
01-mai-20	21:00	434.9	28.1	463.0
01-mai-20	22:00	445.2	26.7	471.9
01-mai-20	23:00	448.2	25.1	473.4
02-mai-20	00:00	444.8	23.6	468.4
02-mai-20	01:00	433.1	9.2	442.3
02-mai-20	02:00	392.9	4.9	397.9
02-mai-20	03:00	330.3	4.5	334.7
02-mai-20	04:00	263.5	4.1	267.5
02-mai-20	05:00	205.1	3.6	208.7
02-mai-20	06:00	157.2	3.3	160.4
02-mai-20	07:00	120.8	3.0	123.7
02-mai-20	08:00	93.6	2.7	96.3
02-mai-20	09:00	73.9	2.4	76.3
02-mai-20	10:00	59.9	2.2	62.1
02-mai-20	11:00	49.8	2.0	51.8
02-mai-20	12:00	42.8	1.8	44.7
02-mai-20	13:00	37.7	1.7	39.4
02-mai-20	14:00	33.9	1.5	35.4
02-mai-20	15:00	30.8	1.4	32.2
02-mai-20	16:00	28.3	1.2	29.6
02-mai-20	17:00	26.2	1.1	27.3

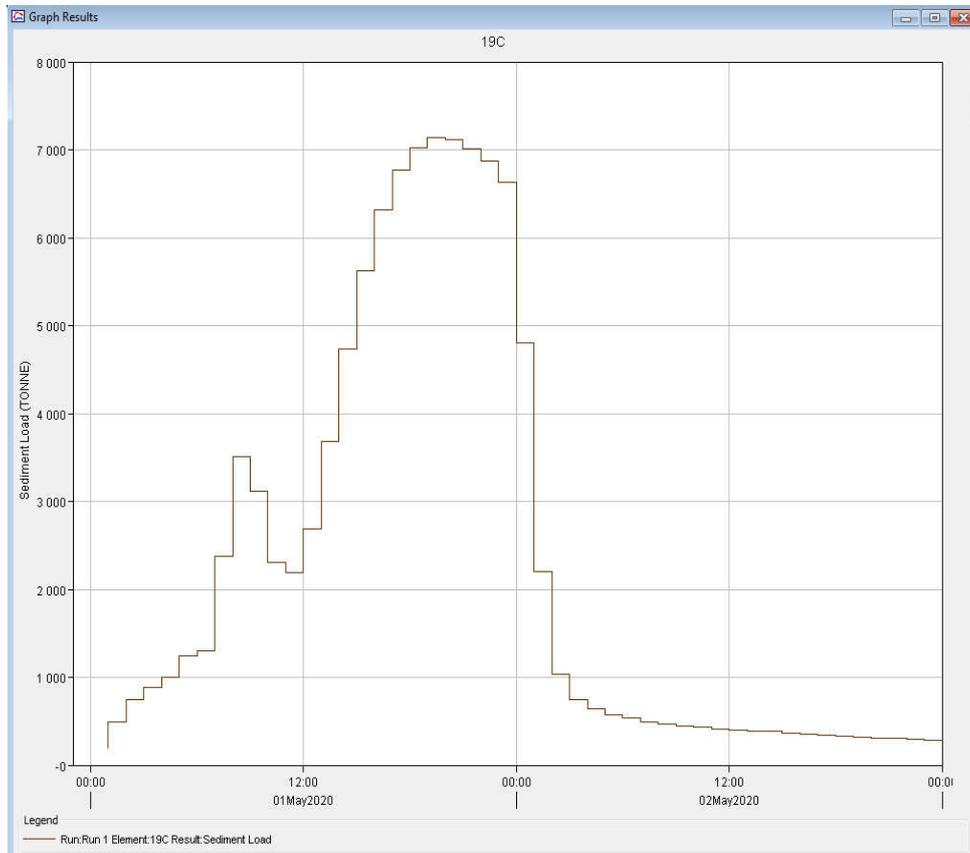
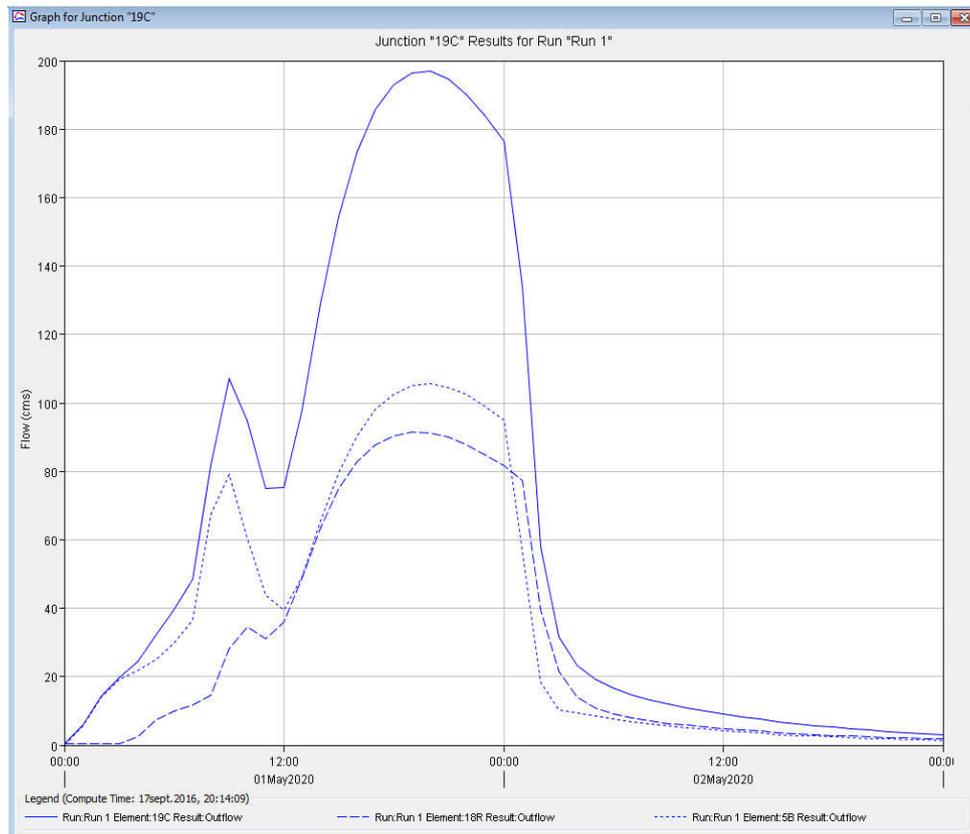
02-mai-20	18:00	24.2	1.0	25.3
02-mai-20	19:00	22.5	0.9	23.4
02-mai-20	20:00	20.9	0.9	21.7
02-mai-20	21:00	19.4	0.8	20.2
02-mai-20	22:00	18.0	0.7	18.7
02-mai-20	23:00	16.8	0.6	17.4
03-mai-20	00:00	15.6	0.6	16.2

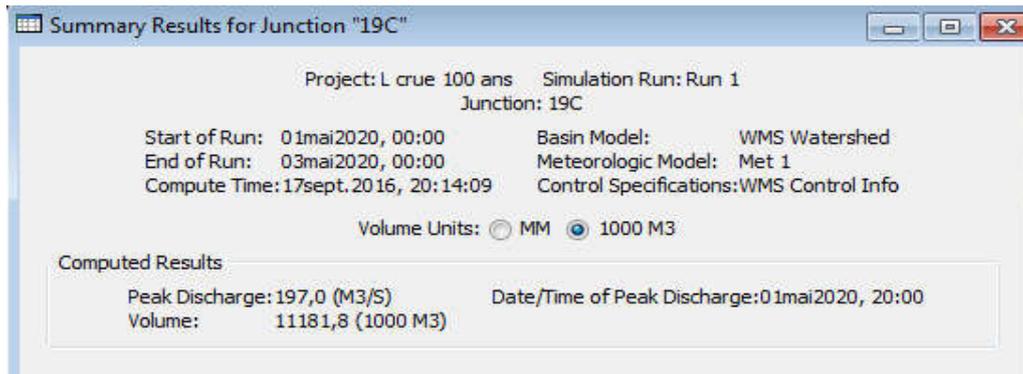
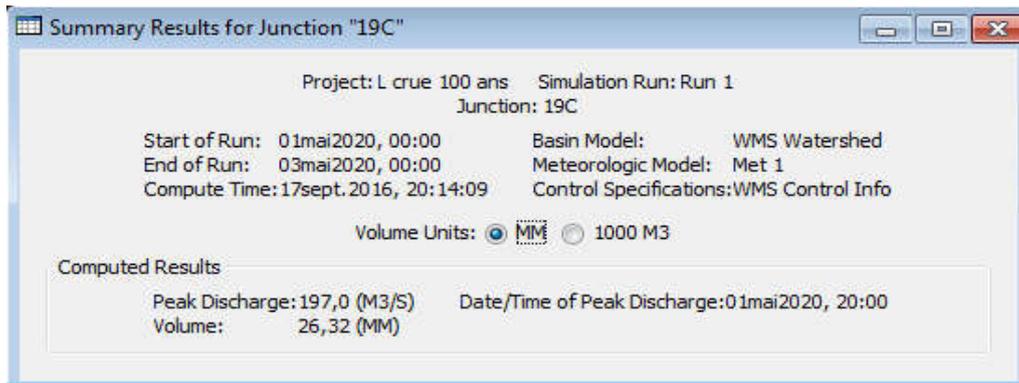
Apports solides durant la crue au site du barrage Foum El-gherza

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	
01-mai-20	01:00	842.6
01-mai-20	02:00	842.6
01-mai-20	03:00	881.6
01-mai-20	04:00	1095.7
01-mai-20	05:00	1095.7
01-mai-20	06:00	1281.1
01-mai-20	07:00	1697.5
01-mai-20	08:00	2589.6
01-mai-20	09:00	6122.7
01-mai-20	10:00	7928.6
01-mai-20	11:00	8762.5
01-mai-20	12:00	10623.8
01-mai-20	13:00	12364.5
01-mai-20	14:00	14519.1
01-mai-20	15:00	16959.5
01-mai-20	16:00	19468.5
01-mai-20	17:00	22293.7
01-mai-20	18:00	24135.3
01-mai-20	19:00	25903.2
01-mai-20	20:00	27114.0
01-mai-20	21:00	26653.3
01-mai-20	22:00	26329.9
01-mai-20	23:00	26172.8
02-mai-20	00:00	25117.7
02-mai-20	01:00	20952.1
02-mai-20	02:00	13592.5
02-mai-20	03:00	9456.2
02-mai-20	04:00	7285.0
02-mai-20	05:00	6197.5
02-mai-20	06:00	5476.9
02-mai-20	07:00	5026.5
02-mai-20	08:00	4720.3
02-mai-20	09:00	4511.2
02-mai-20	10:00	4367.0
02-mai-20	11:00	4357.2
02-mai-20	12:00	4187.5
02-mai-20	13:00	4072.0
02-mai-20	14:00	3977.8
02-mai-20	15:00	3894.2
02-mai-20	16:00	3752.7
02-mai-20	17:00	3410.0

02-mai-20	18:00	3146.2
02-mai-20	19:00	2911.6
02-mai-20	20:00	2699.6
02-mai-20	21:00	2536.6
02-mai-20	22:00	2361.6
02-mai-20	23:00	2029.9
03-mai-20	00:00	1950.8
Total		437668.4

Débits liquides et apports solides simulés au nœud 19C (au gorges de Tighanimine)





Débits liquides durant la crue au gorges de Tighanimine

Date	Temps	Débit entrant (m ³ /s)	Débit du bassin (m ³ /s)	Débit sortant (m ³ /s)
01-mai-20	00:00	0.3	0.1	0.4
01-mai-20	01:00	0.3	5.6	5.9
01-mai-20	02:00	0.3	14.0	14.3
01-mai-20	03:00	0.5	19.3	19.8
01-mai-20	04:00	2.5	22.0	24.4
01-mai-20	05:00	7.5	24.9	32.4
01-mai-20	06:00	10.0	29.8	39.7
01-mai-20	07:00	11.7	36.6	48.3
01-mai-20	08:00	14.6	67.4	82.0
01-mai-20	09:00	28.1	79.0	107.1
01-mai-20	10:00	34.4	60.2	94.6
01-mai-20	11:00	31.1	43.9	74.9
01-mai-20	12:00	36.0	39.5	75.4
01-mai-20	13:00	48.8	49.3	98.2
01-mai-20	14:00	63.6	65.5	129.1
01-mai-20	15:00	75.0	79.6	154.6
01-mai-20	16:00	82.8	90.4	173.2
01-mai-20	17:00	87.7	98.0	185.7
01-mai-20	18:00	90.4	102.5	193.0
01-mai-20	19:00	91.5	105.0	196.5
01-mai-20	20:00	91.3	105.7	197.0
01-mai-20	21:00	90.1	104.6	194.7
01-mai-20	22:00	87.8	102.3	190.2
01-mai-20	23:00	84.9	99.1	184.0
02-mai-20	00:00	81.5	94.9	176.4
02-mai-20	01:00	77.4	56.4	133.8
02-mai-20	02:00	39.4	18.5	57.9
02-mai-20	03:00	21.5	10.2	31.7
02-mai-20	04:00	14.0	9.3	23.3
02-mai-20	05:00	10.8	8.4	19.3
02-mai-20	06:00	9.1	7.7	16.7
02-mai-20	07:00	7.8	6.8	14.7
02-mai-20	08:00	7.0	6.2	13.2
02-mai-20	09:00	6.3	5.7	12.0
02-mai-20	10:00	5.8	5.1	10.9
02-mai-20	11:00	5.3	4.7	10.0
02-mai-20	12:00	4.9	4.2	9.1
02-mai-20	13:00	4.4	3.9	8.3
02-mai-20	14:00	4.1	3.5	7.6
02-mai-20	15:00	3.7	3.2	6.9
02-mai-20	16:00	3.4	2.9	6.3
02-mai-20	17:00	3.1	2.6	5.8

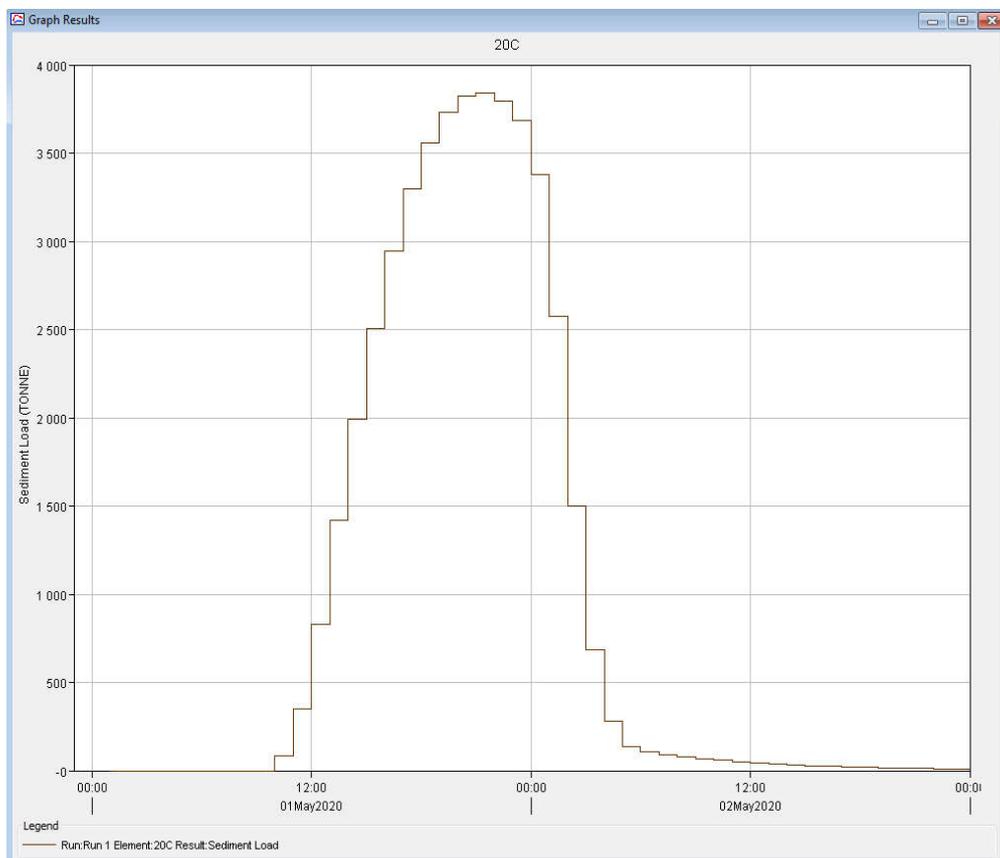
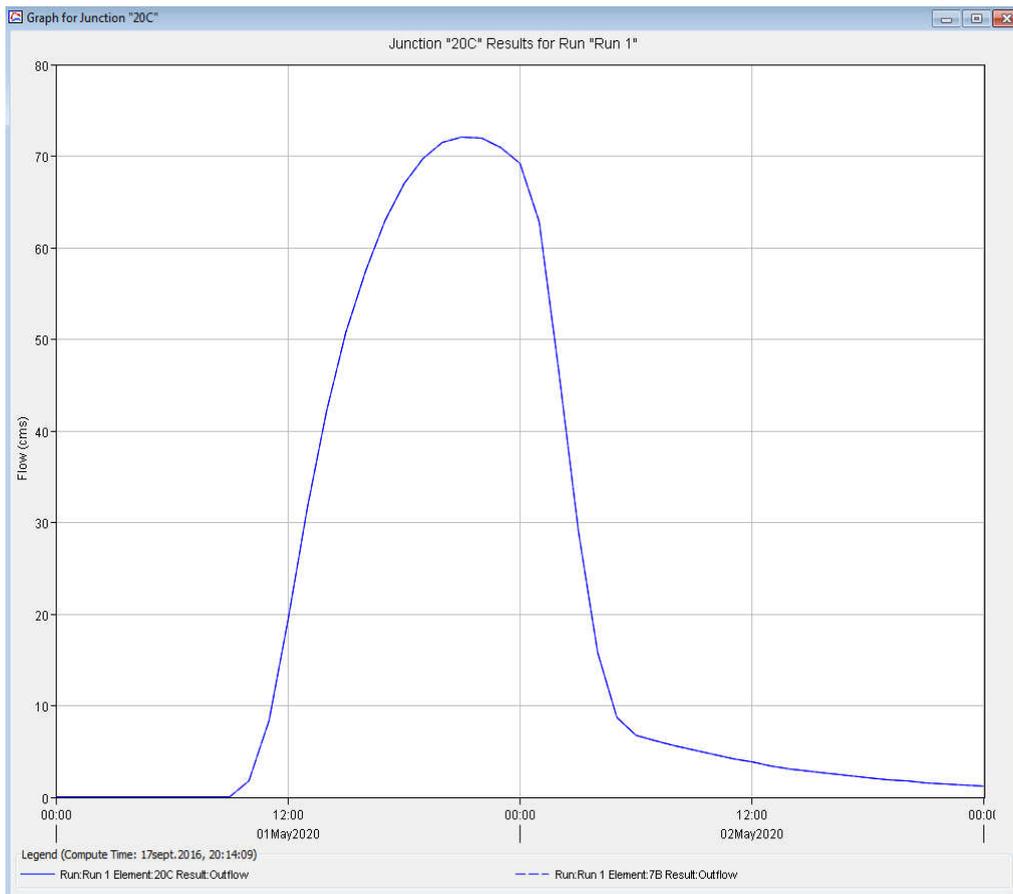
02-mai-20	18:00	2.9	2.4	5.3
02-mai-20	19:00	2.7	2.2	4.8
02-mai-20	20:00	2.4	2.0	4.4
02-mai-20	21:00	2.2	1.8	4.0
02-mai-20	22:00	2.1	1.6	3.7
02-mai-20	23:00	1.9	1.5	3.4
03-mai-20	00:00	1.7	1.3	3.1

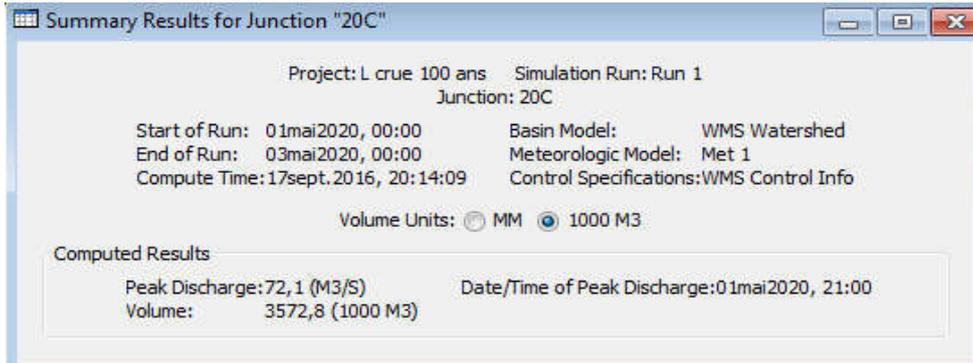
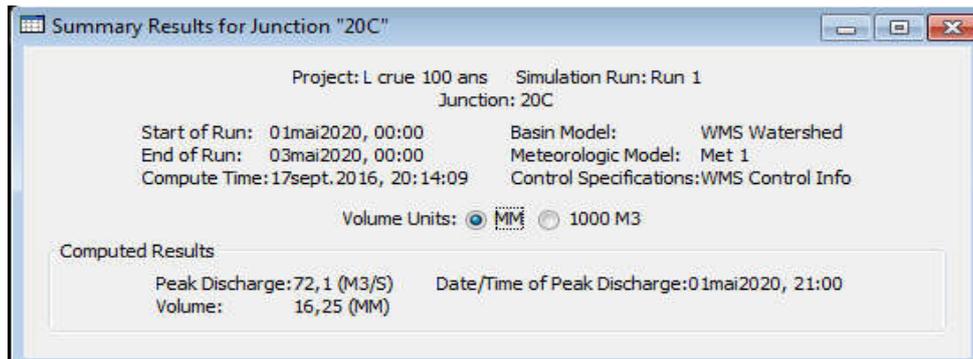
Apports solides durant la crue au gorges de Tighanimine

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	
01-mai-20	01:00	192.3
01-mai-20	02:00	497.1
01-mai-20	03:00	749.0
01-mai-20	04:00	888.6
01-mai-20	05:00	997.5
01-mai-20	06:00	1246.1
01-mai-20	07:00	1298.7
01-mai-20	08:00	2370.0
01-mai-20	09:00	3503.1
01-mai-20	10:00	3110.7
01-mai-20	11:00	2311.6
01-mai-20	12:00	2194.9
01-mai-20	13:00	2693.2
01-mai-20	14:00	3683.9
01-mai-20	15:00	4731.6
01-mai-20	16:00	5625.4
01-mai-20	17:00	6314.6
01-mai-20	18:00	6769.0
01-mai-20	19:00	7026.0
01-mai-20	20:00	7134.2
01-mai-20	21:00	7117.9
01-mai-20	22:00	7014.0
01-mai-20	23:00	6872.1
02-mai-20	00:00	6631.3
02-mai-20	01:00	4804.5
02-mai-20	02:00	2199.6
02-mai-20	03:00	1031.8
02-mai-20	04:00	747.6
02-mai-20	05:00	643.5
02-mai-20	06:00	572.4
02-mai-20	07:00	532.0
02-mai-20	08:00	496.1
02-mai-20	09:00	471.3
02-mai-20	10:00	450.8
02-mai-20	11:00	432.5
02-mai-20	12:00	415.9
02-mai-20	13:00	400.4
02-mai-20	14:00	385.8
02-mai-20	15:00	382.6
02-mai-20	16:00	365.7
02-mai-20	17:00	351.5

02-mai-20	18:00	339.2
02-mai-20	19:00	327.9
02-mai-20	20:00	318.2
02-mai-20	21:00	309.1
02-mai-20	22:00	300.7
02-mai-20	23:00	293.7
03-mai-20	00:00	288.7
Total		107834.3

Débits liquides et apports solides simulés au nœud 20C (Oued T'kout)





Débits liquides durant la crue Oued T'kout

Date	Temps	Débit du bassin (m ³ /s)	Débit sortant (m ³ /s)
01-mai-20	00:00	0.1	0.1
01-mai-20	01:00	0.1	0.1
01-mai-20	02:00	0.1	0.1
01-mai-20	03:00	0.1	0.1
01-mai-20	04:00	0.1	0.1
01-mai-20	05:00	0.1	0.1
01-mai-20	06:00	0.1	0.1
01-mai-20	07:00	0.1	0.1
01-mai-20	08:00	0.0	0.0
01-mai-20	09:00	0.1	0.1
01-mai-20	10:00	1.8	1.8
01-mai-20	11:00	8.4	8.4
01-mai-20	12:00	19.5	19.5
01-mai-20	13:00	31.6	31.6
01-mai-20	14:00	42.1	42.1
01-mai-20	15:00	50.7	50.7
01-mai-20	16:00	57.6	57.6
01-mai-20	17:00	63.0	63.0
01-mai-20	18:00	67.0	67.0
01-mai-20	19:00	69.8	69.8
01-mai-20	20:00	71.5	71.5
01-mai-20	21:00	72.1	72.1
01-mai-20	22:00	71.9	71.9
01-mai-20	23:00	70.9	70.9
02-mai-20	00:00	69.2	69.2
02-mai-20	01:00	62.9	62.9
02-mai-20	02:00	46.9	46.9
02-mai-20	03:00	29.0	29.0
02-mai-20	04:00	15.8	15.8
02-mai-20	05:00	8.8	8.8
02-mai-20	06:00	6.8	6.8
02-mai-20	07:00	6.2	6.2
02-mai-20	08:00	5.6	5.6
02-mai-20	09:00	5.1	5.1
02-mai-20	10:00	4.6	4.6
02-mai-20	11:00	4.2	4.2
02-mai-20	12:00	3.8	3.8
02-mai-20	13:00	3.4	3.4
02-mai-20	14:00	3.1	3.1
02-mai-20	15:00	2.8	2.8
02-mai-20	16:00	2.6	2.6
02-mai-20	17:00	2.3	2.3

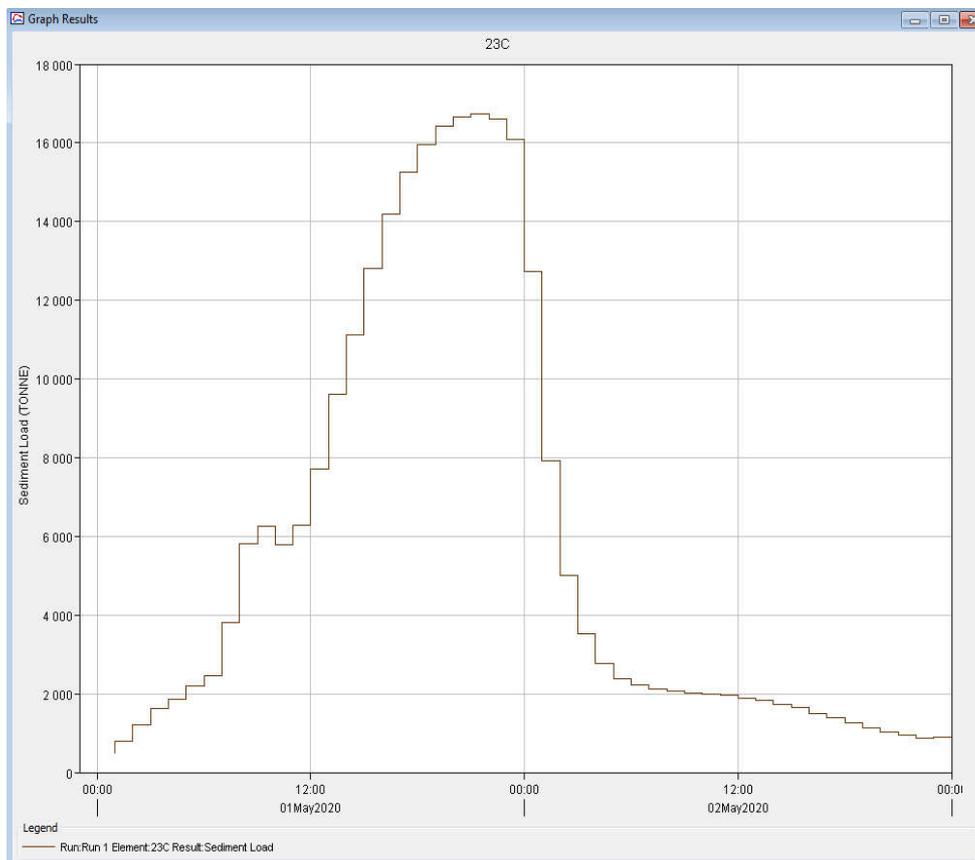
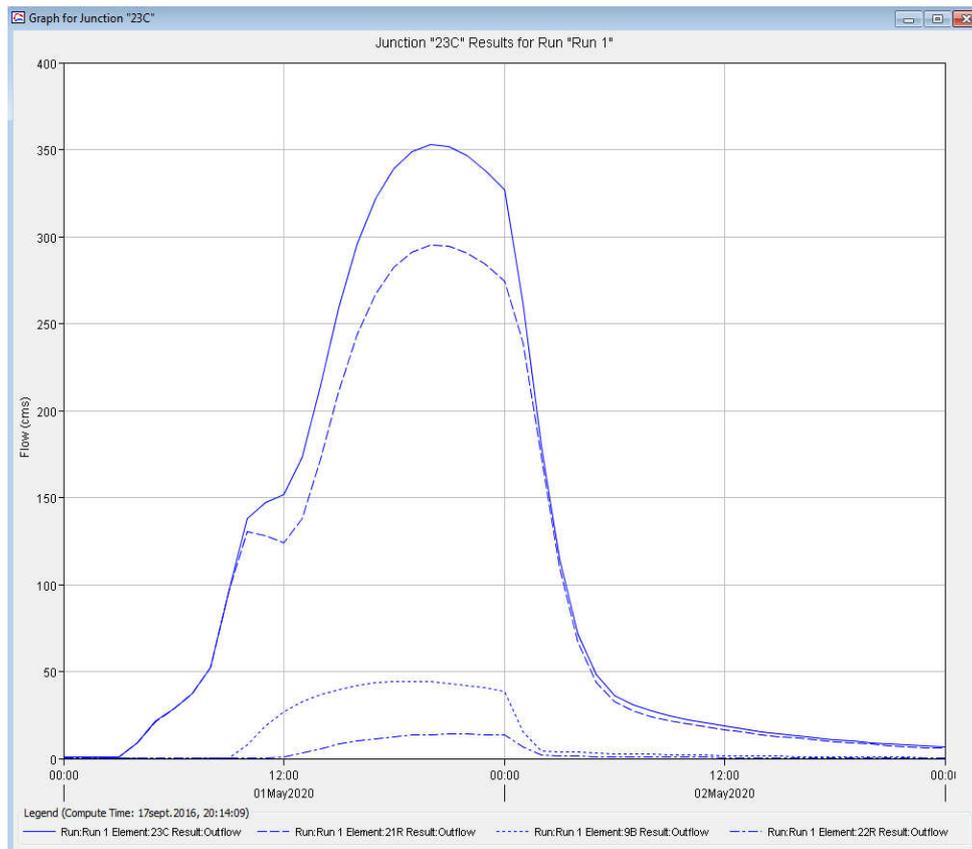
02-mai-20	18:00	2.1	2.1
02-mai-20	19:00	1.9	1.9
02-mai-20	20:00	1.8	1.8
02-mai-20	21:00	1.6	1.6
02-mai-20	22:00	1.4	1.4
02-mai-20	23:00	1.3	1.3
03-mai-20	00:00	1.2	1.2

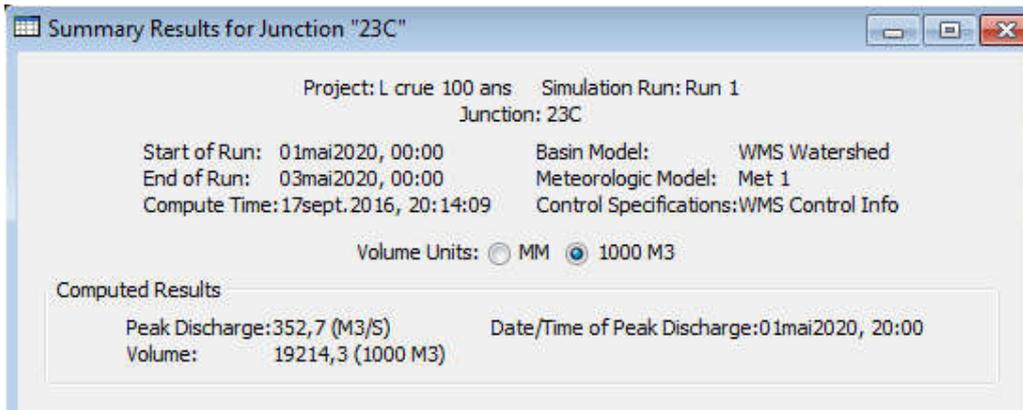
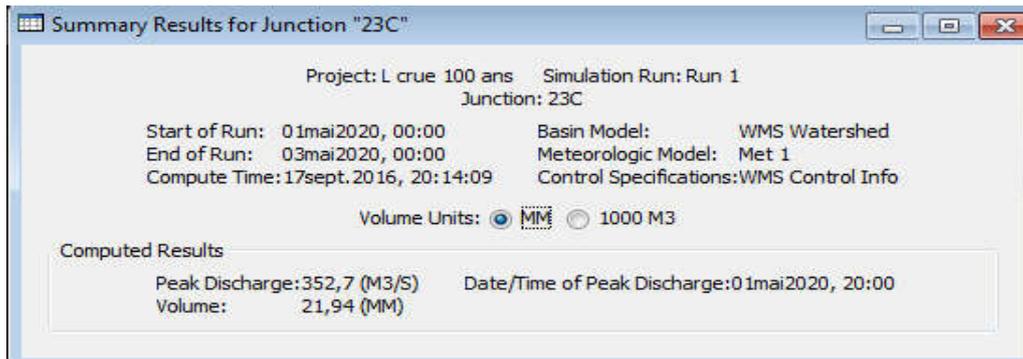
Apports solides durant la crue Oued T'kout

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	
01-mai-20	01:00	0.0
01-mai-20	02:00	0.0
01-mai-20	03:00	0.0
01-mai-20	04:00	0.0
01-mai-20	05:00	0.0
01-mai-20	06:00	0.0
01-mai-20	07:00	0.0
01-mai-20	08:00	0.0
01-mai-20	09:00	0.0
01-mai-20	10:00	0.0
01-mai-20	11:00	84.1
01-mai-20	12:00	347.8
01-mai-20	13:00	830.4
01-mai-20	14:00	1419.0
01-mai-20	15:00	1993.2
01-mai-20	16:00	2506.5
01-mai-20	17:00	2943.8
01-mai-20	18:00	3295.6
01-mai-20	19:00	3558.4
01-mai-20	20:00	3733.9
01-mai-20	21:00	3826.4
01-mai-20	22:00	3843.2
01-mai-20	23:00	3793.5
02-mai-20	00:00	3686.2
02-mai-20	01:00	3376.5
02-mai-20	02:00	2576.9
02-mai-20	03:00	1500.6
02-mai-20	04:00	687.0
02-mai-20	05:00	278.2
02-mai-20	06:00	137.5
02-mai-20	07:00	104.2
02-mai-20	08:00	90.2
02-mai-20	09:00	78.1
02-mai-20	10:00	67.7
02-mai-20	11:00	58.6
02-mai-20	12:00	50.7
02-mai-20	13:00	43.5
02-mai-20	14:00	37.2
02-mai-20	15:00	32.2
02-mai-20	16:00	27.9
02-mai-20	17:00	24.2

02-mai-20	18:00	20.9
02-mai-20	19:00	18.1
02-mai-20	20:00	15.7
02-mai-20	21:00	13.6
02-mai-20	22:00	11.8
02-mai-20	23:00	10.2
03-mai-20	00:00	8.8
Total		45132.3

Débits liquides et apports solides simulés au nœud 23C (au balcons de Ghoufi)





Débits liquides durant la crue aux gorges de Ghoufi

Date	Temps	Débit entrant 21 R (m³/s)	Débit bassin 9 (m³/s)	Débit entrant 22 R (m³/s)	Débit sortant 23 C (m³/s)
01-mai-20	00:00	0.6	0.1	0.1	0.8
01-mai-20	01:00	0.6	0.1	0.1	0.8
01-mai-20	02:00	0.6	0.1	0.1	0.8
01-mai-20	03:00	0.8	0.1	0.1	1.0
01-mai-20	04:00	9.0	0.1	0.1	9.2
01-mai-20	05:00	21.3	0.1	0.1	21.4
01-mai-20	06:00	28.5	0.1	0.1	28.6
01-mai-20	07:00	37.3	0.1	0.1	37.4
01-mai-20	08:00	52.1	0.0	0.0	52.2
01-mai-20	09:00	96.2	0.1	0.0	96.3
01-mai-20	10:00	130.1	7.6	0.0	137.8
01-mai-20	11:00	128.3	19.0	0.0	147.2
01-mai-20	12:00	123.8	27.0	0.8	151.5
01-mai-20	13:00	137.7	32.4	3.1	173.2
01-mai-20	14:00	172.0	36.6	5.8	214.4
01-mai-20	15:00	211.3	39.7	8.2	259.1
01-mai-20	16:00	243.6	41.9	10.1	295.5
01-mai-20	17:00	266.8	43.4	11.6	321.8
01-mai-20	18:00	282.2	44.2	12.6	339.0
01-mai-20	19:00	291.1	44.3	13.4	348.8
01-mai-20	20:00	295.0	44.0	13.8	352.7
01-mai-20	21:00	294.6	43.2	14.0	351.9
01-mai-20	22:00	290.7	42.0	14.0	346.7
01-mai-20	23:00	283.8	40.5	13.7	338.0
02-mai-20	00:00	274.5	38.7	13.4	326.7
02-mai-20	01:00	239.1	15.6	6.8	261.5
02-mai-20	02:00	173.7	4.4	2.1	180.3
02-mai-20	03:00	109.4	4.0	1.3	114.8
02-mai-20	04:00	66.5	3.6	1.2	71.4
02-mai-20	05:00	43.9	3.1	1.1	48.1
02-mai-20	06:00	32.5	2.8	1.0	36.4
02-mai-20	07:00	27.3	2.6	0.9	30.8
02-mai-20	08:00	24.2	2.3	0.8	27.3
02-mai-20	09:00	21.7	2.1	0.7	24.6
02-mai-20	10:00	19.8	1.9	0.7	22.3
02-mai-20	11:00	18.0	1.8	0.6	20.4
02-mai-20	12:00	16.5	1.6	0.5	18.6
02-mai-20	13:00	15.1	1.5	0.5	17.0
02-mai-20	14:00	13.8	1.3	0.4	15.6
02-mai-20	15:00	12.6	1.2	0.4	14.2
02-mai-20	16:00	11.6	1.1	0.4	13.0
02-mai-20	17:00	10.6	1.0	0.3	11.9

02-mai-20	18:00	9.7	0.9	0.3	10.9
02-mai-20	19:00	8.9	0.8	0.3	10.0
02-mai-20	20:00	8.2	0.7	0.3	9.2
02-mai-20	21:00	7.5	0.7	0.2	8.4
02-mai-20	22:00	6.9	0.6	0.2	7.7
02-mai-20	23:00	6.3	0.6	0.2	7.1
03-mai-20	00:00	5.8	0.5	0.2	6.5

Apports solides durant la crue aux gorges de Ghoufi

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	
01-mai-20	01:00	490.3
01-mai-20	02:00	792.5
01-mai-20	03:00	1206.6
01-mai-20	04:00	1638.3
01-mai-20	05:00	1866.7
01-mai-20	06:00	2198.4
01-mai-20	07:00	2452.4
01-mai-20	08:00	3809.8
01-mai-20	09:00	5825.0
01-mai-20	10:00	6253.3
01-mai-20	11:00	5794.7
01-mai-20	12:00	6278.6
01-mai-20	13:00	7719.3
01-mai-20	14:00	9603.8
01-mai-20	15:00	11114.1
01-mai-20	16:00	12810.7
01-mai-20	17:00	14184.5
01-mai-20	18:00	15255.3
01-mai-20	19:00	15963.2
01-mai-20	20:00	16422.9
01-mai-20	21:00	16663.6
01-mai-20	22:00	16732.8
01-mai-20	23:00	16607.4
02-mai-20	00:00	16080.0
02-mai-20	01:00	12733.1
02-mai-20	02:00	7911.4
02-mai-20	03:00	4999.9
02-mai-20	04:00	3527.3
02-mai-20	05:00	2759.8
02-mai-20	06:00	2386.6
02-mai-20	07:00	2218.8
02-mai-20	08:00	2126.2
02-mai-20	09:00	2068.6
02-mai-20	10:00	2028.4
02-mai-20	11:00	1993.4
02-mai-20	12:00	1954.8
02-mai-20	13:00	1894.6
02-mai-20	14:00	1826.0
02-mai-20	15:00	1739.4
02-mai-20	16:00	1642.9
02-mai-20	17:00	1504.9

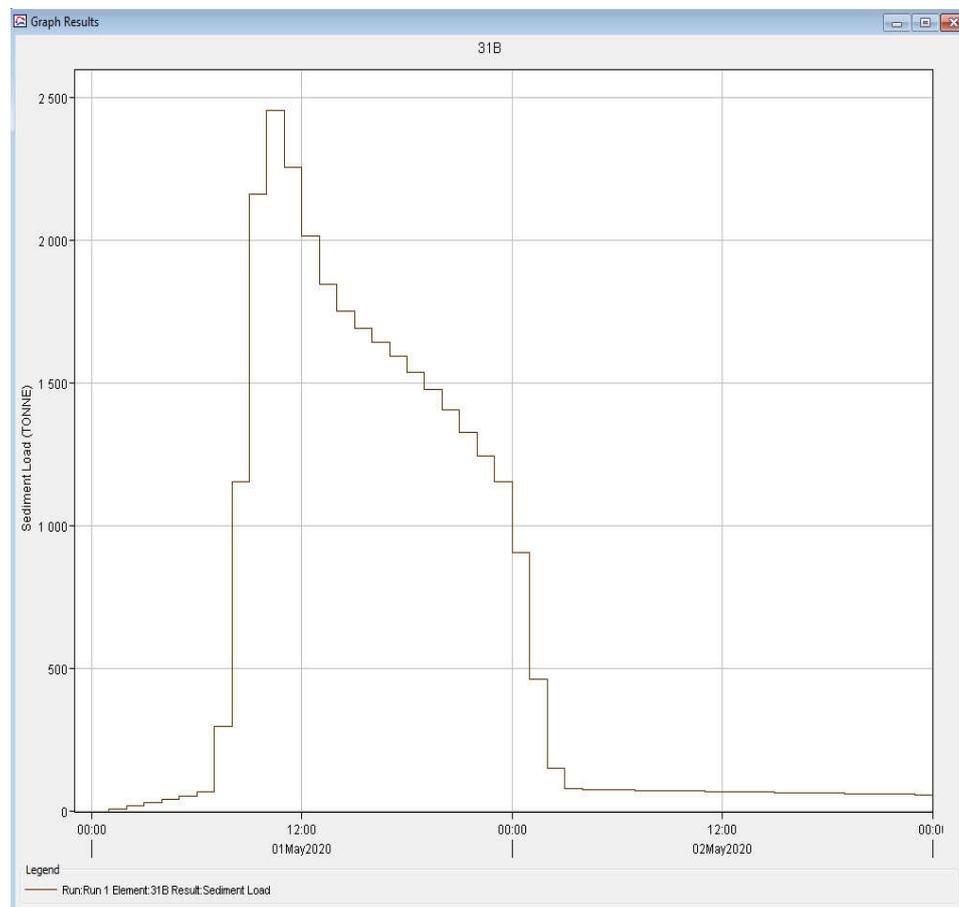
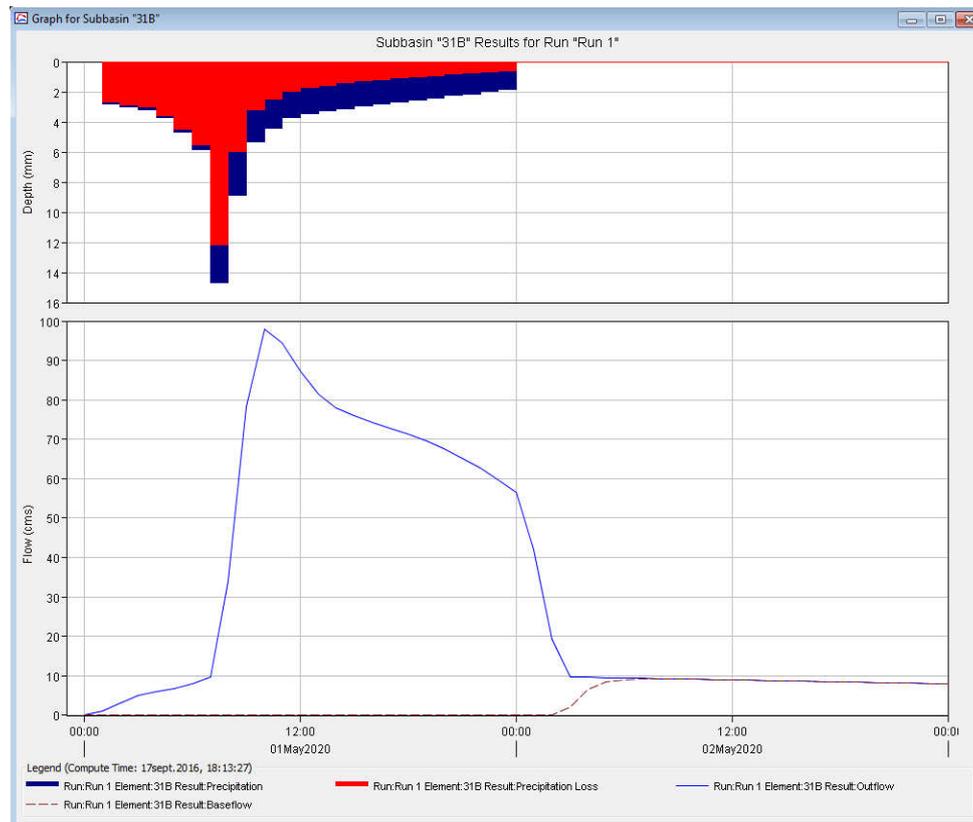
02-mai-20	18:00	1379.2
02-mai-20	19:00	1250.2
02-mai-20	20:00	1132.7
02-mai-20	21:00	1030.1
02-mai-20	22:00	947.9
02-mai-20	23:00	877.3
03-mai-20	00:00	910.2
Total		270607.9

B- Cas du Bassin Oued Chemora: Crue centennale

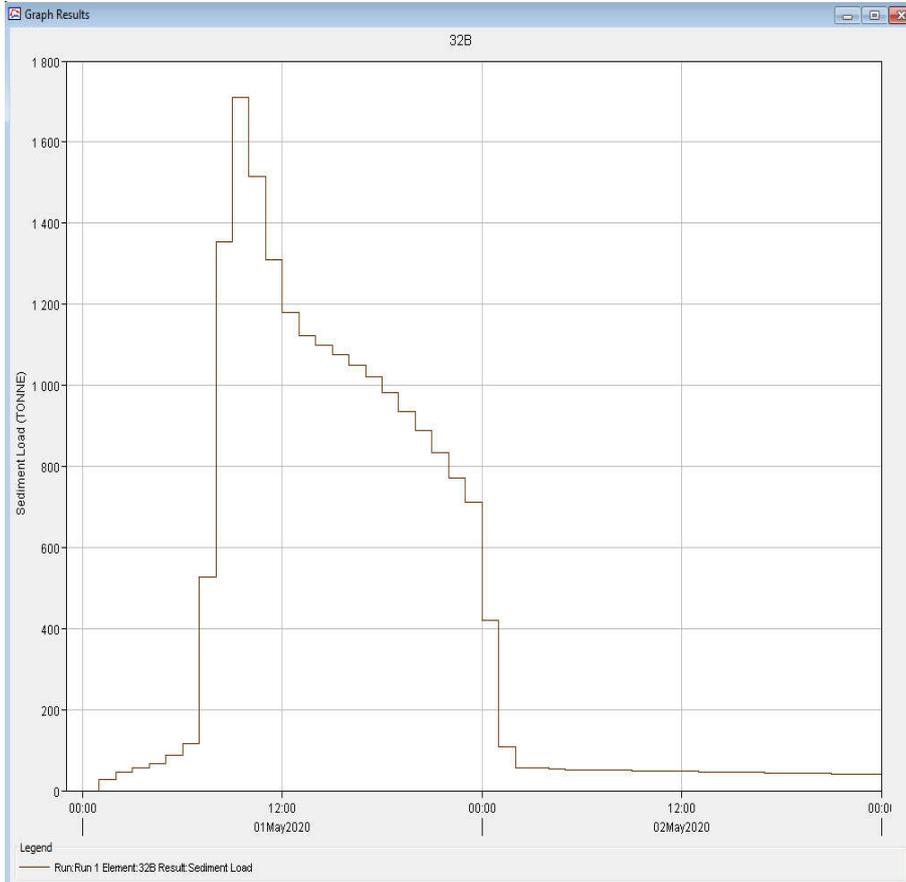
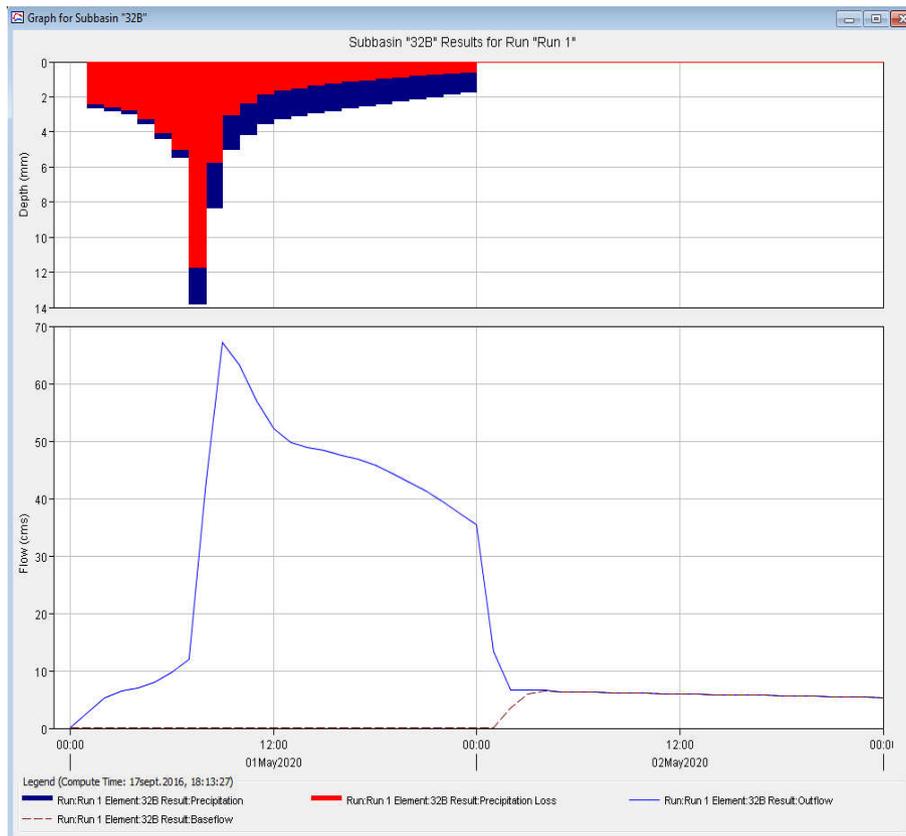
Apports liquides par sous bassins

Élément hydrologique	Surface drainante (km²)	Débit (m³/s)	Temps	Volume (mm)	Volume (10³ m3)
31B	155,4	98.0	01mai2020. 11:00	35.20	5469.6
32B	108,1	67.2	01mai2020. 10:00	33.59	3631.5
18C	108,1	67.2	01mai2020. 10:00	33.59	3631.5
18R	108,1	66.4	01mai2020. 10:00	33.59	3631.6
19C	263,5	161.4	01mai2020. 11:00	34.54	9101.3
19R	263,5	157.3	01mai2020. 11:00	34.41	9067.4
30B	31,5	9.5	01mai2020. 16:00	18.04	567.9
16C	295,0	166.8	01mai2020. 11:00	32.67	9635.3
16R	295,0	164.1	01mai2020. 11:00	32.57	9605.8
28B	81,0	23.6	01mai2020. 18:00	18.07	1462.9
20C	81,0	23.6	01mai2020. 18:00	18.07	1462.9
20R	81,0	23.6	01mai2020. 18:00	18.07	1463.1
27B	40,9	12.9	01mai2020. 17:00	20.39	833.1
21C	121,8	36.3	01mai2020. 18:00	18.85	2296.1
21R	121,8	36.3	01mai2020. 19:00	18.32	2231.2
26B	69,2	23.4	01mai2020. 17:00	20.58	1423.8
14C	191,0	59.7	01mai2020. 18:00	19.14	3655.1
14R	191,0	59.6	01mai2020. 18:00	19.10	3647.5
25B	32,6	13.7	01mai2020. 10:00	22.43	731.3
29B	21,6	10.8	01mai2020. 10:00	26.87	581.5
15C	21,6	10.8	01mai2020. 10:00	26.87	581.5
15R	21,6	10.7	01mai2020. 10:00	26.87	581.5
17C	540,2	223.2	01mai2020. 13:00	26.96	14566.2
17R	540,2	221.5	01mai2020. 14:00	26.88	14523.2
24B	99,8	39.7	01mai2020. 10:00	21.00	2096.6
13C	640,0	252.3	01mai2020. 14:00	25.97	16619.8
13R	640,0	251.1	01mai2020. 14:00	25.64	16408.0
23B	101,0	17.4	01mai2020. 20:00	10.38	1048.3
12C	741,0	263.9	01mai2020. 17:00	23.56	17456.3

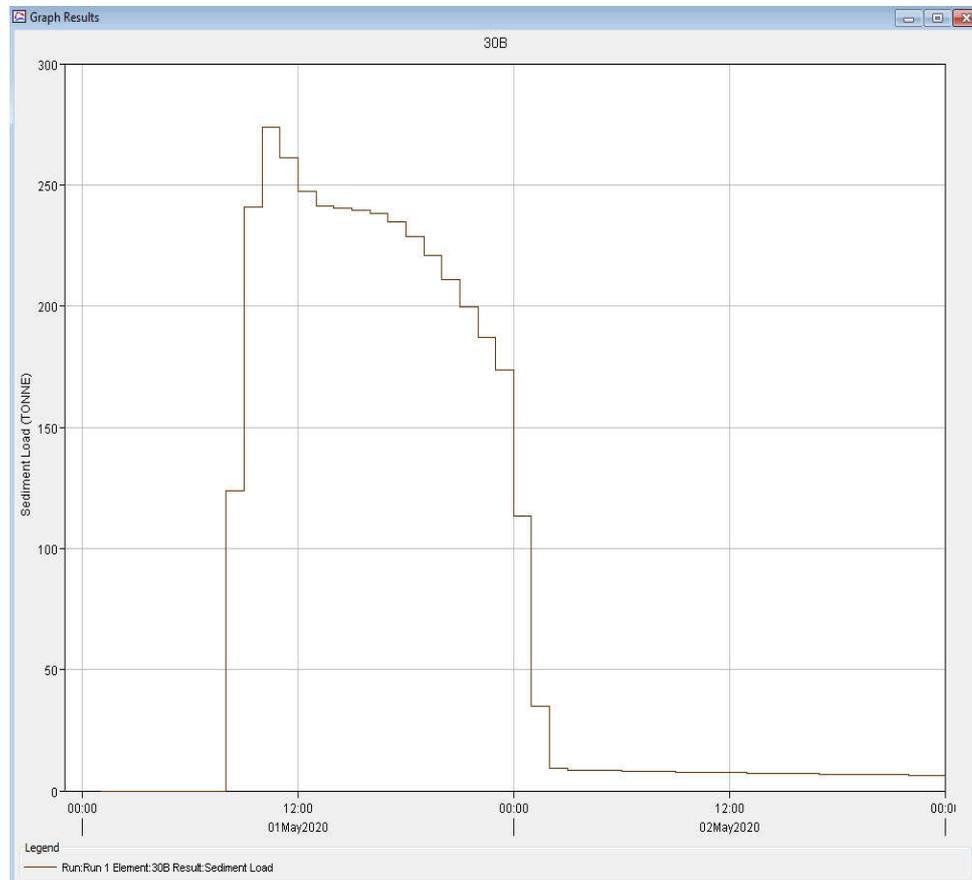
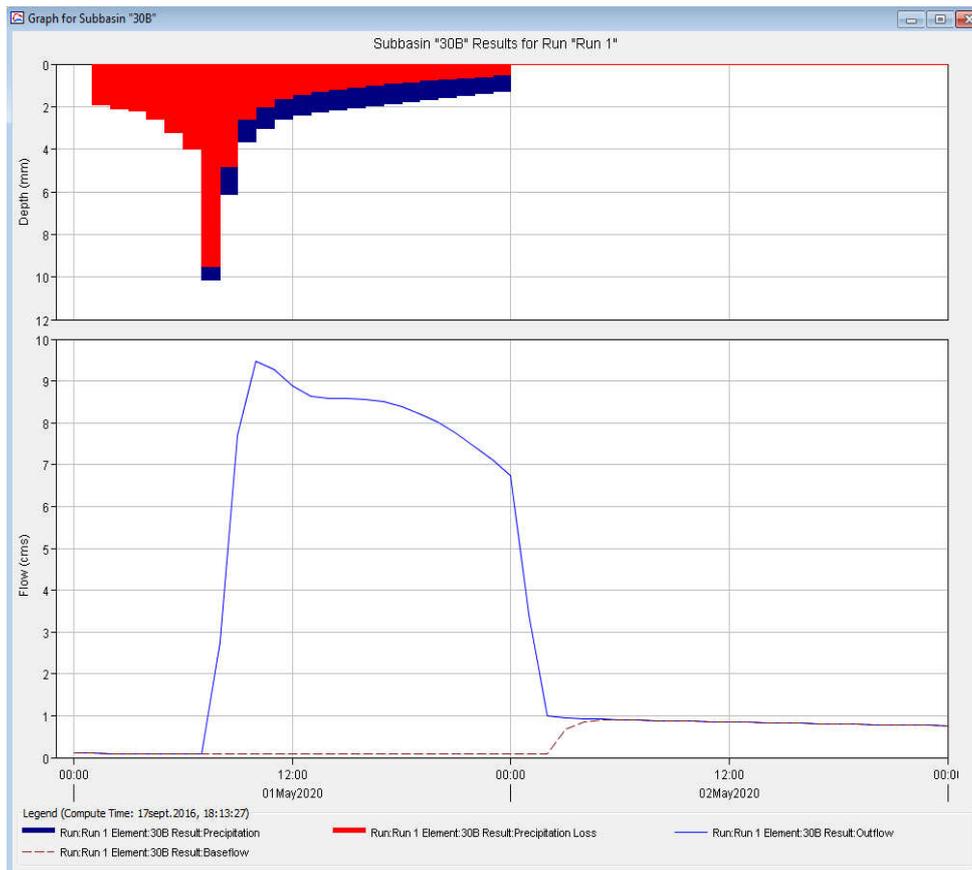
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 31:



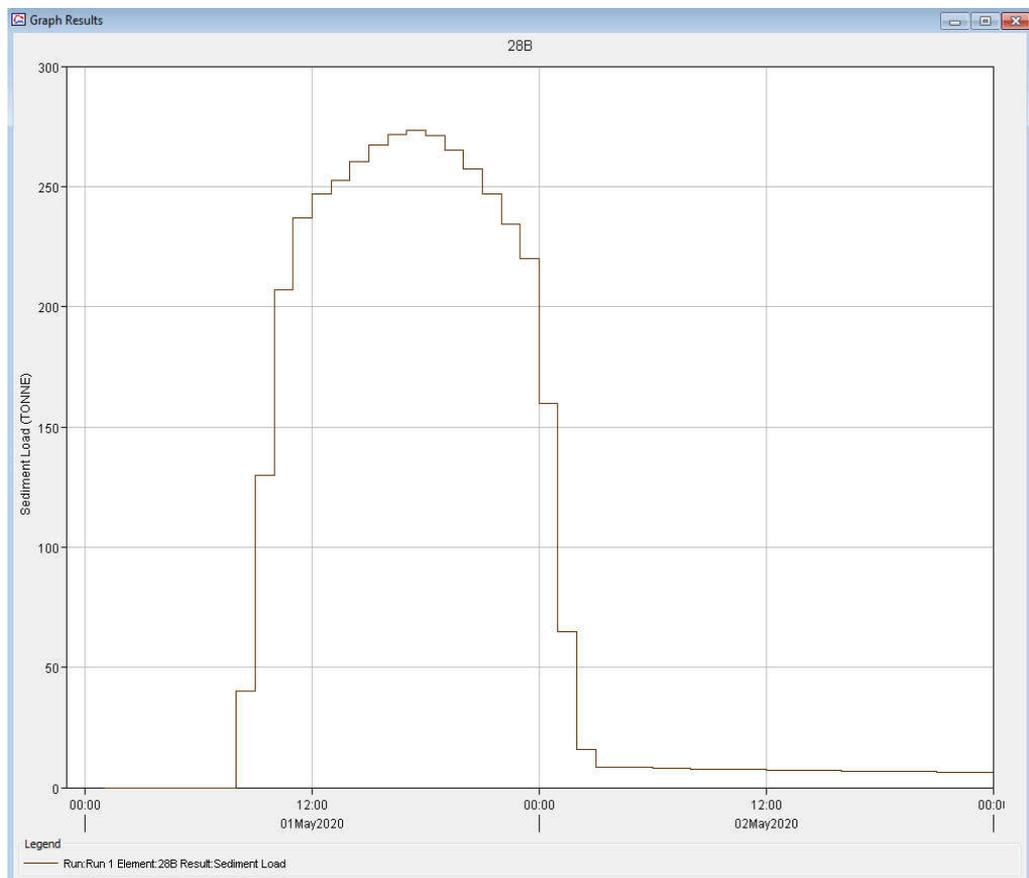
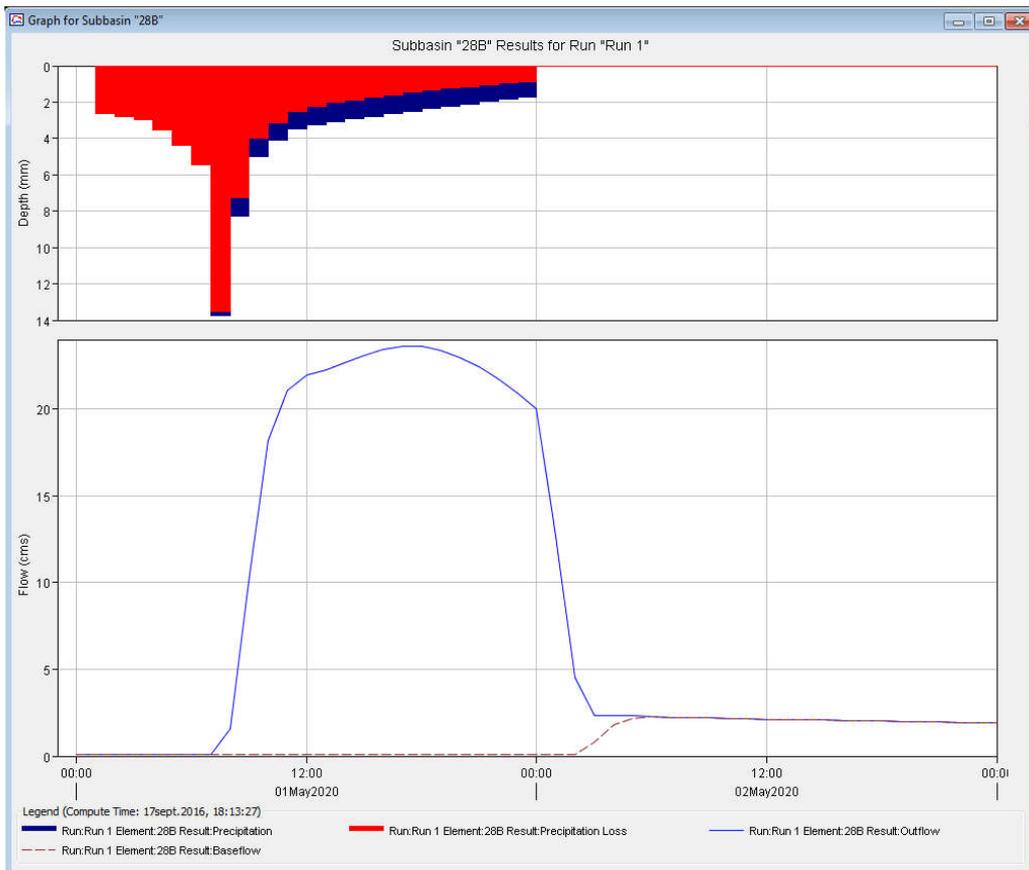
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 32:



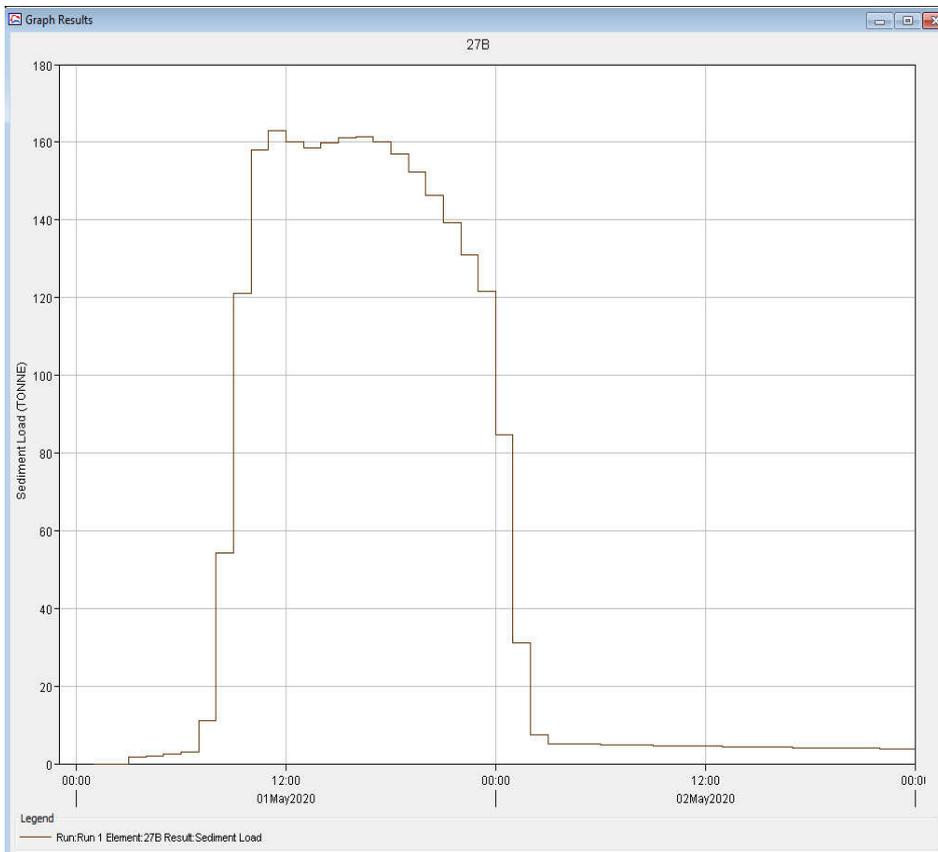
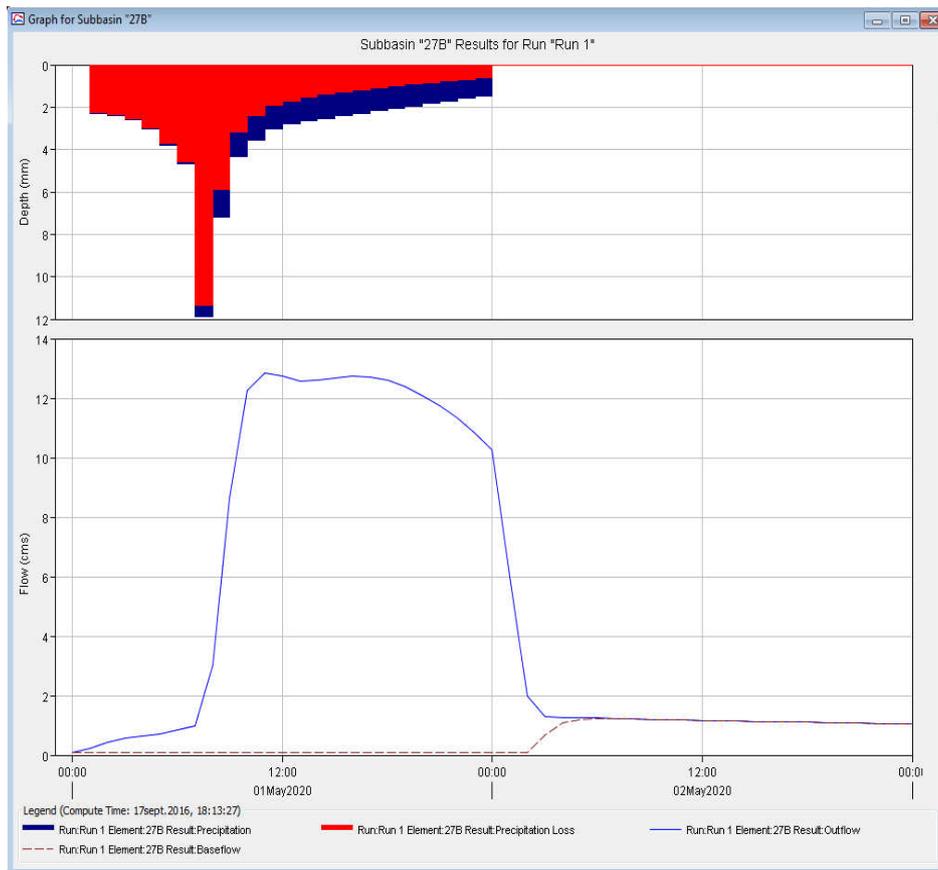
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 30:



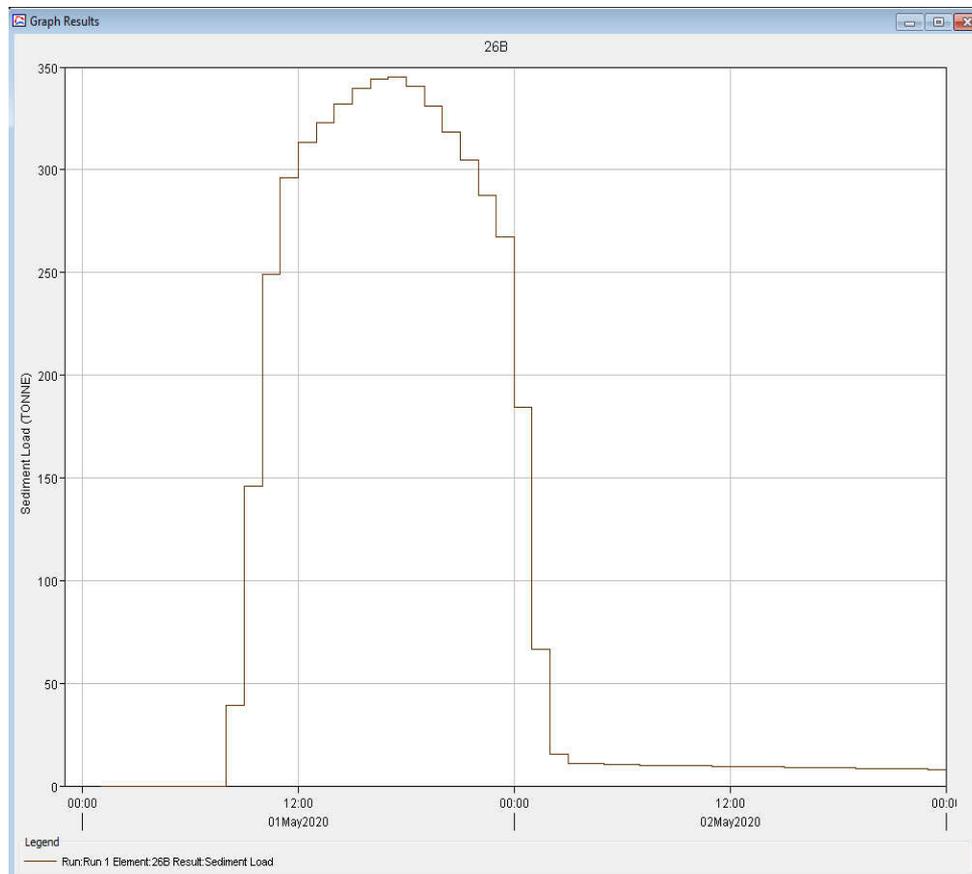
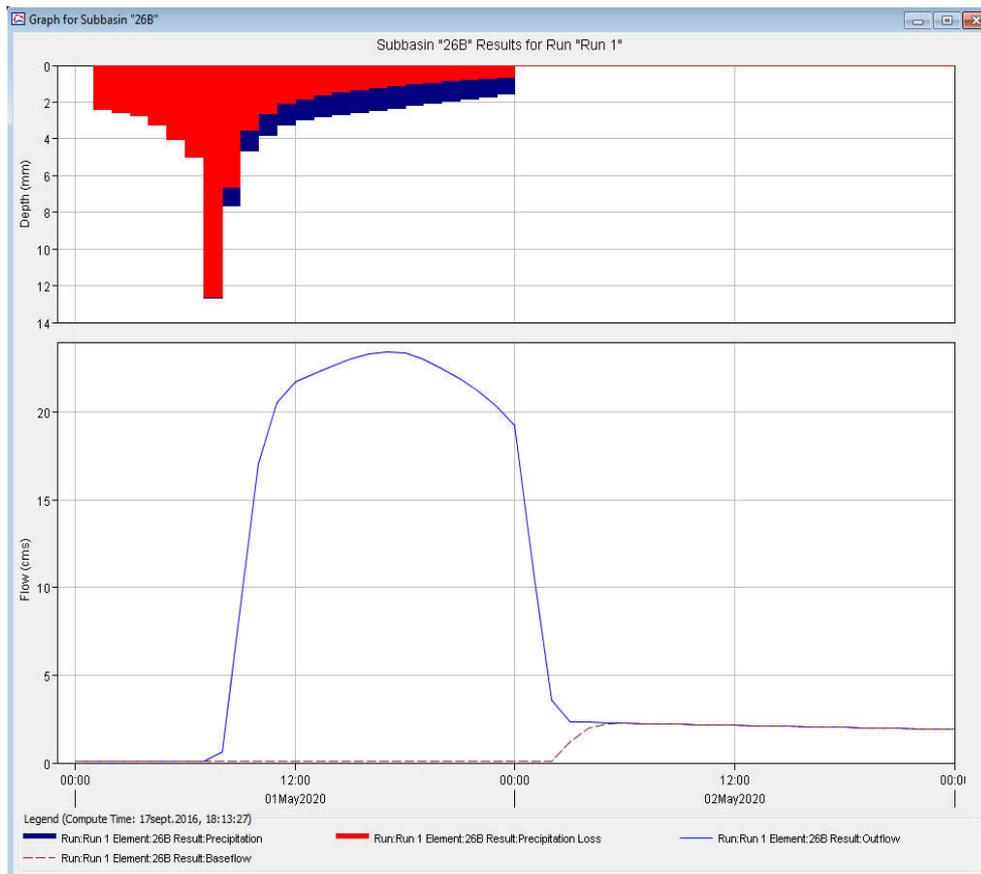
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 28:



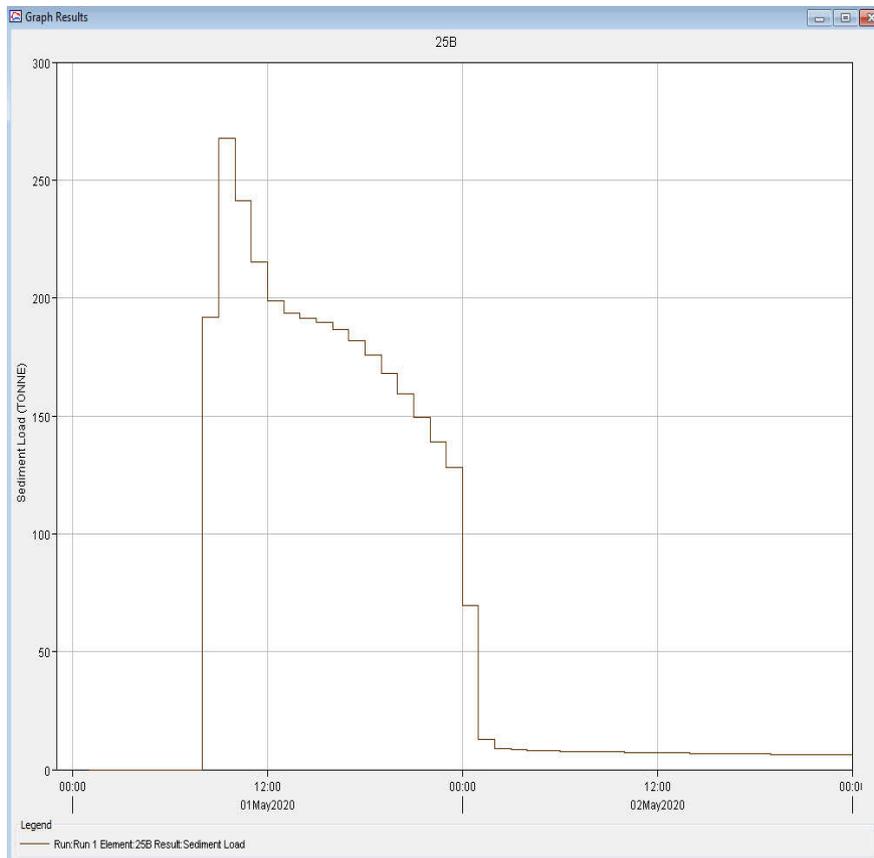
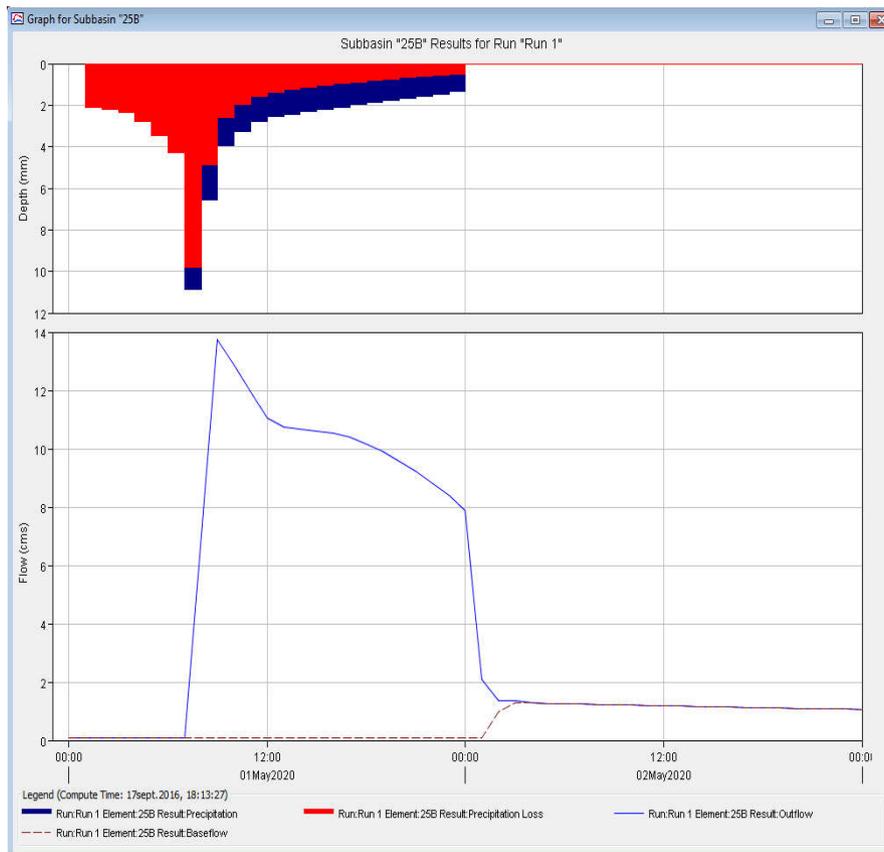
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 27:



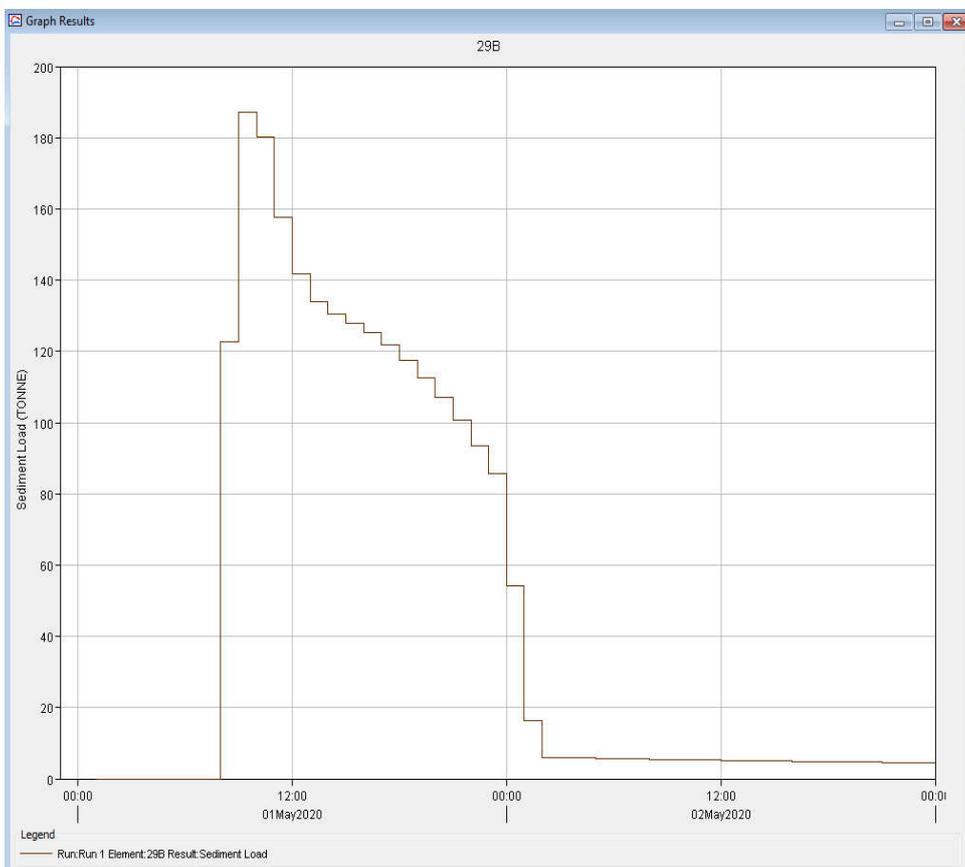
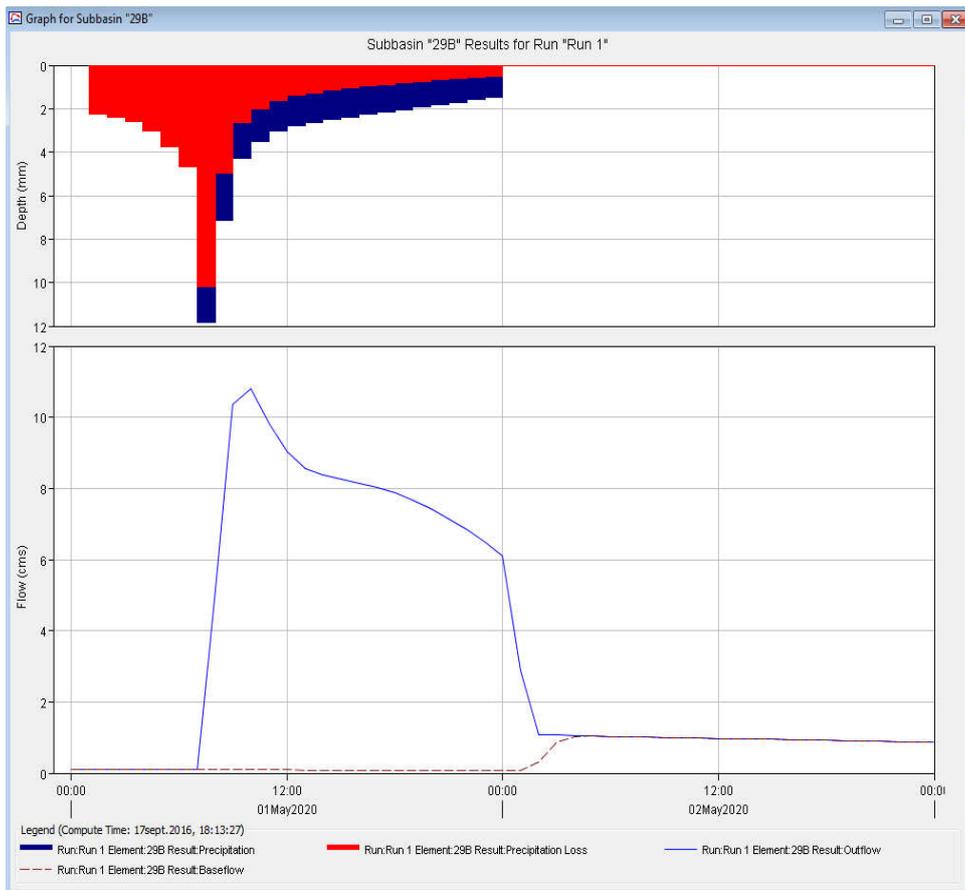
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 26:



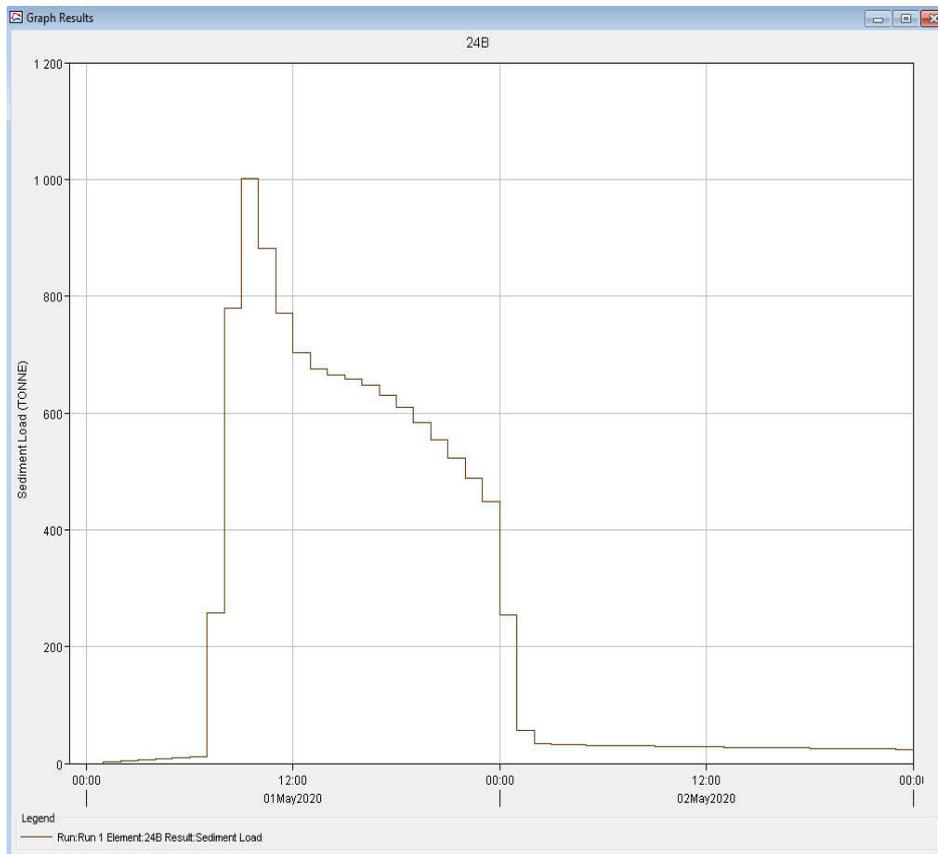
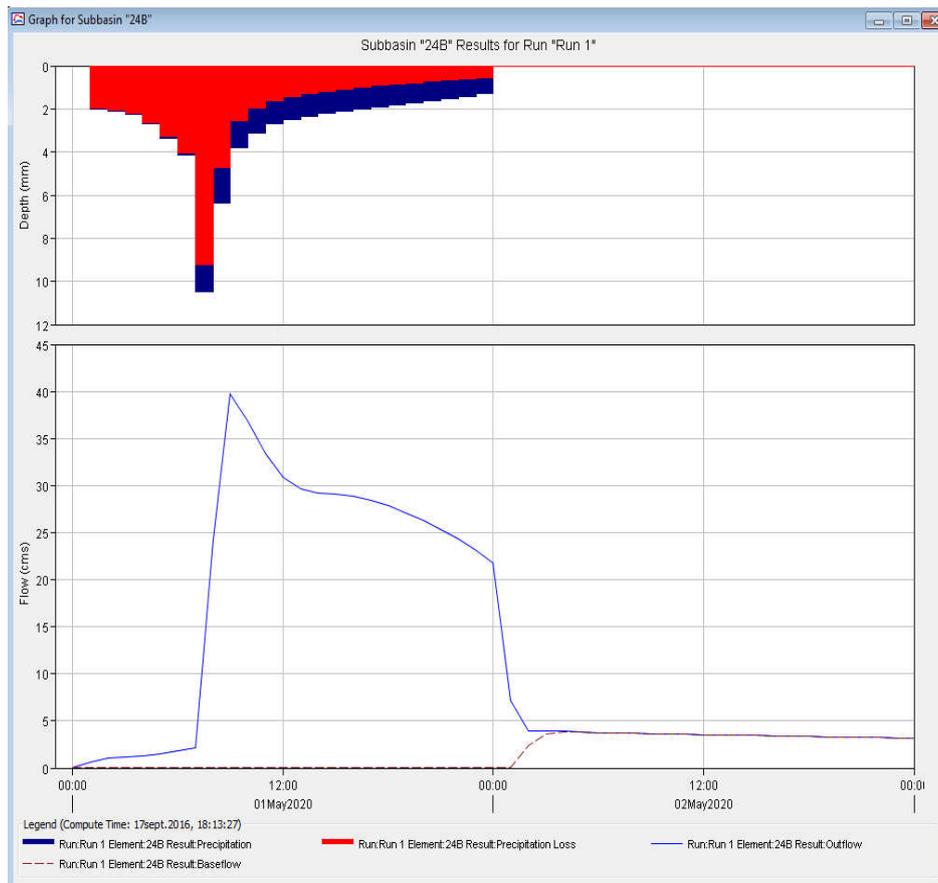
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 25:



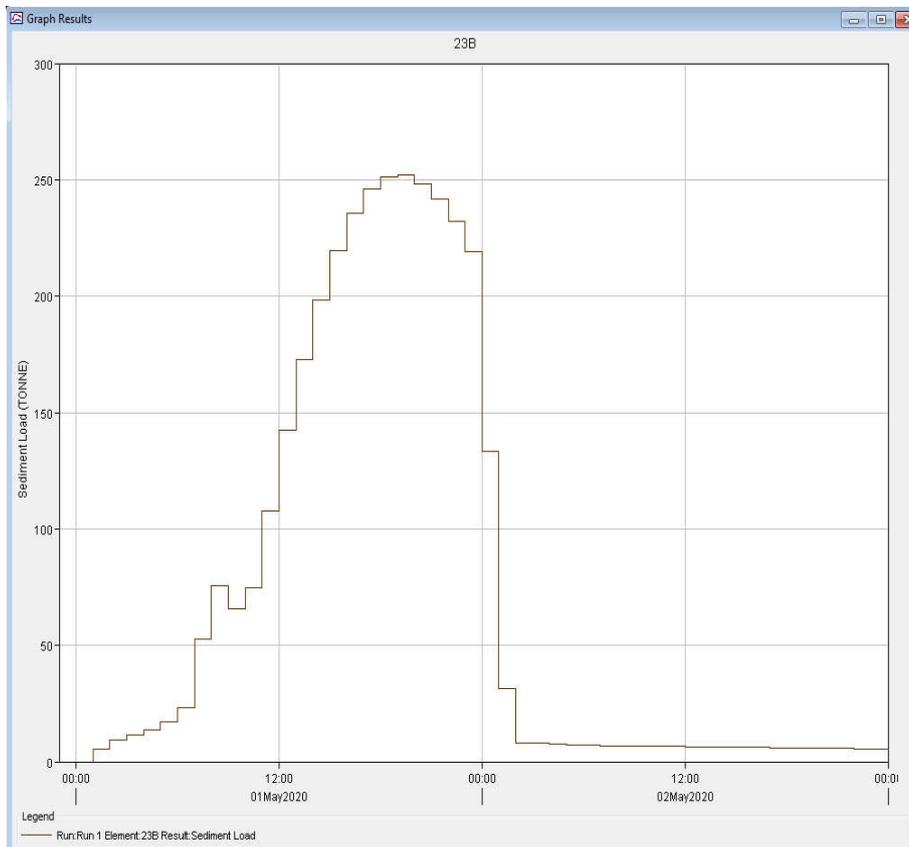
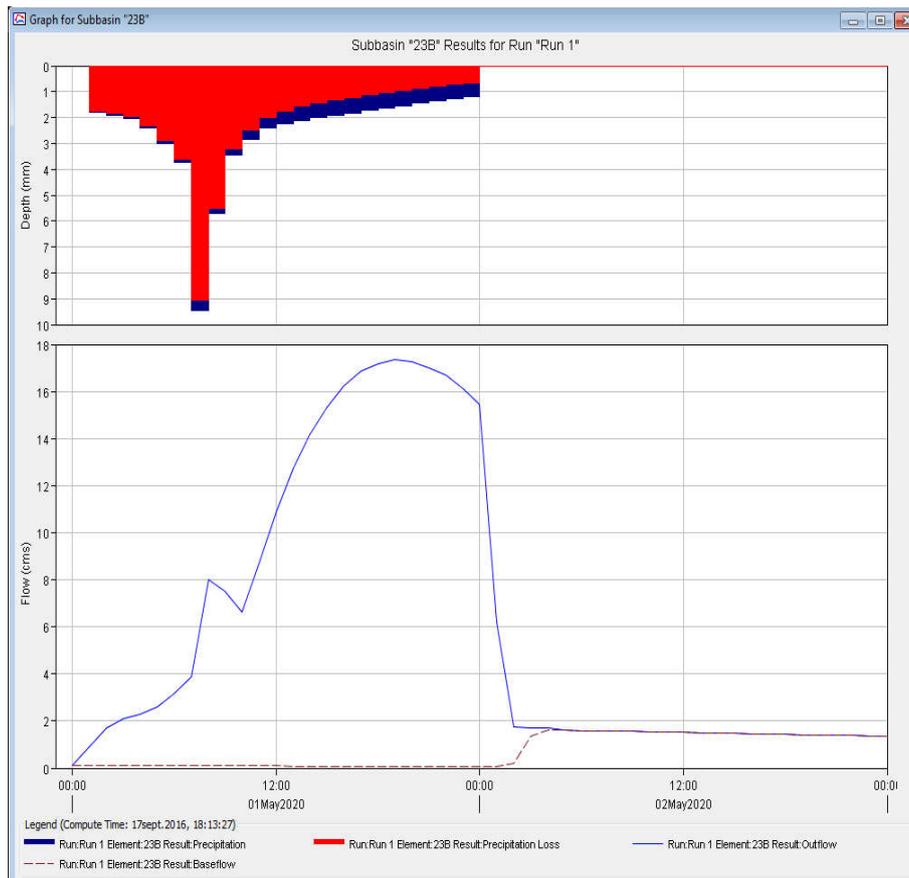
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 29:



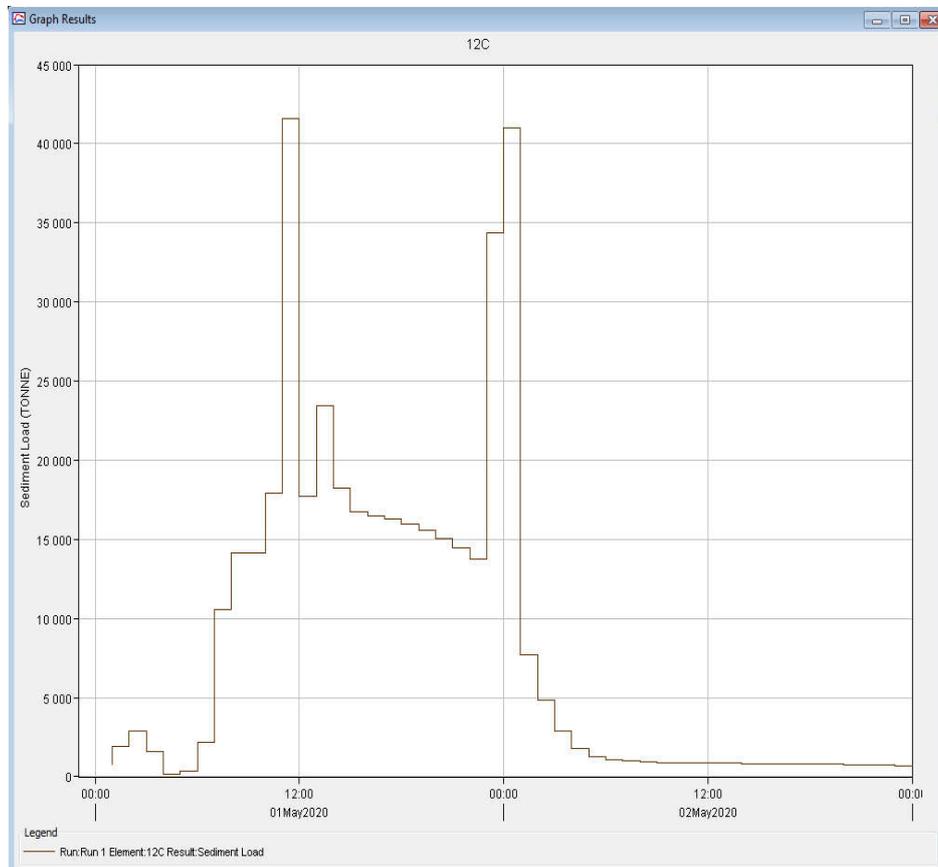
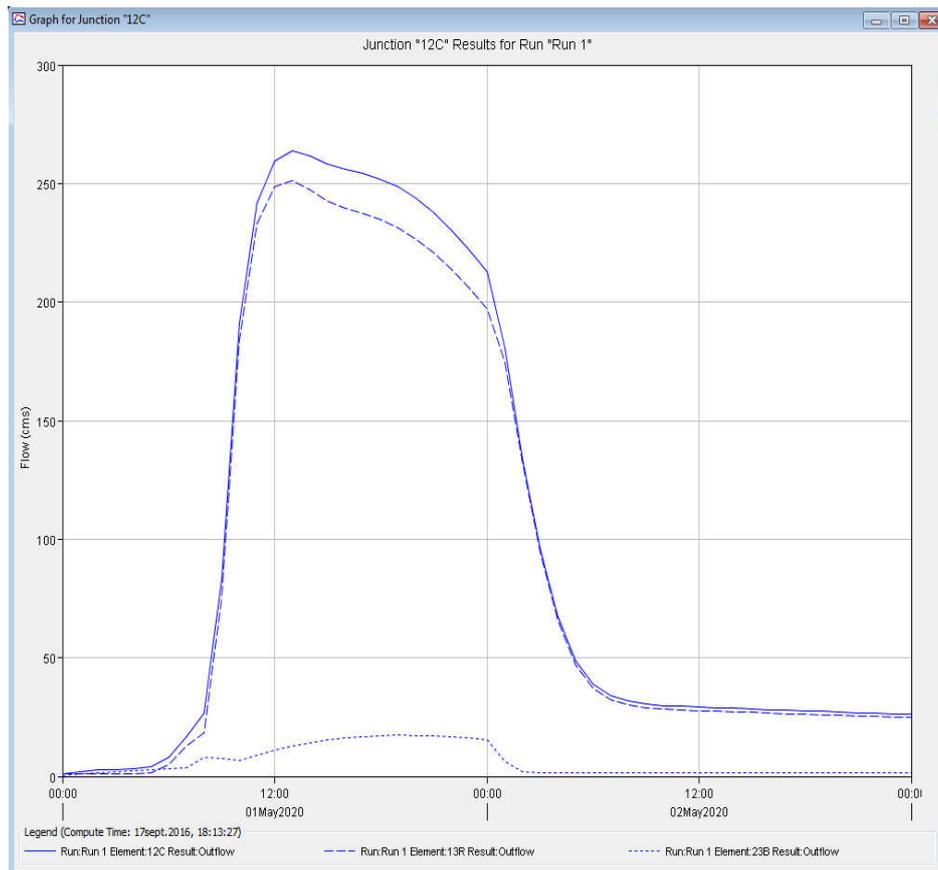
Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 24:

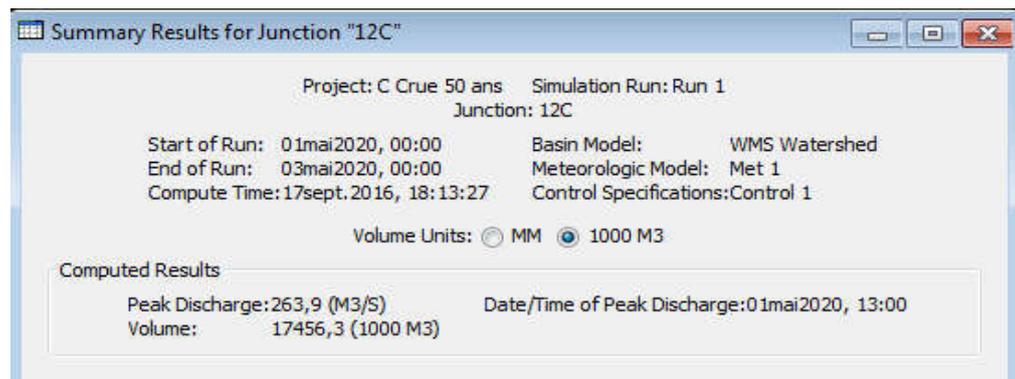
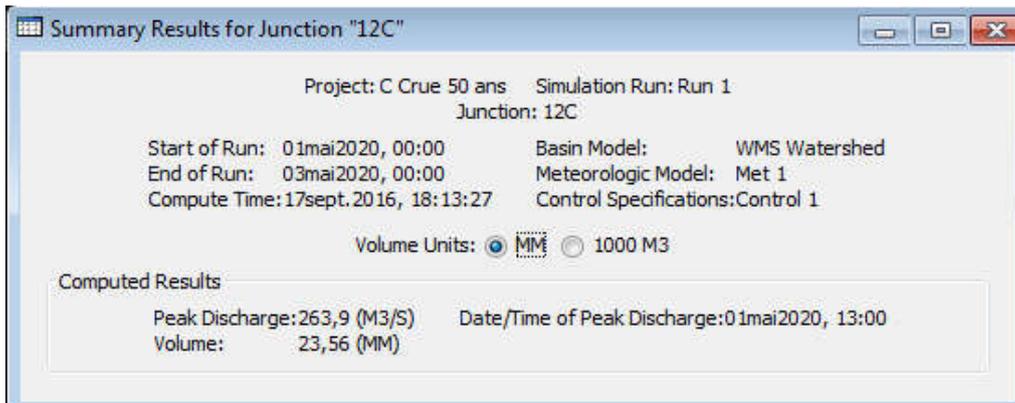


Précipitations, Débits liquides et Apports solides produits par le sous bassin n° 23



Débits liquides et apports solides simulés au nœud 12C (Station Chemora)





Débits liquides durant la crue à la station Chemora

Date	Temps	Débit entrant (m ³ /s)	Débit du bassin (m ³ /s)	Débit sortant (m ³ /s)
01-mai-20	00:00	0.9	0.1	1.0
01-mai-20	01:00	0.9	0.9	1.8
01-mai-20	02:00	0.9	1.7	2.6
01-mai-20	03:00	0.9	2.1	3.0
01-mai-20	04:00	1.0	2.3	3.3
01-mai-20	05:00	1.6	2.6	4.2
01-mai-20	06:00	4.8	3.2	7.9
01-mai-20	07:00	12.9	3.9	16.8
01-mai-20	08:00	18.5	8.0	26.5
01-mai-20	09:00	75.7	7.5	83.3
01-mai-20	10:00	184.1	6.6	190.8
01-mai-20	11:00	233.1	8.7	241.8
01-mai-20	12:00	248.4	10.9	259.3
01-mai-20	13:00	251.1	12.7	263.9
01-mai-20	14:00	247.3	14.2	261.5
01-mai-20	15:00	242.7	15.3	258.0
01-mai-20	16:00	239.6	16.2	255.8
01-mai-20	17:00	237.2	16.9	254.1
01-mai-20	18:00	234.6	17.2	251.8
01-mai-20	19:00	231.1	17.4	248.5
01-mai-20	20:00	226.5	17.3	243.8
01-mai-20	21:00	220.7	17.0	237.7
01-mai-20	22:00	213.9	16.7	230.6
01-mai-20	23:00	206.0	16.1	222.2
02-mai-20	00:00	197.2	15.4	212.7
02-mai-20	01:00	174.4	6.2	180.6
02-mai-20	02:00	132.2	1.7	133.9
02-mai-20	03:00	94.2	1.7	95.9
02-mai-20	04:00	65.7	1.7	67.4
02-mai-20	05:00	47.3	1.6	48.9
02-mai-20	06:00	37.1	1.6	38.7
02-mai-20	07:00	32.3	1.6	33.9
02-mai-20	08:00	30.1	1.6	31.6
02-mai-20	09:00	28.9	1.6	30.5
02-mai-20	10:00	28.3	1.5	29.9
02-mai-20	11:00	28.0	1.5	29.5
02-mai-20	12:00	27.7	1.5	29.2
02-mai-20	13:00	27.4	1.5	28.9
02-mai-20	14:00	27.1	1.5	28.6
02-mai-20	15:00	26.9	1.5	28.4
02-mai-20	16:00	26.6	1.5	28.1
02-mai-20	17:00	26.4	1.4	27.8

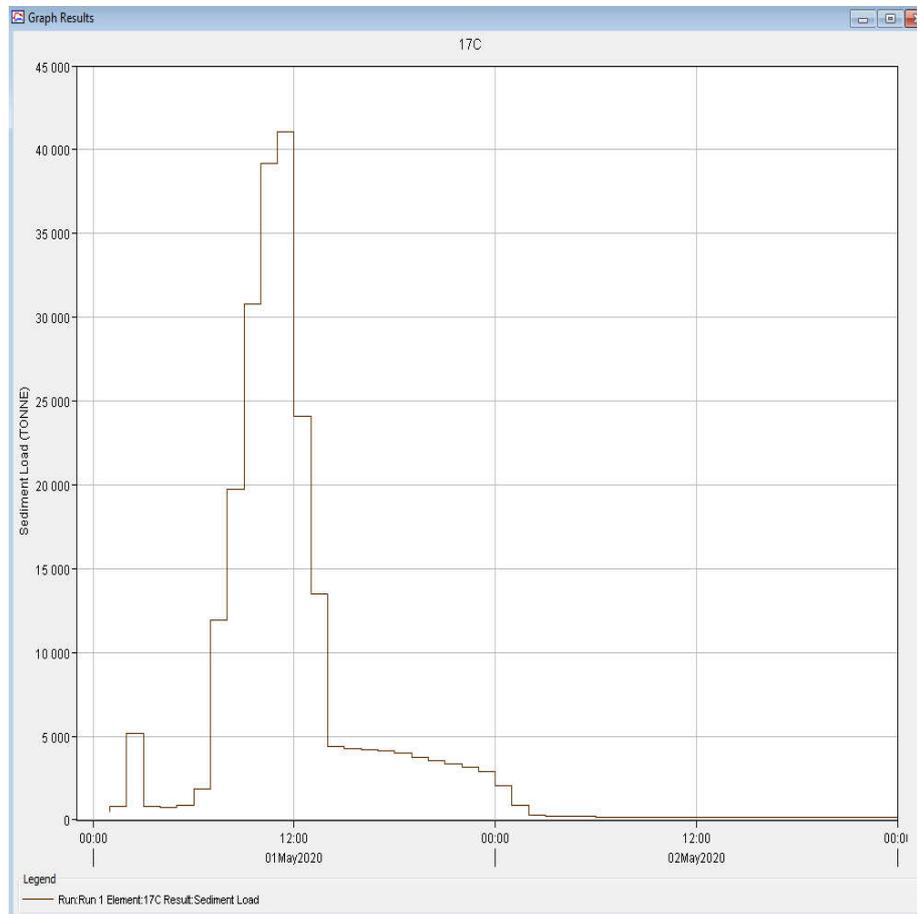
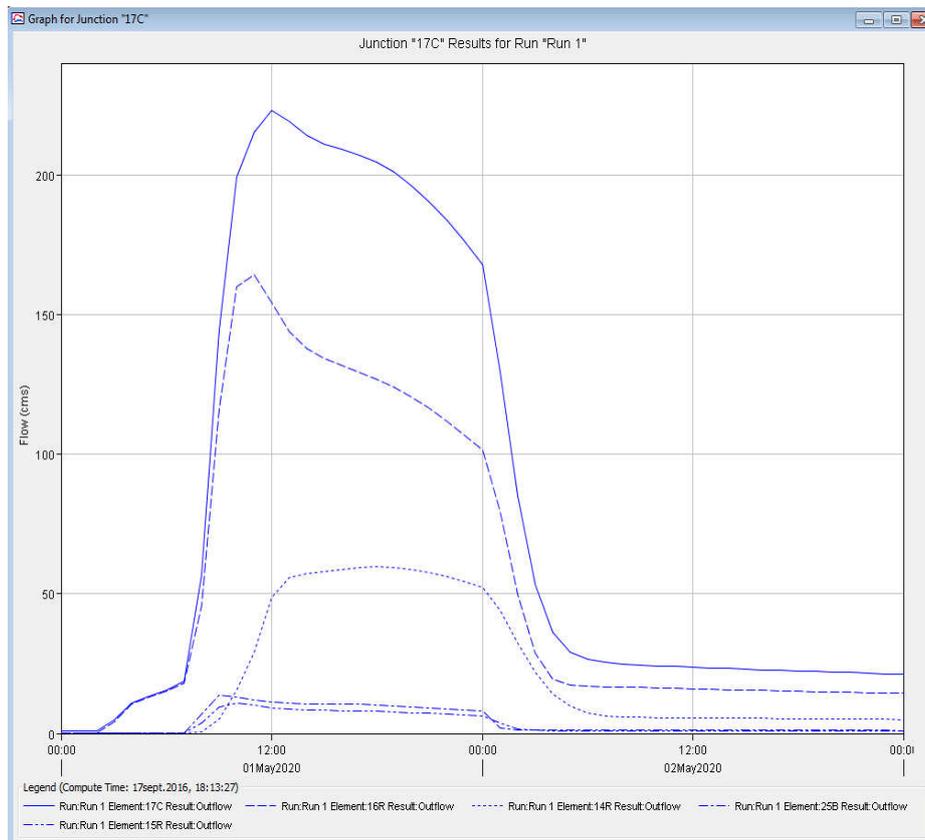
02-mai-20	18:00	26.2	1.4	27.6
02-mai-20	19:00	25.9	1.4	27.3
02-mai-20	20:00	25.7	1.4	27.1
02-mai-20	21:00	25.4	1.4	26.8
02-mai-20	22:00	25.2	1.4	26.6
02-mai-20	23:00	25.0	1.4	26.3
03-mai-20	00:00	24.8	1.3	26.1

Apports solides durant la crue à la station Chemora

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	726.7
01-mai-20	01:00	1950.2
01-mai-20	02:00	2861.4
01-mai-20	03:00	1601.9
01-mai-20	04:00	178.5
01-mai-20	05:00	377.0
01-mai-20	06:00	2153.0
01-mai-20	07:00	10578.8
01-mai-20	08:00	14175.9
01-mai-20	09:00	14118.5
01-mai-20	10:00	17939.1
01-mai-20	11:00	41598.9
01-mai-20	12:00	17701.7
01-mai-20	13:00	23420.8
01-mai-20	14:00	18212.3
01-mai-20	15:00	16752.3
01-mai-20	16:00	16513.9
01-mai-20	17:00	16288.8
01-mai-20	18:00	15990.8
01-mai-20	19:00	15583.6
01-mai-20	20:00	15072.6
01-mai-20	21:00	14469.4
01-mai-20	22:00	13776.2
01-mai-20	23:00	34340.4
02-mai-20	00:00	40993.5
02-mai-20	01:00	7728.7
02-mai-20	02:00	4826.7
02-mai-20	03:00	2916.6
02-mai-20	04:00	1809.3
02-mai-20	05:00	1300.5
02-mai-20	06:00	1070.1
02-mai-20	07:00	976.5
02-mai-20	08:00	928.5
02-mai-20	09:00	904.3
02-mai-20	10:00	887.5
02-mai-20	11:00	874.7
02-mai-20	12:00	862.7
02-mai-20	13:00	851.2
02-mai-20	14:00	840.5
02-mai-20	15:00	829.6
02-mai-20	16:00	818.9
02-mai-20	17:00	808.7

02-mai-20	18:00	798.1
02-mai-20	19:00	787.9
02-mai-20	20:00	778.0
02-mai-20	21:00	768.0
02-mai-20	22:00	758.0
02-mai-20	23:00	660.8
03-mai-20	00:00	726.7
Total		401162.0

Débits liquides et apports solides simulés au nœud 17C (Site du barrage Kodiet Medaouer)



Summary Results for Junction "17C"

Project: C Crue 50 ans Simulation Run: Run 1
Junction: 17C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 17sept. 2016, 18:13:27 Control Specifications: Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 223,2 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 12:00
Volume: 26,96 (MM)

Summary Results for Junction "17C"

Project: C Crue 50 ans Simulation Run: Run 1
Junction: 17C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 17sept. 2016, 18:13:27 Control Specifications: Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 223,2 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 12:00
Volume: 14566,2 (1000 M3)

Débits liquides durant la crue au ite du barrage Kodiet Medaouer

Date	Temps	Débit entrant 16 R (m³/s)	Débit entrant 14 R (m³/s)	Débit entrant 25 R (m³/s)	Débit entrant 15 R (m³/s)	Débit sortant 17 C (m³/s)
01-mai-20	00:00	0.3	0.3	0.1	0.1	0.8
01-mai-20	01:00	0.3	0.3	0.1	0.1	0.8
01-mai-20	02:00	0.3	0.3	0.1	0.1	0.8
01-mai-20	03:00	4.2	0.3	0.1	0.1	4.7
01-mai-20	04:00	10.4	0.3	0.1	0.1	10.9
01-mai-20	05:00	12.9	0.3	0.1	0.1	13.3
01-mai-20	06:00	15.0	0.3	0.1	0.1	15.5
01-mai-20	07:00	18.1	0.3	0.1	0.1	18.5
01-mai-20	08:00	45.7	0.4	7.0	3.7	56.8
01-mai-20	09:00	116.1	5.3	13.7	9.3	144.4
01-mai-20	10:00	159.8	15.7	12.9	10.7	199.1
01-mai-20	11:00	164.1	29.2	11.9	10.0	215.2
01-mai-20	12:00	154.1	48.8	11.1	9.2	223.2
01-mai-20	13:00	144.1	55.7	10.8	8.7	219.2
01-mai-20	14:00	137.7	57.2	10.7	8.4	214.0
01-mai-20	15:00	134.2	57.9	10.6	8.3	211.0
01-mai-20	16:00	131.6	58.7	10.5	8.2	209.0
01-mai-20	17:00	129.3	59.3	10.4	8.1	207.1
01-mai-20	18:00	126.8	59.6	10.2	7.9	204.5
01-mai-20	19:00	123.8	59.4	9.9	7.7	200.8
01-mai-20	20:00	120.3	58.7	9.6	7.5	196.1
01-mai-20	21:00	116.4	57.5	9.2	7.2	190.4
01-mai-20	22:00	111.9	56.1	8.8	6.9	183.7
01-mai-20	23:00	106.9	54.3	8.4	6.6	176.2
02-mai-20	00:00	101.6	52.1	7.9	6.2	167.8
02-mai-20	01:00	79.3	44.1	2.1	3.8	129.2
02-mai-20	02:00	49.6	32.4	1.4	1.7	85.1
02-mai-20	03:00	28.9	21.9	1.4	1.1	53.2
02-mai-20	04:00	19.5	14.2	1.3	1.1	36.1
02-mai-20	05:00	17.2	9.7	1.3	1.1	29.1
02-mai-20	06:00	16.9	7.4	1.3	1.0	26.6
02-mai-20	07:00	16.7	6.4	1.2	1.0	25.4
02-mai-20	08:00	16.6	5.9	1.2	1.0	24.7
02-mai-20	09:00	16.4	5.8	1.2	1.0	24.4
02-mai-20	10:00	16.2	5.7	1.2	1.0	24.2
02-mai-20	11:00	16.1	5.6	1.2	1.0	23.9
02-mai-20	12:00	15.9	5.6	1.2	1.0	23.7
02-mai-20	13:00	15.8	5.5	1.2	1.0	23.5
02-mai-20	14:00	15.7	5.5	1.2	1.0	23.2
02-mai-20	15:00	15.5	5.4	1.2	0.9	23.0
02-mai-20	16:00	15.4	5.4	1.1	0.9	22.8
02-mai-20	17:00	15.2	5.3	1.1	0.9	22.6

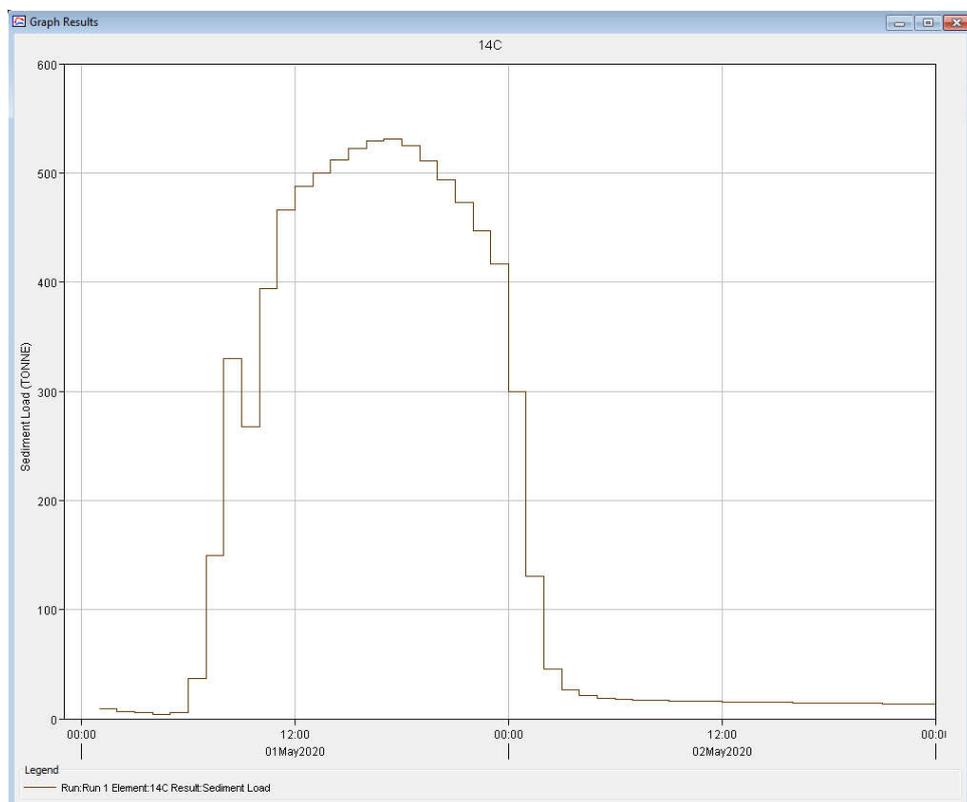
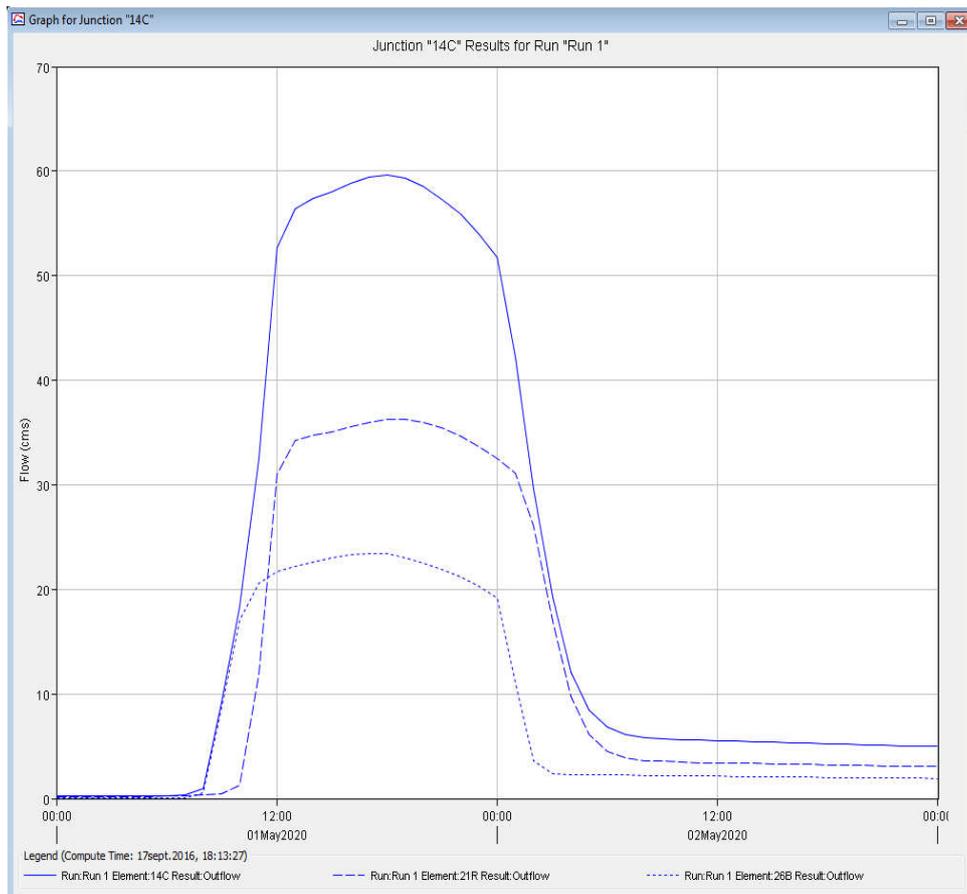
02-mai-20	18:00	15.1	5.3	1.1	0.9	22.4
02-mai-20	19:00	14.9	5.2	1.1	0.9	22.2
02-mai-20	20:00	14.8	5.2	1.1	0.9	22.0
02-mai-20	21:00	14.7	5.1	1.1	0.9	21.8
02-mai-20	22:00	14.5	5.1	1.1	0.9	21.6
02-mai-20	23:00	14.4	5.0	1.1	0.9	21.4
03-mai-20	00:00	14.3	5.0	1.1	0.9	21.2

Apports solides durant la crue au ite du barrage Kodiet Medaouer

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	
01-mai-20	01:00	515.3
01-mai-20	02:00	799.3
01-mai-20	03:00	5197.9
01-mai-20	04:00	807.7
01-mai-20	05:00	736.2
01-mai-20	06:00	886.2
01-mai-20	07:00	1881.4
01-mai-20	08:00	11941.2
01-mai-20	09:00	19762.4
01-mai-20	10:00	30790.0
01-mai-20	11:00	39210.3
01-mai-20	12:00	41070.0
01-mai-20	13:00	24090.5
01-mai-20	14:00	13508.7
01-mai-20	15:00	4368.2
01-mai-20	16:00	4286.1
01-mai-20	17:00	4198.6
01-mai-20	18:00	4100.5
01-mai-20	19:00	3972.7
01-mai-20	20:00	3761.0
01-mai-20	21:00	3561.2
01-mai-20	22:00	3368.5
01-mai-20	23:00	3152.4
02-mai-20	00:00	2900.8
02-mai-20	01:00	2050.4
02-mai-20	02:00	854.6
02-mai-20	03:00	316.6
02-mai-20	04:00	217.7
02-mai-20	05:00	203.8
02-mai-20	06:00	197.4
02-mai-20	07:00	193.7
02-mai-20	08:00	190.5
02-mai-20	09:00	187.8
02-mai-20	10:00	184.9
02-mai-20	11:00	182.5
02-mai-20	12:00	179.9
02-mai-20	13:00	177.5
02-mai-20	14:00	175.1
02-mai-20	15:00	172.7
02-mai-20	16:00	170.4
02-mai-20	17:00	163.8

02-mai-20	18:00	141.4
02-mai-20	19:00	139.5
02-mai-20	20:00	137.6
02-mai-20	21:00	135.7
02-mai-20	22:00	133.8
02-mai-20	23:00	131.8
03-mai-20	00:00	130.2
Total		235636.4

Débits liquides et apports solides simulés au nœud 14C (Oued Soudhes)



Summary Results for Junction "14C"

Project: C Crue 50 ans Simulation Run: Run 1
Junction: 14C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 17sept.2016, 18:13:27 Control Specifications: Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 59,7 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 18:00
Volume: 19,14 (MM)

Summary Results for Junction "14C"

Project: C Crue 50 ans Simulation Run: Run 1
Junction: 14C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 17sept.2016, 18:13:27 Control Specifications: Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 59,7 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 18:00
Volume: 3655,1 (1000 M3)

Débits liquides durant la crue Oued Soudhes

Date	Temps	Débit entrant (m ³ /s)	Débit du bassin (m ³ /s)	Débit sortant (m ³ /s)
01-mai-20	00:00	0.2	0.1	0.3
01-mai-20	01:00	0.2	0.1	0.3
01-mai-20	02:00	0.2	0.1	0.3
01-mai-20	03:00	0.2	0.1	0.3
01-mai-20	04:00	0.2	0.1	0.3
01-mai-20	05:00	0.2	0.1	0.3
01-mai-20	06:00	0.2	0.1	0.3
01-mai-20	07:00	0.3	0.1	0.4
01-mai-20	08:00	0.4	0.6	1.0
01-mai-20	09:00	0.5	8.6	9.1
01-mai-20	10:00	1.3	17.1	18.4
01-mai-20	11:00	11.9	20.6	32.5
01-mai-20	12:00	31.0	21.7	52.7
01-mai-20	13:00	34.2	22.2	56.4
01-mai-20	14:00	34.7	22.6	57.4
01-mai-20	15:00	35.0	23.0	58.0
01-mai-20	16:00	35.5	23.3	58.8
01-mai-20	17:00	36.0	23.4	59.4
01-mai-20	18:00	36.3	23.4	59.7
01-mai-20	19:00	36.3	23.0	59.3
01-mai-20	20:00	36.0	22.5	58.5
01-mai-20	21:00	35.4	21.9	57.3
01-mai-20	22:00	34.7	21.2	55.8
01-mai-20	23:00	33.7	20.3	54.0
02-mai-20	00:00	32.5	19.2	51.7
02-mai-20	01:00	31.1	11.1	42.2
02-mai-20	02:00	26.1	3.5	29.6
02-mai-20	03:00	17.0	2.3	19.3
02-mai-20	04:00	9.7	2.3	12.0
02-mai-20	05:00	6.1	2.3	8.4
02-mai-20	06:00	4.5	2.3	6.8
02-mai-20	07:00	3.9	2.2	6.1
02-mai-20	08:00	3.6	2.2	5.8
02-mai-20	09:00	3.6	2.2	5.8
02-mai-20	10:00	3.5	2.2	5.7
02-mai-20	11:00	3.4	2.2	5.6
02-mai-20	12:00	3.4	2.1	5.5
02-mai-20	13:00	3.4	2.1	5.5
02-mai-20	14:00	3.3	2.1	5.4
02-mai-20	15:00	3.3	2.1	5.4
02-mai-20	16:00	3.3	2.1	5.3
02-mai-20	17:00	3.3	2.0	5.3

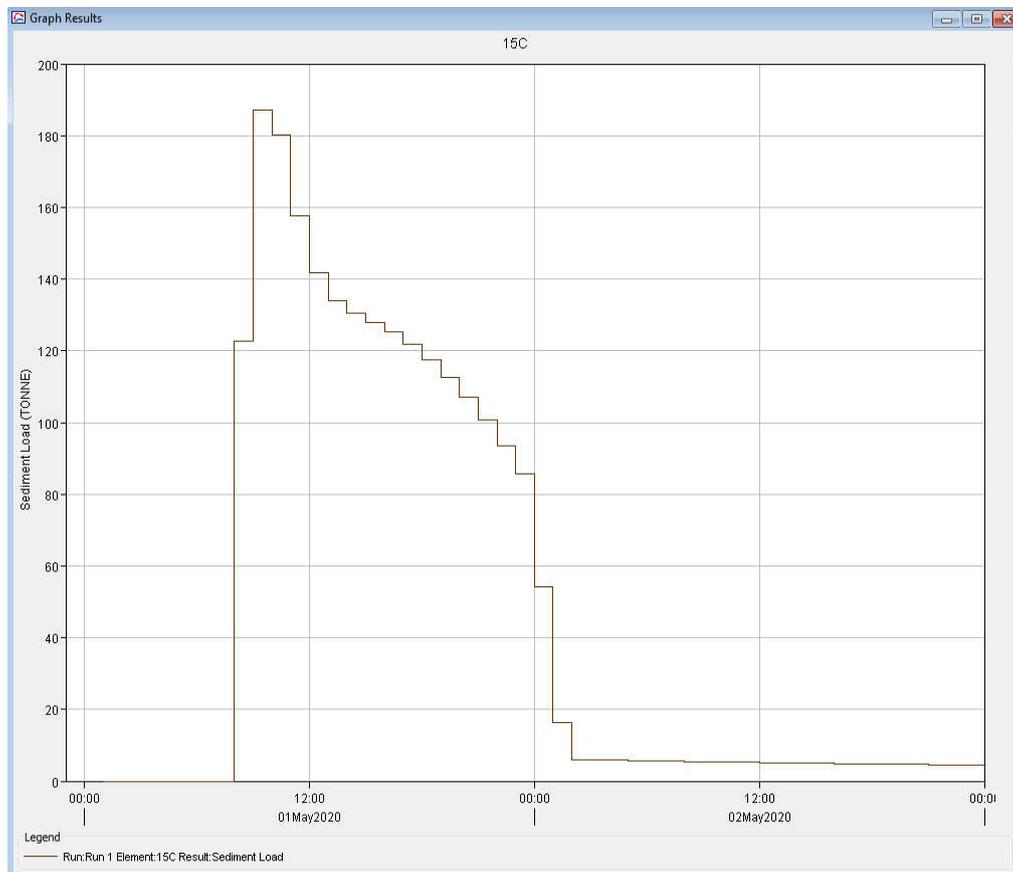
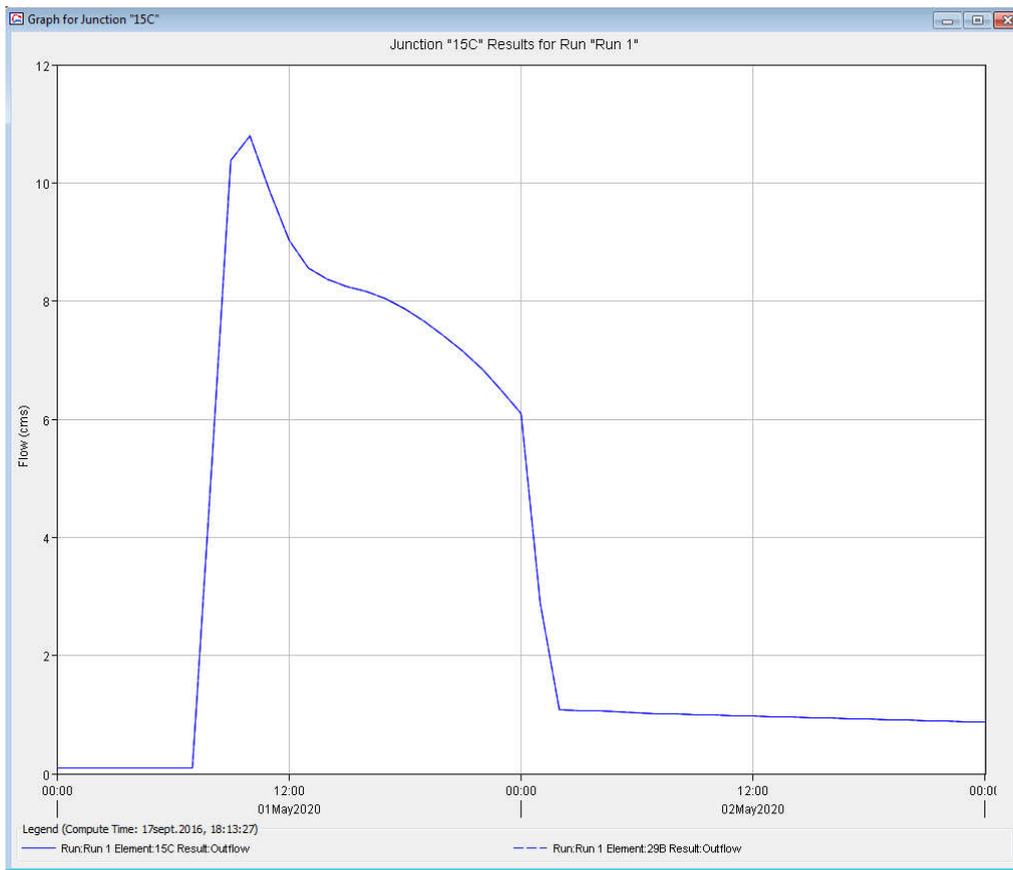
02-mai-20	18:00	3.2	2.0	5.2
02-mai-20	19:00	3.2	2.0	5.2
02-mai-20	20:00	3.2	2.0	5.1
02-mai-20	21:00	3.1	2.0	5.1
02-mai-20	22:00	3.1	1.9	5.0
02-mai-20	23:00	3.1	1.9	5.0
03-mai-20	00:00	3.0	1.9	5.0

Apports solides durant la crue Oued Soudhes

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	
01-mai-20	01:00	8.9
01-mai-20	02:00	8.9
01-mai-20	03:00	6.4
01-mai-20	04:00	6.0
01-mai-20	05:00	4.0
01-mai-20	06:00	6.0
01-mai-20	07:00	36.4
01-mai-20	08:00	149.2
01-mai-20	09:00	330.0
01-mai-20	10:00	267.4
01-mai-20	11:00	393.7
01-mai-20	12:00	466.3
01-mai-20	13:00	488.0
01-mai-20	14:00	499.6
01-mai-20	15:00	512.1
01-mai-20	16:00	522.8
01-mai-20	17:00	529.4
01-mai-20	18:00	531.0
01-mai-20	19:00	524.7
01-mai-20	20:00	511.1
01-mai-20	21:00	493.4
01-mai-20	22:00	472.6
01-mai-20	23:00	447.3
02-mai-20	00:00	416.2
02-mai-20	01:00	299.4
02-mai-20	02:00	130.8
02-mai-20	03:00	45.9
02-mai-20	04:00	26.6
02-mai-20	05:00	21.0
02-mai-20	06:00	18.8
02-mai-20	07:00	17.7
02-mai-20	08:00	17.0
02-mai-20	09:00	16.6
02-mai-20	10:00	16.3
02-mai-20	11:00	16.0
02-mai-20	12:00	15.8
02-mai-20	13:00	15.6
02-mai-20	14:00	15.3
02-mai-20	15:00	15.1
02-mai-20	16:00	14.9
02-mai-20	17:00	14.7

02-mai-20	18:00	14.5
02-mai-20	19:00	14.3
02-mai-20	20:00	14.1
02-mai-20	21:00	13.9
02-mai-20	22:00	13.7
02-mai-20	23:00	13.3
03-mai-20	00:00	13.4
Total		8446.1

Débits liquides et apports solides simulés au nœud 15C (Oued Morri)



Summary Results for Junction "15C"

Project: C Crue 50 ans Simulation Run: Run 1
 Junction: 15C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
 End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 17sept.2016, 18:13:27 Control Specifications:Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 10,8 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 10:00
 Volume: 26,87 (MM)

Summary Results for Junction "15C"

Project: C Crue 50 ans Simulation Run: Run 1
 Junction: 15C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
 End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 17sept.2016, 18:13:27 Control Specifications:Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 10,8 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 10:00
 Volume: 581,5 (1000 M3)

Débits liquides durant la crue Oued Morri

Date	Temps	Débit du bassin (m ³ /s)	Débit sortant (m ³ /s)
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
5.2	5.2	5.2	5.2
10.4	10.4	10.4	10.4
10.8	10.8	10.8	10.8
9.8	9.8	9.8	9.8
9.0	9.0	9.0	9.0
8.6	8.6	8.6	8.6
8.4	8.4	8.4	8.4
8.3	8.3	8.3	8.3
8.2	8.2	8.2	8.2
8.0	8.0	8.0	8.0
7.9	7.9	7.9	7.9
7.7	7.7	7.7	7.7
7.4	7.4	7.4	7.4
7.2	7.2	7.2	7.2
6.8	6.8	6.8	6.8
6.5	6.5	6.5	6.5
6.1	6.1	6.1	6.1
2.9	2.9	2.9	2.9
1.1	1.1	1.1	1.1
1.1	1.1	1.1	1.1
1.1	1.1	1.1	1.1
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0
0.9	0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9

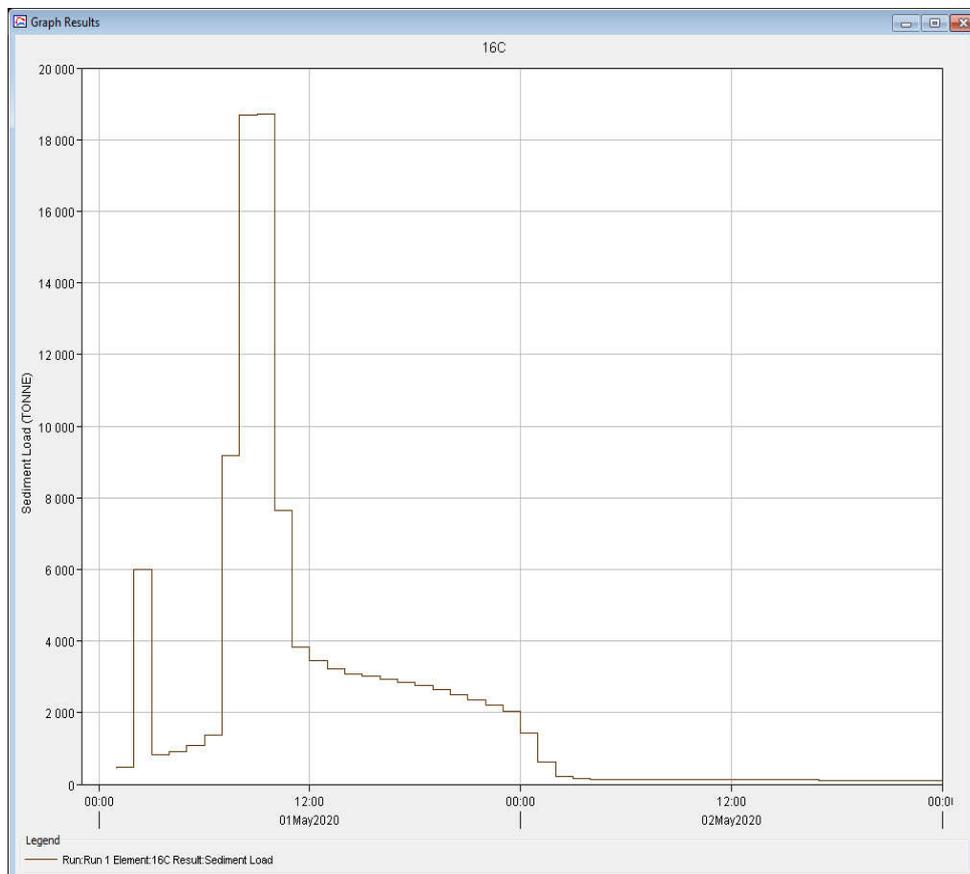
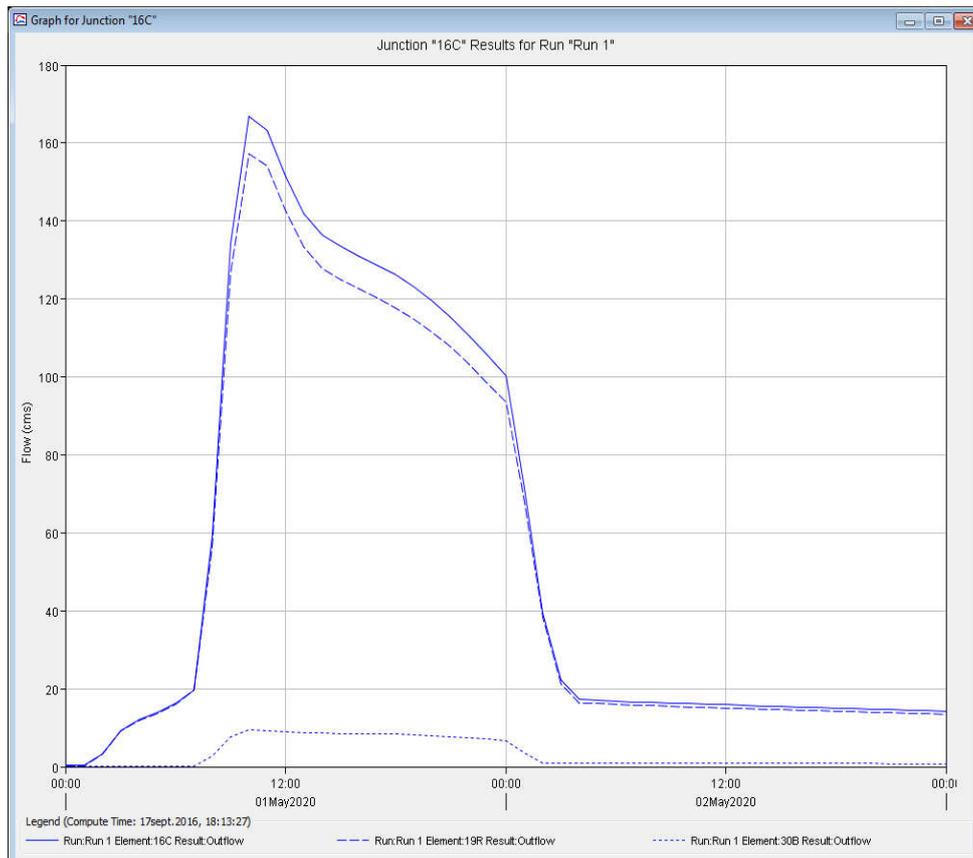
0.9	0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9
0.9	0.9	0.9	0.9

Apports solides durant la crue Oued Morri

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	
01-mai-20	01:00	0.0
01-mai-20	02:00	0.0
01-mai-20	03:00	0.0
01-mai-20	04:00	0.0
01-mai-20	05:00	0.0
01-mai-20	06:00	0.0
01-mai-20	07:00	0.0
01-mai-20	08:00	0.0
01-mai-20	09:00	122.8
01-mai-20	10:00	187.3
01-mai-20	11:00	180.3
01-mai-20	12:00	157.7
01-mai-20	13:00	141.9
01-mai-20	14:00	134.0
01-mai-20	15:00	130.4
01-mai-20	16:00	127.8
01-mai-20	17:00	125.3
01-mai-20	18:00	122.0
01-mai-20	19:00	117.6
01-mai-20	20:00	112.6
01-mai-20	21:00	107.0
01-mai-20	22:00	100.6
01-mai-20	23:00	93.5
02-mai-20	00:00	85.8
02-mai-20	01:00	54.3
02-mai-20	02:00	16.4
02-mai-20	03:00	6.0
02-mai-20	04:00	6.0
02-mai-20	05:00	5.9
02-mai-20	06:00	5.8
02-mai-20	07:00	5.6
02-mai-20	08:00	5.6
02-mai-20	09:00	5.5
02-mai-20	10:00	5.4
02-mai-20	11:00	5.3
02-mai-20	12:00	5.3
02-mai-20	13:00	5.2
02-mai-20	14:00	5.1
02-mai-20	15:00	5.0
02-mai-20	16:00	5.0
02-mai-20	17:00	4.9

02-mai-20	18:00	4.8
02-mai-20	19:00	4.8
02-mai-20	20:00	4.7
02-mai-20	21:00	4.6
02-mai-20	22:00	4.6
02-mai-20	23:00	4.5
03-mai-20	00:00	4.4
Total		2231.3

Débits liquides et apports solides simulés au nœud 16C (Oued Rebôe)



Summary Results for Junction "16C"

Project: C Crue 50 ans Simulation Run: Run 1
 Junction: 16C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
 End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 17sept.2016, 18:13:27 Control Specifications:Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 166,8 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 10:00
 Volume: 32,67 (MM)

Summary Results for Junction "16C"

Project: C Crue 50 ans Simulation Run: Run 1
 Junction: 16C

Start of Run: 01mai2020, 00:00 Basin Model: WMS Watershed
 End of Run: 03mai2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 17sept.2016, 18:13:27 Control Specifications:Control 1

Volume Units: MM 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge: 166,8 (M3/S) Date/Time of Peak Discharge: 01mai2020, 10:00
 Volume: 9635,3 (1000 M3)

Débits liquides durant la crue Oued Rebôe

Date	Temps	Débit entrant (m ³ /s)	Débit du bassin (m ³ /s)	Débit sortant (m ³ /s)
01-mai-20	00:00	0.2	0.1	0.3
01-mai-20	01:00	0.2	0.1	0.3
01-mai-20	02:00	3.3	0.1	3.4
01-mai-20	03:00	9.2	0.1	9.3
01-mai-20	04:00	11.9	0.1	12.0
01-mai-20	05:00	13.7	0.1	13.8
01-mai-20	06:00	16.1	0.1	16.2
01-mai-20	07:00	19.6	0.1	19.7
01-mai-20	08:00	56.4	2.7	59.2
01-mai-20	09:00	126.5	7.7	134.2
01-mai-20	10:00	157.3	9.5	166.8
01-mai-20	11:00	154.1	9.3	163.3
01-mai-20	12:00	142.7	8.9	151.6
01-mai-20	13:00	133.3	8.6	141.9
01-mai-20	14:00	127.9	8.6	136.5
01-mai-20	15:00	124.9	8.6	133.5
01-mai-20	16:00	122.5	8.6	131.1
01-mai-20	17:00	120.2	8.5	128.8
01-mai-20	18:00	117.8	8.4	126.2
01-mai-20	19:00	114.9	8.2	123.1
01-mai-20	20:00	111.5	8.0	119.5
01-mai-20	21:00	107.7	7.7	115.5
01-mai-20	22:00	103.3	7.4	110.8
01-mai-20	23:00	98.6	7.1	105.7
02-mai-20	00:00	93.6	6.7	100.3
02-mai-20	01:00	68.0	3.4	71.4
02-mai-20	02:00	38.3	1.0	39.3
02-mai-20	03:00	21.3	0.9	22.2
02-mai-20	04:00	16.4	0.9	17.3
02-mai-20	05:00	16.1	0.9	17.1
02-mai-20	06:00	15.9	0.9	16.8
02-mai-20	07:00	15.8	0.9	16.6
02-mai-20	08:00	15.6	0.9	16.5
02-mai-20	09:00	15.5	0.9	16.3
02-mai-20	10:00	15.3	0.9	16.2
02-mai-20	11:00	15.2	0.9	16.0
02-mai-20	12:00	15.0	0.8	15.9
02-mai-20	13:00	14.9	0.8	15.7
02-mai-20	14:00	14.8	0.8	15.6
02-mai-20	15:00	14.6	0.8	15.4
02-mai-20	16:00	14.5	0.8	15.3
02-mai-20	17:00	14.3	0.8	15.2

02-mai-20	18:00	14.2	0.8	15.0
02-mai-20	19:00	14.1	0.8	14.9
02-mai-20	20:00	14.0	0.8	14.7
02-mai-20	21:00	13.8	0.8	14.6
02-mai-20	22:00	13.7	0.8	14.5
02-mai-20	23:00	13.6	0.8	14.3
03-mai-20	00:00	13.4	0.8	14.2

Apports solides durant la crue Oued Rebôe

Date	Heure	Sédiments (tonnes)
01-mai-20	00:00	
01-mai-20	01:00	453.2
01-mai-20	02:00	478.4
01-mai-20	03:00	5990.1
01-mai-20	04:00	823.0
01-mai-20	05:00	898.9
01-mai-20	06:00	1091.9
01-mai-20	07:00	1382.2
01-mai-20	08:00	9162.8
01-mai-20	09:00	18683.4
01-mai-20	10:00	18704.0
01-mai-20	11:00	7642.8
01-mai-20	12:00	3828.0
01-mai-20	13:00	3443.4
01-mai-20	14:00	3214.5
01-mai-20	15:00	3092.3
01-mai-20	16:00	3011.3
01-mai-20	17:00	2929.6
01-mai-20	18:00	2847.4
01-mai-20	19:00	2749.2
01-mai-20	20:00	2633.4
01-mai-20	21:00	2505.1
01-mai-20	22:00	2360.8
01-mai-20	23:00	2205.0
02-mai-20	00:00	2028.2
02-mai-20	01:00	1433.9
02-mai-20	02:00	616.9
02-mai-20	03:00	220.3
02-mai-20	04:00	145.4
02-mai-20	05:00	139.9
02-mai-20	06:00	136.8
02-mai-20	07:00	134.9
02-mai-20	08:00	132.9
02-mai-20	09:00	131.1
02-mai-20	10:00	129.1
02-mai-20	11:00	127.4
02-mai-20	12:00	125.6
02-mai-20	13:00	123.9
02-mai-20	14:00	122.2
02-mai-20	15:00	120.4
02-mai-20	16:00	118.8
02-mai-20	17:00	117.1

02-mai-20	18:00	115.5
02-mai-20	19:00	114.0
02-mai-20	20:00	112.3
02-mai-20	21:00	110.8
02-mai-20	22:00	109.3
02-mai-20	23:00	107.8
03-mai-20	00:00	106.3
Total		107011.5

ملخص

تم في هذه الدراسة استعمال تقنية الاستشعار عن بعد ونظام المعلومات الجغرافية باستخدام معادلة فقدان التربة العالمية RUSLE والنمذجة الهيدرولوجية والهيدرولوجية-الرسوبية باستخدام نموذج HEC-HMS وكذا النمذجة الهيدروليكية-الرسوبية باستخدام نموذج HEC-RAS لتحديد وتقييم انجراف التربة والرواسب المنقولة خلال الأمطار، من قبل الجريان السطحي للحوضين وادي الشمرة ووادي الأبيض الواقعين شمال وجنوب الأوراس بالجزائر.

يتميز هذان الحوضان بخصائص مواتية جدا للانجراف ونقل المواد الرسوبية.

إن تطبيق هذه النماذج الخاصة بالسيلان وبالانجراف حققت نتائج مرضية سوى على المستوى السنوي بالنسبة لنموذج RUSLE أو على مستوى الفيضانات بالنسبة للنموذجين HEC-RAS و HEC-HMS.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الارتباط وثيق بين معدلات التآكل والمواد الرسوبية المنقولة من جهة و بين العوامل الرئيسية المسببة لإنتاج المواد الرسوبية و نقلها إلى المجاري المائية من جهة أخرى.

كلمات المفاتيح : الانجراف، الرسوبيات المنقولة، الترسيب، النمذجة الهيدرولوجية، النمذجة الهيدروليكية، النمذجة الرسوبية، RUSLE ، HEC-RAS، HEC-HMS، وادي الشمرة، وادي الأبيض.

Résumé

Dans cette étude, on a fait appel à la cartographie de l'érosion hydrique en utilisant l'équation universelle des pertes en sol révisée RUSLE et à la modélisation hydrologique et hydro-sédimentologique en utilisant le modèle HEC-HMS et hydro-sédimentologique en utilisant le modèle HEC-RAS pour évaluer l'érosion hydrique et les sédiments transportés au cours des épisodes pluvieux, par les eaux de ruissellement des deux bassins versants de l'Oued Chemora et de l'Oued Labiod situés au Nord et au Sud du massif des Aurès en Algérie.

Ces bassins sont caractérisés par des conditions très favorables à la mobilisation et au transport des matériaux.

L'application de ces modèles de ruissellement et d'érosion a permis d'obtenir des résultats satisfaisants que ce soit à l'échelle annuelle pour le modèle RUSLE ou à l'échelle de la crue pour les modèles HEC-HMS et HEC-RAS. Les résultats indiquent une dépendance entre le taux d'érosion spécifique, les matériaux transportés et les principaux facteurs favorisant la production des matériaux solides et à leur livraison au cours d'eau.

Mots clés: Erosion, Transport solide, Dépôt, Modélisation hydrologique, Modélisation hydraulique, Modélisation sédimentologique, RUSLE, Hec-Hms, Hec-Ras, Oued Chemora, Oued Labiod.

SUMMARY

In this study it has been appealed to mapping water erosion by using Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE and to hydro - sedimentological modelling and hydrau - sedimentological modelling using HEC-HMS model and hydrau-sedimentological modelling using HEC-RAS model to estimate water erosion and sediments transported during rain fall events, by runoff water of the two watershed of Wadi Chemora and Wadi Labiod located on the north and south of Aurès Massif in Algeria

These basin are characterised by very favourable conditions to mobilisation and to material transport.

The application of these models of runoff water and erosion allow obtaining satisfactory results either on an annual basis for model RUSLE or at the flood scale for models HEC-HMS and HEC-RAS. Results show a dependency between specific erosion rate, materials transported and the main factors favouring production of solid material and to their delivery to the stream.

KEYS WORDS: Erosion, Sediment transport, Deposit, Hydrological modelisation, hydraulical modelisation, sedimentological modelisation, RUSLE, Hec-Hms, Hec-Ras, Chemora wadi, Labiod wadi.