

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DJILALI LIABES - FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Génie Mécanique

Spécialité : Hydraulique

Etude de la sédimentation des barrages de la triplex : Ouizert-Bouhanifia-Fergoug

Présentée par : **Mohamed GLIZ**

Devant les membres du jury :

Pr KADDOURI Khacem	Président	(UDL- Sidi Bel Abbes)
Pr SAAD-HAMOUDI Abdel Amir	Examineur	(université de Chlef)
Pr HABI Mohamed	Examineur	(université de Tlemcen)
Dr DRIS Mohammed El Amine	Examineur	(UDL- Sidi Bel Abbes)
Pr REMINI Boualem	Directeur de thèse	(université de Blida)
Pr MAKHLOUF Mohammed	Co-directeur de thèse	(UDL- Sidi Bel Abbes)

2014 – 2015

Remerciements

Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce sujet de thèse.

*En premier lieu, j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mes deux directeurs de thèse, **REMINE Boualem**, Professeur à l'Université de Blida. et **MAKHLOUF Mohammed**, Professeur à la Faculté de Technologie, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes.*

*Mr le Professeur **REMINE Boualem** m'a poussé dans le bon sens de la recherche, m'a réservé des moments précieux de discussion et m'a facilité toutes les conditions pour mener ce travail à bien. Je le remercie infiniment pour son apport à la grande cohérence de ce manuscrit, sa disponibilité et sa sympathie.*

*Mr le Professeur **MAKHLOUF Mohammed**, m'a accueilli avec joie à chaque fois, je descendrais à Sidi Bel Abbes dans son bureau, m'a réservé des moments précieux de discussion. Je le remercie très sincèrement pour sa sympathie, pour tous ses conseils et ses encouragements.*

Je suis conscient de la reconnaissance que je dois à ces deux grands Messieurs, qui depuis onze ans, ont toujours répondu favorablement pour toute sollicitation, ils m'ont réservé des moments précieux de discussion et m'ont facilité toutes les conditions pour mener à bien ce travail. Il ne m'est guère possible d'exprimer en quelques mots ce que je leur dois. Je garderais toujours un souvenir très vif de leur dynamisme et leurs grandes qualités humaines.

*Mr **KADDOURI Khacem**, Professeur à la Faculté de Technologie, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, a bien voulu accepter de présider le jury de cette thèse et d'examiner ce travail de recherche. Je lui exprime mes très vifs remerciements et mon profond respect.*

*Mr **SAAD-HAMOUDI Abdel Amir**, Professeur à l'Université de Chlef, a bien voulu être rapporteur de ma thèse. Je le remercie vivement et je lui exprime ma profonde reconnaissance.*

*Mr **HABI Mohamed**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir bien voulu participer à mon jury et juger ce travail. Je le remercie vivement et je lui exprime ma profonde reconnaissance.*

*Mr **DRIS Mohamed El Amine**, Maître de conférence à la Faculté de Technologie, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes pour avoir bien voulu participer à mon jury et juger ce travail. Je le remercie vivement et je lui exprime ma profonde reconnaissance.*

Je n'oublierais sans doute pas de remercier Mr Elouissi Aek, Zaagane Mansour, Anteur Djamel, Bekkouche Othmane et Hamani souici

Dédicace

A la mémoire de mon père

A ma mère

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

A mes enfants Halla Fatima et Abd El Wahab

A mes frères Sahnoun et Mahmoud

A toute ma famille et ma belle famille.

Mohamed

Table des Matières

Table des Matières	
Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
INTRODUCTION GENERALE	01
CONTEXTE BIBLIOGRAPHIQUE	
CHAPITRE I: EROSION HYDRIQUE	
1.1. Définition de l'érosion	05
1.2. Erosion hydrique	05
1.3. Origine et mécanisme	06
1.4. Les facteurs de l'érosion hydrique	06
a) le climat	06
b) le sol	07
c) la topographique	09
d) Le couvert végétal	09
e) L'homme	10
1.5. Les Formes de l'érosion	12
a) L'érosion en nappe	12
b) L'érosion linéaire	12
c) L'érosion par ravinement (Gully érosion)	13
1.6. Mécanisme de l'érosion hydrique	14
1.7. Quantification de l'érosion hydrique	15
a- Formule de Henin 1950	16
b- Formule de Wischmeier et Smith (Universal Soil Loss Equation -1958)	16
c- Formule de Fournier (1960)	17
d- Formule de Tixeront (1960)	17
e- Formule de gravilovic	18
f- Formule de L'A.N.R.H (1970)	18
g- Formule de la SOGREAH	19
1.8. L'érosion en Algérie	20
1.9. Les conséquences de l'érosion hydrique	21
1.9.1 L'envasement des barrages	21
1.9.2 Diminution de la fertilité du sol et perte des terres arables	22
1.9.3 Destruction des routes et des infrastructures hydrauliques	22
1.9.4 L'influence sur le régime des eaux	23
1.10. Conclusion	23
CHAPITRE II: TRANSPORT SOLIDE	
2.1. Introduction	25
2.2. Généralités sur le transport solide	25
2.3. Différents modes de transport solide	26
2.3.1. Transport en suspension	26
2.3.2. Transport par charriage et saltation	27
2.4. Transport solide et morphologie	27
2.5. Charriage et suspension des matériaux non cohérents	18
2.6. Evaluation du transport solide	29
2.6.1. Hypothèse de BAGNOLD	29
2.7. Mesure du Transport Solide	29

2.7.1. Cas du charriage	30
2.7.2. Cas de la suspension	31
2.7.2.1. Méthodes de mesure	32
a) Méthode approchée	32
b) Méthode par extrapolation du champ des concentrations	32
2- Mesure in situ de la concentration	33
2.7.2.2. Appareillage de mesure	33
2.8. Quelques formules de transport solide	34
2.8.1. Cas de la suspension	35
a) Méthode directe	35
b) Méthodes indirectes	36
1. Formule de F.FOURNIER(1960)	36
2. Formule de l'ANRH	36
3. Modèle de PRAVILEVIC	37
4. Formule de SOGREAH (1969)	38
5. Formule de MEDDIM (1998)	38
2.8.3. Transport solide total	40
2.9. Bilan sur les limites d'utilisation des formules de transport	41
2.10. Conclusion	42
CHAPITRE III: ENVASEMENT DES BARRAGES	
3.1. Introduction	44
3.2. Origine du phénomène d'envasement	45
3.4. Facteurs favorisant l'envasement	45
a. Influence de la topographie de la retenue	45
b. Influence de la taille du bassin versant	45
3.5. Action engagée pour la lutte contre l'envasement	45
a. Barrages de décantation	45
b. Réalisation d'autres barrages	46
c. Surélévation de barrage	46
3.6. Le choix du moyen de lutte contre l'envasement	47
3.7. L'envasement dans le Maghreb et en Algérie	47
3.8. Conclusion	49
CHAPITRE IV: PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE	
4.1. Situation géographique et morphologie	51
4.1.1. Bassin versant de la Macta	51
4.1.2. Bassin versant de l'Oued El-Hammam	51
4.2 Hydrographie	55
4.3. Relief	57
b) - Oued Saida	57
c) - Oued Taria	58
d)- Bassin de Bouhanifia	59
e)- Oued Hounet	59
f)- Oued Melrir	60
g)- Oued Fekan	60
h)- Oued Sahouat	61
h)- Bassin de Fergoug	62
4.5. Couvert végétal et occupation du sol	64
4.5.1. Les formations arbustives	64

a)- Végétation forestière	64
b)- Arbres fruitiers et vigne	64
4.5.2. Cultures maraichères	65
4.6. Géologie	66
4.6.1. Introduction	66
4.6.2. Stratigraphie	66
4.7. Tectonique	71
CHAPITRE V: PLUVIOMETRIE DE L'OUED EL HAMMAM	
5.1. Introduction	74
5.2. Le Climat	74
5.3. Précipitations	75
5.3.1. Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles	77
5.3.2. Variations temporelles des précipitations annuelles	80
5.3.3 Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité	81
5.3.4. Précipitations mensuelles et les régimes saisonniers	82
5.3.5. Précipitations torrentielles	85
5.4. Température	86
5.5 Bilan hydrologique	86
CHAPITRE VI: ETUDE HYDROLOGIQUE	
6.1. Introduction	89
6.2. DEBITS MOYENS ANNUELS	89
6.2.1. Variations des débits annuels moyens bruts	90
6.2.2. Variations des débits annuels moyens spécifiques	91
6.2.3. L'irrégularité interannuelle des modules	92
6.2.3.1. L'hydraulicité	92
6.2.3.2. Coefficient d'immodération et de variation	93
6.2.4. Bilan moyen annuel de l'écoulement	94
6.2.5. Apport liquides	94
6.3. DEBITS MOYENS MENSUELS ET SAISONNIERS	95
6.4. Les crues	97
6.4.1. Genèse des crues	97
6.4.2. Puissance des crues	102
6.4.3. Rapport débit de pointe/ débit moyen journalier maximal	103
6.4.4. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles	105
CHAPITRE VII: CARTOGRAPHIE DE L'EROSION HYDRIQUE	
7.1. Introduction	108
7.2. Matériels et méthodes	109
7.2.1. Carte d'occupation des sols	111
a) Le couvert végétal permanent comprend	112
b) Le couvert végétal temporaire comprend	112
c) Le couvert végétal incomplet comprend	112
7.2.2. Carte des pentes	112
7.2.3. Carte de friabilité	113
7.3. Résultats	114
7.4. Discussion	116
7.8. Conclusion	117

CHAPITRE VIII: ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION	
8.1. Nature des sédiments transportés	119
8.1.1. Généralités	119
8.1.2. Caractéristiques physiques	119
8.1.3. Protocole expérimental	120
8.1.4. Résultats et discussion	120
a)- Barrage d'Ouizert	121
b)- Barrage de Bouhanifia et Fergoug	121
c)- Granulométrie des sédiments des lâchés d'eau (Bouhanifia-Fergoug)	121
8.1.5. Morphologie des affluents de l'oued El Hammam	122
8.2. Etude du transport solide en suspension	123
8.2.1. Présentation des données	123
8.2.2. Calcul des apports	124
a)- Les apports annuels	125
1) Le bassin d'Ouizert	125
2) Le bassin de Bouhanifia	126
3) Le bassin de Fergoug	126
b) variabilité interannuelle des apports solides	128
1) Bassin de Ouizert	128
2) Bassin de Bouhanifia	130
3) Bassin de Fergoug	130
c) Apports mensuels	131
1) Bassin d'Ouizert	131
2) Bassin de Bouhanifia	134
3) Bassin de Fergoug	135
d) Apports saisonniers	136
1) Bassin d'Ouizert	136
2) Bassin de Bouhanifia	138
3) Bassin de Fergoug	139
8.2.3. Relation des transports solides avec les précipitations et les écoulements	140
8.2.4. Conclusion	145
CHAPITRE IX: MODELISATION DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION	
9.1. Introduction	144
9.2. Données utilisées	145
a) Echelle interannuelle	145
b) Echelle saisonnière	147
1) Bassin d'Ouizert (oued Sahouat)	147
2) Bassin d'Ouizert (oued Saida)	148
3) Bassin d'Ouizert (oued Taria)	149
4) Bassin de Bouhanifia	150
5) Bassin de Fergoug	152
9.3. Evolution de la concentration des sédiments en suspension et des débits liquides	153
9.3.1 Introduction	153
9.3.2 Application au bassin versant de l'Oued El Hammam	153
a) Bassin d'Ouizert à oued Sahouat	154
b) Bassin d'Ouizert à oued Saida	159
c) Bassin d'Ouizert à oued Taria	162
d) Bassin de Bouhanifia	169

e) Bassin de Fergoug	175
CHAPITRE X: ENVASEMENT QUANTITATIF DES BARRAGES	
10.1. Introduction	182
10.1. Caractéristiques des barrages étudiés	182
a) Barrage d'Ouizert	182
b) Barrage de Bouhanifia	183
c) Barrage de Fergoug	184
10.2. Les principaux problèmes des barrages étudiés	185
10.3. Bilan de l'envasement des barrages étudiés	187
a) barrage de ouizert	187
b) Barrage de Bouhanifia	187
1. Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia (1974-1985)	188
2. Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia (1985-2004)	188
3. Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia (1974-2004)	189
4. Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia(2004-2011)	189
5. Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia(1974-2011)	189
6. Bilan d'envasement actuel au barrage de Bouhanifia	190
b) Barrage de Fergoug	190
1) Bilan d'envasement au barrage de Fergoug (1973-1989)	190
2) Bilan d'envasement au barrage de Fergoug (1973-1998)	191
3) Bilan d'envasement au barrage de Fergoug (1973-2004)	191
10.4. Modèle de prévision de l'envasement	192
a) Formule d'ORTH	192
b) Formule de REMINI	193
CHAPITRE XI: IMPACT DE L'ENVASEMENT SUR LES TERRES AGRICOLES	
11.1. Introduction	198
11.2. Situation géographique de la plaine de l'Habra	198
11.3. Caractéristiques de la plaine de l'Habra:	199
11.4. Données	199
11.5. Matériels et méthodes	200
11.6. Résultats et discussions	201
a) Relation entre la perméabilité et le nombre d'irrigation	201
CONCLUSION GENERALE	204
Références bibliographiques	210
Annexes	221

Liste des Tableaux

Tableau 1.1:	Interaction entre texture matière organique et stabilité structurale (D'après Monar et Stangel, 1982)	08
Tableau 1.2:	Valeurs de α pour différentes perméabilités (Zaibak, 2007)	19
Tableau 1.3:	La dégradation spécifique du sol dans le Maghreb (d'après Probest and Suchet, 1992)	20
Tableau 1.4:	Quelques travaux sur l'érosion au Maghreb	21
Tableau 4.1:	Caractéristiques de forme des sous bassins de l'Oued El Hammam	54
Tableau 4.2:	Caractéristiques du réseau hydrographique	55
Tableau 4.3:	Répartition altimétrique du bassin versant d'Ouizert	57
Tableau 4.4:	Répartition altimétrique d'oued Saida	58
Tableau 4.5:	Répartition altimétrique d'oued Taria	58
Tableau 4.6:	Répartition altimétrique du bassin de Bouhanifia	59
Tableau 4.7:	Répartition altimétrique du sous bassin d'oued Hounet	59
Tableau 4.8:	Répartition altimétrique du sous bassin d'oued Melrir	60
Tableau 4.9:	Répartition altimétrique d'oued Fekan	60
Tableau 4.10:	Répartition altimétrique d'oued Sahouat	61
Tableau 4.11:	Répartition altimétrique du bassin de Fergoug	62
Tableau 4.12:	Répartition des pentes dans le bassin versant de l'Oued El Hammam	62
Tableau 4.13:	Caractéristiques du relief du bassin versant de l'oued El Hammam	63
Tableau 4.14:	Répartition des formations lithologiques en % des sous bassins de l'oued El Hammam	70
Tableau 5.1:	Caractéristiques des précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de l'oued El Hammam	76
Tableau 5.2:	Statistiques des séries pluviométriques (1979/80- 2005/06)	81
Tableau 5.3:	Précipitations pour des périodes de récurrence des principales stations	81
Tableau 5.4:	Nombre de jours de pluies torrentielles observés de 1913 à 1938 (P. Seltzer, 1946)	85
Tableau 5.5:	Températures moyennes mensuelles (1990-2005)	86
Tableau 5.6:	Bilan hydrologique des stations du bassin de l'oued El hammam (1990-2005)	87
Tableau 6.1:	Caractéristiques des stations hydrométriques	89
Tableau 6.2:	débits moyens annuels des oueds	90
Tableau 6.3:	Valeurs caractéristiques des modules au niveau des bassins versants	91
Tableau 6.4:	Débits spécifiques et lames d'eau écoulées au niveau des bassins versants	92
Tableau 6.5:	Hydraulicité des oueds des sous bassins	93
Tableau 6.6:	Bilan moyens annuels de l'écoulement aux différentes stations	94
Tableau 6.7:	Apport total moyen annuel écoulé et ses extrêmes aux différentes stations	94
Tableau 6.8:	Répartition des débits mensuels aux différentes stations	96
Tableau 6.9:	Répartition en (%) du nombre des crues dans le bassin versant de l'oued El Hammam	99
Tableau 6.10:	Crues du bassin d'Ouizert à la station d'oued Sahouat	99
Tableau 6.11:	Crues du bassin d'Ouizert à la station d'oued Saida	100
Tableau 6.12:	Crues du bassin d'Ouizert à la station d'oued Taria	100
Tableau 6.13:	Crues du bassin de Bouhanifia à la station de Trois rivières	101
Tableau 6.14:	Crues du bassin de Fergoug à la station de Hacine	101
Tableau 6.15:	Débits maximums pour des périodes de récurrence des principales stations	105
Tableau 7.1:	Classes de sensibilité du couvert végétal à l'érosion	111

Tableau 7.2:	Classes de pente et indices attribués	113
Tableau 7.3:	Caractéristiques et classement de sensibilités des types de sols	113
Tableau 7.4:	Classes de friabilité des matériaux et indices attribués	114
Tableau 7.5:	Règles de décision de fragilité des terres	114
Tableau 7.6:	Règles de décision de sensibilité à l'érosion	116
Tableau 7.7:	Répartition en % de la sensibilité des sols à l'érosion	116
Tableau 8.1:	Caractéristiques physiques des sédiments et des vases	120
Tableau 8.2:	Granulométrie des sédiments des lâchés ((Bouhanifia-Fergoug)	122
Tableau 8.3:	Caractéristiques morphologiques des affluents	122
Tableau 8.4:	Caractéristique des stations hydrométriques et périodes de mesure	123
Tableau 8.5:	Valeurs des apports liquides, solides et des dégradations spécifiques au niveau des sous bassins de l'oued el hammam	127
Tableau 8.6:	Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Saida	132
Tableau 8.7:	Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Taria	133
Tableau 8.8:	Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Sahouat	133
Tableau 8.9:	Apports liquides et solides moyens mensuels au bassin de Bouhanifia	134
Tableau 8.10:	Apports liquides et solides moyens mensuels au bassin de Fergoug	135
Tableau 8.11:	Apports liquides et solides moyens saisonniers à oued Saida	136
Tableau 8.12:	Apports liquides et solides moyens saisonniers à oued Taria	137
Tableau 8.13:	Apports liquides et solides moyens saisonniers à oued Sahouat	138
Tableau 8.14:	Apports liquides et solides moyens saisonniers au bassin de Bouhanifia	139
Tableau 8.15:	Apports liquides et solides moyens saisonniers au bassin de Fergoug	140
Tableau 8.16:	Corrélations annuelles entre précipitations, écoulement et érosion	141
Tableau 8.17:	caractéristiques des transports solides dans les sous bassins de l'oued El Hammam	141
Tableau 9.1:	Paramètre de la relation débit solide-débit liquide à l'échelle interannuelle	146
Tableau 9.2:	Paramètre de la relation débit solide-débit liquide à l'échelle saisonnière	147
Tableau 9.3:	Répartition des classes d'évolution de la relation concentration-débit liquide des crues	153
Tableau 10.1:	Levés bathymétriques et bilan d'envasement du barrage d'Ouizert	187
Tableau 10.2:	Levés bathymétriques et bilan d'envasement du barrage de Bouhanifia	188
Tableau 10.3:	Levés bathymétriques et bilan d'envasement du barrage de Fergoug	190
Tableau 10.4:	Caractéristiques topographiques de la zone d'épandage	192
Tableau 10.5:	Prévision de l'envasement du barrage de Bouhanifia "Formule d'Orth"	194
Tableau 10.6:	Prévision de l'envasement du barrage de Bouhanifia "Formule de Remini"	194
Tableau 10.7:	Prévision de l'envasement du barrage d'Ouizert "Formule d'Orth"	196
Tableau 10.8:	Prévision de l'envasement du barrage d'Ouizert "Formule de Remini"	196
Tableau 11.1:	Valeurs de matières en suspension de l'eau du Barrage de Fergoug	199
Tableau 11.2:	Valeurs de K pour différents sols (charge constante)	200
Tableau 11.3:	Corrélation entre la perméabilité et le nombre d'irrigation	201

Liste des Figures

Figure 1.1:	les formes d'érosion linéaire (trois processus de ravinement) D'après Roose (1999)	13
Figure 1.2:	Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie (D'après J.Boiffin, 1984)	15
Figure 2.1:	Différents modes de transport solide (Remineras, 1972)	26
Figure 2.2:	Modes de transport solide en hydraulique fluviale (Degoutte, 2004)	28
Figure 3.1:	Schéma d'une retenue envasée	44
Figure 4.1:	Situation géographique du bassin versant de l'oued El Hammam	52
Figure 4.2:	Sous bassins versants de l' Oued El Hammam	53
Figure 4.3:	Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued El Hammam	56
Figure 4.4:	Courbes hypsométriques des sous bassins d'Ouizert	58
Figure 4.5:	Courbes hypsométriques des sous bassins de Bouhanifia	61
Figure 4.6:	Courbe hypsométrique du bassin de Fergoug	62
Figure 4.7:	Carte des pentes du bassin versant de l'oued El Hammam	63
Figure 4.8:	Carte d'occupation des sols	65
Figure 4.9:	La lithostratigraphie du bassin versant de l'Oued El Hammam	67
Figure 4.10:	Carte lithologique	70
Figure 4.11:	Ensemble de failles dans le sous bassin versant de l'oued Saida	72
Figure 5.1:	Précipitations moyennes annuelles aux stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued El Hammam	77
Figure 5.2:	Variation annuelle des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'Oued El Hammam	78
Figure 5.3:	Répartition spatiale de la pluviométrie moyenne du bassin versant de l'Oued El Hammam (1979/2005)	79
Figure 5.4:	Ajustement des précipitations annuelles des stations du bassin versant de l'oued El Hammam	82
Figure 5.5:	Variations mensuelles des précipitations dans le bassin de l'Oued El Hammam	83
Figure 5.6:	Variations saisonnières des précipitations dans le bassin de l'Oued El Hammam	84
Figure 5.7:	Variation mensuelle des précipitations aux stations représentatives du bassin de l'Oued El Hammam	85
Figure 6.1:	Localisation des stations hydrométriques	89
Figure 6.2:	Variation interannuelles des modules des oueds	91
Figure 6.3:	Variation des débits moyens mensuels aux différentes stations	96
Figure 6.4:	Hydrogrammes de quelques crues des sous bassins de l'oued El Hammam	105
Figure 6.5:	Ajustement des débits maximums des sous bassins versants de l'Oued El Hammam	106
Figure 7.1:	Organigramme de la méthodologie suivie	110
Figure 7.2:	Carte de fragilité des terres	115
Figure 7.3:	Carte de sensibilité à l'érosion	115
Figure 8.1:	Variation de l'écoulement et du transport solide annuels en fonction de la surface des sous bassins	128
Figure 8.2:	Apports solides annuels des oueds Sahouat, Taria et Saida	129
Figure 8.3:	Apports liquides et solides annuels à la station de Trois rivières	130
Figure 8.4:	Apports liquides et solides annuels à la station de Hacine	131
Figure 8.5:	Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Saida	132
Figure 8.6:	Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Taria	133

Figure 8.7:	Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Sahouat	134
Figure 8.8:	Apports liquides et solides moyens mensuels au bassin de Bouhanifia	135
Figure 8.9:	Apports liquides et solides moyens mensuels au bassin de Fergoug	136
Figure 8.10:	Répartition des apports liquides et solides au bassin d'Ouizert (oued Saida)	137
Figure 8.11:	Répartition des apports liquides et solides au bassin d'Ouizert (oued Taria)	137
Figure 8.12:	Répartition des apports liquides et solides au bassin d'Ouizert (oued Sahouat)	138
Figure 8.13:	Répartition des apports liquides et solides au bassin de Bouhanifia	139
Figure 8.14:	Répartition des apports liquides et solides au bassin de Fergoug	140
Figure 9.1:	Relations débits solides en fonction des débits liquides instantanés dans les sous bassins de l'oued El Hammam	146
Figure 9.2:	Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin d'Ouizert (oued Sahouat)	148
Figure 9.3:	Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin d'Ouizert (oued Saida)	149
Figure 9.4:	Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin d'Ouizert (oued Taria)	150
Figure 9.5:	Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin de Bouhanifia (station de Trois rivières)	151
Figure 9.6:	Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin de Fergoug (station de Hacine)	152
Figure 9.7:	Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues de l'oued Sahouat (Bassin d'Ouizert)	158
Figure 9.8:	Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues de l'oued Saida (Bassin d'Ouizert)	161
Figure 9.9:	Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues de l'oued Taria (Bassin d'Ouizert)	168
Figure 9.10:	Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues à la station de Trois rivières (Bassin de Bouhanifia)	174
Figure 9.11:	Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues à la station de Hacine (Bassin de Fergoug)	179
Figure 9.12:	Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides pendant les crues du 06/10/1994 et 17/10/1994 à la station de Hacine	180
Figure 10.1:	Evolution des fuites et de l'évaporation du barrage d'Ouizert	186
Figure 10.2:	Localisation de la zone d'épandage	192
Figure 10.3:	Corrélation entre valeurs estimées de l'envasement des barrages	195
Figure 10.4:	Evolution temporelle de l'envasement	195
Figure 11.1:	Situation géographique de la plaine de l'Habra	198
Figure 11.2:	Relation entre la perméabilité du sol et le nombre d'irrigation	202
Figure 11.3:	Variations interannuelles des matières en suspension	203

Liste des Photos

Photo 1:	Vue générale du Barrage d'Ouizert (Benfetta et al .2008)	183
Photo 2:	Vue Générale - Barrage Bouhanifia	184
Photo 3:	Vue Générale - Barrage Fergoug	185
Photo 4:	Effet de l'eau chargée en matières en suspension sur l'état du sol	202

ملخص

إن الحوض الصباب لوادي الحمام الواقع شمال غرب الجزائر مهدد بالانجراف. مما أدى إلى توحد السدود المتدرجة: ويزرت، بوحنيفية وفرقوق. هذا الأخير وصلت به درجة التوحد إلى 98٪، بالنسبة للأخرين، بالترتيب 09٪ و 52.71٪. الغرض من هذه الدراسة هو توضيح تشغيل الأحواض الفرعية الثلاثة المسيطرة على هذه السدود، لتحديد العوامل الرئيسية المسؤولة عن ترسب الطمي. إن التحليل المورفولوجي، المناخي و الهيدرولوجي للفترة الزمنية (1979-2005)، بين أن الترسب في هذا الحوض يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالخصائص الصخرية، الطبوغرافية و هطول الأمطار. وجود الدولوميت والدولوميت الكلسية في حوضي ويزرت و بوحنيفية، أدى إلى وجود نفاذية كبيرة و تدفق منخفض، على عكس حوض فرقوق، الذي يتميز بتدفق كبير و نسبة انجراف أعلى بسبب قوامه الطيني و الصخر الزيتي. خريطة الانجراف المحصل عليها باستخدام الاستشعار عن بعد و نظم المعلومات الجغرافية (SIG)، يكشف عن هيمنة رتبة الحساسية المنخفضة والمتوسطة على 91٪ من المساحة الكلية للحوض. وجود منطقة للترسبات في مقدمة حوض ويزرت، جعل معدل التوحد فيه أقل بكثير من معدل بوحنيفية بالرغم من خضوعهما لنفس الظواهر الطبيعية. بالنسبة لجميع المحطات، هطول الأمطار يقدم علاقة متنافرة مع التدفقات و نقل الرواسب السنوية. إلا في حوض ويزرت الذي يتميز بعواصف صيفية عنيفة. كما لوحظ أن الحد الأقصى لنقل الرواسب يتم في الخريف. دراسة مفصلة عن العلاقة بين التدفقات و تركيز الفيضانات باستخدام منحنيات التباطؤ حددت فئات رئيسية من التطور، والتي تمثلت في: منحنيات بسيطة، اتجاه عقارب الساعة، الاتجاه المعاكس، و نموذج الرقم ثمانية. نموذج المنحنى البسيط هو الأكثر شيوعاً للأحواض الفرعية ويزرت و بوحنيفية ما يعكس تآكل لحظي و نقل الرواسب المعلقة بشكل سريع، الناجم عن الأمطار القصيرة والعنيفة. الحلقة في اتجاه عقارب الساعة، الأكثر وصفاً للتجمعات الصغيرة، أمر شائع لحوض فرقوق، وأشرنا أيضاً في هذه الدراسة إلى الأثر السلبي لانجراف التربة على النفاذية.

كلمات مفتاحية: الجزائر، وادي الحمام، ويزرت، بوحنيفية، فرقوق، الانجراف، نظم المعلومات الجغرافية، نقل الرواسب.

Résumé

Le bassin versant de l'oued El Hammam au Nord ouest d'Algérie est menacé par le phénomène de l'érosion, qui a pour conséquence l'envasement des barrages de la cascade : Ouizert, Bouhanifia et Fergoug, ce dernier se trouve ensasé à 98% , les autres présentant respectivement : 09% et 52,71%. Le but de cette étude est d'éclaircir le fonctionnement des trois sous bassins contrôlant ces barrages afin de déceler les principaux facteurs responsables de l'alluvionnement. L'analyse morphologique, climatique et hydrologique des trois sous bassins sur la période (1979-2005), fait ressortir que, la sédimentation dans ce bassin est étroitement lié à : la lithologie, la topographie et les précipitations. Les dolomies et calcaires dolomitiques occupant les sous bassin d'Ouizert et Bouhanifia leurs confère une infiltration importante et un écoulement faible. Par contre, le Fergoug, constitué essentiellement, d'argiles et de schiste, bénéficie d'un écoulement plus fort et d'un taux d'érosion le plus élevé. La carte d'érosion établie par l'utilisation de la télédétection et (SIG), révèle la dominance de la classe faible et moyenne de sensibilité, correspondant à 91% de la surface totale du bassin. Du faite, de la présence d'une zone d'épandage en amont du barrage d'Ouizert, ce dernier montre un taux d'envasement faible, comparativement à Bouhanifia, malgré qu'ils sont soumis presque aux mêmes conditions naturels. Pour l'ensemble des stations, les précipitations présentent une relation discordante avec les écoulements et les transports solides annuels. excepté le sous bassin d'Ouizert, qui se caractérise par des orages violents d'été. Le maximum de transport solide est observé en automne. L'examen détaillé des relations entre les concentrations en fonction des débits de crue par l'utilisation des courbes en hystérésis ont permis d'identifier les principales classes d'évolution, qui sont les courbes simples, dans le sens des aiguille d'une montre, puis dans le sens contraire et enfin en forme de huit. Le modèle en courbe simple est le plus fréquent pour les sous bassins d'Ouizert et de Bouhanifia. Il traduit une action érosive instantanée et un transport des sédiments en suspension rapide, provoqués par des averses courtes et violentes. Le modèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, caractérisant les petits bassins, est fréquent pour le Fergoug. L'effet négatif de l'envasement sur la perméabilité des sols a été aussi mentionné dans notre étude.

Mots clés: Algérie, oued El Hammam, Ouizert, Bouhanifia, Fergoug, érosion, SIG, transport solide.

Abstract

The watershed of Wadi El Hammam in the North West of Algeria is threatened by the phenomenon of erosion, that has resulted the silting of reservoirs at cascade: Ouizert, Bouhanifia and Fergoug, it is silted in 98%, other respectively with 09% and 52.71%. The aim of this study is to clarify the operation of the three sub basins controlling these dams to identify the main factors responsible for the siltation. Morphological, climatic and hydrological analysis of the three sub basins in the period (1979-2005) shows that, sedimentation in the basin is closely related to: lithology, topography and rainfall. Dolomites and dolomitic limestones occupying Ouizert and Bouhanifia, their pelvis and gives an important infiltration and low flow. For cons, the Fergoug consisting mainly of clay and shale has a stronger flow and a highest erosion rates. The erosion map drawn up by the use of Remote Sensing and (GIS), reveals the dominance of the low and middle class of sensitivity, corresponding to 91% of the total area of the basin. Made of the presence of an upstream application zone dam Ouizert, it shows a low sedimentation rate compared to Bouhanifia, although they are subject to the same almost natural conditions. For all stations, precipitations present a discordant relationship with the flows and annual sediment transport except under Ouizert basin, which is characterized by violent summer storms. The maximum solid transport is observed in autumn. detailed examination of the relationship between the concentration-flood flows by using hysteresis curves have identified the main classes of evolution, which are simple curves, in the direction of the hand of a clock, and then in the opposite direction, and finally figure of eight. The simple curve model is the most common for Ouizert and Bouhanifia sub basin. It reflects an instantaneous erosive action and sediment transport rapidly suspension caused by short and heavy showers. The loop in the direction of clockwise, characterizing the small pools, is common for Fergoug. The negative effect of silting on soil permeability was also mentioned in our study.

Key Words: Algeria, Wadi El Hammam, Ouizert, Bouhanifia, Fergoug, erosion, GIS, sediment transport.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays méditerranéens (Bou kheir et al.2001). En Algérie, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active, et en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportés annuellement par les eaux (Heddadj, 1997). Comme conséquences de ces dégradations, la part des sédiments qui se déversent chaque année est estimée à 45 millions de m³ de vase se déposant au fond des barrages, ce qui représente une perte de capacité de stockage égale à 0,7% de la capacité totale (Remini, 2008).

L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une région à l'autre. La partie Ouest du pays est la plus érodée, où l'érosion touche 47% de l'ensemble des terres, Les versants du Nord-ouest algériens qui représentent un grand potentiel de production agricole sont affectés depuis un siècle par une dynamique de dégradation du couvert végétale et des sols (Morsli et al. 2004, 2013). Les zones des montagnes sont les plus touchés par ce phénomène, sur les monts de Beni-Chougrane, les sols sont très dégradés, décapés et ravinés (Morsli, 1996). L'érosion globale (érosion en nappe et linéaire) varie dans des proportions plus grandes et peut atteindre des taux record (54 t/ha/an) comparables à ceux des "bad-lands" (Morsli et al. 2013).

Dans cette région, le barrage de Fergoug témoigne le produit de cette érosion. Originellement, destiné à la régularisation de l'oued Habra pour l'irrigation de la région de Mohammedia. Il est, dès les années 1990, confronté à un envasement accéléré jusqu'à aujourd'hui. En début de période, les eaux du barrage permettent d'irriguer presque 20000 hectares, ce qui a conduit les colons a dénommé cette plaine "plaine des agrumes", les productions avoisinent le million de quintaux pendant les premières années de l'indépendance. Actuellement, on assiste à une réduction accru de surfaces irriguées qui ne représente que 10% de la superficie projeté initialement. L'envasement a transformé ce barrage en un triste mur ne retenant que des sédiments.

Pour ne pas répéter le drame du Fergoug, les deux barrages en cascade, Ouizert et Bouhanifia, situés juste en amont et abrités dans le même bassin versant, méritent donc une attention particulière, penchée sur des études détaillées sur les risques directs d'envasement, qui sont liés directement à la cadence accélérée de l'érosion hydrique et du transport solide.

Dans ce travail, on tentera d'exposer et d'illustrer les différents facteurs : morphologique, lithologique, climatique, hydrologique et transport solide conditionnant l'alluvionnement,

INTRODUCTION GENERALE

dans le but de déterminer les causes et sources de la sédimentation constatée au niveau des barrages de l'oued El Hammam.

Ainsi, notre étude s'articulera sur les axes suivants:

1- L'analyse du milieu physique des trois sous-bassins composant le bassin de l'Oued El Hammam, étape importante permettant de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans l'alimentation en eau et dans l'écoulement ; facteurs morphologiques, lithologiques, climatiques et biogéographiques. Leur interaction est déterminante dans le comportement hydrologique du bassin étudié.

2- L'étude hydrologique, portera sur les oueds : Sahouat , Saida Taria et El Hammam , où sont érigés les trois barrages :Ouizert (100 Hm³), Bouhanifia (73 Hm³) et Fergoug (18 Hm³), et sera basée sur un traitement statistique des données hydrométriques des stations d'Ouizert, Trois rivières et Hacine, qui permettra l'évaluation des apports liquides annuels, saisonnier, mensuel et des crues dans les sous-bassins concernés.

3- L'élaboration d'une carte de sensibilité à l'érosion par l'utilisation de la télédétection et le (SIG), permettra d'une part, de cibler les principaux facteurs provoquant l'érosion dans notre bassin versant, et d'autre part, de dégager les zones productrices de sédiments.

4- L'étude des transports solides comporte d'un coté, la quantification des transports solides en suspension des oueds, en s'intéressant sur les causes de leurs variabilités spatiales et temporelles. Et de l'autre coté, la modélisation de la relation concentration en sédiments-débits liquides, dans le but de comprendre le mécanisme du transport solide et d'en tirer des conclusions sur son dynamique au niveau de chaque sous bassin.

5- L'établissement des bilans d'envasement sur des périodes assez longues, permet d'avoir une idée générale sur l'apport solide moyen annuel et durée de vie probable des barrages étudiés.

6- L'impact de l'envasement sur les terres agricoles, en étudiant l'effet de la vase contenue dans les eaux d'irrigation sur la perméabilité des sols.

Ces principaux axes abordés auront pour aboutissement une meilleure connaissance des modalités de l'écoulement, de l'érosion et du transport solide en suspension.

CONTEXTE

BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Erosion hydrique

1.1. Définition de l'érosion

L'érosion est l'ensemble des processus qui contribuent à l'usure de la partie superficielle de l'écorce terrestre. (Greco, 1966)

Elle se définit comme le détachement et le transport des particules du sol de leurs emplacements d'origine par différents agents (gravité, eau, vent) vers un lieu de dépôt.

L'érosion apparaît sous plusieurs formes (Wikipedia) :

- L'érosion hydrique.
- L'érosion aratoire ou mécanique sèche: C'est le travail du sol qui arrache les particules, les Transporte et les dépose.
- L'érosion thermique : La différence de température peut dégrader le sol et effriter les roches.
- L'érosion chimique : l'attaque chimique est un facteur essentiel d'érosion, comme c'est le cas pour les roches calcaires.
- L'érosion causée par les êtres vivants : parmi les êtres vivants qui causent le plus de dégâts c'est bien l'homme, en dégradant directement le sol ou en favorisant d'autres facteurs.

1.2. Erosion hydrique

L'érosion des sols par l'eau résulte du détachement des particules du sol sous l'action des gouttes de pluies ou du ruissellement, leur transport n'est assuré que par le ruissellement.

L'érosion se développe lorsque les eaux de pluies ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol. Cette incapacité du sol s'aborder les eaux en excédent apparaît lorsque l'intensité des pluies est supérieurs à l'infiltrabilité.

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement les pays du Maghreb dont il menace gravement les potentialités en eaux et en sol. (Roose, 1977.). En Algérie, l'érosion hydrique touche 45% des zones telliennes, la généralisation et l'accélération de l'érosion revêtent des aspects catastrophiques.

Les zones des montagnes sont les plus touchés par ce phénomène. Sur les monts de Beni-Chougrane, les sols sont très dégradés, décapés et ravinés (Morsli, 1996).

L'érosion par l'eau constitue un grave processus de dégradation du sol, même s'il ne s'agit que d'une érosion en nappe. Elle attaque principalement l'horizon supérieur, en général le plus riche non seulement en matière organique, mais aussi en éléments qui servent d'aliments pour les plantes et pour les cultures (Fournier, 1967).

1.3. Origine et mécanisme

La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine de l'arrachage, du transport et du dépôt de la terre enlevée. L'arrachage est due à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et aux eaux de ruissellement, dont le transport est assuré par elles.

a- Impact de la goutte de pluie : Les sols subissent un martèlement considérable causé par les gouttes de pluie. Les premières gouttes s'infiltrent 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 :

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

b- Ruissellement : Comme les précipitations, le ruissellement agit sur le sol par des actions de détachement et de transport.

1.4. Les facteurs de l'érosion hydrique

L'érosion des sols est conditionnée par un certain nombre de facteurs pouvant influencer sa forme et son intensité.

a) Le climat

Le climat est un facteur important qui conditionne d'une façon directe le mécanisme de l'érosion, en plus de l'influence du vent de la température, la pluie représente le facteur

climatique le plus déterminant de l'érosion hydrique. Le climat Algérien est particulièrement agressif. D'après Saccardy, les pluies sont dangereuses lorsqu'elles atteignent ou dépassent 30 mm en 24 heures, ou 20 mm en 2 heures ou même 15 mm au moins d'une heure. Les terres d'Algérie reçoivent plusieurs fois par an (de 1 à 18 fois) des pluies torrentielles ayant une valeur moyenne de 45mm en 24 heures c'est-à-dire une fois et demi et souvent deux fois la limite dangereuse (Bencherit, 1972). D'autre part, les pluies torrentielles présentent toujours des périodes de pointe dont l'intensité maximale agit proportionnellement sur la masse des eaux en mouvement donc sur leur puissance de destruction (Greco, 1966).

En dehors du facteur climatique essentielles (les pluies), la dégradation des sols peut être provoquée par d'autres éléments dont l'action est moins marquée, mais qui préparent souvent celle de l'eau. La chaleur et le froid, ainsi que les variations brusques de température, ont non seulement une influence directe sur le comportement des terres, mais ils interviennent encore par leurs effets sur la végétation qui joue un rôle important dans la conservation des sols.

La sécheresse peut accentuer ou réduire la force de résistance du sol, surtout en terres argileuses qui sont précisément les plus sensibles. En outre, elle est particulièrement redoutable en Algérie, parce qu'elle empêche toute végétation estivale sur de vastes territoires, les terres dénudées étant ainsi exposées sans protection aux fortes pluies orageuses d'automnes (Deloye et Rebour, 1953).

b) Le sol

Les sols influent sur le processus de ruissellement et d'érosion essentiellement sur leurs propriétés hydrodynamiques et structurales. Les sols présentent une sensibilité à l'érosion variable d'un site à un autre et d'une situation à une autre, cette variabilité est fonction de la nature du sol et de l'état de dégradation (Morsli, 1996). L'infiltrabilité d'un sol donné dépend de la succession et des caractéristiques physiques des horizons qui le constituent. D'une manière générale, plus le sol présente une succession d'horizons aux caractéristiques physiques contrastées, avec de faibles conductivités hydrauliques et de faible capacité de rétention en eau, plus l'infiltration sera limitée (Stengel, 1988). Les sols sont d'autant plus fragiles, que la topographie et la mise en cultures les exposent gravement aux effets des processus d'érosion (Morsli, 1996).

La sensibilité d'un sol à l'érosion dépend de :

❖ La stabilité structurale

C'est l'aptitude de la structure à résister aux agents de dégradation. Un sol stable est moins sensible à la battante et résiste mieux à la fois au tassement et à l'arrachement des particules par le ruissellement et à l'écoulement de particules par le ruissellement. La stabilité structurale dépend de :

- la texture : les sols limoneux apparaissent les plus instables et les sols argiles comme les plus stables.
- La nature minéralogique des argiles : la présence d'argiles accentué (par exemple montmorillonite) à une influence négative sur la résistance des agrégats du fait de leurs propriétés de gonflement à l'eau (Imeson et Jurgerius, 1976).
- La teneur en matière organique forme avec l'argile le complexe argilo humique ; sorte de ciment qui favorise l'agrégation des particules entre elles.

La matière organique influe positivement sur la stabilité structurale d'autant plus importante que la teneur en argile est plus importante (tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Interaction entre texture matière organique et stabilité structurale

(D'après Monar et Stangel, 1982)

Sol	Teneur en Argile (%)	Teneur seuil en Mo (%)	Stabilité d'origine texturale	Stabilité en présence de matière organique (Mo)			
				1% Mo	2% Mo	3% Mo	4% Mo
SL	8	0.6	Passable	Stable	Très instable	Très instable	Très instable
L	15	1.05	Très instable	Très instable	Très instable	Instable	Passable
LA	25	1.75	Instable	Instable	Instable	Passable	Passable
AA	30	3.5	Stable	Stable	Stable	Stable	Très instable

- l'état de l'histoire hydrique : influe sur la stabilité structurale et la sensibilité à la battance, la stabilité augmente si le sol reste faiblement humide pendant plusieurs jours.

❖ Infiltrabilité du sol

Elle dépend de l'état de la surface du sol et de la porosité, influencée par l'état de compacité, la fissuration et l'activité biologique du sol.

c) La topographique

La pente intervient dans les phénomènes d'érosion par son inclination, sa longueur et sa forme (Roose et al. 1999).

-L'influence de l'inclinaison : l'administration du « soil conservation service » des États-Unis admet d'une façon générale que les pertes de terre augmentent en fonction du pourcentage de pente (Roose, 1973). Lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais le transport s'accélère vers le bas car l'énergie cinétique du ruissellement augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15%. Zing, en 1940, a montré que les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente (Roose et al. 1999).

-La longueur de la pente : plus la pente est longue plus le ruissellement s'accumule et prend de la vitesse et de l'énergie et plus d'érosion s'intensifie.

D'après (Wischmeier, 1978), à l'a pente moyenne égale une pente gauchie ou concave diminue les transports solides (sédimentation localisée) tandis qu'une pente convexe augmente en fonction de l'inclinaison du segment le plus pentu. La présence de pentes concaves dans le paysage indique qu'il doit y avoir des piègeages, des colluvions et des alluvions dans la vallée (Arabi et Roose, 1989).

La prédominance de fortes pentes (31% du territoire du Nord de l'Algérie a une pente supérieure de 12,5%) qui augmente la vitesse de ruissellement et donc le ravinement des sols. La pente influence puissamment l'importance de l'érosion, mais l'existence d'érosion et de ruissellement intense sur des pentes douces (glacis de 2% au Sahel ou sur les plateaux européens) indique par contre qu'il n'est pas besoin d'une forte pente pour déclencher ce phénomène : l'action pluviale y suffit (Fournier, 1967).

d) Le couvert végétal

Dans un rapport de l'O.N.U, cité par EL MOUDJAHID du 08-04-1992, « plus de 1.2 Milliards d'hectares, soit 11% des terres découvertes de végétation dans le monde, se sont dégradés ces quarantaines dernières années ». Le couvert végétal joue un rôle primordial dans la protection des sols contre l'érosion, il agit de trois façons différentes, en fonction des forces destructives de l'eau :

1-Contre l'effet vertical

Il amorti la violence des pluies, atténuant aussi le tassement superficiel, la destruction des agrégats et l'entraînement des éléments fins. En outre, une partie de l'eau reste fixée sur les feuillages.

2-Contre l'effet horizontal

La végétation oppose un obstacle au ruissellement. Les tiges et les feuilles ralentissent le courant et obligent les filets d'eau à se diviser, réduisant ainsi leur force de destruction. Cette double action est d'autant plus efficace qu'elle s'exerce sur le facteur vitesse de l'eau, le plus redoutable (Deloye et Rebour, 1958).

3-L'action souterraine

Des racines viennent renforcer la cohésion du sol. Plus la végétation est dense, plus le sol est riche en humus et par conséquent, plus est puissant le frein opposé aux eaux superficielles et de percolation.

e) L'homme

L'Algérie du nord est soumise à de fortes pressions en hommes et en bétail qui engendrent une sévère dégradation des sols et de la couverture végétal. On estime à plus de 20 millions d'hectares les terres touchées par l'érosion particulièrement dans les zones montagneuses où sont implantés plus de 20 millions d'habitants (Mazour., Roose, 2002).

L'homme peut être à l'origine du déclenchement et de l'accélération de l'érosion par des actions telles:

1-Les défrichements

L'homme défriche des terrains en pente, il les dénude, les livrant à l'action des éléments atmosphérique. " Les riverains considèrent implicitement la forêt comme leur propre propriété ce qui leur permet utiliser ses produits à la fois comme bois de chauffage ou encore pour la construction et la couture des champs et comme aliment pour le bétail. C'était la situation qui régnait en une dizaine d'année juste après l'indépendance" (Sari, 1977).

2-Pratiques sylvicoles- incendies de forêts et les surpâturages

La situation est plus grave avec les incendies, dans le but de gagner des terrains de parcours à l'élevage ou pour l'agriculture. Les surfaces des forêts sont détruites annuellement par le feu de l'ordre de six cents milles hectares dans la région méditerranéenne. Ces incendies se produisent généralement en été laissent le sol découvert assèche, exposé à l'action malfaisante des averses orageuses du début de l'automne. (Greco, 1966).

Dans le rapport des « Service de protection civil cité par EL KHABER du 15-05-2006 » plus de 12 milles hectares de la surface forestière algérienne été touchées par le feu en 2005.

3-Les techniques culturales

Le travail du sol a deux effets antagonistes sur la résistance à l'érosion. Il augmente la perméabilité du sol et améliore l'enracinement des plantes. Mais peut :

- Diminuer la cohésion du sol et ainsi sa stabilité structurale ;
- Diluer la matière organiques accéléré la dégradation ;
- Compacter le sol en profondeur et crée des semelles de labour. L'expérience montre que le labour à un effet non négligeable sur l'infiltration des petites pluies ou dans la première phase des grosses pluies. Cet effet devient nul ou négatif en fin de grosses pluies ou après quelques événements pluvieux. (Roose, 1995).

4-Compactage des sols

Le compactage des sols par le passage répété des engins de labour et de récolté agit d'une part par la diminution de la porosité et d'autre part l'accentuation de la semelle de labour, ces deux phénomènes empêche la percolation des eaux et favorisent la battance et donc le ruissellement et l'érosion.

5- La démographie

Les risques anthropiques de l'érosion dépendent de la démographie et de l'état de développement économique de la société en général et des communautés rurales en particulier. En effet une baisse importante de la population peut favoriser une remonté biologique naturelle par réduction de la pression anthropique, mais conduit une mauvaise

protection des aménagements fonciers (ouvrage de protection d'évaluation des eaux). De même qu'une surpopulation rurale selon (Combes, 1982, Neboit, 1983), conduit les gens à protéger contre l'érosion. La pression démographique entraîne aussi une surcharge pastorale sur toute la terre non cultivée.

1.5. Les Formes de l'érosion

a) L'érosion en nappe

Elle apparaît lorsque l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de dégradation des sols par l'érosion hydrique (Roose et al. 1999).

L'érosion en nappe est beaucoup plus importante sur les sommets des versants, ainsi que sur les terres des faibles pentes régulièrement cultivées. Seule la couche superficielle est érodée. Le signe le plus connu de l'érosion en nappe est donc la présence de plage de couleur clair aux endroits les plus décapés, les plus agressés des champs (haut de collines, et rupture de pente). Le deuxième est la remontée des Cailloux en surface par les outils de travail du sol. Les paysans disent que " les cailloux poussent" .Il s'agit en réalité d'une fonte de l'horizon humifère et un travail profond du sol qui remonte en surface des cailloux. Après quelque pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies soit par drainage en profondeur, soit par érosion sélective, tandis que les cailloux trop lourds ne peuvent être emportés et s'accumulent à la surface des sols (Poesen, 1984).

b) L'érosion linéaire

Un micro-filet ou une rigole est une dépression suffisamment petite pour pouvoir être supprimée par les façons culturales. Sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux (figure 1.1).

A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles. Elle apparaît surtout sur les pentes fortes et dans les zones de concentration, et affecte des éléments de taille variée, donc elle n'est pas sélective (Roose et al. 1999).

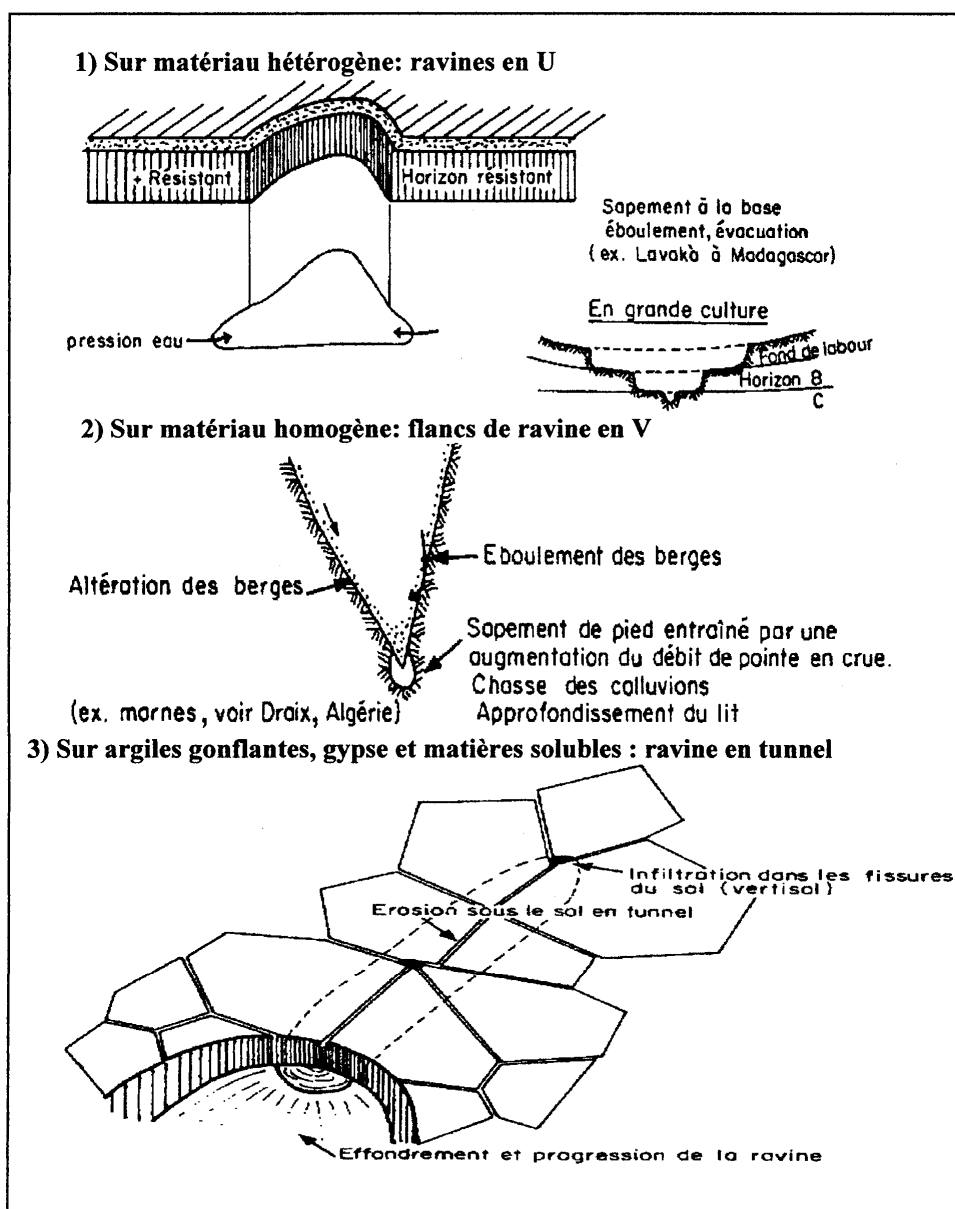


Figure 1.1 : les formes d'érosion linéaire (trois processus de ravinement)

D'après Roose et al. (1999)

c) L'érosion par ravinement (Gully érosion)

Certaines rigoles peuvent en peu de temps atteindre une grande taille pour ne plus être effacées. Elles s'impriment à ce stade dans le paysage et le terme de ravines peut leur être appliqué, en tenant compte des mêmes caractères, mais pour une profondeur atteignant le mètre. Ce passage d'une rigole à une ravine est toujours difficile à trancher (une rigole qui s'approfondit vers l'aval et s'élargit a été associée à une ravine). Le ravinement constitue un

stade avancé de l'érosion .Les ravines peuvent atteindre des dimensions considérables. Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands" et explique également la sape d'ouvrages (ponts, radiers, digues filtrantes...).Lorsque l'aménagement des ravines n'est pas prolongé suffisamment en aval.

1.6. Mécanisme de l'érosion hydrique

Plusieurs facteurs influencent le processus d'érosion hydrique (pente, caractère des sols, pluies rares, couvert végétal...) ceci rend les phénomènes très complexe. Le mécanisme de l'érosion peut se décomposer en deux phases :

1- La phase de détachement

L'énergie de la pluie intervient pour détruire les éléments structuraux, la dégradation des éléments est d'autant plus rapide :

- Que le sol est plus humide au début des pluies (influence de l'antécédent de la pluie) ;
- Que la structure du sol est plus instable ;
- Que la surface du sol réellement attaquable est plus grande (intervention de la surface occupée par les cailloux).

2- La phase de transport des éléments

Les éléments les plus fins mis en suspension seront entraînés par ruissellement et la quantité de terre transportée devrait théoriquement être en fonction :

- Du temps d'apparition du ruissellement
- Du volume de celui-ci (augmentation de la charge hydrique)
- De la granulométrie du sol

Le ruissellement apparaît lorsque la vitesse d'apport d'eau devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol, celle-ci décroît d'autant plus vite que le sol a une structure plus instable (effet de battance). La battance est la dégradation de la structure de la surface du sol liée à l'action des gouttes de pluies, la surface passe d'un état fragmentaire poreux et meuble à un état compact (figure 1.2). Elle peut être décomposée en deux phases successives bien distinctes (Boiffin, 1984).

Phase 1 : la surface du sol travaillé est ouverte, se forme progressivement, du fait du « Splach », le sol devient aussi compact.

Phase 2 : dès que la vitesse à laquelle la pluie tombe devient supérieure à la vitesse d'infiltration, des flaques peuvent se former. Les particules détachées vont se déposer à des vitesses différentes formant une croûte sédimentaire.

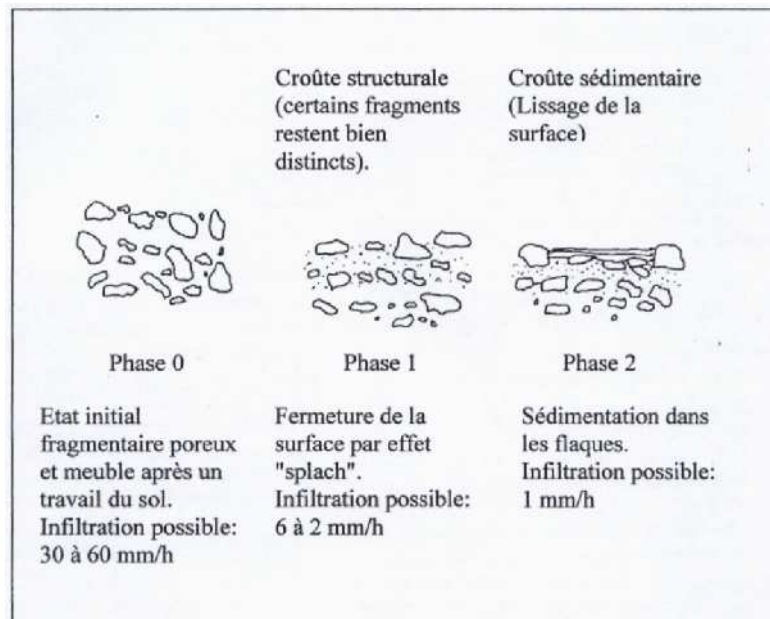


Figure 1.2: Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie (D'après J.Boiffin, 1984)

1.7. Quantification de l'érosion hydrique

La quantification de l'érosion hydrique peut se faire soit :

- Par la mesure directe du transport solide au niveau des stations de mesure
- Par des formules expérimentales

On citera dans ce qui suit quelques formules les plus utilisées.

a- 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 :

$$Es = \frac{Ip I S}{KVe}$$

Où :

Ip : intensité des précipitations

I : pente du bassin versant

S : susceptibilité des sols

K : perméabilité

Ve : végétation

b- Formule de Wischmeier et Smith (Universal Soil Loss Equation -1958)

Il s'agit d'un modèle d'érosion, permettant d'évaluer les zones à haut risque et de quantifier les pertes de sol moyennes annuelles. Le modèle permet l'estimation des quantités de sédiments qui seront transportées par les cours d'eau. La formule s'écrit :

$$A = 2,24.R.K.L_s.C.P$$

A : pertes annuelles de sol (t/ha/an)

R : facteur d'agressivité climatique

K : facteur sol

L_s : facteur pente

C : facteur agronomique

P : facteur des aménagements antiérosifs.

c- Formule de Fournier (1960)

$$Ass = \left(\frac{1}{36}\right) \left(\frac{h^2}{S}\right)^{0,46} \left(\frac{Pm^2}{Pam}\right)^{2,65}$$

Où :

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

Pm : précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm)

Pam : précipitations annuelles (mm)

h : dénivelée moyenne (m)

S : superficie du bassin versant (km²).

d- Formule de Tixeront (1960)

Basée sur les données recueillies dans 32 bassins algériens et 9 bassins tunisiens sur une durée comprise entre 2 et 22 ans.

$$Ass = K Le$$

Où :

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

Le : écoulement moyenne interannuelle (mm)

K : coefficient dépendant de la perméabilité des terrains

K= 8,5 pour les terrains à perméabilité élevée

K= 75 pour les terrains à perméabilité moyenne à élevée

K= 350 pour les terrains à perméabilité faible à moyenne

K= 1400 pour les terrains à faible perméabilité

K= 3200 pour les terrains perméables

e- Formule de Graviovic (1960)

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnelle à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion.

$$Es=3,14.T.Po\sqrt{Z^3}$$

Où :

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

T : coefficient de température : $T=\sqrt{\frac{t_0}{10}}+0,1$

Avec :

t₀ : température moyenne annuelle (°c)

Po : pluie annuelle (mm)

Z : coefficient d'érosion : $Z=y.[x.a].(\delta+\sqrt{Imoy})$

Où :

y : valeur du coefficient de résistance du sol à l'érosion.

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

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

Imoy : indice de pente moyenne du bassin versant

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

$$T_{ss}=26,62 Ie+5,071 I_p+9,77 C_t -593,59 (1,13)$$

Où :

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

I_e : indice lithologique (%).

I_p : indice des précipitations (%).

C_t : coefficient de torrentialité.

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes : $I_e > 10\%$ et $I_p > 300$

g- Formule de la SOGREAH

Basée sur les données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 km², soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000 mm.

$$Ass = \alpha \cdot E^{0,15}$$

Où :

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

α : coefficient dépendant de la perméabilité du sol, donné au Tableau ci dessous

E : Ecoulement annuel (mm)

Tableau 1.2 : Valeurs de α pour différentes perméabilités (Zaibak, 2007)

Perméabilité	α
Forte	8,5
Moyenne	75
Moyenne à faible	350
Faible	1400
Imperméable	3200

1.8. L'érosion en Algérie

L'Algérie comme les autres pays de l'Afrique du Nord (Maghreb arabe) est parmi les régions les plus érodables dans le monde (Probest ., Suchet, 1992), plusieurs travaux ont été consacrés à l'évaluation de la dégradation des terres dans cette région (Tableau 1.3).

Pour l'Algérie, les premières mesures de l'érosion hydrique et du transport solide ont débuté en 1946, à la station hydrométrique de la Traille qui contrôle le haut bassin de l'oued Isser (Medinger, 1960, Demmak 1982). Au fur et à mesure de l'installation d'autres stations, plusieurs études ont été menées pour la quantification et l'étude de l'érosion hydrique et le transport solide : (Medinger 1960, Tixeront 1960, Capolini 1967 a,b Capolini et al 1969).

Tableau 1.3 : La dégradation spécifique du sol dans le Maghreb (d'après Probest and Suchet, 1992)

Source	A_{ss} (t/km ² /an)
Fournier (1960)	60-600
Strakhov (1967)	10-50
Heusch and Milliès-Lacroix (1971)	265-2569
Dedkov and Mozzherin (1984)	100-250
Walling (1984)	1000-5000
Walling and Webb (1987)	>500
Snoussi (1988) (pour le Maroc seulement)	750
Probest and Suchet (1992)	504

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude de ce phénomène (Demmak 1982, Demmak et al. 1991, Meddi 1992, Remini et al. 1997, Touibia 2000, Terfous et al. 2001, Megnounif et al. 2003, Benkhaled et Remini 2003, Bouanani 2004, Bouteldja 2005, Ghenim et al. 2007, Achite et Ouillon 2007, Hasbaia et al. 2010) (tableau 1.4). Ces exemples montrent l'enjeu majeur de l'érosion hydrique non seulement pour l'Algérie, mais aussi pour les pays semi-arides. Au Maroc, près de 10% du volume des barrages est comblé par les sédiments. En Tunisie, la proportion est plus forte, soit 25% (Benblidia et al. 2001). La gravité de l'érosion hydrique réside à la fois dans les taux importants en plus de la variabilité spatio-temporelle du phénomène.

Tableau 1.4 : Quelques travaux sur l'érosion au Maghreb

Sources	Basin versant	Période	S (km ²)	P (mm)	Ass (t/km ² /an)
Terfous et al. (2001)	Oued Mouilah	1977-1993	2650	300.9	126.4
Megnounif et al. (2003)	La haute-Tafna	1988-1993	256	345-527	24-4288
Boudjadja et al. (2003)	Oued. Allalah		295		2701
	Oued Damous		577		2879
	Oued Es Sebt		112		2950
	Oued Messelmoun		218		3029
	Oued Elhachem		217		2905
Achite et Meddi (2004)	Oued Haddad	1973-1995	470	200-379	287
Ghenim et al. (2007)	Oued Sebdou	1985-1998	256	188-597	107-5876
Achite et Ouillon (2007)	Oued Abd	1973-1995	2480	174-303	136
Hasbaia et al. (2010)	Oued Soubella	1974-1989	183.5	288.5	126

(Hasbaia et al. 2012)

1.9. Les conséquences de l'érosion hydrique

1.9.1 L'envasement des barrages

Les terres arrachées aux montagnes vont causer des dégâts en aval, la sédimentation des barrages en Algérie est particulièrement spectaculaire, ils reçoivent une quantité importante des matériaux du transport solide au moment des grandes averses, plus de 2000 Tonnes/km²/an pour la plupart des bassins versants de tell (Demmak, 1982).

a)- Ampleur du phénomène de l'envasement

L'Algérie dispose de plus de 107 barrages en exploitation totalisant une capacité de 4.6 milliards de m³ utilisés pour l'adduction en eau potable, l'industrie et l'irrigation. Or, du fait de l'érosion (pluie de courte durée, de forte intensité, absence de couvert végétal et relief assez jeune etc.), L'Algérie perd annuellement une capacité estimée à 20 millions de m³ par le dépôt de sédiments dans les retenues (Remini, 2003).

L'envasement pose le problème de la stabilité des ouvrages. A titre d'information pour le barrage de Zerdezas (Est d'Algérie), les services d'hydraulique ont diminué le volume de l'eau clair de 9milliards de m³ en 1990, uniquement pour assurer la sécurité de l'ouvrage.

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidanges de fond. Le cas du barrage d'Oued El Fodda est à signaler. En effet, la vanne de fond est bloquée depuis 1948 et elle se trouve maintenant sous plus de 40m de vase, ce qui rend toute opération de vidange impossible à réaliser. L'autre cas à signaler est celui du barrage de foug El Gherza (Sud Algérien) où la vanne de fond est restée bloquée de 1982 à 1989. (Remini ., Avenard, 2000).

1.9.2 Diminution de la fertilité du sol et perte des terres arables

Suite à l'extension des différentes formes d'érosion, de grandes surfaces de terres arables disparaissent d'une année à une autre. La diminution de la fertilité du sol (appauvrissement des horizons supérieures) qui résultent de la détérioration des qualités physiques et chimiques et de l'extension des parcours s'observe de plus en plus sur les terres.

Depuis le début du siècle, la région montagneuse septentrionale de l'Algérie est soumise à de fortes pressions en hommes et en bétail qui ont contribué à une sévère dégradation des sols et de la couverture végétale. La perte de fertilité des sols diminue considérablement le potentiel de production agricole. Le surpâturage cause la diminution considérable de la phytomasse et les possibilités d'accroissement des revenus. Les agriculteurs quittent alors des zones dégradées pour aller grossir le chômage des villes et vivre dans un habitat précaire.

En Algérie, environ 6 millions d'hectares sont exposés à une érosion active, et la dégradation spécifique dans les bassins et les versants atteint 2000 tonnes/km² /an. Ce sont donc, en moyenne, 120 millions de tonnes des sédiments qui sont emportés annuellement par les eaux (Heddadj, 1997).

1.9.3 Destruction des routes et des infrastructures hydrauliques

Parmi les conséquences néfastes de l'érosion sur les infrastructures :

- L'endommagement des routes par l'eau qui provient des terres arables, les profondes ravines qui se forment en bordure des routes résultant souvent de l'action des eaux venantes des champs situés en bordures du chemin, qu'on a laissé couler sans maîtriser et diriger leur cours.
- Le rehaussement des lits des rivières favorisant ainsi l'inondation des terrains voisins.
- La destruction des ouvrages de travaux publics comme les ponts par suites d'affouillement.

-La destruction des installations hydrauliques (conduites, vannes, centrales hydrauliques après colmatage).

1.9.4 L'influence sur le régime des eaux

Dans le sens de diminution de l'infiltration, les nappes souterraines ne sont plus alimentées, les sources tarissent en saison sèche. En saison humide, la masse d'eau de ruissèlement gonfle les cours d'eau et provoque des crues brutales et dangereuses, un régime torrentiel avec tous ses inconvénients s'établit (Greco, 1966).

1.10. Conclusion

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que l'érosion hydrique provoque le décapage de la couche superficielle du sol. A travers ce décapage deux conséquences sur la baisse de la production végétale sont à noter.

-Diminution du bilan hydrique :

Par l'effet de battance qu'elle provoque, la pluie devient de moins en moins profitable à la plante, en effet une effraction importante de la pluie ruisselle. La réduction du volume de sol exploitable par les racines augmente la sensibilité de la culture aux périodes sèche.

-sol pauvre en éléments fertilisants :

La fraction du sol emportée par l'érosion est fréquemment plus riche que le sol dans son ensemble. Le sol laissé sur place se désagrège et devient hostile voir inculte (pas de vie biologique, hétérogénéité de levée, baisse de la production...)

-Terre inaccessible (bad-lands) :

A travers la formation de ravine, le terrain peut évoluer en bad-lands rendant impossible tout accès au terrain.

Pour prévenir ces effets, seules des méthodes de lutte cohérentes peuvent être efficaces. Le rôle de la végétation apparaît en tout premier lieu. Dans la mesure du possible, l'érosion doit être stoppée dès sa forme réversible c'est-à-dire avant que ne commencent les ravins.

Chapitre II

Transport solide

2.1. Introduction

Les cours d'eau transportent des matières solides (blocs, cailloux, graviers, sables, limons...) en quantité variable et quelques fois considérables. La connaissance de ces transports solides est fondamentale dans les études des aménagements hydrauliques. L'expression « Transport solide» recouvre un ensemble de phénomènes physiques extrêmement vaste, ayant tout un point commun. Il s'agit de l'entraînement du solide à l'état granulaire en très grand nombre, sous l'action d'écoulement de l'eau (Michel, 1954).

2.2. Généralités sur le transport solide

Il existe différents modes de transport solide dans les cours d'eau, ils dépendent essentiellement de la morphologie de cours d'eau et des terrains traversés (Keller., Bouchard, 1989). La connaissance de ce transport en cas de réalisation de certains ouvrages d'art est obligatoire, vu les conséquences qui peuvent avoir lieu :

- L'engravement ou l'envasement de certains barrages
- Détérioration des installations hydraulique (pompes), et hydroélectriques (turbines)
- Dégradation des terres agricoles.

Le déclenchement de ces transports a pour doubles origines :

- L'ampleur du débit liquide qui dépend des conditions hydrométéorologiques sévissant dans les bassins versants.
- La disponibilité en matériel susceptible d'être prise en charge, qui dépend de l'intensité et de la fourniture sédimentaire par les processus des versants

Cet effet demeure très difficile à l'expliquer, quoi qu'il y ait beaucoup de chercheurs dans ce domaine, car les phénomènes soient beaucoup plus complexes lorsque deux phases réagissent ensemble (liquide et solide).

2.3. Différents modes de transport solide

Sous l'effet d'un flux liquide, les éléments constitutifs du lit sont susceptibles d'être mise en mouvement. Dans les cours d'eau fluviaux, et par extension dans les torrents (Larras, 1972). Les eaux des cours d'eau transportent les sédiments sous deux formes (figure 2.1): en suspension, par charriage et saltation (Remineras, 1972).

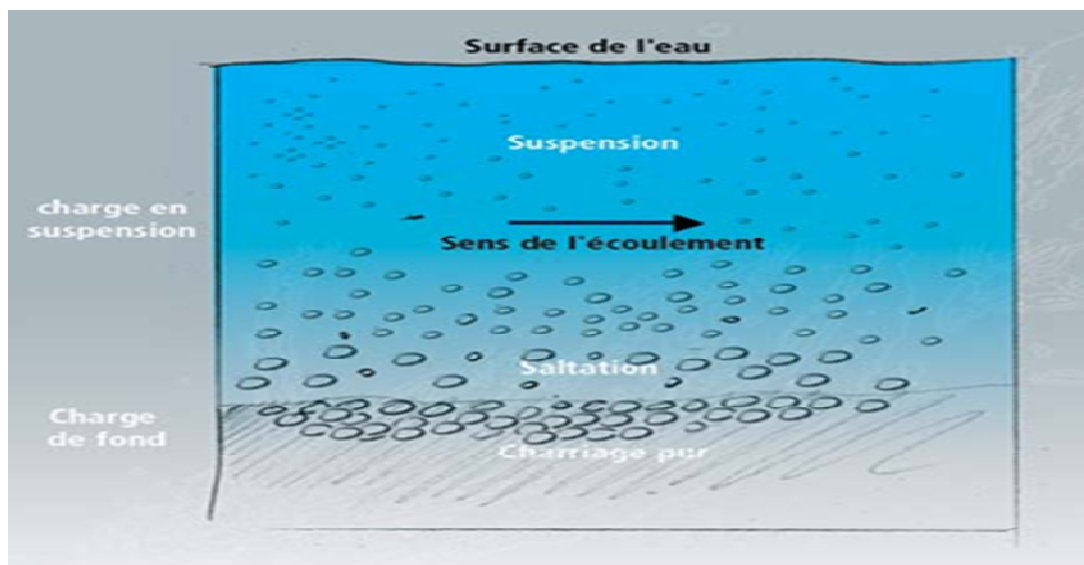


Figure 2.1: Différents modes de transport solide (Remineras, 1972)

2.3.1. Transport en suspension

On dit qu'on a transport en suspension quand les granulats progressent dans le sens du courant au sein du liquide sans jamais retomber sur le fond sauf très rarement. C'est-à-dire que l'énergie turbulente est suffisante à vaincre les forces de pesanteur (Larras, 1972).

Pour les matières généralement transportées dans les cours d'eau et dans les conditions d'écoulement que nous rencontrons dans la nature, les grains ne dépassent pas le millimètre. En général, ce sont des sables fins ou très fins dont les dimensions sont de l'ordre de 0.1mm. On trouve encore des vases et des argiles dont les dimensions peuvent atteindre une fraction de micron. Dans le cours d'eau, on constate que le transport a lieu principalement en périodes de crues. Il est commode de classer ces grains en fonction de la vitesse limite de maintien en suspension. Les grains de très faible diamètre (inférieure à $1\mu m$) restent en suspension, ils ne décantent même pas si la vitesse de l'eau est nulle, ils réalisent une suspension colloïdale. Les

grains de diamètre compris entre 1 et $100\mu m$ se décantent que très lentement, si la vitesse de l'eau est faible (entre 0.5 et 1 m/s), ils restent en suspension et peuvent constituer, à l'intérieure d'une masse d'eau tranquille des courants conservant leur individualité que l'on appelle "**courant de densité**". Les grains de diamètre supérieur à $100\mu m$ décantent si la vitesse est nulle, et restent en suspension dans un canal à écoulement turbulent dès que la vitesse moyenne dépasse une certaine valeur, qui croit avec le diamètre des grains. Ils sont mise en suspension mécanique (Larras, 1972).

2.3.2. Transport par charriage et saltation

La taille des particules est plus importante, l'énergie turbulente n'arrive plus à vaincre la pesanteur et les particules cheminent sur le fond sous l'action des forces hydrodynamiques.

Ce transport met toujours en jeu les chocs et les frottements entre particules, de ce fait les particules roulent et glissent les unes sur les autres, ou elles sautent légèrement sur le fond. On dit qu'il y a transport par saltation quand il y a suite d'envols et de retombées successifs à des distances relativement appréciables (Larras, 1972).

2.4. Transport solide et morphologie

Le transport solide résulte d'interactions entre la phase liquide et la phase solide. Il faut voir ces interactions comme des actions constantes de l'écoulement sur la morphologie des cours d'eau et, réciproquement, de l'action du flux solide sur la nature de l'écoulement. Par exemple Smart et Jaeggi ont montré qu'à partir d'une pente de 7%, pour un débit liquide fixé s'écoulant sur un lit affouillable, la hauteur d'eau est significativement supérieure à ce qu'elle serait en l'absence de particules solides (Larras, 1972).

Concernant le risque torrentiel, les situations de risque peuvent résulter d'un excès d'apport de solide par rapport à la capacité d'un tronçon à les évacuer. Il est important d'être capables d'estimer la capacité de transport solide d'un cours d'eau et l'apport effectif de sédiments pour prévoir les catastrophes naturelles. Il est aussi essentiel de pouvoir évaluer l'évolution de la morphologie du cours d'eau en fonction des apports réels de sédiments (Keller ., Bouchard, 1989).

2.5. Charriage et suspension des matériaux non cohérents

Considérons un cours d'eau qui coule sur des alluvions de taille à peu près identique. Pour les faibles vitesses, rien ne se passe au fond du cours d'eau : les matériaux solides restent au repos. Pour les vitesses plus élevées, les matériaux solides se déplacent sur le fond en roulant, en glissant ou en effectuant des bonds successifs : ce phénomène est appelé charriage. Les grains se déplacent à une vitesse nettement inférieure à celle de l'eau, moins d'un mètre par heure. Pour des vitesses encore plus élevées, les matériaux prélevés sur le fond sont emportés par le courant : le phénomène est appelé transport en suspension. Les grains se déplacent à la vitesse de l'eau au voisinage du grain.

Pour les rivières, dont le fond et les berges sont constitués de matériaux de tailles différentes : par exemple des sables fins, des graviers et des galets. Pour une vitesse donnée, il y a simultanément transport par charriage des matériaux les plus lourds et transport en suspension des matériaux plus légers (Figure 2.2). Lorsque la vitesse augmente, les matériaux qui étaient simplement charriés sont à leur tour mis en suspension. Dans les rivières à graviers, le transport solide se fait essentiellement par charriage ; mais dans les rivières à sable, le transport par suspension peut constituer la quasi-totalité du transport (Degoutte, 2004).

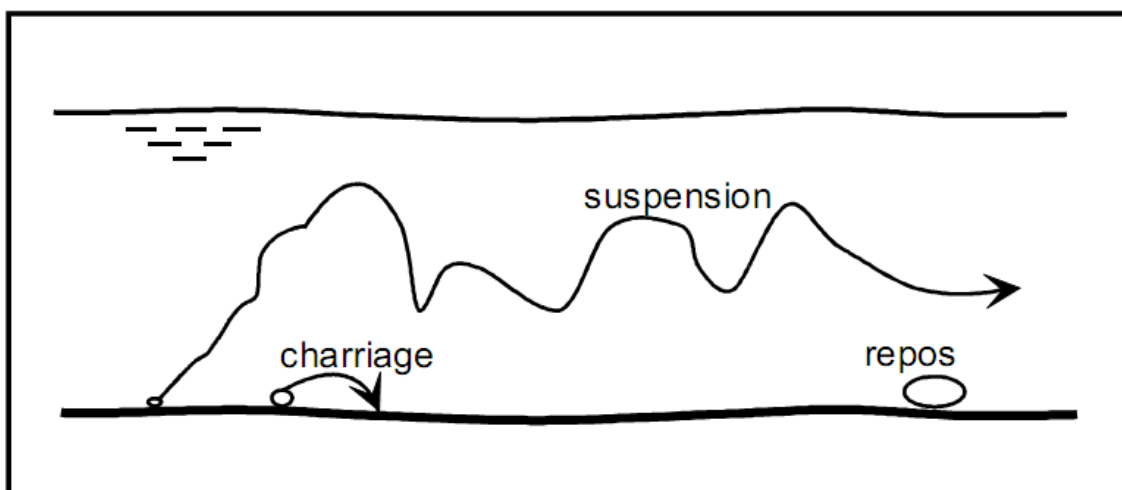


Figure 2.2: Modes de transport solide en hydraulique fluviale (Degoutte, 2004)

2.6. Evaluation du transport solide

2.6.1. Hypothèse de BAGNOLD

Devant la difficulté d'étudier analytiquement les propriétés des flux biphasique, de nombreuses hypothèses simplificatrices ont été proposées, une des hypothèses les plus utilisées est celle proposée par Bagnold (1948). Cette hypothèse suppose un équilibre dynamique entre le flux liquide et le flux solide. Bagnold affirme que le flux solide est directement proportionnel à la différence entre la contrainte de cisaillement sur le lit, τ , est la contrainte critique, τ_c . Le flux solide s'écrit alors sous la forme :

$$q_s \approx (\tau - \tau_c)^{3/2}$$

Cette hypothèse a été remise par Remineras et al. Ils ont montré que cette formule n'est plus valable pour des pentes au-dessus d'une valeur qui est bien au-dessous de la valeur de l'angle de repos des particules. Ils ont, en particulier, souligné que dans ces conditions aucune concentration solide dans l'écoulement n'est suffisante pour réduire la contrainte de cisaillement du fluide sur le lit (τ_0) à la valeur critique. Ils proposent une hypothèse alternative selon laquelle l'équilibre dynamique est maintenu par un équilibre entre l'entraînement des grains et leur dépôt.

Cette formulation rappelle celle de H.A.Einstein 1942. Le taux de l'entraînement des grains est une fonction croissante de la différence ($\tau - \tau_c$). Cette nouvelle formulation valable pour les pentes de 0 à 22% donne un bon modèle. L'essentiel des formules utilisées pour évaluer le transport solide sont basées sur l'hypothèse de Bagnold.

2.7. Mesure du Transport Solide

L'évaluation des apports solides est basé sur l'analyse des échantillons prélevés au niveau de la station.

2.7.1. Cas du charriage

Les mesures du transport par charriage englobent une forte proportion de transport par saltation car il n'existe pas une différence essentielle entre les deux sortes de transport solide ; c'est en effet moins une question de nature qu'une question de degré dans la hauteur des sauts successif des grains. Ces mesures sont malheureusement difficiles à réussir et rarement précises parce que le charriage et la saltation ne font que mouvoir les agrégats le long du périmètre mouiller sans changements de forme des berges et du fond.

A/ La méthode de mesure la plus directe consiste à déposer des nasses de captage sur le fond, et à mesurer les volumes, des agrégats qu'on y capte en un temps donné. Mais la présence de ces nasses modifie les conditions d'écoulement donc de transport solide au tour d'elle : et ces nasses résistent mal à l'action des forts courants qui les détériorent.

B/ On peut mesurer dans le même ordre d'idées la vitesse de comblement de fosses ou trappes transversales creusées en travers du lit, mais il faut beaucoup de temps pour en arriver à des chiffres suffisamment précis comme pour les nasses puisque ce sont surtout les grosses crues qui déplacent les matériaux par charriage sur le fond.

C/ On peut procéder d'une façon plus direct

En mélangeant des granulats artificiels (tels que des débris d'un verre de densité convenable) ou des granulats naturels convenablement marqués (par inadiation nucléaire aux matériaux des berges et du fond dans une section d'écoulement donnée) et en relevant les proportions de grains marqueurs ou marqués qu'on retrouve dans les sections d'aval au bout d'un temps donné. Cette méthode est plus précise que les précédents.

D/ Une méthode encore plus indirecte consiste à construire un modèle réduit de la partie de la rivière dont on veut mesurer le débit solide, et à reproduire sur ce modèle

l'évolution passée du tracé, des berges, des profondeurs et du champ de vitesse de la rivière.

E/ On peut encore utiliser des traceurs radioactifs ou des appareils acoustiques (dits hydrophone) sur le fond et en guettant l'apparition sonore des premières chocs entre les gravions et galets entraînés. Le préleveur HELLEY-SMITH à échantillonnage direct décrit par Emet (1980), s'est montré efficace récemment pour des particules de 0.5 à 16 mm de diamètre. Le seul procédé adéquat est d'estimer le charriage en fonction de l'évolution des lits (Keller., Bouchard, 1989). La technique la plus récente est sans doute celle initié par Belleudy (2009), qui consiste en une technique de mesure du transport solide charrié basée sur l'enregistrement par hydrophones et l'analyse du signal émis par les matériaux en mouvement au fond du lit. Malgré ça la mesure du transport du fond reste imprécise, car les dispositifs utilisés peuvent perturber le régime du transport de fond.

2.7.2. Cas de la suspension

Cette mesure est analogue à celle du débit liquide en un point de la station, on mesure simultanément la vitesse " v " du courant avec un moulinet, et la concentration en matériaux de suspension.

Bien des variables conditionnant un échantillonnage représentatif sont indiqués, les plus importants sont : la variation spatiale et les fluctuations dans le temps décrites par Nordin (1980).

Au moyen d'un appareil de prélèvement, on procède ainsi par un jaugeage ordinaire, en plusieurs points d'un certain nombre de verticales. Chaque point étant défini par ses coordonnées, y : profondeur et x : distance à une des rives prise comme origine, le débit solide à travers une surface $dx dy$, de la section est égale à $c(x, y) v(x, y) dx dy$ et le débit solide en suspension de la rivière est obtenu par double intégration graphique étendue à la totalité de la section suivant l'expression :

$$\int \int_{L P} c(x, y) v(x, y) dx dy$$

L : Largeur de la rivière

P : Hauteur d'une verticale

2.7.2.1. Méthodes de mesure

Il existe toujours deux méthodes qui sont :

- 1- Prélèvement d'échantillon des cours d'eau ;
- 2- Mesure in situ de la concentration.

1- Prélèvement d'échantillons des cours d'eau

Son principe consiste à déterminer un certain nombre de verticales dans la section de mesure et à prélever des échantillons d'eau troubles à différentes profondeurs le long de chaque verticale.

Il y a de sortes de prélèvements :

a) Méthode approchée

On prélève des échantillons à l'aide des bouteilles de 0.5 à 1 litre de capacité. Ces bouteilles sont lestées pour permettre une entrée rapide de la section mouillée et présentent un goulot de diamètre très large afin de diminuer le temps de remplissage et d'éviter d'autant que possible les variations de la concentration due au remplissage saccadé. Le lieu de prélèvement sera pris dans le centre de la section, si la rivière est franchissable, en bordure, mais en tous cas pas dans une zone calme.

b) Méthode par extrapolation du champ des concentrations

Elle consiste à explorer à travers une section droite du cours d'eau, le champ de concentration en matières solides et déterminer le débit solide par intégration. On procède à des prélèvements d'échantillons en différents points de la section de mesure.

Soit :
$$Q_s = \int_{L_i}^L \int_{H_i}^H C v dh dl$$

Où :

h : Profondeur du point de prélèvement (m)

H : Profondeur total (m);

L_i : Abscisse de la verticale ;

L : Largeur total de la section (m).

2- Mesure in situ de la concentration

L'évaluation du transport solide est basée sur deux types d'action.

- a) La mesure directe du taux de remplissage des retenues, en contrôlant le bilan hydraulique sur le barrage et la turbidité des volumes d'eau déversés ou retirés.
- b) L'observation du réseau hydrométrique en faisant des mesures instantanées.

L'intérêt de cette mesure réside dans le fait qu'elle permet une mesure continue et sur place de la turbidité. Les caractères généraux de transport solide en suspension par les cours d'eau se résument en deux points principaux :

1. La distribution inégale des matériaux solides dans une section mouillée

La turbidité varie latéralement et verticalement

2. La variation de la turbidité dans le temps, surtout lors des crues

C'est en fonction de ces caractéristiques fondamentales que les différents appareils et méthodes de mesure se sont développés.

2.7.2.2. Appareillage de mesure

On distingue :

- Les échantillonneurs instantanés.

- Les échantillonneurs à intégration dans le temps qui regroupent les bouteilles modifiées et les turbidimètres.

Les caractéristiques des sédiments ainsi que les limitations physiques des possibilités d'échantillonnage des débits à toute station aideront à choisir le type de préleveur de sédiments en suspension et la méthodologie d'échantillonnage à adopter.

Deux types principaux de préleveurs sont utilisés pour les sédiments en suspension :

1- Prélevés à intégration ponctuelle et intégration sur un vertical

2- Préleveurs à pompe instantané

Le préleveur à intégration est préféré pour la plupart des recherches, parce qu'il est utilisé pour recueillir des mélanges eau-sédiments pendant un certain intervalle de temps, ce qui contribue à réduire les variations dues aux fluctuations temporelles.

Le préleveur instantané est le plus ancien des appareils car il a été utilisé de bien des façons, par exemple en descendant un récipient ouvert dans l'eau.

Il y a des conditions limites recommandées pour l'usage de différents types d'appareils, selon la masse de l'appareil, la profondeur, la vitesse maximum et la taille des sédiments.

2.8. Quelques formules de transport solide

L'expérience montre que le débit solide dépend :

- Du débit liquide.
- De la nature des particules (taille, masse, répartition granulométrique, forme).
- De la hauteur d'eau.
- De la pente.

Il est certain que la rivière est un milieu très complexe pour être facilement étudié. Un bon nombre de formules sont établies en laboratoire sur des écoulements rectilignes uniformes et pour des granulométries qui n'ont que peu de chance d'être en rapport avec celles des sédiments de la rivière.

Le transport se fait par charriage et en suspension, et pour chaque mode de transport, il existe une multitude de formules basées sur des approches du problème de transport.

2.8.1. Cas de la suspension

a) Méthode directe

➤ Station à échelles limnimétriques

La courbe des débits en fonction du temps $Q = f(t)$ à une station de jaugeage se déduit, en général, de celle des «hauteur d'eau» $H(t)$ au droit de cette station. Ces hauteurs d'eau sont lues une ou deux fois par jour sur une échelle limnimétrique ou enregistrées d'une façon continue par un limnigraphe.

On déduit de la courbe $H(t)$ ainsi relevée de l'altitude du plan d'eau, celle des débits $Q(t)$ correspondants, au moyen de la « courbe de tarage » $Q(H)$ de la station, celle-ci est établie expérimentalement en déterminant (en principe une fois toutes pour les lits stables et plusieurs fois pour les lits instables) par une séries de jaugeage effectues le plus souvent au moulinet.

➤ Méthode et procède de calcul

Le fichier d'observation présente les hauteurs d'eau en cm et les concentrations correspondantes en g/l. A partir de ces données de base on dresse un fichier des débits moyens journaliers (débits liquides) après avoir calculer :

- Les débits liquides instantanés à partir de la concentration entre les hauteurs d'eau disponible avec la courbe de tarage $Q = f(H)$.
- Les débits solides en suspension instantanées : en multipliant les débits liquides instantanés par les concentrations correspondantes.

Étant donnée le débit solide et connaissant les horaires de levée des hauteurs d'eau, donc des concentrations, le calcul du transport solide en poids se fait par plusieurs méthodes. On

commence par tracer les courbes des débits solides en fonction des temps $Q_s(t)$ et on détermine le débit solide total par planimétrie de la surface de la courbe, ou on prend des accroissements de temps dt pour lesquels on relève les débits et on calcule le poids.

b) Méthodes indirectes

➤ Formules empiriques

On ne cite que les formules qui sont effectuées en Algérie

1. Formule de F.FOURNIER(1960)

Elle donne le taux d'abrasion d'un bassin versant situé dans une zone semi-aride.

$$Ta = 91.8 (P^2/p) - 737.6$$

Où :

Ta : Taux d'abrasion ($t/km^2/an$).

P : Pluie moyenne annuelle (mm).

p : Pluie du mois le plus pluvieux de l'année (mm).

2. Formule de l'ANRH

Elle lie l'érosion spécifique au coefficient de torrentialité et à l'indice climatique de Fournier.

$$Ta = 44.9Ct + 73.2 (P^2 / p) - 1442.8$$

Où :

Ta : Taux d'abrasion ($t/km^2/an$)

Ct : Coefficient de torrentialité

P^2 / p : Indice climatique de Fournier

3. Modèle de PRAVILEVIC

Ce modèle permet de calculer en premier temps la production annuelle des sédiments.

$$D = T \rho \pi \sqrt{Z^3}$$

Où :

D : Production moyenne annuelle de sédiments en suspension et par charriage ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$)

T = $t_0/10 + 1$ avec t_0 : température moyenne annuelle ($^{\circ}\text{C}$)

Z : Coefficient d'érosion qui reflète l'intensité et l'extension du phénomène d'érosion d'un bassin, les valeurs de Z sont données comme suit :

- Érosion excessive Z: de 1 à 1,5
- Érosion intense Z: de 0,7 à 1
- Érosion moyenne Z: 0,4 à 0,7
- Érosion faible Z: de 0,2 à 0,4
- Érosion très faible Z: de 0,01 à 0,2

Dans un deuxième temps, le modèle calcule le taux de rétention des sédiments produits par le bassin versant, en se basant sur la non uniformité des régions productrices de sédiments.

$$R_m = \frac{\sqrt{\text{per}}}{0,2(L + 10)} \cdot H_{\text{moy}}$$

Où :

per : Périmètre du bassin versant (km).

H_{moy} : Altitude moyenne (m)

L : Longueur du talweg principal (km)

La dernière étape du modèle permet le calcul de la dégradation spécifique.

$$D_s = D \cdot R_m \quad (\text{m}^3/\text{Km}^2/\text{an})$$

4. Formule de SOGREAH (1969)

Ce modèle est basé sur les données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 Km², soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000mm.

$$T_a = \alpha E^{0,15}$$

Où:

Ta: Taux d'abrasion (t/km²/an)

E : Lamme d'eau ruisselée annuelle (mm)

"a" est un paramètre empirique variant avec le degré de perméabilité des bassins versants. La dégradation peut être estimée par l'une des formulations suivantes :

- $T_a = 8,5 E^{0,15}$ Perméabilité élevée
- $T_a = 75 E^{0,15}$ Perméabilité moyenne
- $T_a = 350 E^{0,15}$ Perméabilité moyenne à faible
- $T_a = 1400 E^{0,15}$ Perméabilité faible
- $T_a = 32005 E^{0,15}$ Imperméable

5. Formule de MEDDI.M (1998)

En étudiant le transport solide en Algérie du nord, (une étude faite sur 20 barrages Algériens, ainsi que 16 autres Marocains, 11 barrages Tunisiens et 40 stations hydrométriques Algériennes). L'auteur a développé la relation suivante :

$$D_s = 3286,24 Q_L^{-0,234} S^{-0,197}$$

Où :

Ds: Dégradation spécifique (t/km²/an).

Q_l: Débit liquide inter annuel (m³/s).

S : Surface du bassin versant (km²)

➤ Formule simple

Il existe quelques formules simples qui permettent une évaluation rapide du débit solide lorsque le débit de début de mouvement est négligeable devant le débit liquide total.

1. Formule de Meunier

$$Q_s/Q = 6,3 \cdot I^2$$

Avec :

Q_s : débit solide

Q : débit liquide.

I : pente du canal

2.8.2. Cas du charriage

1. Formule de MEYER-PETER et MULLER (1948)

$$q_s = 8(\beta\tau^* - 0,047)^{3/2} \sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) g d^3}$$

q_s : débits solides en m³/s/m de largeur, exprimé en volume des grains

β: Paramètre adimensionnelle compris entre 0,35 et 1 qui dépend de la rugosité des grains et du fond.

2. Einstein Brown 1950

$$q_s = f(\theta) \left[\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)d^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)d^3}} \right] \sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)gd^3}$$

$$f(\theta) = 2,15 e^{-\frac{0,391}{\theta}} \quad \text{si } \theta < 0,18$$

$$f(\theta) = 40 \theta^3 \quad \text{si } \theta > 0,18$$

ν est la viscosité cinématique du fluide ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 20°C)

2.8.3. Transport solide total

1. Engelund et Hansen (1967)

Cette formule donne le transport solide apparent total pour des sédiments non cohésifs. Elle a été établie pour $0,15\text{mm} < d < 5\text{mm}$.

$$q_s = 0,05 \left[\frac{K^2 R^{\frac{1}{3}}}{g} \right] \tau^{*\frac{5}{2}} \sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)gd^3}$$

K: coefficient de Strickler global des parois

2. Formule de Rickenmann (1990)

La formule proposée par Rickenmann à partir de ses données expérimentales et de celles de Meyer-Peter et Smart et Jaeggi ne fait plus appel à un excès de contrainte mais à un débit critique q_{cr} .

$$Q_s = 12.6(d_{90}/d_{30})^{0.2} \Gamma^2 / (\gamma_s - 1)^{1.6} (q - q_{cr})$$

$$\text{Où } : \quad q_{cr} = 0.065 (\gamma_s - 1)^{1.67} \sqrt{g} d_{50}^{1.6} \Gamma^{-1.12}$$

Cette formule est valable pour des pentes comprises entre 0.2 et 20%.

2.9. Bilan sur les limites d'utilisation des formules de transport

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., 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 sub-surface), généralement non disponible. C'est pourquoi, on se limite à l'utilisation des formules donnant le débit solide moyen.

En 2010, Alain Recking a élaboré une étude très intéressante sur l'évaluation des formules de transport solide en rivières ; Barnavette et Esconavette sur le Rhône, il a testé 15 formules sélectionnées à partir de leur intérêt "historique" ou " local " : [Meyer-Peter et Müller (1948), Einstein-Brown (1950), Schoklitsch (1962), Engelund et Hansen (1967), Ackers-White (1973), Mizuyama (1977), Bagnold (1980), Parker et al. (1982), Smart et Jaeggi (1983), Yang (1984), Rickenmann (1991), Van Rijn (1984), Recking (2006), Lefort (2007), Sogreah (1991)], sur quatre jeux de données distincts, correspondant chacun à une échelle temporelle particulière : les mesures continues de laboratoire, les mesures instantanées en rivières, des mesures de volumes cumulés à l'échelle de l'évènement et enfin, des mesures de volumes cumulés à l'échelle interannuelle. Il a montré que toutes les formules, bien qu'ayant une efficacité relative plus ou moins bonne, présentent globalement un même comportement : les résultats des tests sont bons pour les mesures de laboratoire, très mauvais pour les mesures instantanées de terrain, et contrastés pour les volumes cumulés à l'échelle de l'évènement et interannuelle. La comparaison des scores obtenus sur chaque jeu de données n'a pas permis d'identifier un effet lié à l'échantillonnage (et donc à l'échelle temporelle). Au lieu de cela, il a mis en évidence trois limitations à l'utilisation des formules de transport : la plupart des modèles donnent des résultats plutôt satisfaisants (1) s'ils sont utilisés pour simuler le transport de sédiments de diamètre médian inférieur à 20 mm, (2) pour des crues fortes (en moyenne lorsque la contrainte dépasse 2 fois la valeur critique pour le début du transport) et (3) sur des pentes inférieures à 1%.

2.10. Conclusion

De nombreux hydrauliciens ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreuses mesures en modèle réduit ou sur des fleuves. Ces différentes formules donnent rarement des résultats comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes. Il n'y a pas de formule universelle de transport solide.

Chapitre III

Envasement des barrages

3.1. Introduction

A l'état naturel, les rivières transportent progressivement des quantités, importantes de sédiments, soit par charriage soit en suspension. Les eaux chargées de matériaux fins forment un courant de densité qui s'écoule au fond de la retenue. Les particules ainsi piégés dans les eaux calmes de ce dernier, se tassent et se consolident pour enfin former un lac de vase qui s'avance jusqu'au pied du barrage (Figure 3.1). L'envasement des retenues est défini comme étant, l'accumulation successive des sédiments transportés par les cours d'eau dans la retenue (Remini, 1997). On désigne ainsi sous le nom de vase, une grande variété de matériaux fins plus au moins cohésifs et argileux, mélangés à l'eau dans des proportions très variable. On appelle vase aussi bien une suspension assez diluée qu'une argile molle. Ce matériau solide provient essentiellement de l'érosion des bassins versants due au ruissellement des eaux de pluie. On comprend donc que les matériaux solides ne sont pas apportés de façon continue toute l'année, mais essentiellement lors des crues (Keller., Bouchard, 1989).

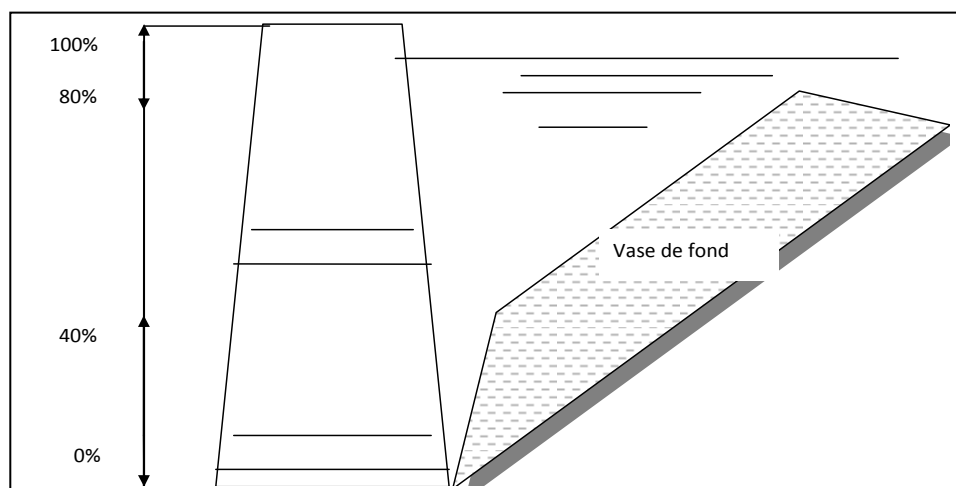


Figure 3.1: Schéma d'une retenue envasée

3.2. Origine du phénomène d'envasement

L'érosion est à l'origine de tous les types de transport solides qui se développent dans un système constitué d'une part par l'élément principal qui est le bassin versant ou la rivière, et d'autre part l'eau, élément moteur. L'action de l'eau sur le bassin versant s'avère très complexe, et est conditionnée par plusieurs facteurs.

3.4. Facteurs favorisant l'envasement

a. Influence de la topographie de la retenue

La topographie de la retenue modifie l'envasement en modifiant les conditions d'écoulement du courant. En général, plus la forme de la retenue est tortueuse, plus l'envasement se déplace vers l'amont. Les élargissements brusques de la vallée, sont des zones de dépôts et de disparition des courants de densité. D'autres part, pour les retenues de basses chutes, les méandres créent des zones d'eau calme qui favorisent les dépôts (Keller., Bouchard, 1989).

b. Influence de la taille du bassin versant

Les plus petits bassins versants produisent proportionnellement le plus de dépôt. Cela est évident car si l'on considère que sur un bassin versant de taille réduite les matériaux érodés peuvent être entraînés et déposés dans la retenue au cours d'une même crue. Les distances à parcourir étant faible, et en générale, la pente du lit de l'Oued assez forte. Par contre dans un bassin versant grand, il peut exister des zones d'épandages intermédiaire, ou des tronçons de lit ou l'Oued divagué, et peut abandonner une partie de la charge solide transportée (Claude ., Chartier, 1977).

3.5. Action engagée pour la lutte contre l'envasement

a. Barrages de décantation

La meilleure manière d'éviter l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage. Cela peut se faire par la création de retenues pour la décantation des apports solides, ce qui revient à construire un autre barrage à l'amont.

L'exemple du barrage de Boughzoul, construit essentiellement pour amortir les crues d'oued Chellif, a permis de retenir depuis sa construction un volume de près de 35 Hm³ de vase qui aurait s'ajouter au 114 Hm³ de vase actuellement retenu dans le Ghrib. Ce barrage a donc réduit l'envasement de ce dernier de près 24%.

b. Réalisation d'autres barrages

Afin d'augmenter le volume d'eau stocké, l'Algérie a été amené à recourir à la réalisation des nouveaux ouvrages. C'est ainsi qu'après l'envasement du barrage du Sig, édifié sur l'oued Mekarra en 1856 (capacité de 3.4 Hm³), en 1882, et à 20Km à l'amont, un nouveau barrage a été construit, barrage du Cheurfa avec une capacité de 14.4 Hm³ et des apports estimé à 0.26 Hm³/an. Sa longévité était donc de l'ordre de 50 ans. En 1953, le barrage de Sarno a été construit à l'amont de Cheurfa, et sur un affluent de l'oued Mekarra avec une capacité de 22 Hm³ devant l'importance de l'envasement du barrage de Cheurfa, ce dernier a été déclassé en 1976 afin d'être rénové en 1992 avec une capacité bien plus importante qui était de 82 Hm³ % (Chadi ., Hadji, 1992).

c. Surélévation de barrage

- **Le barrage de Hamiz:** Le barrage de Hamiz est l'un des premiers barrages algériens, construit en 1869 et 1879 en vue de l'irrigation du périmètre de Mitidja est. Les apports solides sont évalués à 0.27 Hm³. devant la progression de l'envasement de la retenue, il a été décidé en 1883 de le surélever de 7 mètres pour porter sa capacité à 23 Hm³.

- **Le barrage de K'sob:** C'est un ouvrage construit en 1939 pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation Des périmètres de K'sob avec capacité de 11.5 Hm³, mais dans le milieu des années 70, la capacité a été réduite à moins de 4 Hm³.L'administration a décidé alors de le surélever de 15 m pour porter sa capacité à 39 Hm³, (31 Hm³ en 1975, date d'achèvement des travaux de surélévation).

- **Le barrage de Zardezas:** Il est été réalisé entre 1927 et 1945 sur l'oued Saf Saf Sa hauteur de 37m au-dessus du lit de l'oued, lui permettait d'assurer un stockage de 14.9 Hm³. Du fait de l'envasement, cette capacité est passée à 10Hm³ en 1946. Pour

remédier à cet état de fait. La hauteur du barrage a été portée à 45 in. La capacité ainsi obtenue est de 31Hm^3 . (Chadi ., Hadji, 1992).

3.6. Le choix du moyen de lutte contre l'envasement

- Les chasses, si elles constituent un moyen souvent efficace pour l'évacuation des sédiments, il n'en demeure pas moins qu'elles sont consommatrices de quantités importantes d'eau souvent plus de 10m^3 d'eau pour 1m^3 de vase, ce qui est une contrainte majeure pour un pays comme l'Algérie (Chadi ., Hadji, 1992).
- La technique de soutirage, définie comme étant une méthode pratique qui consiste à évacuer les sédiments drainés par les courants de densité sur le fond de la retenue, en utilisant des pertuis de vidange (vannettes de dévasement ou vanne de fond) du barrage. C'est le moyen le plus simple et le moins coûteux et qui peut prolonger la durée de vie du barrage (Remini, 1997). Dans les pays arides et semi-arides, la technique de soutirage revêt une grande importance pratique et devrait être une nécessité. En effet, si une opération de soutirage n'est pas effectuée au bon moment pour une raison quelconque, on perd alors tout simplement une capacité de retenue égale au volume qu'on aurait du évacuer, avec par ailleurs des répercussions ultérieures: la vase, en se déposant près de l'ouvrage, évolue dans le temps et les vannes finiront par se bloquer. Il est important de ne négliger aucune occasion qui consiste à soutirer la vase chaque fois que cela est possible.
- La réalisation de nouveaux barrages est une solution intéressante, lorsque les conditions techniques le permettent (existence d'un site faisable), mais il n'est pas toujours facile de trouver des conditions aussi favorable.
- Les surélévations ont constitués en Algérie, des solutions seulement pour les barrages en béton (K'sob et Zardezas), pour les barrages en terre ou en enrochement, cette solution est inefficace (cas du Fergoug, surélevé deux fois).

3.7. L'envasement dans le Maghreb et en Algérie

L'Algérie dispose ainsi de 57 grands barrages d'une capacité totale de $6,8\text{Gm}^3$. ils sont 119 au Maroc pour un total d'environ 15Gm^3 et 23 en Tunisie pour un total de $1,6\text{Gm}^3$. Les retenues des barrages tunisiens perdent annuellement 0,5 % à 1 % de leur capacité par

alluvionnement. Les moyennes annuelles des pertes de capacité de stockage des retenues des barrages tunisiens pourraient atteindre 530 Mm^3 , soit 37 % de la capacité initiale de toutes les retenues en exploitation. D'après [GE.O.R.E, 2001], en 2030, la perte de capacité de stockage des barrages en exploitation pourrait atteindre 43 % de leur capacité initiale.

Les infrastructures hydrauliques Marocaines enregistrent une perte en volume avoisinant de 0.5% de la capacité totale de stockage qui est de 10 milliards de m^3 . L'envasement des barrages est estimé à 75 millions de m^3/an . La perte en capacité des grands barrages dépasse maintenant les 820 millions de m^3 . A titre d'exemple, le barrage Mohamed V au Maroc, d'une capacité de 567 Hm^3 , reçoit annuellement un volume de vase de $14,5 \text{ Hm}^3$, soit une perte annuelle de 2,5 % de sa capacité totale (Remini ., Hallouche, 2005).

En 2006, le volume total de vase est estimé à $1,1 \text{ Gm}^3$, soit un comblement de 16 % de la capacité totale de $6,8 \text{ Gm}^3$. L'envasement moyen est donc de $45 \text{ Mm}^3/\text{an}$, ce qui correspond à une perte de capacité de 0,65 % par an (Remini, 2009), les 18 barrages les plus envasés soulignent la forte variation de l'envasement d'un site à l'autre, en fonction de l'intensité de l'érosion dans le bassin (liée à la géologie, à la pente, au couvert végétal, etc.), de l'âge de l'ouvrage, mais aussi des éventuelles mesures de protection à l'amont ou des opérations de dévasement déjà effectuées.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude des facteurs d'envasement, en essayant de trouver une corrélation entre les paramètres hydromorphologiques des bassins et le taux d'envasement. En 2005, Remini a dressé une carte de sensibilité à l'envasement en se basant sur les données de 90 barrages, il a cartographié le taux de comblement moyen (T), selon quatre catégories depuis le comblement faible ($T < 0,5 \%$ par an) jusqu'au très fort ($T > 3 \%$ par an).

3.8. Conclusion

Parmi les problèmes que pose l'envasement des retenues de barrage, on peut retenir quelques inconvénients majeurs qui sont:

- La réduction de la capacité de la retenue
- Obturation des organes de vidange
- Sécurité de l'ouvrage
- L'envasement des canaux d'irrigation
- Dégradation de la qualité de l'eau
- Eutrophisation du lac

Il existe un éventail de solution, assez large pour déterminer le moyen le plus approprié pour lutter contre l'envasement des retenues. Néanmoins, l'aménagement des bassins versants demeure sans doute le moyen le plus efficace. La bonne application de la technique de soutirage donne aussi des résultats jugés encourageants. Cette technique peut contribuer à augmenter d'une manière très sensible la durée de vie de barrage si elle est bien pratiquée (Remini, 1997).

Chapitre IV

Présentation de la région d'étude

4.1. Situation géographique et morphologie

4.1.1. Bassin versant de la Macta

Le bassin versant de la Macta (14750 km²), bassin versant n°11 dans la numérotation nationale, situé en Algérie occidentale est constitué de seize sous bassins. Il est délimité au Nord Ouest par la chaîne montagneuse du Tessala, au Sud par les hauts plateaux de Ras-el-Ma et les plaines de Maalifs, à l'Est par les plateaux du Telagh et les monts de Tlemcen qui sont le prolongement des monts de Benichougrane. Il est drainé par deux principaux cours d'eau : l'oued Mekkera, à l'Ouest, et l'oued El Hammam à l'Est. Le bassin versant de la Macta est constitué d'une part par la haute plaine de Sidi Bel Abbes, les plaines de la Habra et de Mascara et d'autre part par deux dispositifs orographiques parallèles à la côte allant du Sud-Ouest au Nord-Est. Ces dispositifs sont formés essentiellement par les monts des Benichougrane dont l'altitude varie entre 540 et 900 m et les monts de Telagh et de Saida avec une altitude variant de 600 à 1200 m (Figure 4.1).

En général, le bassin de la Macta subit l'influence méditerranéenne au Nord et continentale au Sud où le climat est aride et sec avec des hivers froids et des étés chauds. Les précipitations annuelles dans la région varient entre 280 mm dans la partie Sud du bassin et 350mm dans les montagnes de Benichougrane. Les années les plus humides peuvent avoir des précipitations 3 à 4 fois supérieures à celle des années les plus sèches (khaldi, 2008). les précipitations se caractérisent par des intensités exceptionnelles engendrant des crues très importantes pouvant aller jusqu'à 1500m³/s, les apports moyens annuels sont estimés à 240Mm³ dont 90 drainés par l'oued Mekkera et 150 par l'oued El Hammam, les apports solides sont estimés entre 30 et 130 t /km²/an (Meilhac, 1993).

4.1.2. Bassin versant de l'Oued El-Hammam

Le bassin versant de l'oued el-Hammam fait partie du grand bassin versant de la Macta. Il est limité au nord par les monts de Benichougrane, plaine de l'Habra et des massifs de Saida au sud, à l'est par le bassin de la Mina et à l'ouest par le bassin de la Mekkera.

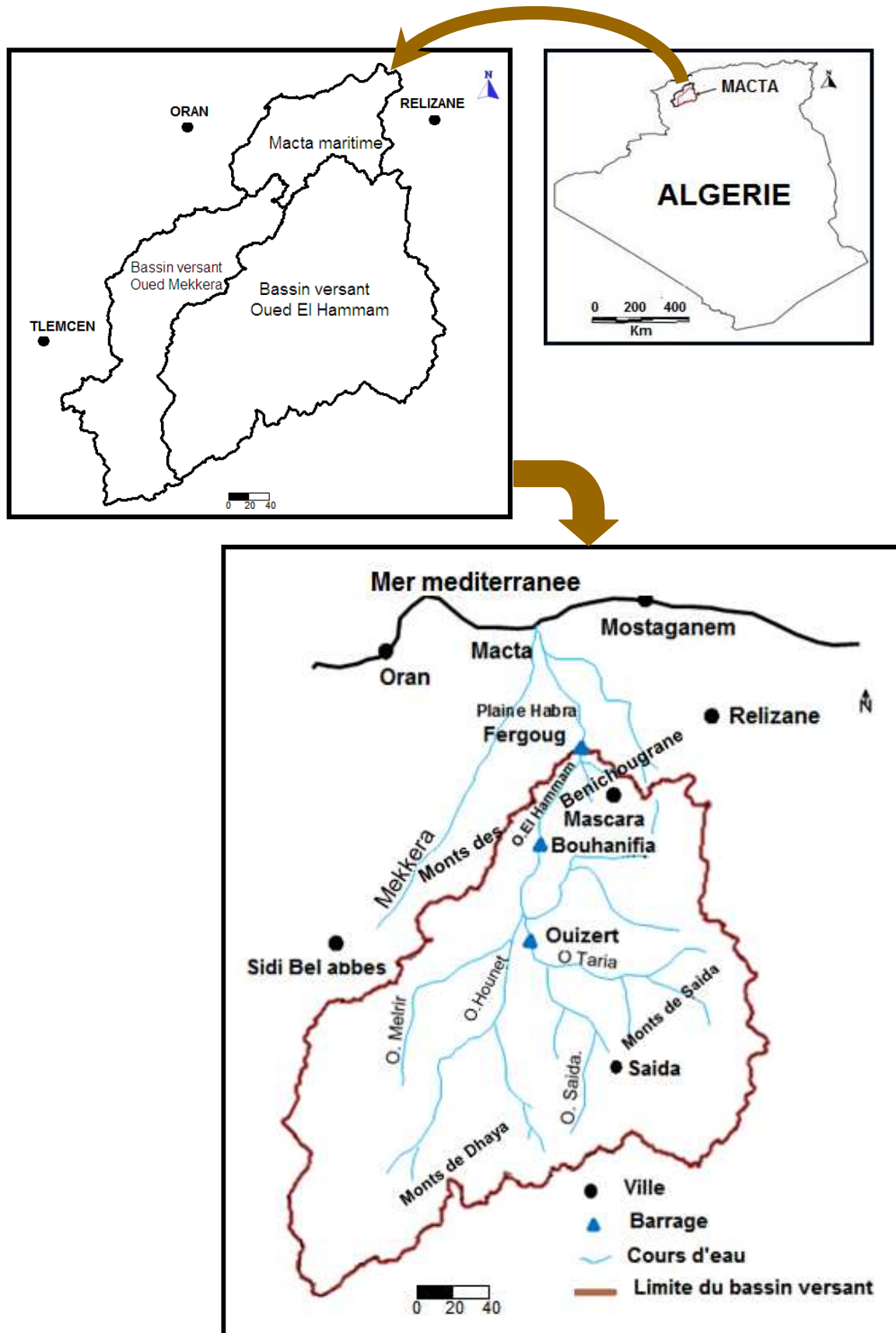


Figure 4.1: Situation géographique du bassin versant de l'oued El Hammam

Au barrage de Fergoug, l'oued El Hammam a un bassin versant de 8314 km², la partie correspondante aux reliefs les plus vigoureux et en aval de Bouhanifia et constitue l'impluvium propre du barrage : ce sont les monts de Benichougrane qui domine de 850m la plaine de Mohammadia. La plus grosse partie du bassin versant alimente le barrage de Bouhanifia et s'étend sur les reliefs atténués de la Meseta oranaise, en une zone, où pourtant, une érosion énergique a creusé de profondes vallées encadrées de témoins qui en dominent le fond de 200 à 300m (Benchetrit, 1972).

Si environ 65% de la superficie du bassin de l'Oued El Hammam se situe en-dessous de 1000 m, 3,6% sont à plus de 1200 m, le point culminant dépassant les 1400 m à proximité de la confluence de la Macta. Les monts de Benichougrane (932 m) occupent une bonne partie de la zone moyenne du bassin versant. Celui-ci remonte, à l'Est, jusqu'aux Monts de Saïda (1201 au Djebel Tiffrit) et, au Sud, jusqu'aux Monts de Dhaya et jusqu'aux hauteurs de la bordure septentrionale des hauts plateaux, qui séparent le terrain d'étude de la dépression du Chott Echergui (Meddi et al. 2009). L'Oued El Hammam prend sa source à 16 km au sud-ouest de Ras Elma et parcourt une distance de 172,6 km selon une direction Sud-Est Nord-Ouest. Il comprend trois sous bassins comme le montre la figure 4.2.

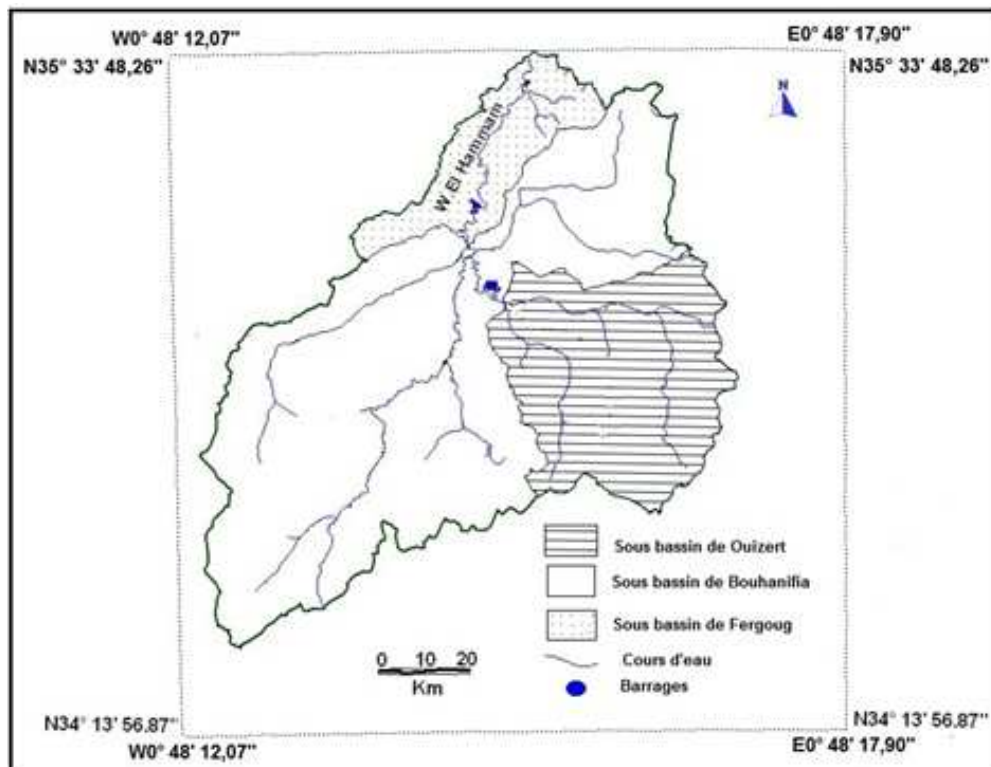


Figure 4.2 : Sous bassins versants de l' Oued El Hammam

La forme du bassin joue un rôle essentiel dans le cycle hydrologique ; elle influence le temps de réponse du bassin, c'est-à-dire le temps de parcours de l'eau à travers le réseau de drainage, et par conséquent l'hydrogramme de crue (Bouanani, 2005). Le tableau suivant résume les principales caractéristiques de forme de la zone d'étude.

Tableau 4.1: Caractéristiques de forme des sous bassins de l'Oued El Hammam

Bassins	Superficies (Km ²)	Périmètre (Km)	Kc	Rectangle équivalent	
				Longueur (km)	Largeur (km)
Oued El Hammam	8314	508	1,56	215,4	38,6
Ouizert	2086,2	228,34	1,4	91,34	22,84
Oued Saida	621,2	131,7	1,48	54,46	11,4
Oued Taria	1465	214,6	1,57	91,24	16,05
Bouhanifia	5376	476,6	1,82	213,06	78,83
Oued Fekan	1193	167,6	1,35	64,87	18,4
Oued Sahouat	141	58,07	1,37	22,88	6,16
Oued Melrir	1464	210,8	1,54	88,72	16,5
Oued Hounet	2578	318,5	1,75	140,28	18,37
Fergoug	851,7	179,26	1,72	78,83	10,8

Où :

- A : la superficie drainée
- P : le périmètre du sous bassin
- Rectangle équivalent : $Long = \frac{kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{(1,12)^2}{(kc)^2}} \right]$, $Larg = \frac{A}{Long}$
- Kc : indice de compacité, il est calculé par l'expression $k_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$

De l'indice de compacité, on déduit que les trois sous bassins sont plus au moins allongés ($Kc > 1$), les bassins les plus allongés sont respectivement : Bouhanifia, oued Hounet et Fergoug, alors que les moins allongés sont: Ouizert avec ses affluents (oued Saida et Sahouat) et oued Fekan. Outre ces données extrêmes toutes les autres valeurs sont très rapprochées, les formes des bassins correspondants étant donc plus ou moins semblables.

4.2 Hydrographie

L'hydrographie est liée à plusieurs paramètres, les plus importants sont la géologie et le relief.

L'Oued EL Hammam se situant dans le versant nord des hautes plaines oranaises entre 800 et 1200 m d'altitude. Il prend sa source à 16 Km au Sud Ouest de Ras Elma, à une altitude de 1200 m suivant une direction Sud-Est. Ce bassin versant est drainé par quatre principaux affluents (Figure 4.3):

- ✓ Oued Taria
 - ✓ Oued Saida
 - ✓ Oued Barbour
 - ✓ Oued Sefioun
 - ✓ Oued Melrir
 - ✓ Oued Fekan
- } Oued Sahouat → (Draine le sud est du bassin) ;
 } Oued Hounet → (Draine le centre du bassin) ;
 → (Draine le Sud ouest du bassin) ;
 → (Draine le Nord est du bassin)

Les bassins élémentaires (Fekan , Sahouet, Hounet et Melrir) , pris dans leur ensemble, convergent en éventail pour former l'Oued El-Hammam à la station hydrométrique de Trois rivières. Les principales caractéristiques de ce réseau hydrographique sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.2: Caractéristiques du réseau hydrographique

Bassins	$\sum L_i$ (km)	D_d (km/km ²)	C_t	L_T (km)	T_c (h)
Oued El Hammam	7203,29	0,86	0,228	172,64	28h 9mn
Ouizert	1648,87	0,79	0,276	42,56	14h 9mn
Oued Saida	622,95	1	0,62	36,51	09h 33mn
Oued Taria	1025,92	0,7	0,165	42,5	11h 50mn
Bouhanifia	4387,13	0,83	0,143	133,77	25h 10mn
Oued Fekan	1057,10	0,88	0,14	15,64	11h 49mn
Oued Sahouat	97,4	0,69	0,23	25,6	10h 36mn
Oued Melrir	1213,95	0,83	0,133	65	14h 59mn
Oued Hounet	2018,68	0,78	0,137	31,68	11h 21mn
Fergoug	1167,29	1,37	0,89	67,56	10h 54mn

D_d : densité de drainage, C_t : Coefficient de torrentialité, L_T : Longueur du Talweg principale, $\sum L_i$: longueur du chevelu hydrographique

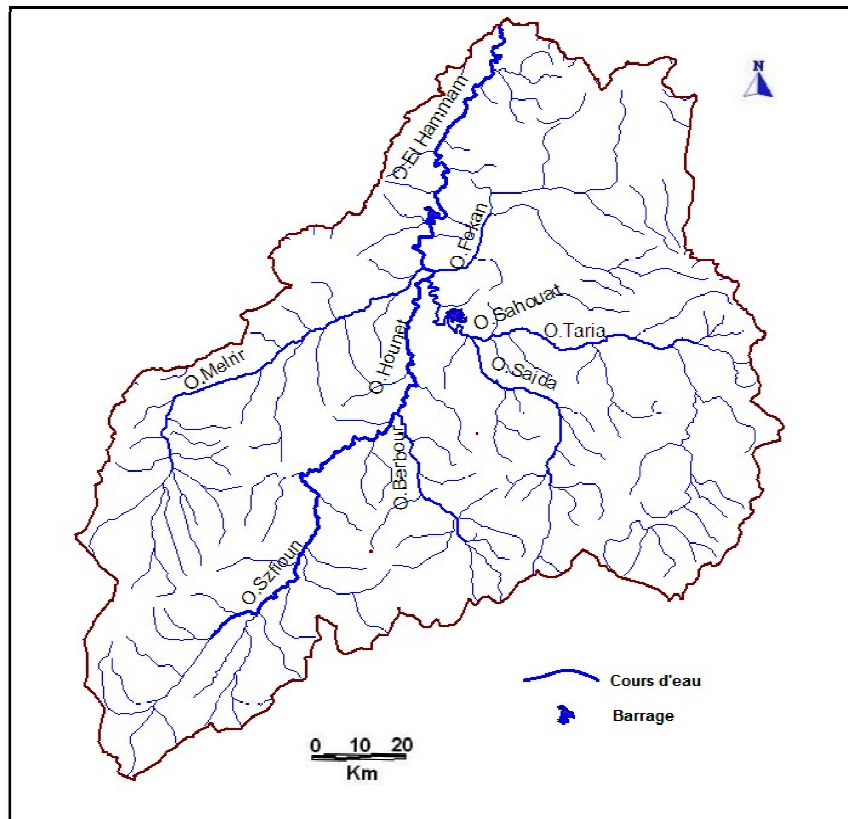


Figure 4.3: Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued El Hammam

Les valeurs de densité de drainage obtenues sont comprises entre 0.69 et 1.37 km/km². Ces résultats indiquent que nos sous bassins versants sont en général assez bien drainés.

L'importance du drainage est due principalement à la nature des formations qui forment le bassin ainsi qu'aux pentes assez fortes des versants d'une part et d'autre part au régime climatique, caractérisé par ses pluies irrégulières et violentes. Les valeurs de la densité de drainage sont faibles dans la région d'étude, surtout pour les sous bassins de Taria et Sahouat : en raison d'une part à des pentes faibles auxquelles s'ajoute la faible abondance des précipitations, et d'autre part, de la perméabilité non négligeable des formations lithologiques constitués principalement de calcaires dolomitiques et dolomies. Par contre, la valeur de la densité de drainage est élevée dans les sous bassin de Fekan, Saïda et Fergoug où se conjuguent un très fort relief, une abondance pluviométrique relative et une faible perméabilité des affleurements.

Les valeurs peu élevées du coefficient de torrentialité (tableau 4.2), correspondent aux chevelus hydrographiques de Fergoug et Saïda, issus d'un secteur montagneux et pluvieux. Par contre, les basses valeurs des autres sous bassins, sont liées soit à la faiblesse des

précipitations, ou encore à la forte perméabilité des formations lithologiques. Aussi, le temps de concentration des eaux est différent d'un sous bassin à l'autre malgré que certains possèdent la même superficie (Taria et Melrir), ce qui implique que ce dernier est non seulement fonction de la surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief.

4.3. Relief

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration, l'évaporation et même la puissance érosive de l'eau (Ammari, 2012). On caractérise souvent le relief par la courbe hypsométrique ; on portant en abscisse les surfaces partielles et en ordonnées les altitudes correspondants.

a) - Bassin d'Ouizert

Le bassin d'Ouizert occupe une superficie de 2086,2 km², avec une altitude maximale de 1324 m, 40% de surface est comprise entre l'altitude 1324 et 1000m La courbe hypsométrique a une allure qui semble assez régulière (figure 4.4). , La répartition altimétrique des surfaces est assez homogène (tableau 4.3) et la courbe présente un état plutôt de jeunesse allant vers l'équilibre.

Tableau 4.3: Répartition altimétrique du bassin versant d'Ouizert

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
1324-1200	95,4	95,4	4,57	4,57
1200-1000	737,9	833,3	35,37	39,94
1000-800	521,6	1354,9	25	64,94
800-600	507,6	1862,5	24,33	89,27
600-422	223,7	2086,2	10,72	100

b) - Oued Saida

Ce sous bassin versant à une superficie de 621,2 km² avec une altitude maximale de 1195 m (tableau 4.4). Sa confluence avec l'oued Taria a lieu dans la vallée de Sahouat à 422m d'altitude. La classe des pentes (0-15%) est la plus fréquente, elle occupe une superficie d'environ 94,5% de la surface totale. La courbe hypsométrique, montre une concavité vers le bas avec des pentes faibles vers les hautes altitudes, indiquant la présence de zone abruptes en amont du bassin, favorisant ainsi un écoulement torrentiel. Les pentes de la courbe sont importantes vers les basses altitudes et expriment que l'oued Saïda termine sa course au niveau d'une zone pénéplaine. Cet oued présente bien l'état d'équilibre, offrant un potentiel érosif moyen à faible.

Tableau 4.4 : Répartition altimétrique d'oued Saïda

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
1195-1100	31,12	31,12	5,01	5,01
1100-1000	89,58	120,7	14,42	19,43
1000-900	117,2	237,9	18,86	38,29
900-800	106,8	344,7	17,19	55,48
800-700	113,8	458,5	18,32	73,8
700-600	96,8	555,3	15,58	89,38
600-500	53,8	609,1	8,66	98,04
500-422	12,1	621,2	1,94	100

c) - Oued Taria

Le sous bassin d'oued Taria, d'une superficie de 1465 km² et une altitude maximale de 1324 m (tableau 4.5), est caractérisé par des pentes faibles et moyenne, qui occupent presque la même superficie attribuée à oued Saïda (94,36%). 48,6% de surface est comprise entre l'altitude 1324 et 1000m. La forme de la courbe hypsométrique est identique à celui du bassin d'Ouizert.

Tableau 4.5 : Répartition altimétrique d'oued Taria

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
1324-1200	95,4	95,4	6,51	6,51
1200-1000	617,2	712,6	42,13	48,64
1000-800	297,6	1010,2	20,31	68,95
800-600	297	1307,2	20,27	89,22
600-422	157,8	1465	10,77	100

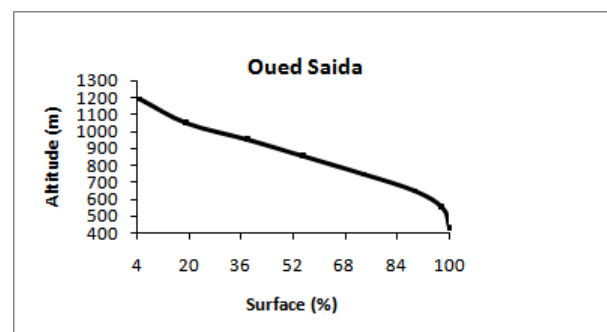
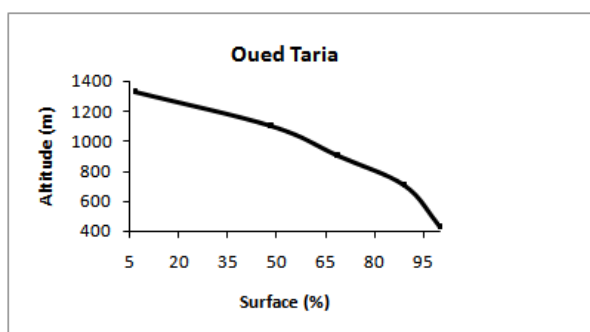
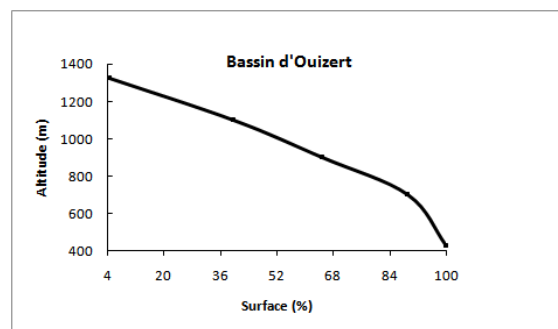


Figure 4.4: Courbes hypsométriques des sous bassins d'Ouizert

d)- Bassin de Bouhanifia

Le bassin de Bouhanifia occupe une superficie de 5376 km² avec une altitude maximale de 1454m (tableau 4.6), et un thalweg principal de 133,7 km de long. Ce bassin est entouré de montagnes ; par les monts de Benichougrane au Nord, les monts de Saida à l'Est et par les monts de Dhaya au Sud. Il est drainé par quatre bassins élémentaires (Fekan, Sahouat, Hounet et Melrir) dont, environ 98% de leurs surfaces totale sont occupées par des pentes faibles à moyenne. Les pentes faibles s'étalent sur une superficie de 65 à 76%. La forme de la courbe hypsométrique (figure 4.5), présente l'état d'équilibre du bassin, offrant un potentiel érosif moyen à faible.

Tableau 4.6: Répartition altimétrique du bassin de Bouhanifia

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
1454-1400	1,7	1,7	0,031	0,031
1400-1200	375,2	376,9	6,98	7,01
1200-1000	1022,75	1399,65	19,02	26,03
1000-800	1219	2618,65	22,67	48,7
800-600	1224,05	3842,7	22,76	71,46
600-400	1416,3	5259	26,34	97,8
400-200	117	5376	2,17	100

e)- Oued Hounet

La courbe hypsométrique, montre une concavité vers le bas, avec une pente faible vers les hautes altitudes. Elle indique la présence de pentes très fortes à l'amont ; presque 50% de la surface totale est comprise entre la fourchette d'altitude (1000-1400). Vers les basses altitudes, la pente accentuée de la courbe indique que l'oued Hounet rejoint la plaine où se trouve la station de trois rivières. La forme de la courbe est caractéristique d'un bassin à l'état de jeunesse allant vers l'équilibre, d'où un potentiel érosif assez important.

Tableau 4.7: Répartition altimétrique du sous bassin d'oued Hounet

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
1431-1400	0,95	0,95	0,036	0,036
1400-1200	346	346,95	13,42	13,45
1200-1000	932	1278,95	36,15	49,6
1000-800	669	1947,95	25,95	75,55
800-600	445,05	2393	17,26	92,81
600-400	167	2560	6,47	99,28
400-200	18	2578	0,69	100

f)- Oued Melrir

Le sous bassin d'oued Melrir occupe une superficie de 1464 km² avec une altitude maximale de 1454m. La longueur du thalweg principal est de 65 km. Vers les hautes altitudes, le relief accentué à l'amont du bassin est bien mis en évidence par la forme de la courbe hypsométrique (tableau 4.8 et figure 4.5). Ce dernier présente un état d'équilibre du sous bassin et donc un potentiel érosif moyen.

Tableau 4.8: Répartition altimétrique du sous bassin d'oued Melrir

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
1454-1400	0,74	0,74	0,05	0,05
1400-1200	29,2	29,94	2	2,05
1200-1000	71,5	101,44	4,88	6,93
1000-800	426,3	527,74	29,11	36,04
800-600	506	1033,74	34,56	70,6
600-400	364	1397,74	24,86	95,46
400-287	66,26	1464	4,52	100

g)- Oued Fekan

Le bassin d'oued Fekan correspond rigoureusement à une zone plane dont l'altitude moyenne est de 470m, il est limité au Nord par les monts des Benichougranes, au sud par les monts de Saida. Il présente de fortes pentes à l'amont et se termine par une vallée encaissée à son point de confluence. Ceci est bien indiqué par la courbe hypsométrique (tableau 4.9 et figure 4.5), dont la forme témoigne bien de l'état de vieillesse du bassin engendré par l'érosion du bassin.

Tableau 4.9: Répartition altimétrique d'oued Fekan

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
1166-1000	19,25	19,25	1,61	1,61
1000-900	57,5	76,75	4,82	6,43
900-800	66,2	142,95	5,55	11,98
800-700	118,6	261,55	9,94	21,92
700-600	145,8	407,35	12,22	34,14
600-500	283	690,35	23,72	57,86
500-400	495	1185,35	41,5	99,36
400-292	7,65	1193	0,64	100

h)- Oued Sahouat

Aux basses altitudes l'oued Saida et Taria se rejoint pour former l'oued Sahouat, cette vallée où 65% de superficie est occupée par des pentes faibles (0-5%), constitue en fait une zone de dépôt sédimentaire formé de calcaires, de grès et de marnes du Jurassique (Benfetta, 2000); la forme de la courbe hypsométrique présente bien l'état d'équilibre du bassin, offrant un potentiel érosif moyen à faible (Tableau 4.10, figure 4.5).

Tableau 4.10: Répartition altimétrique d'oued Sahouat

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
760-700	0,71	0,71	0,5	0,5
700-600	8	8,71	5,67	6,17
600-500	30,64	39,35	21,73	27,9
500-400	76,65	116	54,36	82,26
400-290	25	141	17,73	100

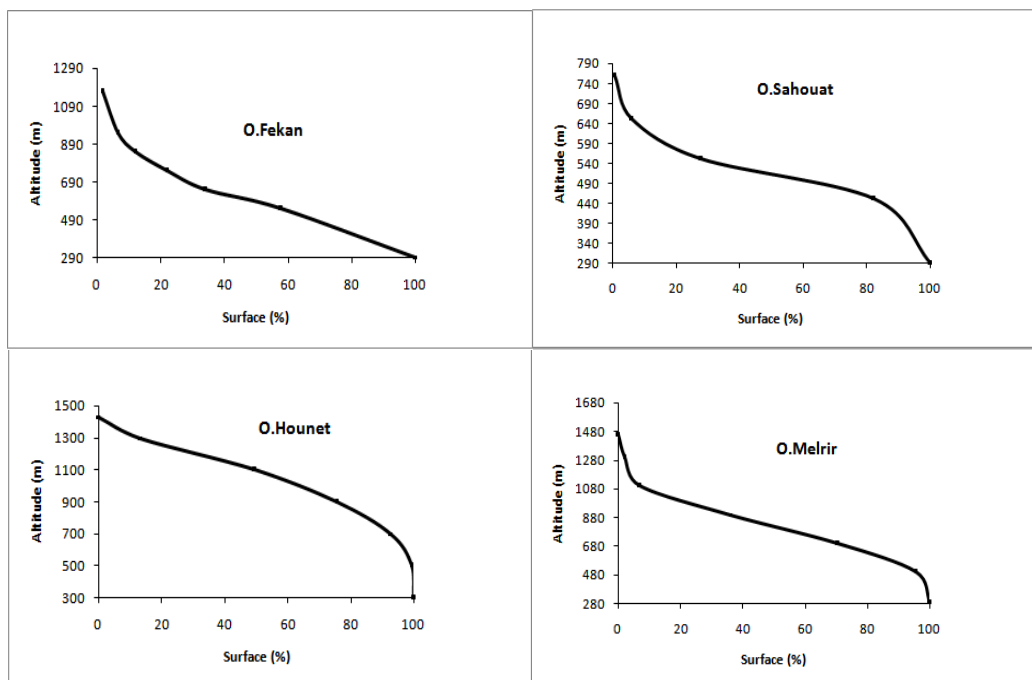
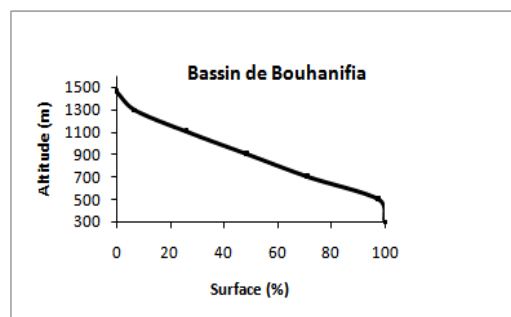


Figure 4.5: Courbes hypsométriques des sous bassins de Bouhanifia

h)- Bassin de Fergoug

Il présente une unité hydrographique des Benichougrane occidentaux. Dans cette partie, le massif des Benichougranes est compris entre deux compartiments effondrés : la plaine de l'Habra et celle de Ghriss qui l'encadrent au Nord et au Sud (figure 4.1), il se présente ici comme une aire de surélévation bien individualisée avec un aspect montagneux. Selon le tableau 4.12, Les surfaces à fortes pentes (15-35%) occupent 12% de la surface totale du bassin. Ceci est bien indiqué par la courbe hypsométrique (tableau 4.11 et figure 4.6), dont la forme témoigne bien de l'état de vieillesse du bassin engendré par l'érosion du bassin.

Tableau 4.11: Répartition altimétrique du bassin de Fergoug

Tranches d'altitudes	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
884-800	0,84	0,84	0,1	0,1
800-700	32,4	33,24	3,8	3,9
700-600	116	149,24	13,62	17,52
600-500	158,1	307,34	18,56	36,08
500-400	148,06	455,4	17,38	53,46
400-300	170,2	625,6	20	73,46
300-200	135	760,6	15,85	89,31
200-100	73,1	833,7	8,58	97,89
100-20	18	851,7	2,11	100

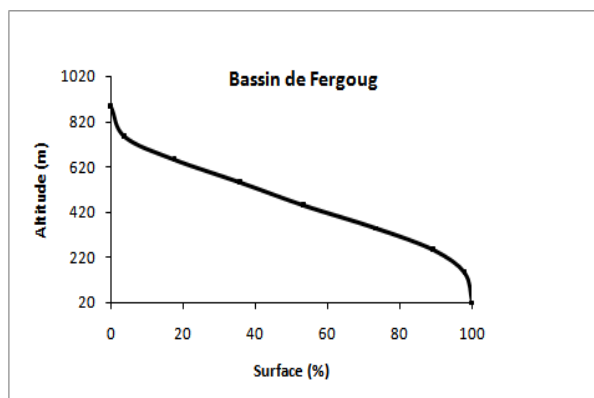


Figure 4.6: Courbe hypsométrique du bassin de Fergoug

Tableau 4.12: Répartition des pentes dans le bassin versant de l'Oued El Hammam

S/bassins	Pentes (%)			
	0-5	5-15	15-25	Supérieure de 25
Oued El Hammam	66,5	29,5	3,95	0,05
Ouzert	62,32	32,23	5,43	0,01
Saida	56,63	37,9	5,44	0,02
Taria	63	31,38	5,61	0,016
Bouhanifia	74	23,8	2,04	0,07
Sahouat	65,31	32,57	2,1	0,007
Hounet	73,16	25,06	1,62	0,14
Melrir	74,79	22,35	2,85	0,001
Fekan	75,92	22,1	1,96	0,01
Fergoug	29,57	58,37	11,98	0,06

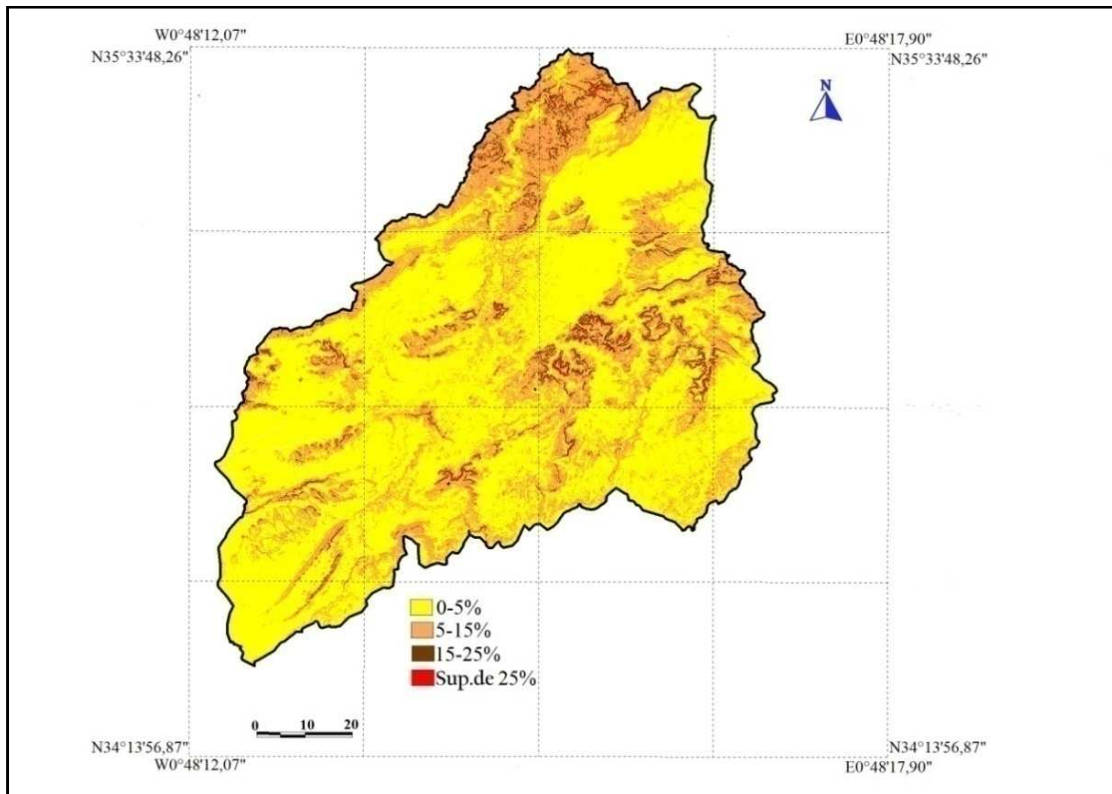


Figure 4.7: Carte des pentes du bassin versant de l'oued El Hammam

En examinant les résultats du tableau ci-dessous, et la figure 4.7, On peut constater que le relief régnant le bassin versant de l'oued El Hammam est assez fort à fort, du fait que la plupart de ses affluents prennent leurs sources à des altitudes assez importantes.

Tableau 4.13: Caractéristiques du relief du bassin versant de l'oued El Hammam

Sous bassins	Altitudes (m)				Ig	Ds (m)	Classe de relief
	Maximale	Minimale	Moyenne	Fréquente			
Ouizert	1324	422	897	1000-1200	8,36	381,4	Fort
Saida	1195	422	829,5	900-1000	11,10	276,6	Fort
Taria	1324	422	925,4	800-1000	8,44	323	Fort
Bouhanifia	1454	200	802	400-600	3,78	277,1	Fort
Sahouat	760	290	403,7	400-500	13,98	166	Assez fort
Hounet	1431	200	961,5	1000-1200	4,99	253,3	Fort
Melrir	1454	287	723,5	600-800	7,55	288,8	Fort
Fekan	1166	292	583,8	400-500	10,17	351,2	Fort
Fergoug	884	20	422	300-400	6,85	200	Assez fort

- Ig : indice de pente globale, elle est égale à la dénivelée divisée par la longueur du rectangle équivalent.

- Ds : dénivelée spécifique, elle est égale à l'indice de pente globale multipliée par la racine carrée de la surface.

4.5. Couvert végétal et occupation du sol

Les formes et l'importance de l'érosion apparaissent comme directement liées à l'importance du couvert végétal dans un milieu donné. Le risque d'érosion augmente lorsque le sol n'a qu'un faible couvert végétal. La végétation protège le sol de l'impact des gouttes de pluie, tend à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permet une meilleure infiltration. L'efficacité du couvert végétal à réduire l'érosion dépend du type de l'étendue et de la densité de ce dernier.

Les cultures céréalières et des maraichages dominent la partie Sud de notre bassin versant. Ce sont des cultures qui couvrent le sol saisonnièrement et le laissant nu pendant la plus grande partie de l'année, ce qui provoque le déclenchement d'une érosion accélérée.

4.5.1. Les formations arbustives

a)- Végétation forestière

La couverture forestière actuelle du bassin révèle une sensible modification par rapport au recouvrement évalué dans les anciennes cartes topographique. La plus part des surfaces boisées ne sont revêtues que d'une formation très dégradée, se qui présente avec une texture grossière et irrégulière. C'est généralement sur les versants tournés avec le nord que nous retrouvons ces taches de verdure. Les espèces dominantes sont le chêne, et le pin d'Alpe. On signale que la densité forestière a diminué ces dernières années suite à l'action anthropique et incendies récents.

b)- Arbres fruitiers et vigne

Une arboriculture riche domine pratiquement tout au long de l'Oued El Hammam, sur les riches terrasses que l'on trouve dans la vallée, les arbres rustiques tels que l'amandier, le figuier et l'olivier occupant des surfaces importantes.

4.5.2. Cultures maraichères

Celles-ci pratiquées surtout à proximité des Oueds ou des puits, pour permettre leur irrigation. La pomme de terre et le petit pois sont des cultures temporaires, discontinues et ne protègent pas efficacement le sol, cependant le labour favorise l'infiltration et constitue un moyen antiérosif. La carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued El hammam présente la diversité de cultures et d'occupations du sol (figure 4.8), elle montre que les cultures extensives occupent plus de la moitié de l'espace du bassin versant. Dans le détail, les céréales occupent (58.16 %) de la surface du bassin versant ; les vignes (3.11 %), (10.47%) de culture maraîchère et le reste est occupé par les arboricultures (9.63 %), les broussailles (5.50 %) et les forêts (4.57 %).

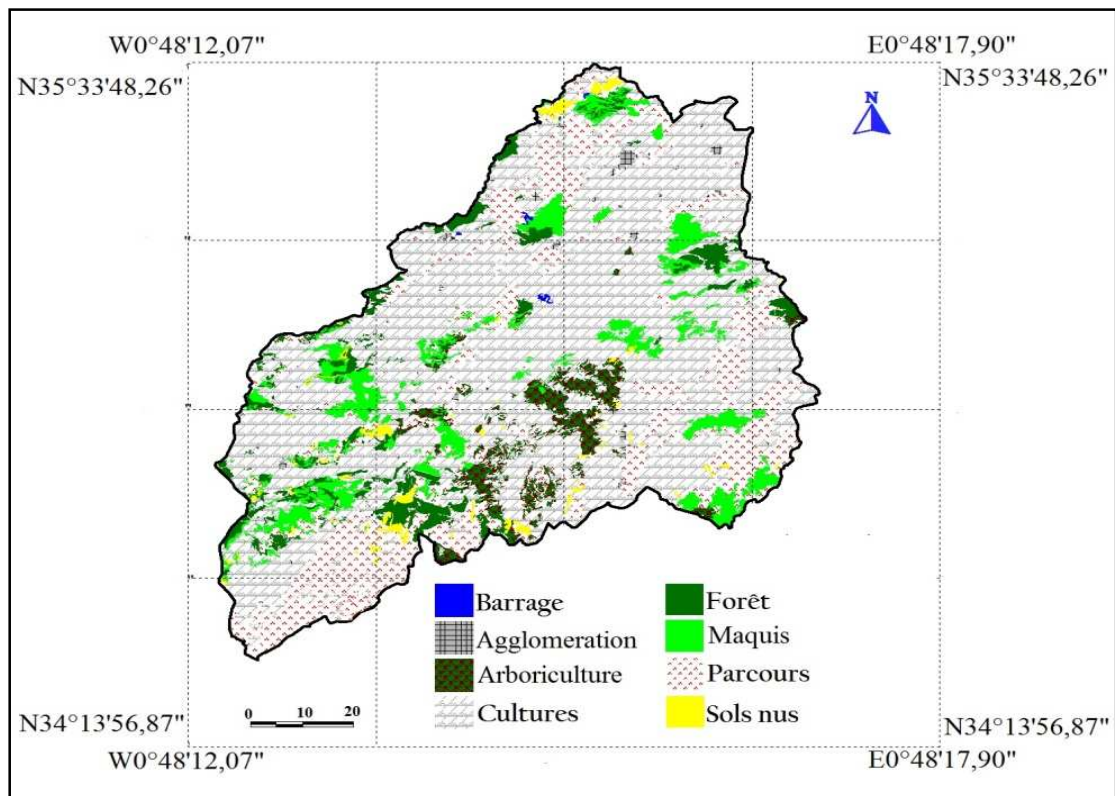


Figure 4.8: Carte d'occupation des sols

4.6. Géologie

4.6.1. Introduction

La géologie du substratum influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface. Les caractères géologiques principaux à considérer sont la lithologie et la structure tectonique. La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide.

4.6.2. Stratigraphie

Le bassin d'étude fait partie du domaine tellien et plus exactement du grand bassin de la Macta. Ce bassin est limité au Nord et à l'Est par les massifs de Benichougrane, au Sud et Sud-ouest par les monts de Saida. De nombreux sondages exécutés dans la région ont permis d'établir la succession des faciès et des étages rencontrés dans le sous-sol (figure 4.9).

D'après Gautier, 1938 ; Augier, 1967, la succession lithostratigraphique est la suivante :

a/ Le trias

C'est une formation salifère, argilo-gypseuse avec des passées contient des roches de dolomies et de marnes bariolées. Cette formation affleure dans les monts de Benichougrane à la base des nappes du crétacé (Argile de Saida). Dans la région de Saida, il y a la présence d'un membre de faciès carbonaté dans un ensemble très réduit. L'épaisseur maximale est 15 m.

b/ Le jurassique

C'est une formation rigide constituée par des calcaires gris à pate au sommet qui passe à des calcaires dolomitiques et dolomies, il est rencontré dans les monts de Saida avec une épaisseur est de 300 a 400 m. Selon Clair (1952), on distingue les formations suivantes :

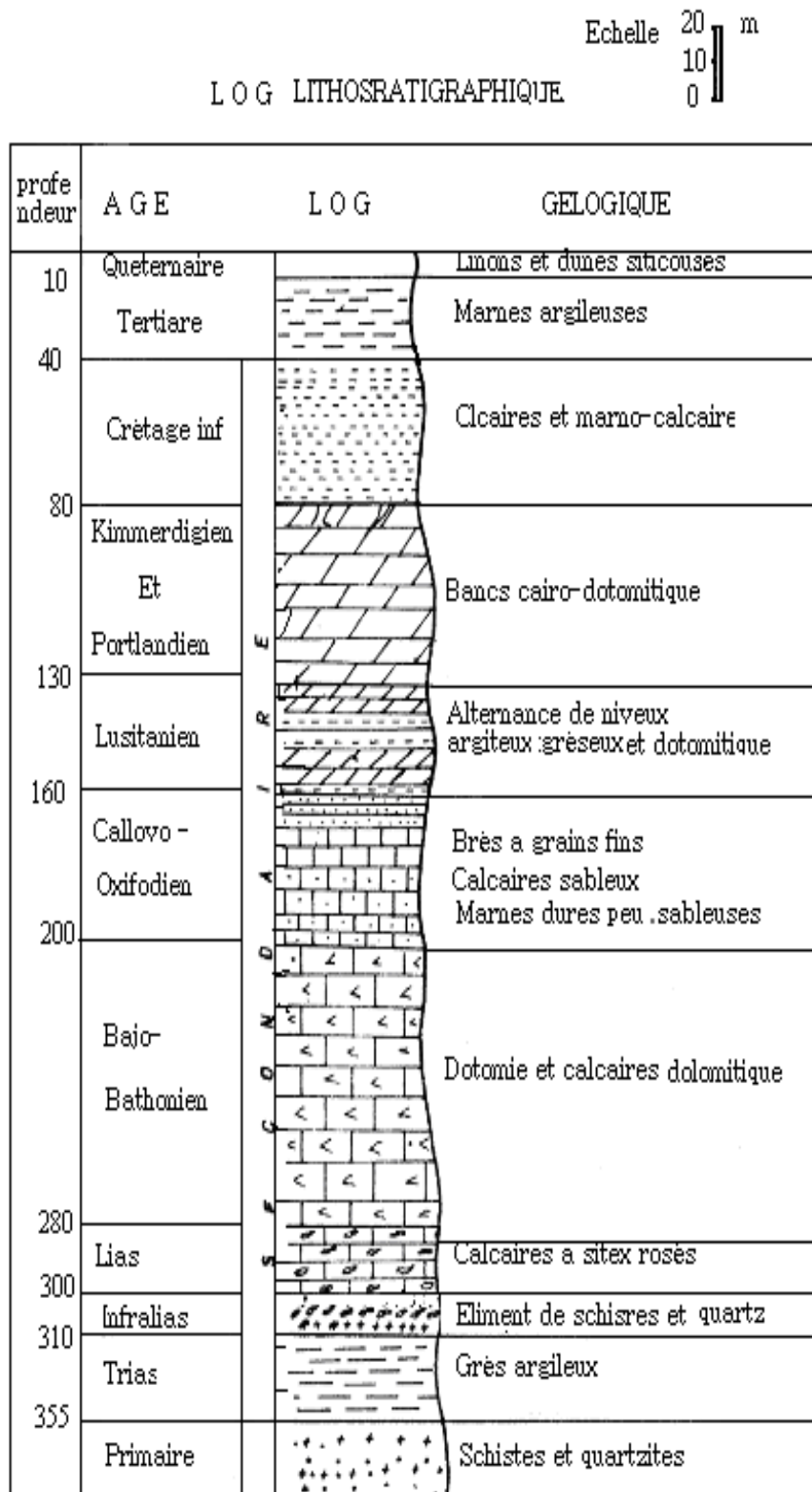


Figure 4.9: La lithostratigraphie du bassin versant de l'Oued El Hammam

- **Aaléno-Bajo-Bathonien**

Cette formation est représentée par des terrains dolomitiques. Ce groupe est largement répandu dans la région de Saida, ces dolomies sont plus épaisses que les dolomies inférieures et peuvent atteindre jusqu'à 150 m. Elles sont très variées, tant par leur teinte qui peut être très blanche, grise, jaunâtre ou rosée, que par leur structure ; elles peuvent passer de la dolomie cristalline à grain fin donnant une roche extrêmement compacte à une dolomie pulvérulente à grand cristaux qui s'altère facilement.

- **Callovo-Oxfordien**

Il est représenté par une formation composée d'intercalations des bancs gréseux et argileux dans sa partie supérieure. Il affleure dans la vallée de l'oued Taria et la région de Sidi Aissa (Hammam Rabi), Son épaisseur peut dépasser 300m (forage de Gharrouss).

- **Lusitanien**

C'est une série argilo-gréseuse de 50 m d'épaisseur, limitée à la partie supérieure de petits bancs dolomitiques et à la partie inférieure par des couches de marne grise à nombreux modules ferrugineux. Cette formation est largement répandue au Nord-Est de Saida. Au Nord-Ouest de Saida, ce banc dolomitique est surmonté d'une alternance de grès de couleur claire avec intercalation marneuses.

- **Le kimméridgien et le portlandien**

C'est une série de bancs calcaréodolomitiques d'une centaine de mètres d'épaisseur, Cette formation affleure au Nord-est des monts de Saida et plonge sous la plaine de Ghriss.

c/ Crétacé Inférieur

Ce sont des calcaires gréseux et des grès fins argileux, c'est une formation plus argileuse (Dalloni, 1924).

- **Le Valanginien**

D'une cinquantaine de mètres d'épaisseur, il apparait au dessus des assises gréseuses à Oued Taria, surmonté par un ensemble de calcaires jaunes et de marno-calcaires attribué à l'Hautervien et au Bariennien.

- **Le Sénonien**

Il recouvre la partie Sud de l'extrémité des monts de Saida. Ce sont des terrains calcaires de couleur blanche.

d/ Le Tertiaire

Il recouvre les monts de Saida et la partie Nord du bassin versant (les monts de Benichougrane). Il est constitué essentiellement de marne et d'argile sableuse.

- **Eocène**

Il apparait à l'Est du bassin. Il est représenté par une alternance de bancs gréso-calcaires et de couches marneuses.

- **Oligocène**

Il affleure dans les monts de Benichougrane. Cette formation est constituée de couches argilo-marneuses avec passage de bancs gréseux. A la base s'intercale des conglomérâtes de base polygénique peu épais.

- **Miocène**

Dans les monts de Benichougrane, cette formation est représentée par des terrains épais (800 m) de marnes vertes surmontées par des sables fins argileux à concrétions calcaires vers le Nord-Ouest.

- **Pliocène**

Le Pliocène apparait dans le versant Sud des Benichougrane. Il est représenté à sa partie inférieure par des grés passant à des sables consolidés de couleur jaune. La partie supérieure

est constituée par des calcaires lacustres. Cette formation se plonge jusqu'au pied mont du versant Sud des Benichougrane, sous les alluvions de la plaine de Ghriss.

e/ Le Quaternaire

Ce sont des alluvions quaternaires d'origine fluviale. Sur les calcaires lacustres du Pliocène repose les argiles rouges détritiques qui affleurent sur la bordure Est et Nord de la région d'étude (figure 4.10). Il occupe presque la totalité de la plaine de Ghriss et la majorité des vallées des oueds.

La répartition des différentes formations par groupes lithologique en % des sous bassins étudiés est donnée dans le tableau 4.14.

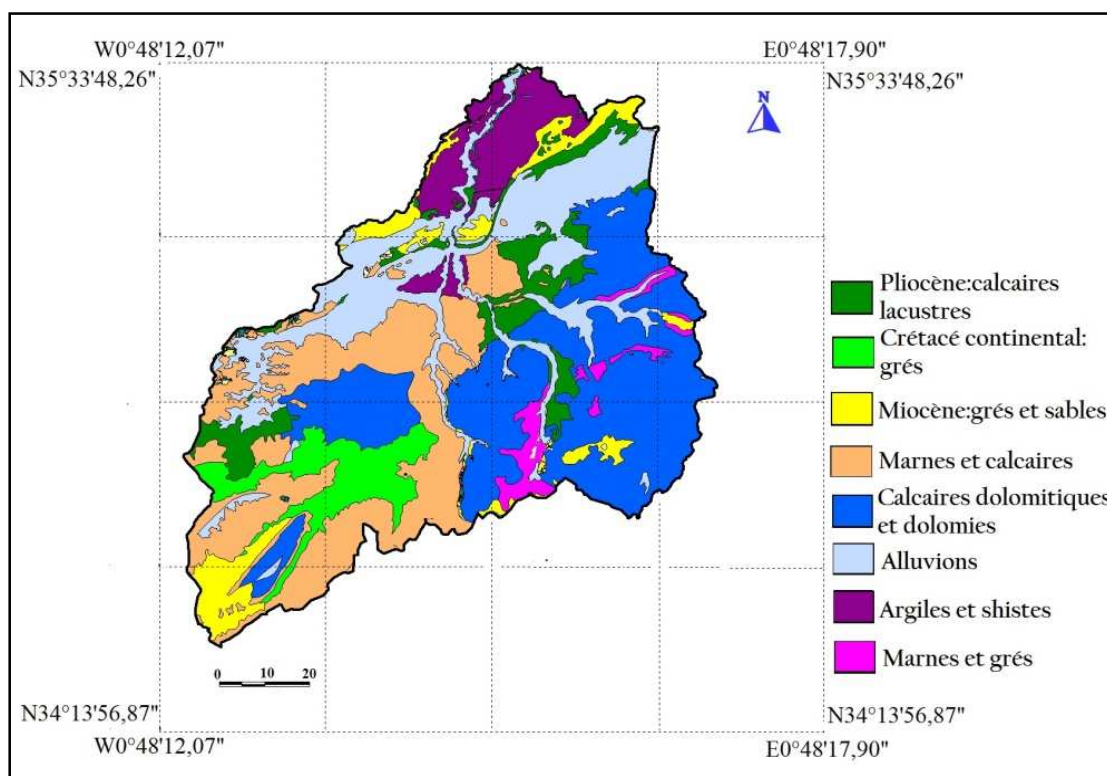


Figure 4.10: Carte lithologique

Tableau 4.14: Répartition des formations lithologiques en % des sous bassins de l'oued El Hammam

	Argiles et shistes	Marnes et calcaires	Marnes et grés	Calcaires et dolomies	Calcaires lacustres	Grés	Grés et sables	Alluvions
Bassin	Terrains imperméables			Terrains perméables				
Ouizert	0	0	5,5	74	11,4	0	4,5	4,6
Bouhanifia	1,4	40	1	18	12	11	1,6	15
Fergoug	76	0	0	0	5	0	9	10

Les dolomies et calcaires dolomitiques occupent presque la totalité de la superficie du bassin d'Ouizert, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface. L'abondance de formations perméables dans le bassin d'Ouizert et Bouhanifia permet de différencier le comportement hydrologique de ces bassins à celui de Fergoug, dont 76% de la superficie est occupée par des argiles et schistes. Le bassin de Bouhanifia peut avoir aussi un comportement différent, suite à l'abondance relative des marnes et calcaires qui occupent 40% de la surface du bassin. Ces formations étant plus facilement érodables.

4.7. Tectonique

La vallée de l'oued El Hammam suit sensiblement un système de failles et des cassures alignées selon une direction NE-SW (El mahi, 2012): elle est barrée en deux points située dans le sillon Sud-tellien, région de tectonique complexe et où la sédimentation n'a donné que des roches imperméables et compressibles (argile et marnes) ou très perméables et peu cohérentes à l'exception des quelques bancs durs (grès, pouding et sable plus ou moins cimentés) dans la bordure Nord (Monts de Benichougrane). Pour le sous-bassin d'oued Saïda, les très nombreuses failles reconnues par la géologie mettent en évidence la tectonique cassante des terrains carbonatés avec constitution des blocs dolomitiques des dimensions et des formes extrêmement variées, décalés les uns par rapport aux autres dans tous les plans.

Certaines zones tectoniques les plus riches en failles ont une forme généralement allongée, dans la direction Nord-Sud de la vallée de Saïda et Sud-ouest Nord-est, sur le reste de la région (figure 4.11). L'ensemble de la région de Saïda qui comporte le sous-bassin d'oued Saïda est formé d'un plateau pourvu de deux axes principaux tectoniques riches en failles formant un plexus au centre. L'inclinaison générale des formations est orientée vers le Nord et vers le Sud à partir de l'axe du Djebel Sidi Youssef qui se situe à l'Ouest du bassin versant. Le système de faille du plateau est en communication avec le réseau de faille de la zone effondrée de la vallée de Saïda au niveau de la région de Nazereg (Rebahia). L'ensemble de cette tectonique détermine la Karstification et le fonctionnement du système hydraulique de la région (Pitaud, 1973). Ces tectoniques cassantes subies par les Monts de Saïda s'enfoncent légèrement vers le Nord, ce qui favorise l'écoulement et le drainage des eaux vers la plaine de Ghriss. A Ain Fekan cet ensemble calcaréo-dolomitique du Jurassique Supérieur est limité par une faille qui le met en contact avec le Crétacé inférieur argilo-gréseux (Achite et al. 2003).

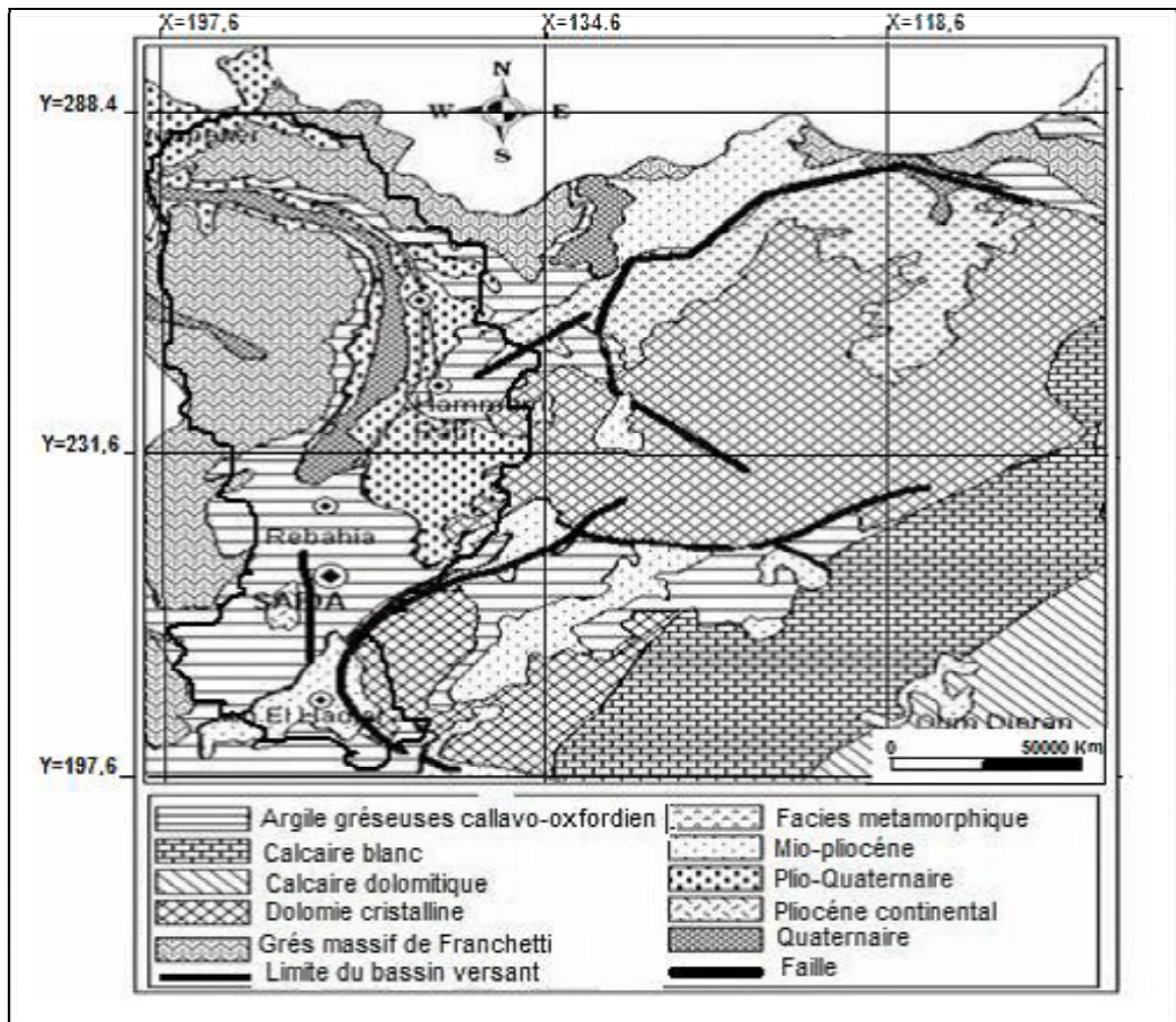


Figure 4.11: Ensemble de failles dans le sous bassin versant de l'oued Saida (Source : Deschamp (1973), in Yles, 2014)

Chapitre V

Pluviométrie de l'Oued El
Hammam

5.1. Introduction

Les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau (Roche 1963, Cosande, 2001...). Ce sont les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel influençant les régimes hydrologiques. Mais, contrairement aux paramètres proprement physiques permettant une interprétation seulement qualitative du comportement hydrologique des bassins, les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble, variables aléatoires dans le temps et l'espace, permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large (Bouanani, 2005).

Ce chapitre sera consacré à l'étude de la pluviométrie dans le bassin de l'oued El Hammam, afin de pouvoir ajouter un paramètre important du phénomène de transport solide dans la région. Les séries pluviométriques qui présentaient des lacunes ont été largement homogénéisées avant leur utilisation; cela est essentiel pour arriver à une série longue et continue. Les températures atmosphériques du bassin seront aussi esquissées en soulignant plus particulièrement l'importance de la saison sèche et donc l'effet déterminant de l'évapotranspiration, paramètre essentiel du déficit d'écoulement.

5.2. Le Climat

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

L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer, une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles (Bouanani, 2005).

Le bassin de L'Oued El hammam est situé dans la zone subtropicale, versant nord de l'Atlas Tellien, il est soumise à l'influence directe du Méditerranéen, au Nord ; et de la vaste étendue continentale du Sahara, au Sud. Le climat est caractérisé par deux grandes saisons : un hiver froid, dont les masses d'air humide, par effet orographique de l'Atlas, provoquent des précipitations cycloniques exceptionnelles ; et un été chaud ou l'air continental localisé dans le Nord, entraîne un anticyclone qui conditionne un temps stable et très sec. En Hiver

comme en été, le bassin subit les effets maritimes de modération en matière des températures extrêmes saisonnières (Elouissi, 2004).

5.3. Précipitations

Le bassin de l'Oued El hammam comprend au total près de 28 stations pluviométriques ; ce nombre, paraît à priori, satisfaisant, mais il est en réalité très faible comparé à la superficie du bassin : 1poste pour 297 km² environ. La période d'observation retenu comporte des données qui s'étalent sur 26 ans, de 1979 à 2005, et qui peuvent être confronté aux écoulements liquides pour dégager les coefficients d'écoulement.

Par ailleurs, vu la qualité médiocre des observations, les données ne sont pas toujours dépourvues d'erreurs, Pour résoudre ce problème de fiabilité des données, l'emploi d'outils statistiques et graphiques est nécessaire pour contrôler la qualité des échantillons pluviométriques et déceler l'anomalie qui pourrait les affecter en vue de leur homogénéisation. Cette dernière opération est indispensable si l'on veut déterminer de façon plus ou moins précise les caractéristiques des précipitations. Nous avons ainsi établi par le moyen de la méthode "double masses et écarts cumulés" une vérification complète de l'homogénéité des totaux annuels, ensuite par la méthode de la corrélation linéaire, nous avons essayé de reconstituer par extrapolation les données manquantes dans les stations pourvues de lacunes, ce qui donc contribue à améliorer la cartographie des isohyètes.

Bien que la notion de la moyenne pluviométrique estompe la réalité des faits climatiques, notamment en domaine méditerranéen, sa connaissance demeure nécessaire pour aborder l'étude de l'abondance des cours d'eau et surtout la détermination du bilan moyen annuel de l'écoulement. Elle permet également de cerner la variabilité des pluies sur de longues périodes d'observation, néanmoins, cette variabilité doit être précisée par des moyens statistiques qui permettent de lier les hauteurs précipitées à leur durée de récurrence.

Les résultats d'analyse de la figure 5.1, sont résumés au (tableau 5.1) .Dans l'ensemble, malgré des écarts plus prononcés entre certaines stations, on relève une certaine homogénéité des valeurs des précipitations. Quelques remarques s'imposent, tout d'abord au sujet des années ayant enregistré des hauteurs de pluie maximales sur 26 ans; l'année 1995-1996 touche 55% des stations.

Tableau 5.1: Caractéristiques des précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de l'oued El Hammam

Stations	Moyenne (mm)	Max (année)	Min (année)	Nombre d'année > moy	Pmax/Pmin
A.Chaffia	278,04	605,5 (86-87)	121,1 (99-00)	12	5
A.El hadjar	324,7	649,2 (90-91)	119,7 (83-84)	11	5,42
Ain frass	227,3	363,5 (79-80)	120,5 (98-99)	13	3,01
Ain Tiffrit	339,81	564,9 (95-96)	168,3 (92-93)	14	3,35
Aouf	416,91	629 (90-91)	205,9 (81-82)	12	3,05
Benian	249,9	530,9 (95-96)	140,2 (84-85)	11	3,78
Bouhanifia	254,33	370,4 (79-80)	135 (96-97)	12	2,74
Daoud	221,38	295,9 (01-02)	113,33 (99-00)	16	2,61
Douar Keroua	263,58	485,2 (95-96)	172,9 (98-99)	12	2,8
Fergoug	283	435,6 (80-81)	168,5 (96-97)	13	2,58
Ghriss	266,24	507,2 (95-96)	144 (92-93)	13	3,52
Hacine	287,37	465,6 (79-80)	173,2 (81-82)	12	2,68
Khalouia	334,07	530 (79-80)	205,7 (98-99)	14	2,57
Maoussa	289,39	490,3 (80-81)	165,7 (99-00)	15	2,95
Mascara	311,25	461,7 (95-96)	198,5 (81-82)	13	2,32
Merine	300,4	510,5 (95-96)	170,9 (89-90)	12	2,98
Oued Taria	249,1	497,4 (95-96)	102,6 (82-83)	11	4,84
Ouizert Aval	234,9	322,6 (90-91)	134,7 (81-82)	14	2,39
Ouizert Barrage	226,7	388,8 (95-96)	129,2 (81-82)	14	3
Oued Saida	307,4	595,6 (95-96)	173,3 (92-93)	12	3,43
Sfisef	299	477,6 (95-96)	149 (96-97)	14	3,2
Sidi Ahmed	304,43	506,6 (95-96)	202,8 (87-88)	12	2,49
Sidi Kada	302,3	473,8 (95-96)	198,4 (92-93)	13	2,38
Temesna	286,91	480 (79-80)	150,8 (92-93)	16	3,18
Telagh	211,55	469,6 (95-96)	82,4 (99-00)	12	5,69
Tenira	324,2	467,7 (95-96)	187 (92-93)	13	2,5
Tizi	320,6	429,1 (84-85)	180,4 (81-82)	13	2,37
Trois Rivières	209,98	297,7 (95-96)	127,6(96-97)	13	2,33

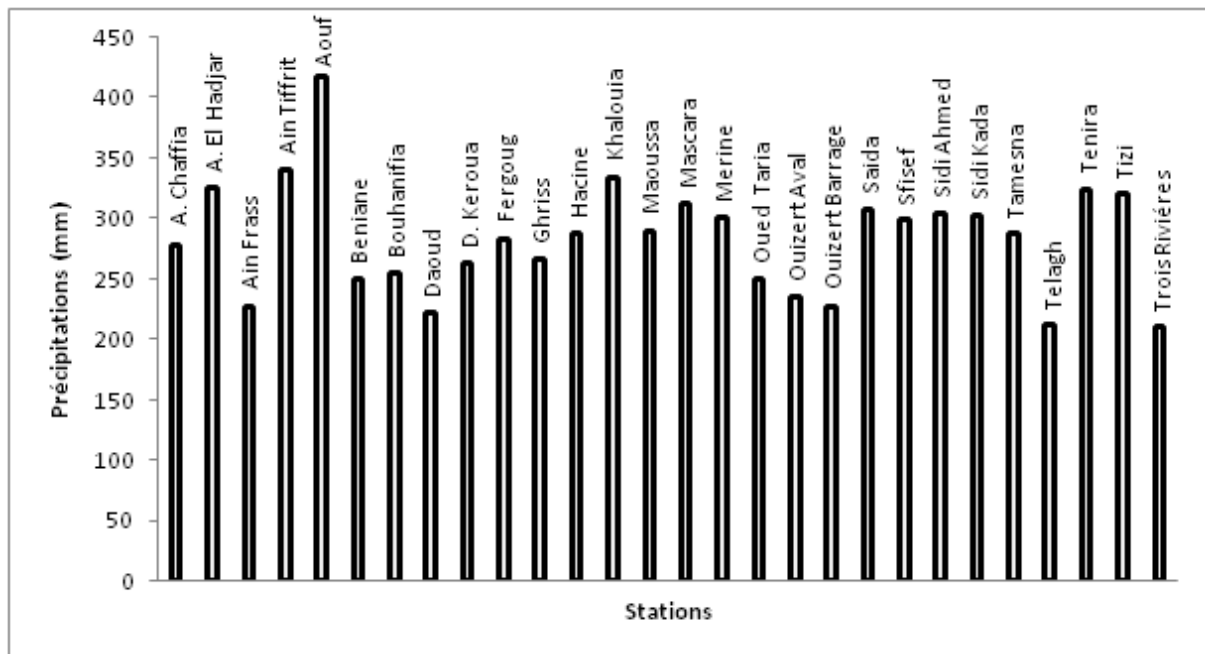


Figure 5.1: Précipitations moyennes annuelles aux stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued El Hammam

5.3.1. Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles

Il convient de remarquer également à partir de la figure 5.2, l'alternance saison humide-saison sèche tout les trois ans de 1979 au 1990, et tous les deux ans de 1991 jusqu'au 1995 ; à partir de l'année 1996-1997, apparait une tendance déficitaire des précipitations de 7 années où plusieurs valeurs annuelles se trouvent en dessous de la moyenne.

On se référant aux travaux réalisés par J.P. Laborde (1993), qui a mis en évidence une succession de quatre phases pluviométriques, en étudiant les données de 120 postes pluviométriques du Nord de l'Algérie :

- Une longue phase où la pluviométrie est supérieure à la moyenne de 6 %, de 1922 à 1938.
- Une courte phase sèche débutant en 1939 et s'arrêtant en 1946 à l'ouest et au centre du pays (déficit de l'ordre de 11 %).
- Une phase pluvieuse qui dure jusqu'en 1972 environ.
- Une longue phase sèche qui s'affirme dès la fin de 1973.

Et aux ceux réalisés par Meddi et al (2009), qui a constaté une diminution très nette des pluies à partir de la première moitié des années 1970 en étudiant les précipitations annuelles sur la période 1930-2002 au bassin versant de la Macta. Une rupture dans la stationnarité des séries pluviométriques a été mise en évidence entre la fin des années 1960 et celle des années 1970, la diminution des précipitations annuelles moyennes avant et après le point est en moyenne de 38 %, (Meddi et Humbert, 2000 ; Meddi et al. 2003, 2009 ; Meddi et Hubert, 2003). On conclue que les séries pluviométriques qui seront utilisées pour le calcul des bilans hydrologiques correspondent à des périodes de faible pluviosité.

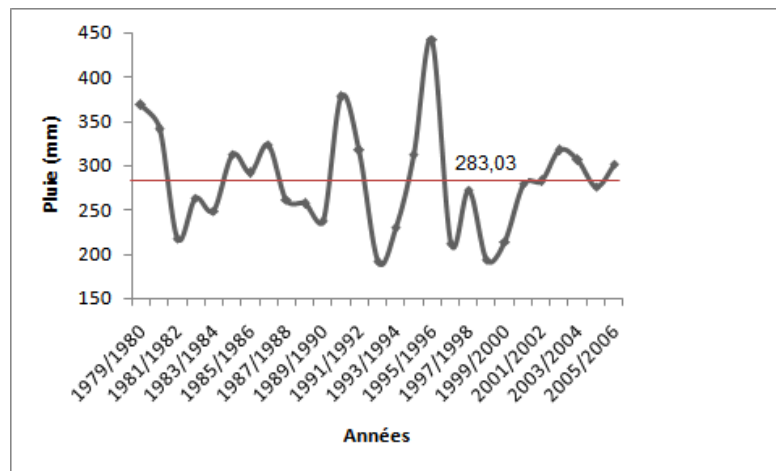


Figure 5.2: Variation annuelle des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant de l'Oued El Hammam

Tous les auteurs qui ont étudié la pluviométrie en Algérie montrent que la répartition de la pluie, subit trois influences, celle de l'altitude, les conditions topographiques, de la longitude et enfin celle de l'éloignement à la mer.

Ainsi, P. Seltzer (1946) a montré que la répartition des pluies en Algérie obéit aux trois lois suivantes :

- La hauteur de pluie augmente avec l'altitude mais est plus élevée sur les versants exposés aux vents humides que sur les versants sous le vent. A la même latitude, la station de Hacine situé à 145 m ne reçoit 287,37 mm, alors que celle de Khalouia situé à 560,32 m reçoit 334,07 mm.
- Elle augmente de l'Ouest à l'Est.
- Elle diminue à mesure que l'on s'éloigne du littoral.

Notre carte de la répartition spatiale de la pluviométrie moyenne du bassin versant de l'Oued El Hammam (figure 5.3) représente un échantillon caractéristique au niveau de l'Ouest algérien. En effet, la pluie diminue à mesure que l'on s'éloigne du littoral à cause de l'appauvrissement progressif de l'atmosphère en vapeur d'eau, lors du passage des courants aériens qui abandonnent leur pluie en franchissant les chaînes montagneuses : tel est le cas de la station de Trois rivières située à une altitude de 315 m qui ne reçoit que 210 mm, alors qu'à 30km seulement au Nord, la station de Hacine est plus arrosée et reçoit 287, 37 mm. Les monts de Benichougrane constitueraient un premier obstacle au passage de nuages.

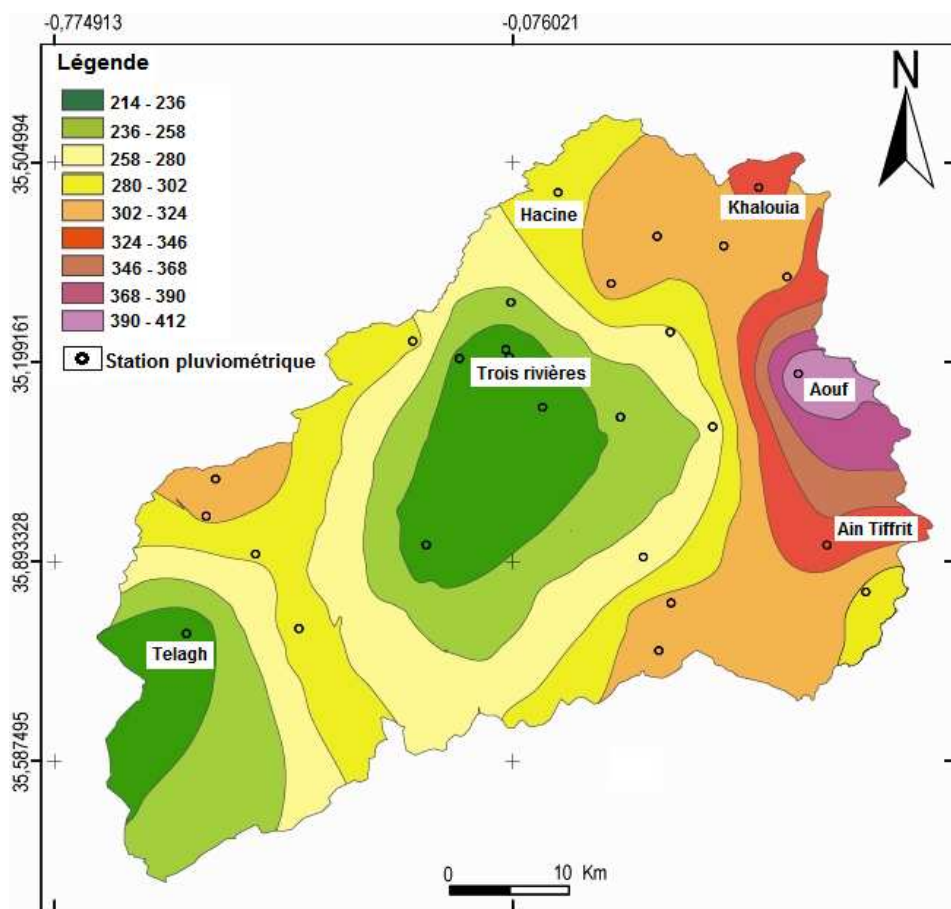


Figure 5.3: Répartition spatiale de la pluviométrie moyenne du bassin versant de l'Oued El Hammam (1979/2005)

On note également une sensible augmentation pluviométrique de l'Ouest à l'Est; ceci est très perceptible au niveau du bassin. . La station de Telagh , se trouvant à la limite Ouest et à une altitude de 908,2 m, enregistre 211,55 mm. À la limite Est, les stations de Aouf à 990 m et Ain tiffrit à 1105 m d'altitude enregistrent respectivement une hauteur de pluie de 416,91 mm et 339,81mm.

5.3.2. Variations temporelles des précipitations annuelles

Afin de caractériser la pluviosité propre à chaque année, il convient de tenir compte de "l'écart à la moyenne" correspondant à l'excédent ou au déficit des précipitations de l'année considérée rapporté à la moyenne de 26 ans. Cet écart est calculé par :

$$E_i (\%) = [(P_i - P_n) / P_n] \cdot 100$$

Avec:

E_i : écart à la moyenne

P_n : module pluviométrique moyen

P_i : total de l'année considérée.

L'écart à la moyenne (tableau 5.1), varie pour les années de plus forte pluviosité, de +121% à Telagh à + 0,08 à Merine, pour une moyenne de 24% pour tout le bassin. Pour les années de plus faible pluviosité, il oscille entre -63,14% à Ain el Hadjar et -0,03 à Sidi kada pour une moyenne de -52%.

Le coefficient d'irrégularité du régime des précipitations annuelles : rapport du module de l'année la plus humide P_M à celui de l'année la plus sèche P_m est en moyenne de 3,2 pour le bassin de l'Oued El Hammam. Il varie de 2,33 (Trois rivières) jusqu'à plus de 5 à Telagh et Ain El hadjar. Ceci traduit une irrégularité aussi bien spatiale que temporelle du régime pluviométrique dans le bassin de l'Oued El Hammam. Le phénomène de variabilité interannuelle des modules pluviométriques est bien exprimé par le coefficient de variation (C_v) traduisant la dispersion relative des pluies. Les valeurs du coefficient de variation relatives à la période (1979/80-2004/05) pour quelques stations importantes du bassin (Tableau 5.2), oscillent entre 0,26 et 0,32 ; ce qui implique une variabilité assez faible dans l'ensemble, par rapport à la variabilité des précipitations mensuelles qui s'exprime parfois par un coefficient de variation 13 fois plus élevé. Il est à remarquer que la variabilité inter annuelle est légèrement plus forte dans la station d'oued Taria (0.32).

Tableau 5.2 : Statistiques des séries pluviométriques (1979/80- 2005/06)

Stations		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Ouziert	Moyenne P	19,6	22,4	33,5	26,5	21,5	24,9	26,5	23,9	19,5	4	1,8	4,2	228,3
	Ecart type σ	19,5	19,24	34,65	26,99	15,12	17,73	28,17	21,36	16,99	6,81	5,23	6,94	61,72
	Coef.Var Cv	0,99	0,86	1,09	1,02	0,70	0,71	1,06	0,89	0,87	1,71	2,96	1,64	0,27
Oued Saida	Moyenne P	16,6	37,2	33,8	36,8	29,2	31,9	41,7	32,5	21,1	7,8	2,5	11,5	302,5
	Ecart type σ	14,37	34,42	26,58	37,42	23,8	28,2	46,78	28,94	18,88	15,33	5,87	17,42	89,9
	Coef.Var Cv	0,87	0,93	0,79	1,02	0,82	0,88	1,12	0,89	0,89	1,97	2,35	1,51	0,29
Oued Taria	Moyenne P	15,5	20,5	34,6	29,5	26,9	27,8	30,2	26,6	19	6,3	3,2	6,2	246,2
	Ecart type σ	16,06	16,61	36,26	25,09	22,66	22,79	33,33	21,22	17,63	14,31	7,54	13,06	78,67
	Coef.Var Cv	1,04	0,81	1,05	0,85	0,84	0,82	1,10	0,80	0,93	2,27	2,36	2,11	0,32
Bouhanifia	Moyenne P	15,3	24,2	37,1	33,6	27,3	31,3	33,2	22,4	21,0	3,6	2,2	3,4	254,8
	Ecart type σ	12,66	22,32	37,38	37,72	19,83	26,6	35,02	16	18,57	6,36	5,07	4,78	72,17
	Coef.Var Cv	0,82	0,92	1,01	1,12	0,73	0,85	1,05	0,71	0,88	1,77	2,30	1,41	0,28
Trois rivières	Moyenne P	16,1	19,6	30,8	22,5	19,2	24,8	25,2	19,6	16,9	3,1	0,9	2,7	201,5
	Ecart type σ	14,24	17,45	34,27	21,71	14,73	20,12	27,47	17,28	17,05	6,19	3,29	5,77	58,46
	Coef.Var Cv	0,88	0,89	1,11	0,96	0,77	0,81	1,09	0,88	1,01	2,00	3,66	2,14	0,29
Fergoug	Moyenne P	14,8	21,5	40,6	39,1	34,1	35,8	36,6	25,0	20,7	2,0	1,8	2,0	274
	Ecart type σ	13,92	17,96	34,65	41,45	24,12	27,67	38,62	17,87	20,66	4,64	5,15	2,85	72,65
	Coef.Var Cv	0,94	0,84	0,85	1,06	0,71	0,77	1,06	0,71	1,00	2,32	2,86	1,43	0,26
Hacine	Moyenne P	17,0	27,7	38,5	44,0	31,1	43,6	35,3	24,3	19,3	1,3	2,7	2,4	287,3
	Ecart type σ	17,99	29,60	31,84	55,30	26,23	33,37	36,34	18,47	15,16	3,43	5,29	4,08	79,54
	Coef.Var Cv	1,06	1,07	0,83	1,26	0,84	0,77	1,03	0,76	0,79	2,64	1,96	1,70	0,27

5.3.3 Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité

L'ajustement graphique des séries pluviométriques (figure 5.4), des différentes stations de l'Oued El Hammam pour la période (1979/05), montre que la pluie s'ajuste en général suivant une loi log normale. Les précipitations relatives à des récurrences données sont présentées au tableau 5.3.

Tableau 5.3: Précipitations pour des périodes de récurrence des principales stations

Stations	Pluie moyenne (1979/2005)	Pluie décennale	Pluie centennale	Pluie millénaire
Ouziert	234,9	321,2	425,9	523,6
Oued Saida	307,4	414,8	543,8	662,9
Oued Taria	249,1	351,8	482,5	607,8
Trois rivières	209,98	278	357,4	429,3
Hacine	287,37	388,7	510,7	623,5

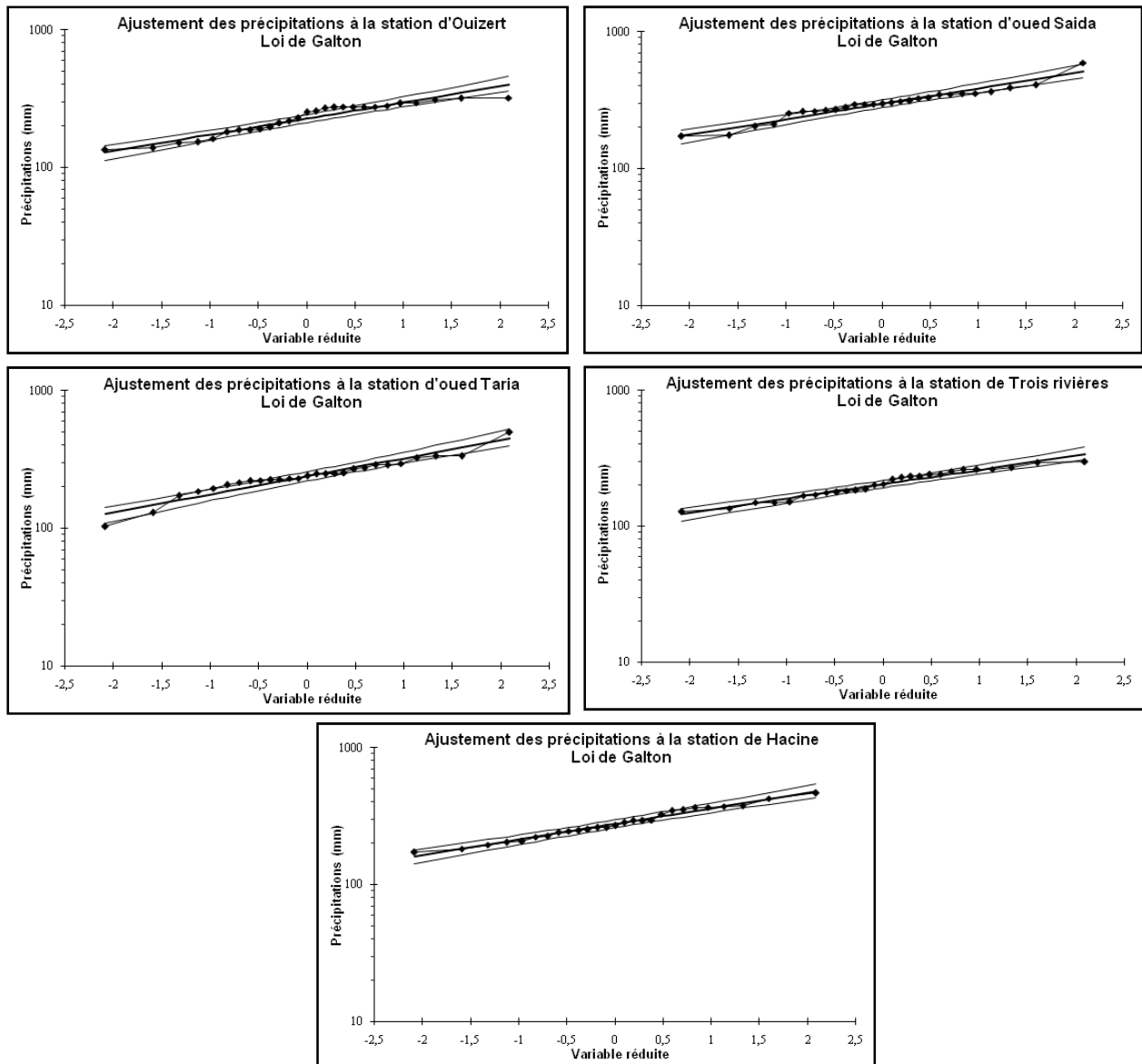


Figure 5.4: Ajustement des précipitations annuelles des stations du bassin versant de l'oued El Hammam

5.3.4. Précipitations mensuelles et les régimes saisonniers

Les valeurs moyennes mensuelles pluviométriques relatives à la période (1979/06), traduisent clairement les variations mensuelles et saisonnières de la distribution des précipitations à l'échelle annuelle. Ainsi, on peut distinguer (figure 5.5 et 5.6) deux périodes distinctes :

- Une période sèche qui correspond à la saison d'été (juin, juillet, août), caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué.
- Une période humide qui correspond au reste de l'année ; cependant, il faut souligner que cette période pluvieuse est elle aussi marquée par une succession de mois humides et de mois relativement secs.

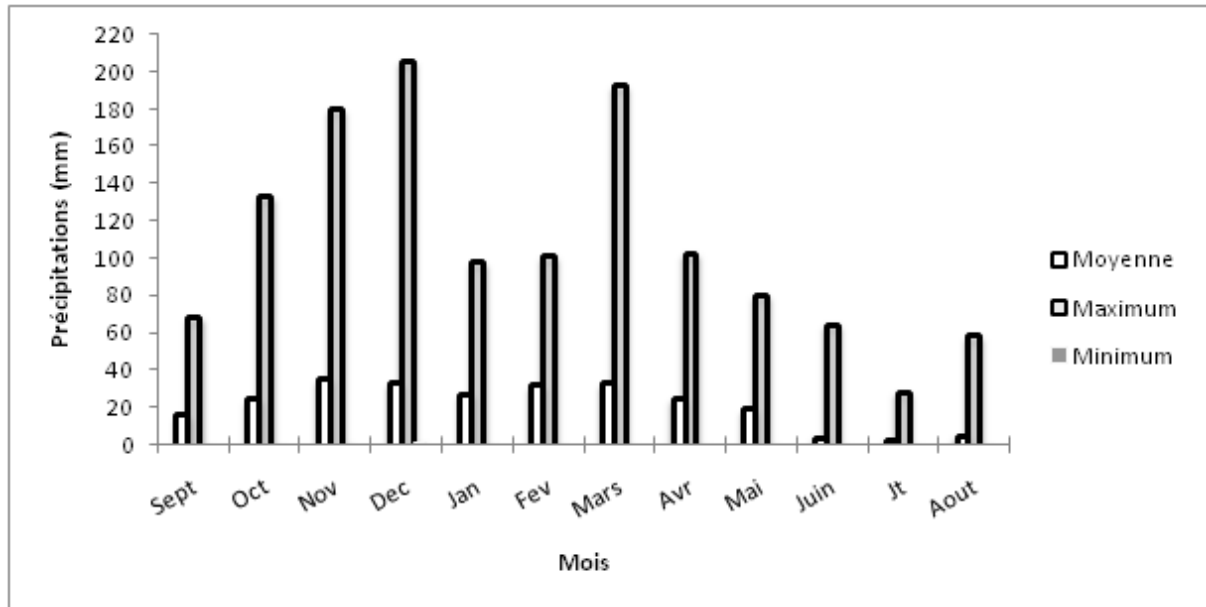


Figure 5.5 : Variations mensuelles des précipitations dans le bassin de l'Oued El Hammam

D'autre part, le mois le plus pluvieux diffère d'une station à l'autre (figure 5.7), mais en général, il se situe soit en automne (novembre), soit en hiver (décembre) ou au printemps pendant le mois de mars. Les mois les plus secs sont représentés par juin et juillet. La forte variabilité inter mensuelle des précipitations, apparaît à travers les valeurs élevées des coefficients de variation mensuelle (tableau 5.2). Les plus fortes valeurs concernent les mois d'été où il est compris entre 1,43 et 3,66. Une variabilité aussi marquée en été s'explique par une indigence pluviométrique des mois secs d'été qui sont parfois parsemées par de vifs orages pouvant être assez important par leurs actions érosives violentes.

L'organisation des saisons n'est pas homogène dans la région d'étude, elle dépend du régime pluviométrique propre à chaque secteur géographique. Ainsi nous avons, trois saisons qui se partagent le maximum, l'hiver où le total de pluie varie entre 66,4 et 118,8 mm, le printemps avec des valeurs comprises entre 61,6 et 95,2 mm et l'automne avec des valeurs comprises entre 66,6 et 87,6 mm selon la station. Selon la figure 5.6, en moyenne, le maximum saisonnier se situe en hiver (91,95 mm) suivi par un maximum secondaire (76,7mm) au printemps, suivi par un maximum tertiaire en automne (75,64 mm), l'été (10,7 mm) étant la saison la plus sèche.

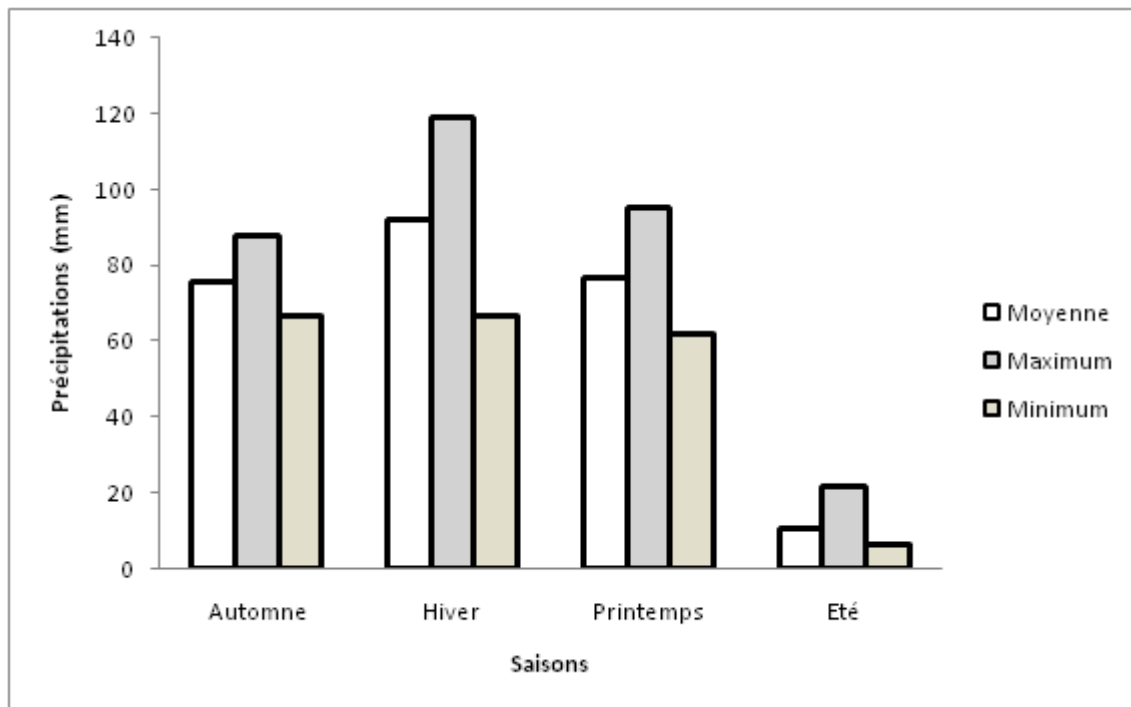


Figure 5.6 : Variations saisonnières des précipitations dans le bassin de l'Oued El Hammam

Pour le bassin d'Ouzert, les stations d'oued Saida et oued Taria étant situées à une altitude plus élevée, oued Saida semble être plus arrosée que la station d'Ouzert et oued Taria, la moyenne mensuelle maximale ne dépasse pas les 42 mm, et est enregistrée en mars pour oued Saida, en novembre pour Ouzert et oued Taria. Le minimum est observé en juin et juillet. Le bassin de Bouhanifia étant situé entre les monts de Benichougrane et les monts de Saida, est relativement le moins arrosé. Les valeurs moyennes maximales ne dépassent pas les 37 mm et sont observées en novembre. Le minimum est enregistré en juin et juillet.

Pour le bassin de Fergoug, la station de Hacine et Fergoug sont relativement plus arrosées, Fergoug étant situé à une altitude plus faible, les moyennes maximales ne dépassent pas les 44 mm et sont enregistrées en novembre pour Fergoug, en décembre pour Hacine, le minimum en juin, juillet et aout.

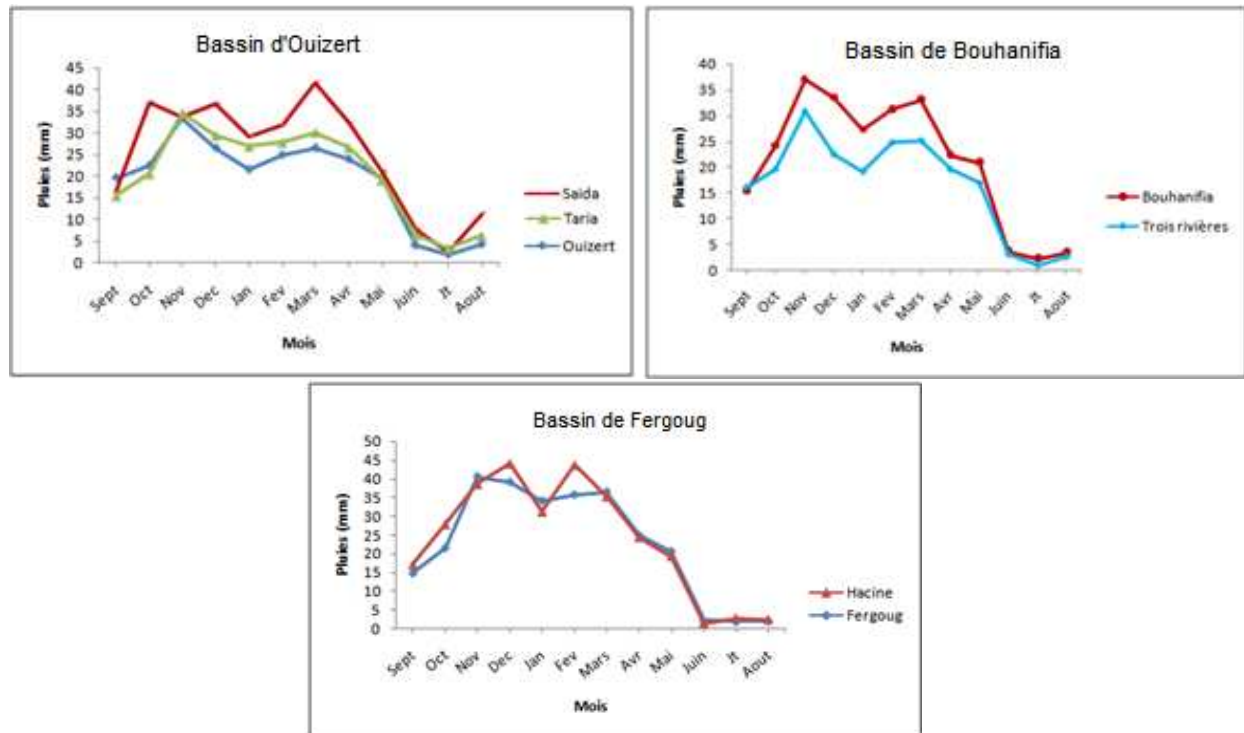


Figure 5.7: Variation mensuelle des précipitations aux stations représentatives du bassin de l'Oued El Hammam

5.3.5. Précipitations torrentielles

Pour mettre en évidence l'importance des précipitations torrentielles et surtout leurs conséquences sur le ruissellement et l'érosion, nous nous basons sur les données fournies dans l'étude de P.Seltzer (1946) pour quelques stations du bassin versant de l'oued El Hammam et concernant la période 1913-1938 (tableau 5.4). Selon certains auteurs, les précipitations journalières de plus de 30 mm sont qualifiées de " pluies nocives ".

Tableau 5.4 : Nombre de jours de pluies torrentielles observés de 1913 à 1938 (P. Seltzer, 1946)

Caractéristiques		Mascara	Fergoug
Nombre de pluie torrentielle > 30 mm/24h		70	57
Répartition annuelle des pluies torrentielles > 30 mm/24h	Janvier	11	7
	Février	3	5
	Mars	4	1
	Avril	5	3
	Mai	5	7
	Juin	2	2
	Septembre	1	0
	Octobre	3	5
	Novembre	17	10
	Décembre	19	17
Répartition par intensité (mm/24h)	30-50mm	53	44
	50-70mm	10	7
	70-100mm	5	4
	> 100mm	2	2
Hauteur maximale (mm/24h)		157	160

Les précipitations sont plus que groupées en quelques mois, elles sont concentrées en un nombre relativement restreint de jours. La moitié environ des précipitations annuelles tombe en 25 à 30 jours de pluies pendant les mois de novembre, décembre et janvier. Ces pluies ne durent jamais plus de quelques heures et constituent donc presque toute les pluies torrentielles dont l'intensité dépasse 30 mm en 24 heures ou 20 mm en 2 heures (Benchetrit, 1972).

Sur 70 pluies torrentielles (plus de 30 mm en 24 h) observées à Mascara de 1913 à 1938, 33 pluies sont tombées en hiver de même à Fergoug, 29 sur 57. Ce nombre de pluies observées sur 25 ans aboutissent à des pluies torrentielles de l'ordre de 2 à 3 pluies par an en moyenne.

5.4. Température

Les températures moyennes, mensuelles agissent directement sur le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques. On dispose des données de températures moyennes mensuelles et annuelles des trois stations représentatives des bassins, relative à la période (1990-2005), avec les minima et les maxima (Tableau .5.5)

Tableau 5.5 : Températures moyennes mensuelles (1990-2005)

Stations	T°C	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	An
Ouizert	Min	15,5	9,8	4,2	1,7	1,6	2,2	4,2	6,1	11	15,7	18,9	17,4	9
	Max	35,9	30,8	25,8	20,6	20,7	21,9	26,4	27,8	32,4	38,3	40,8	37,7	29,9
	Moy	25,7	20,3	15	11,1	11,1	12	15,3	16,9	21,7	27	29,8	27,5	18,7
Bouhanifia	Min	12,1	8,7	3,2	1,3	0,6	1	2,7	3,7	7,9	12	15,1	15,2	4,9
	Max	37,9	34,4	28,5	23	23,4	23,9	29	31,1	35,7	38,8	42,2	42,3	32,5
	Moy	25	21,5	15,8	12,1	12	12,4	15,8	17,4	21,8	25,4	28,6	28,7	19,7
Fergoug	Min	19,6	15,6	11,8	8,7	6,8	7,7	9,1	12,9	17,5	20	21,4	22,9	14,5
	Max	26,1	23,4	17,5	14,5	13,6	14,7	16,8	20,4	23,3	26,9	29,8	29,2	21,3
	Moy	22,8	19,5	14,7	11,6	10,2	11,2	12,9	16,7	20,4	23,4	25,6	26	17,9

La saison chaude s'étend de Mai à octobre, mois pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle, alors que la saison froide correspond à Novembre-Avril. Le maximum de température est atteint en juillet et août avec une moyenne de 27,9°C. Alors que le minimum qui est de 11,1 se situe en janvier. L'analyse de ces deux facteurs essentiels du climat, met en évidence l'agressivité de certaines précipitations à l'égard du sol, ainsi l'impact des températures élevées sur la dessiccation du sol.

5.5 Bilan hydrologique

L'évapotranspiration en milieu semi-aride représente une composante majoritaire du cycle hydrologique. (Hernandez, 2000 ; Pilgrim et al. 1988) rapportent que l'évapotranspiration recycle 80% des précipitations en milieu semi aride et 95% en région aride.

L'évaporation du sol nu a souvent un poids supérieur à la transpiration des plantes du fait de la large portion de sol nu et d'une couverture végétale souvent discontinue et peu abondante. L'évapotranspiration joue donc un rôle majeur et ne peut pas être négligée sous ce type de climat. Le calcul de l'évapotranspiration réelle pour les stations représentatives du bassin de l'oued El Hammam à partir de différentes méthodes se résume dans le tableau ci – dessous.

Tableau 5.6: Bilan hydrologique des stations du bassin de l'oued El Hammam (1990-2005)

Stations		Station	Station	Station
Formules		Ouizert	Bouhanifia	Fergoug
Thornthwaite	R(mm)	6,05	7,33	11,82
	P (mm)	228,3	242	284,1
	ETP(mm)	891,8	802,7	804
	ETR(mm)	278,3	292	334,1
	I(mm)	-	-	-
Turc	P(mm)	228,3	242	284,1
	ETR(mm)	244	242,1	277
	I(mm)	-	-	-
Verdeil	P(mm)	228,3	242	284,1
	ETR(mm)	205	230	271
	I(mm)	17,25	4,67	1,28
Wundt	P (mm)	228,3	242	284,1
	T°(c)	18,7	19,7	17,9
	ETR(mm)	194	216	262
	I(mm)	28,5	18,67	10,28

Les bilans hydrologiques des trois stations de la région établies en tenant compte des ETP calculées par la méthode de Thornthwaite et Turc, sont totalement déficitaires, ceci est lié à une surestimation du ruissellement calculé par la méthode de Berkaloff et/ou à l'évaporation réelle calculée. Les résultats obtenus par les méthodes de Verdeil et Wundt semblent acceptables.

Chapitre VI

Etude hydrologique

6.1. Introduction

L'écoulement est la traduction de la lame d'eau précipite dont une partie s'écoule a la surface contribuant à l'érosion et au transport des sédiments (Ammari, 2012).

En ce qui concerne l'étude des débits, nous nous sommes basés sur les données de stations se trouvant à l'aval des sous bassins : la station d'Oued sahouat, station d' Oued Taria et d'Oued Saida (bassin d'Ouizert), station de Trois rivières (bassin de Bouhanifia) et la station de Hacine (bassin de Fergoug). Les caractéristiques de ces stations hydrométriques sont consignées au tableau 6.1 et figure 6.1.

Tableau 6.1 : Caractéristiques des stations hydrométriques

Bassin	Station	Code	Période
Ouizert	Oued Sahouat	1112 03	79-80/01-02
	Oued saida	111129	91-92/05-06
	Oued Taria	111201	91-92/05-06
Bouhanifia	Trois rivières	111501	88-89/03-04
Fergoug	Hacine	111518	79-80/03-04

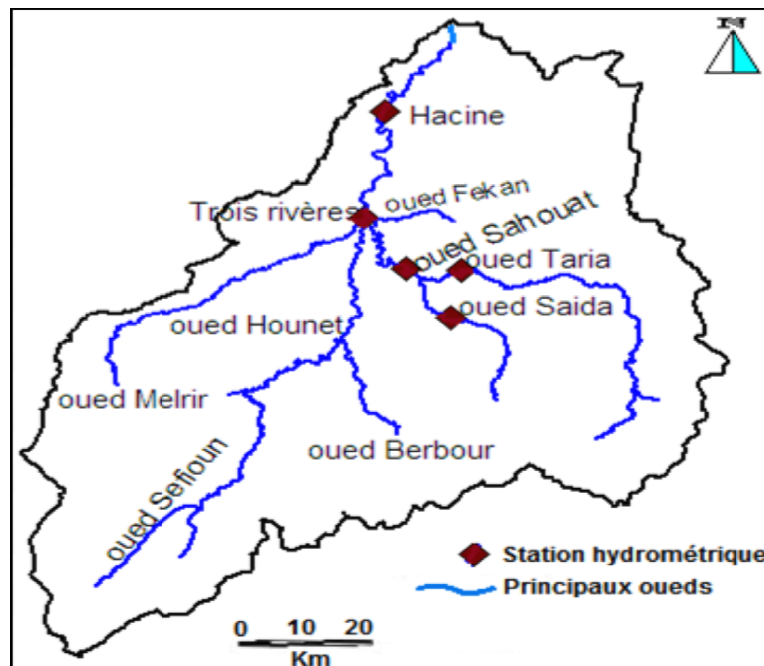


Figure 6.1: Localisation des stations hydrométriques

6.2. DEBITS MOYENS ANNUELS

L'écoulement moyen annuel ou l'abondance annuelle est une notion fondamentale en hydrologie. C'est le volume d'eau écoulé en 365 jours à la sortie d'un bassin. Le module brut ou absolu est généralement exprimé en m^3/s et le module spécifique se traduit en $l/s/km^2$. Nous disposons de séries de données hydrométriques représentant 15 à 25 ans d'observation.

6.2.1. Variations des débits annuels moyens bruts

La variation annuelle des modules (Tableau 6.2) au niveau des quatre stations est illustrée par la figure 6.2. Le tableau 6.3, montre que l'oued Sahouat à ouizert débite $0,88 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une aire de réception de $2086,2 \text{ km}^2$, l'oued Saida et Taria convergent pour former l'oued Sahouat, transitent respectivement un débit de $0,43$ et $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$; débit relativement faible qui s'explique par le caractère calcaire dolomitique et dolomie prépondérant des formations géologiques. L'oued El hammam à Trois rivières, transite un débit de $1,52 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une surface drainée de 5376 km^2 . L'oued El hammam à Hacine, qui est un petit bassin de montagne ($851,7 \text{ km}^2$), affiche un débit de $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tableaux 6.2: débits moyens annuels des oueds

Bassin Station	Ouzert						Bouhanifia		Fergoug	
	Oued Sahouat		Oued Saida		Oued Taria		Trois rivières		Hacine	
Année	Q (m^3/s)	q ($\text{l/s}/\text{km}^2$)	Q (m^3/s)	q ($\text{l/s}/\text{km}^2$)	Q (m^3/s)	q ($\text{l/s}/\text{km}^2$)	Q (m^3/s)	Q ($\text{l/s}/\text{km}^2$)	Q (m^3/s)	q ($\text{l/s}/\text{km}^2$)
79-80	1,32	0,63							3,4	4
80-81	1,5	0,72							3,12	3,66
81-82	0,84	0,4							2,23	2,61
82-83	0,81	0,38							2,58	3,03
83-84	0,46	0,22							1,05	1,23
84-85	1,44	0,69							2,47	2,9
85-86	0,87	0,41							1,81	1,12
86-87	0,72	0,34							2,11	2,47
87-88	0,87	0,41							1,59	1,86
88-89	0,29	0,14					0,64	0,12	0,76	0,89
89-90	0,31	0,15					2,41	0,44	2,46	2,88
90-91	0,7	0,33					2,85	0,53	3,18	3,73
91-92	0,57	0,27	0,24	0,39	0,16	0,11	1,12	0,20	1,76	2,06
92-93	0,26	0,12	0,16	0,26	0,13	0,09	0,55	0,10	0,44	0,51
93-94	0,61	0,29	0,31	0,5	0,36	0,25	0,85	0,15	0,52	0,61
94-95	0,96	0,46	0,61	0,98	1,3	0,89	3,97	0,73	3,2	3,75
95-96	1,22	0,58	0,67	1,08	1,28	0,87	2,24	0,41	2,94	3,45
96-97	1,26	0,6	0,3	0,48	0,63	0,43	2,9	0,54	1,7	2
97-98	1,59	0,76	0,31	0,5	0,68	0,46	3,13	0,58	2,87	3,37
98-99	1,35	0,64	0,21	0,34	0,18	0,12	1,05	0,19	1,66	1,95
99-00	0,62	0,29	0,46	0,74	0,58	0,4	0,79	0,14	0,95	1,11
00-01	0,84	0,40	0,69	1,11	1,03	0,7	3,09	0,57	1	1,17
01-02			0,39	0,63	0,58	0,4	2,00	0,37	1,19	1,39
02-03			0,42	0,68	0,29	0,2	0,69	0,13	1,35	1,58
03-04			0,69	1,11	0,26	0,18	1,79	0,33	1,14	1,33
04-05			0,47	0,76	0,18	0,12				
05-06			0,49	0,79	0,15	0,1				
Moyenne	0,88	0,42	0,43	0,69	0,52	0,35	1,88	0,35	1,9	2,19
Ecart type	0,40	0,19	0,17	0,28	0,40	0,27	1,1	0,2	0,91	1,09
Coef.Var	0,46	0,46	0,39	0,40	0,77	0,77	0,58	0,58	0,47	0,49

Tableaux 6.3: Valeurs caractéristiques des modules au niveau des bassins versants

Stations	Moyenne	Max	Min	Nombre d'année sup. à la moyenne	Coeff. Immodération $R=Q_{max}/Q_{min}$	Coeff. de variation
Oued Sahouat	0,88	1,59 (97-98)	0,26 (92-93)	8 sur 22	6,11	0,46
Oued Saïda	0,43	0,69 (00-01)	0,16 (92-93)	7 sur 15	4,31	0,39
Oued Taria	0,52	1,3 (94-95)	0,13 (92-93)	7 sur 15	10	0,77
Trois rivières	1,88	3,97 (94-95)	0,64 (88-89)	8 sur 16	7,21	0,58
Hacine	1,9	3,4 (79-80)	0,44 (92-93)	11 sur 25	7,72	0,47

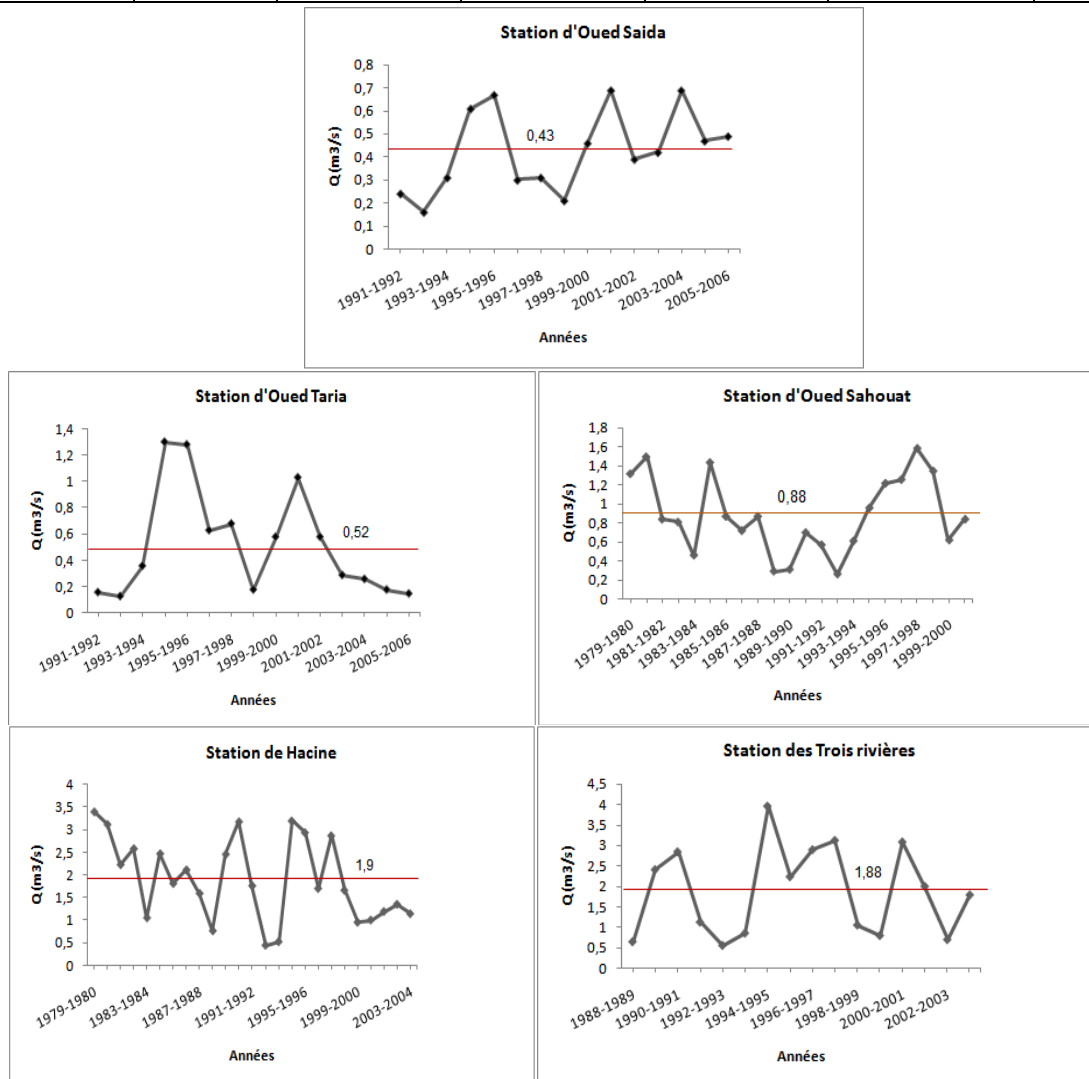


Figure 6.2: Variation interannuelles des modules des oueds

6.2.2. Variations des débits annuels moyens spécifiques

Afin de mieux cerner la variation de l'écoulement dans les trois sous bassins, nous utiliserons les modules spécifiques, car ces derniers permettent de les comparer entre eux en ramenant le débit à l'unité de surface.

L'abondance spécifique des bassins (tableau 6.4), varie d'une part en fonction de la distribution des précipitations et d'autre part en fonction des caractéristiques physiographiques de chaque bassin, à savoir la lithologie, le couvert végétal.

Tableau 6.4: Débits spécifiques et lames d'eau écoulées au niveau des bassins versants

Bassins	Stations	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	E (mm)
Ouzert	Oued Sahouat	0,88	0,42	13,30
	Oued Saida	0,43	0,69	21,83
	Oued Taria	0,52	0,35	11,19
Bouhanifia	Trois rivières	1,88	0,35	11,02
Fergoug	Hacine	1,9	2,19	70,35

Le bassin versant de Fergoug, s'étend sur 851,7 km², reçoit plus de précipitations, son débit spécifique est de 2,19 l/s/km², correspondant à une lame d'eau écoulée de 70,35mm. Cette valeur relativement importante du débit spécifique au niveau de ce bassin, est due à la taille et la lithologie de ce dernier. Pour le bassin d'Ouzert, l'oued Saida affiche un débit spécifique double que celui de Taria. Le bassin de Bouhanifia et oued Sahouat affichent des débits spécifiques relativement faibles qui sont respectivement de 0,35 et 0,42 l/s/km².

6.2.3. L'irrégularité interannuelle des modules

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

6.2.3.1. L'hydraulicité

Les courbes de variation interannuelle des modules (figure 6.2), montrent de forte fluctuation des débits d'une année à une autre. Les valeurs de l'hydraulicité qui sont en majorité inférieures à la moyenne annuelle (tableau 6.5), révèle respectivement 64% et 56% des années déficitaires pour les bassins d'Ouzert et Fergoug, et 50% des années pour le Bouhanifia. Ce fait, confirme l'hypothèse formulée au chapitre II quant à la tendance climatique "sèche" de la période d'observation étudiée.

Tableau 6.5: Hydraulicité des oueds des sous bassins

Bassin	Ouizert			Bouhanifia	Fergoug
Station	Oued Sahouat	Oued Saida	Oued Taria	Trois rivières	Hacine
Année	Qi/Qmoy	Qi/Qmoy	Qi/Qmoy	Qi/Qmoy	Qi/Qmoy
79-80	1,5				1,79
80-81	1,7				1,64
81-82	0,95				1,17
82-83	0,92				1,36
83-84	0,52				0,55
84-85	1,63				1,3
85-86	0,98				0,95
86-87	0,81				1,11
87-88	0,98				0,84
88-89	0,33			0,34	0,4
89-90	0,35			1,28	1,29
90-91	0,79			1,52	1,67
91-92	0,64	0,56	0,31	0,6	0,93
92-93	0,29	0,37	0,25	0,29	0,23
93-94	0,69	0,72	0,69	0,45	0,27
94-95	1,09	1,42	2,5	2,11	1,68
95-96	1,38	1,56	2,46	1,19	1,55
96-97	1,43	0,7	1,21	1,54	0,89
97-98	1,8	0,72	1,31	1,68	1,51
98-99	1,53	0,49	0,35	0,56	0,87
99-00	0,7	1,07	1,12	0,42	0,5
00-01	0,95	1,6	1,98	1,64	0,53
01-02		0,91	1,12	1,06	0,63
02-03		0,98	0,56	0,37	0,71
03-04		1,6	0,5	0,95	0,6
04-05		1,09	0,35		
05-06		1,14	0,29		

6.2.3.2. Coefficient d'immodération et de variation

Les coefficients d'immodération (tableau 6.3) calculés varient entre 6 et 10 ; les valeurs les plus importantes sont enregistrées pour les stations d'Oued Taria, Trois rivières et Hacine, montrant l'irrégularité accentuée des débits interannuels à ce niveau. Les valeurs du coefficient de variation les plus fortes sont enregistrées pour les stations d'Oued Taria et Trois rivières, cette variabilité est liée à l'alimentation pluviale irrégulière des cours d'eau.

6.2.4. Bilan moyen annuel de l'écoulement

Connaissant la précipitation et la lame d'eau écoulée, le déficit moyen annuel de l'écoulement en mm est déduit par simple soustraction. Le rapport E/P donne le coefficient moyen annuel de l'écoulement "C". Ce dernier est faible pour les bassins d'Ouizert et Bouhanifia, élevé pour celui de Fergoug (tableau 6.6).

Tableau 6.6: Bilan moyens annuels de l'écoulement aux différentes stations

Bassins	Stations	Période	P (mm)	E (mm)	D (mm)	C (%)
Ouizert	Oued Sahouat	79-80/00-01	225,9	13,30	212,6	5,88
	Oued Saida	91-92/05-06	309,5	21,83	287,67	7,05
	Oued Taria	91-92/05-06	261,6	11,19	250,41	4,27
Bouhanifia	Trois rivières	88-89/03-04	204,46	11,02	193,44	5,39
Fergoug	Hacine	79-80/03-04	283,56	70,35	213,21	24,81

6.2.5. Apport liquides

Malgré que l'apport annuel moyen n' a cependant qu'une signification théorique en raison de la forte variabilité interannuelle justifiée par les coefficients de variation calculés, il peut néanmoins nous renseigné sur la balance apport-stockage du bassin étudié.

Le déficit d'apports par rapport au stockage apparait pour le bassin d'Ouizert , ou le barrage d'une capacité de 100 Mm³ et un volume régularisé de 32 Mm³ ,ne reçoit qu'environ 28 Mm³. Au contraire, un déficit de stockage est constaté pour le Fergoug dont le barrage qui n'est doté que de 18 Mm³de capacité, reçoit un apport moyen interannuel d'environ 60Mm³.

Avec un apport moyen interannuel d'environ 147 Mm³ (tableau 6.7), soit une lame écoulée moyenne de 17,68 mm avec une pluviométrie moyenne interannuelle de 283,03 mm ce qui donne un déficit de près de 94% pour l'ensemble du bassin.

Tableau 6.7: Apport total moyen annuel écoulé et ses extrêmes aux différentes stations

Bassins	Stations	Apport moyen (Hm ³)	Apports extremes (Hm ³)	
			Minimum	Maximum
Ouizert	Oued Sahouat	27,75	8,2	50,14
	Oued Saida	13,56	5	21,76
	Oued Taria	16,4	4,1	41
Bouhanifia	Trois rivières	59,28	17,34	125,2
Fergoug	Hacine	59,92	13,87	107,22

6.3. DEBITS MOYENS MENSUELS ET SAISONNIERS

L'examen du tableau ci-dessous et les histogrammes de la figure 6.3, montre que les maxima mensuels sont observés au mois d'octobre pour les stations des Trois rivières et de Hacine, au mois de novembre pour la station d'oued Sahouat. Malgré une irrégularité interannuelle des modules faible ($C_v=0,46$), l'oued Sahouat présente de fortes fluctuations à l'échelle mensuelle. Etant à la confluence des oueds Taria et Saida, nous pensons que son régime est influencé largement par l'écoulement de l'oued Taria, étant donné que ce dernier présente les plus fortes valeurs du coefficient d'immodération et de variation (10, 0,77) traduisant un régime d'écoulement fortement irrégulier.

La saison chaude (juin-juillet et août) affiche des valeurs importantes de débits pour l'oued Sahouat et oued El Hammam à la station de Hacine, ce qui est lié, pour le premier : à l'alimentation de l'oued par des circulations d'eaux souterraines, qui soutiennent l'écoulement après les dernières fortes pluies de printemps et d'été. Pour le second : aux lâchés d'eau qui s'opèrent entre les barrages (Ouzert- Bouhanifia- Fergoug) afin de couvrir les besoins agricoles qui sont extrêmement élevés pendant cette période de l'année.

L'irrégularité mensuelle des débits (tableau 6.8), ressort parfaitement des valeurs calculées du coefficient de variation pour les différentes stations et pour les différents mois de l'année. Il apparaît en effet que l'écoulement mensuel est extrêmement variable, pour certains mois le coefficient de variation dépasse largement l'unité et est compris entre 0,67 et 2,16 pour le bassin d'Ouzert, entre 0,79 et 2,08 pour le Bouhanifia et est compris entre 0,53 et 1,36 pour le Fergoug ; contrairement aux précipitations, cette forte variabilité de l'écoulement concerne d'une part la période de saison froide qui s'explique par l'importance et la fréquence des crues en cette saison, et d'autre part la période chaude qui peut être justifiée par l'alimentation souterraine et l'apport liquide des lâchés des barrages aux oueds.

Tableau 6.8: Répartition des débits mensuels aux différentes stations

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Bassin d'Ouizert (79-80/01-02)													
Station d'oued Sahouat													
Moy	0,91	0,6	1,48	0,85	0,79	0,92	0,87	0,92	0,63	0,89	0,66	1,05	0,88
Max	75,12	35,92	464,8	32,93	23,88	45,38	62,37	62,23	16,46	42,44	19,06	34,7	1,59
Min	0	0	0	0,11	0,12	0,12	0,04	0,06	0,03	0,01	0	0	0,26
σ	0,78	0,4	3,2	0,83	0,76	0,98	0,89	0,99	0,64	1,41	0,85	1,32	0,4
Cv	0,86	0,67	2,16	0,98	0,96	1,07	1,02	1,07	1,01	1,6	1,28	1,25	0,46
Bassin de Bouhanifia (88-89/03-04)													
Station de Trois rivières													
Moy	3,12	3,99	1,72	0,98	1,15	1,07	2,66	1,59	2,16	1,62	1,3	2,35	1,88
Max	805	2360	162,04	44,1	78,7	229,8	764,8	550	998	63,6	650	371,15	3,97
Min	0	0	0,09	0,17	0,17	0,24	0,1	0,08	0,02	0,01	0	0	0,64
σ	4,38	6,95	2,08	0,86	0,91	1,02	4,52	1,58	4,48	2,52	2,45	3,48	1,09
Cv	1,4	1,74	1,21	0,87	0,79	0,95	1,7	0,99	2,08	1,55	1,88	1,48	0,58
Bassin de Fergoug (79-80/03-04)													
Station de Hacine													
Moy	2,15	2,19	1,91	1,17	1,42	1,11	1,67	1,24	1,87	2,53	3,28	2,24	1,9
Max	226,6	278	354,6	120,4	63,9	46,8	131,25	43,7	64,6	42	36,05	42,3	3,4
Min	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	0,44
σ	1,24	2,34	2,6	1,17	1,53	1,05	1,66	0,76	1,38	1,36	2,21	1,54	0,91
Cv	0,58	1,06	1,36	1	1,08	0,95	0,99	0,61	0,74	0,53	0,67	0,69	0,47

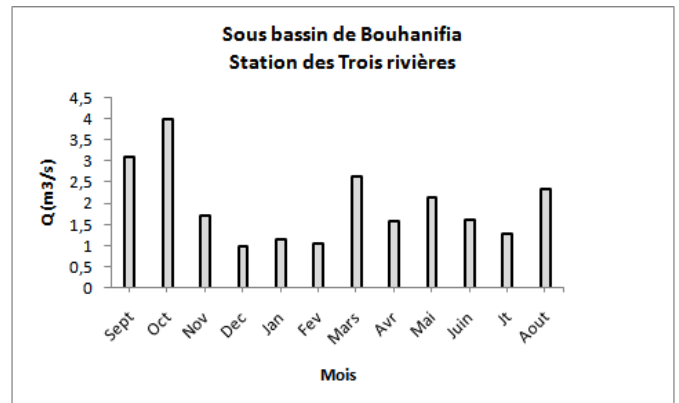
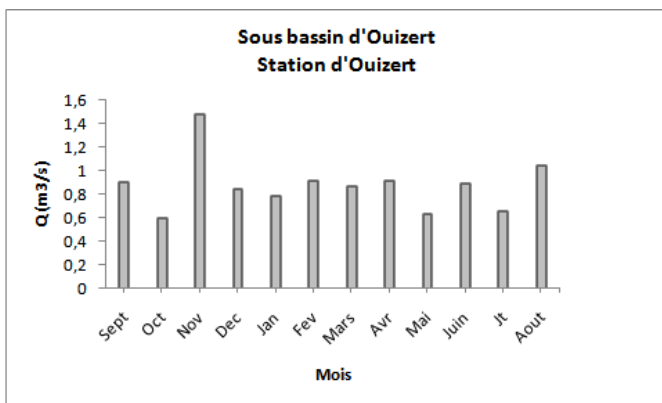
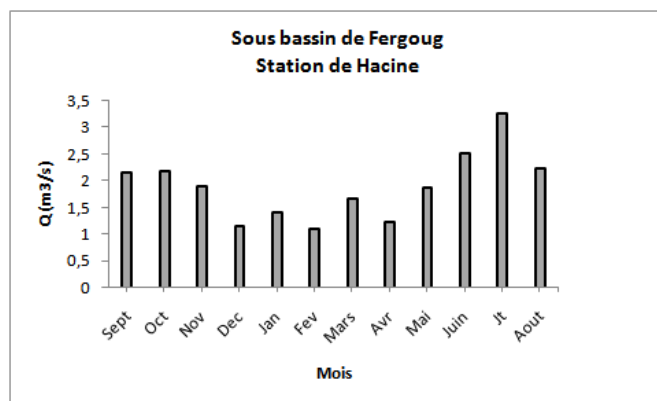


Figure 6.3: Variation des débits moyens mensuels aux différentes stations

6.4. Les crues

Les crues représentent un des traits fondamentaux du régime d'un cours d'eau. Selon Frécaut (1971), il convient de distinguer crues et hautes eaux ; les hautes eaux moyennes représentent une situation saisonnière durable. Les crues au contraire, constituent avec les étiages une situation extrême dans le comportement des cours d'eau. Selon certains auteurs relevant du XIX^{ème} congrès géologique international (Cornet, 1952), l'oued El Hammam est parmi les oueds les plus importants en Algérie dont les crues peuvent dépasser 2000m³/s ; Mais il faut noter surtout la violence de certaines crues, celle de 1927 a roulé 6 à 7 fois le débit annuel moyen en trois jours avec une pointe de 5000 m³/s. Celle de 1966 a atteint 1400m³/s a durée 09jours, et celle de novembre 1984 a atteint une pointe de 1450m³/s (Guertarni, 1990).

On se limitera dans l'étude des crues, à leurs caractères généraux tels que leur genèse, leur puissance, leur fréquence en précisant par ailleurs, le potentiel hydrologique qu'elles représentent. Les données disponibles exploitées sont les suivantes :

-débits instantanés de crues du bassin d'Ouizert à la station d'oued Taria (1990- 2006), à oued Saida (1990-2006) et Oued Sahouat (1986-2006)

-débits instantanés de crues du bassin de Bouhanifia à la station de Trois rivières (1985-2006)

-débits instantanés de crues du bassin de Fergoug à la station de Hacine (1993-2005).

6.4.1. Genèse des crues

La crue dépend essentiellement de l'abondance et de l'intensité de la pluie : son évolution obéit principalement à la puissance et l'intensité de l'averse. Sa vitesse est largement influencée par le couvert végétal, la lithologie, par des paramètres morphométriques du bassin, par des pentes des thalwegs et la forme du lit (Cosandey et Robinson, 2000).

L'étude fréquentielle des crues enregistrées montre que (tableau 6.9) :

1- La classe prépondérante pour l'Ouizert est celle :

- Comprise entre 10-25 m³/s avec environ 41% des cas à la station d'Oued Sahouat, durant une période de 20 ans, l'Oued Sahouat a connue 3 crues de débit supérieur de 500 m³/s et deux crues de débit supérieur de 1000 m³/s.

- Inférieure de 10m³/s avec 30,82% des cas à la station d'oued Taria, 40,6% des crues ont un débit compris entre 10 et 50 m³/s. durant une période de 16 ans, l'Oued Taria n'a connue aucune crue de débit supérieure de 300 m³/s.

- Comprise entre 25-50 m³/s avec environ 26,23% des cas à la station d'oued Saida, 65,58% des crues ont un débit inférieur de 50 m³/s dont 22,95% n'atteignent pas 10m³/s. durant une période de 16 ans, l'Oued Saida a connue 3 crues de débit supérieure de 300 m³/s et une seule crue de débit supérieure de 500 m³/s , il présente donc un régime d'écoulement torrentiel comparativement à celui de Taria.

2- La classe la plus fréquente pour le Bouhanifia est celle comprise entre 10-25 m³/s avec 36,58% des cas à la station des Trois rivières, environ 44% des crues ont un débit compris entre 25 et 100 m³/s. Le bassin de Bouhanifia a connu sur une période de 21 ans, cinq crues de débit supérieur à 500 m³/s et une seule de débit supérieure à 1000 m³/s.

3- L'oued El Hammam à la station de Hacine inscrit 52,56% des cas dans la classe des débits comprise entre 25 et 50 m³/s. 88,45% des crues appartiennent à la classe 10-50 m³/s, sur une période de 12 ans, cet oued n'a connu aucune crue de débit supérieur de 300 m³/s.

Tableau 6.9: Répartition en (%) du nombre des crues
dans le bassin versant de l'oued El Hammam

Classe de débits (m ³ /s)	Bassin d'Ouizert			Bassin de Bouhanifia	Bassin de Fergoug
	Station d'oued Sahouat	Station d'oued Saida	Station d'oued Taria	Station de Trois rivières	Station de Hacine
2000-1000	2,4	-	-	1,22	-
1000-500	3,61	1,64	-	6,09	-
500-300	3,61	4,91	-	1,22	-
300-100	10,84	14,75	13,53	8,53	7,69
100-50	18,07	13,11	15,03	26,83	2,56
50-25	20,48	26,23	18,04	17,07	52,56
25-10	40,96	16,4	22,55	36,58	35,89
10	-	22,95	30,82	2,44	1,28

Tableau 6.10: Crues du bassin d'Ouizert à la station d'oued Sahouat

A	B	c	D	E
01/02/1986	39,28	12,91	3,04	0,86
31/08/1986	19	17,56	1,08	0,41
1/10/1986	20,75	12,42	1,67	0,45
23/09/1987	209,92	175,46	1,19	4,6
23/05/1989	18,8	18,36	1,02	0,41
09/01/1990	64,56	49,88	1,29	1,41
11/05/1990	53,91	11,28	4,78	1,18
20/08/1991	482,34	407,85	1,18	10,56
13/09/1991	57,8	41,76	1,38	1,26
19/10/1993	482,3	39,17	12,31	10,56
26/09/1994	578,2	74,51	7,76	12,66
28/09/1994	792,4	201,63	3,93	17,34
05/09/1995	83,5	20,43	4,08	1,82
14/06/1996	63,6	22,5	2,82	1,4
25/08/1997	1578	169,64	9,3	34,54
21/09/1997	143,1	28,89	4,95	3,13
23/11/1997	1578	249,26	6,33	34,54
19/03/1999	34,82	13,05	2,66	0,76
02/05/2000	121,4	15,18	8	2,65
04/08/2000	564	201,6	2,79	12,34
05/12/2000	140	19,68	7,11	3,06
11/10/2001	126,5	24,71	5,12	2,77
09/10/2002	196,4	85,91	2,28	4,3
10/01/2003	58,51	11,67	5,01	1,28
27/04/2003	26,35	4,69	5,61	0,57
29/10/2004	35,8	22,01	1,62	0,78

Tableau 6.11: Crues du bassin d'Ouizert à la station d'oued Saida

A	B	c	D	E
14/03/1991	108	77,5	1,4	4,33
11/04/1995	95	52,63	1,8	3,81
13/10/1995	102,9	97,88	1,05	4,12
04/02/1996	172	86,51	1,98	7
12/06/1996	140	47,91	2,92	5,61
20/04/1997	486,46	286,76	1,7	19,51
08/10/1999	261	39,77	6,56	10,47
16/10/1999	492	118,27	4,16	19,74
18/12/1999	140	58,84	2,33	5,61
23/10/2000	564	300,11	1,88	22,63
10/11/2001	130,86	41,68	3,14	5,25
07/05/2002	49,08	36,06	1,36	1,97

Tableau 6.12: Crues du bassin d'Ouizert à la station d'oued Taria

A	B	c	D	E
12/11/1990	44,68	9,18	4,82	1,58
14/03/1991	128	59,96	2,13	4,52
09/04/1992	33,84	9,78	3,46	1,19
05/03/1993	26,08	5,52	4,72	0,92
31/08/1993	50,5	10,1	5	1,78
20/10/1993	159	37,14	4,28	5,62
25/11/1993	15,65	12,85	1,21	0,55
20/01/1994	10,75	3,31	3,24	0,38
28/09/1994	180,52	27,37	6,6	6,38
17/10/1994	191	122,34	1,56	6,75
02/03/1995	98,25	11,32	8,68	3,47
09/10/1995	151,8	36,7	4,13	5,36
05/12/1995	165	69,2	2,38	5,83
04/02/1996	103,6	32,88	3,15	3,66
12/06/1996	22,05	3,09	7,13	0,78
20/04/1997	165,33	53,86	3,07	5,84
24/08/1997	104,38	28,76	3,63	3,69
23/10/1997	94,93	25,76	3,68	3,35
22/11/1997	93,32	10,76	1,83	2,59
23/04/1998	41,88	9,2	4,55	1,48
16/03/1999	121,39	19,4	6,25	4,29
27/09/1999	194,6	59,72	3,25	6,88
08/10/1999	159	29,65	5,36	5,36
23/10/2000	200,6	99,67	2,01	7,09
28/02/2001	126,5	44,8	2,82	4,47
10/10/2001	26,03	4,18	6,22	0,92
07/05/2002	196,4	114,75	1,71	6,94
25/11/2002	58,61	16,64	3,52	2,07
17/01/2003	26,35	6	4,4	0,93
17/10/2003	18,25	16,45	1,11	0,64
09/12/2004	78,7	78,7	1	2,78
31/01/2006	35,8	30,62	1,17	1,26

Tableau 6.13: Crues du bassin de Bouhanifia à la station de Trois rivières

A	B	c	d	E
21/10/1985	10,9	7,51	1,45	0,14
09/02/1986	64,5	41,29	1,56	0,88
04/10/1986	140,76	97,34	1,44	1,92
17/10/1986	143,1	94,03	1,52	1,96
24/09/1987	21,5	20	1,07	0,29
19/05/1988	37,3	31,16	1,19	0,5
15/09/1988	77,25	32,04	2,41	1,05
01/09/1989	85	40,58	2,09	1,16
01/05/1990	613	153,04	4	8,36
11/05/1990	155	88,18	1,75	2,11
15/03/1991	662,32	235,19	2,81	9,03
05/08/1992	18,8	12,06	1,55	0,25
19/10/1993	482,34	24,94	19,34	6,57
27/09/1994	578,2	56,94	10,11	7,88
29/09/1994	792,4	182,12	4,35	10,8
05/09/1995	83,5	29,58	2,82	1,13
16/06/1996	26,08	9,79	2,66	0,35
25/08/1997	1578	175,5	9	21,52
16/09/1997	92,6	54,49	1,7	1,26
26/06/1998	58	43,89	1,32	0,79
16/03/1999	90	18,74	4,8	1,22
23/05/2000	19,25	6,15	2,93	0,26
11/11/2001	80,4	33	2,74	1,09
07/05/2002	528	96,06	5,5	7,2
11/11/2003	137,56	87,72	1,56	1,87
18/11/2003	136,4	93,32	1,46	1,86
13/11/2004	90	39,82	2,26	1,22

Tableau 6.14: Crues du bassin de Fergoug à la station de Hacine

A	B	c	d	E
18/10/1993	209,4	100,27	2,08	7,17
06/10/1994	111,3	20,1	5,53	3,81
05/12/1995	41	14,55	2,81	1,4
13/03/1996	47	21,28	2,2	1,61
29/10/1997	40,6	27,86	1,45	1,4
16/04/1998	43,7	43,7	1	1,5
12/11/1998	40,95	26,67	1,53	1,4
12/05/1999	36,45	26,23	1,39	1,25
18/12/1999	43,8	8,61	5,08	1,5
09/11/2000	25,15	18,43	1,36	0,86
28/05/2001	35,94	35,94	1	1,23
17/11/2003	56,5	56,5	1	1,93
16/12/2003	105,6	105,6	1	3,61
07/03/2004	105,6	105,6	1	3,61
30/05/2004	31,3	31,3	1	1,07
13/11/2004	179,65	90,24	2	6,15

a : date du débit de pointe ; b : débit instantané maximal (m^3/s) ; c : débit moyen journalier maximal (m^3/s) ; d : moyenne b/c ; e : coefficient de crue

Pendant l'année 1994/1995, au mois de septembre, de fortes précipitations eurent lieu sur le bassin d'Ouizert, la hauteur pluviométrique mensuelle à la station d'Ouizert a été de 43,5 mm soit 19% des précipitations annuelle de l'année même et 3 fois le module mensuel. Ces précipitations ont provoqué la crue du 28 septembre 1994 dont le débit de pointe était de 792,4 (m³/s) à oued Sahouat avec un coefficient de crue de 17,34; le 29 septembre, ce même débit a été observé à Trois rivières avec un coefficient de crue de 10,8.

Les bassins connaissent quelques crues généralisées telle que celle du 25 aout 1997, cette crue a donnée un débit de pointe très élevé par rapport à toutes les crues de la série observée qui était de 1578 (m³/s) à Ouizert et Trois rivières.

6.4.2. Puissance des crues

Plusieurs critères peuvent caractériser la puissance d'une crue : sa cote maximale, son débit journalier maximal, son volume et son coefficient "e" de Meyer-Coutagne-Pardé, qui constitue un bon élément d'approche dans le cadre d'une analyse comparative de crues entre des bassins de tailles différentes.

$$e = Q/S^{1/2} \text{ Avec :}$$

Q : Débit maximal instantané (m³/s)

S : Surface réceptrice du bassin (km²)

Pour le bassin d'Ouizert à la station d'oued Sahouat, les valeurs correspondantes calculées pour les crues maximales de saison froide et de saison chaude relative à la période 1986/2006 (tableau 6.10) permettent de constater de fortes variations de la puissance des crues, le coefficient « e » oscille entre 34,54 et 0,41.

Il varie pour l'oued Saida (tableau 6.11) entre 22,63 et 0,16, par contre il oscille entre 7,09 et 0,64 pour l'oued Taria (tableau 6.12).

Il varie pour le bassin de Bouhanifia à la station des trois rivières (tableau 6.13) entre 21,52 et 0,14, et pour celui de Fergoug à la station de Hacine (tableau 6.14), de 7,17 à 0,86.

Ces fortes variations sont liées aux tailles différentes des bassins, au coefficient de torrentialité et au temps de concentration.

6.4.3. Rapport débit de pointe/ débit moyen journalier maximal

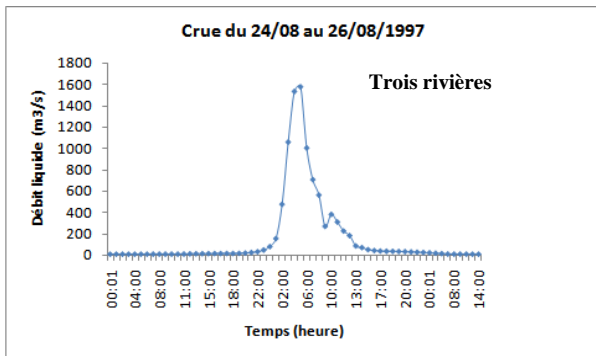
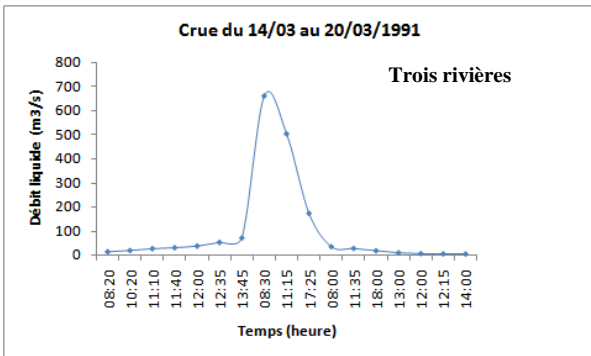
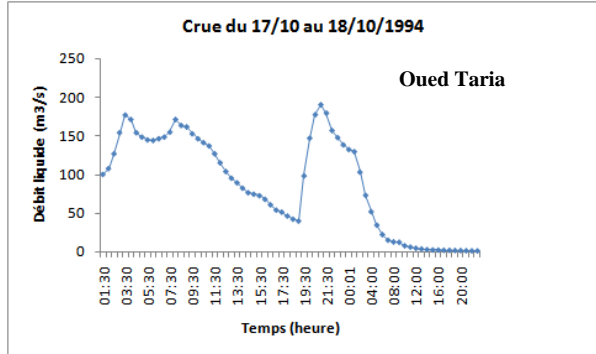
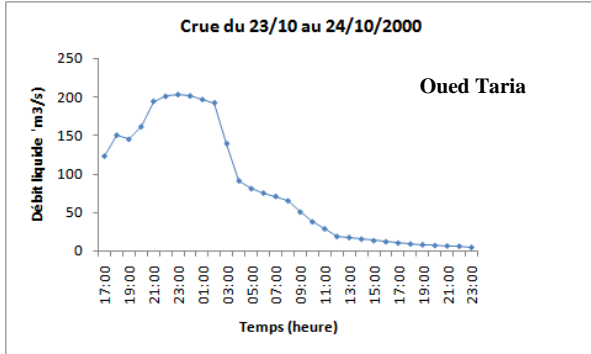
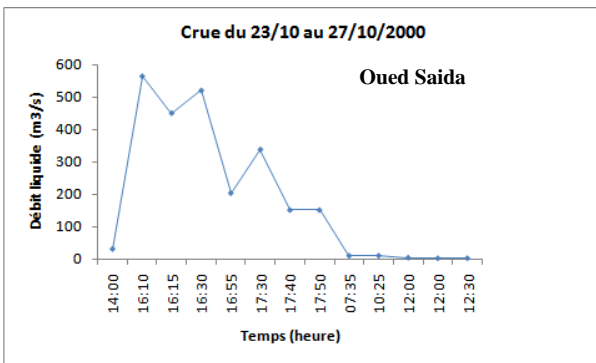
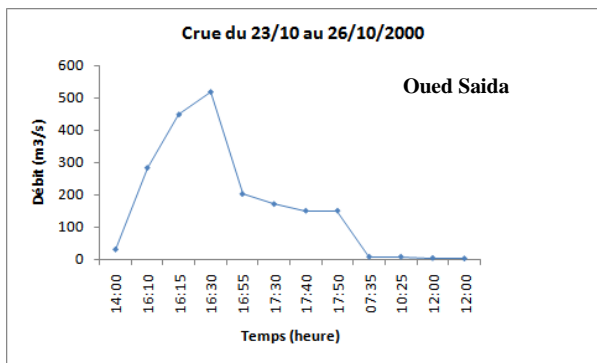
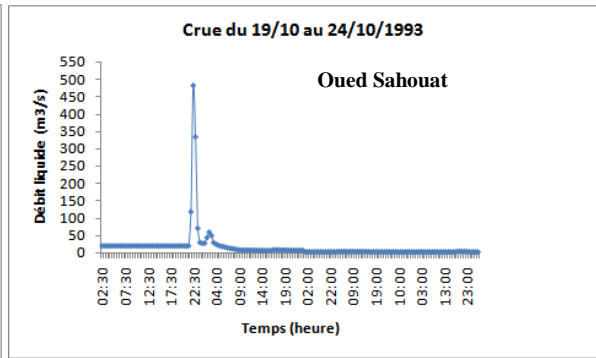
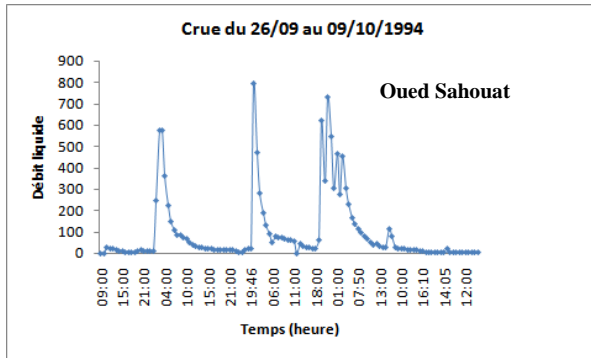
La variabilité des crues s'exprime aussi par le coefficient « d » (tableau 6.10 à 6.14), ce rapport peut atteindre des proportions remarquables :

- 1,02 et 12,31 pour le bassin d'Ouizert à oued Sahouat
- 1,05 et 6,56 à oued Saida
- 1 et 8,68 à oued Taria
- 1,07 et 19,34 pour le bassin de Bouhanifia
- 1 et 5,53 pour le bassin de Fergoug

Ces données mettent en évidence la forte irrégularité de l'écoulement au cours d'une journée de crue et confirme le régime d'écoulement très aléatoire du bassin de l'oued El Hammam.

Les hydrogrammes relatifs aux quelques crues des oueds aux divers stations laissent apparaître des crues avec une montée ou plus des niveaux d'eau (figure 6.4), dû à la répartition des précipitations et à la densité du réseau hydrographique. Les crues avec deux montées et plus sont généralement dues à des averses successives. La vitesse de propagation des débits de pointe est lente pour les bassins de grande taille (Sahouat, Taria et Bouhanifia), plus au moins rapide pour les petits bassins (Saida et Fergoug), la variation spatiale de cette vitesse est liée au coefficient de torrentialité et au temps de concentration.

Contrairement à la montée, la décrue s'est généralement faite de façon beaucoup plus lente ; cette phase s'étend sur plusieurs jours (1 à 10) avant le rétablissement du débit de base. On remarque que les courbes de décrue des oueds ont des allures semblables.



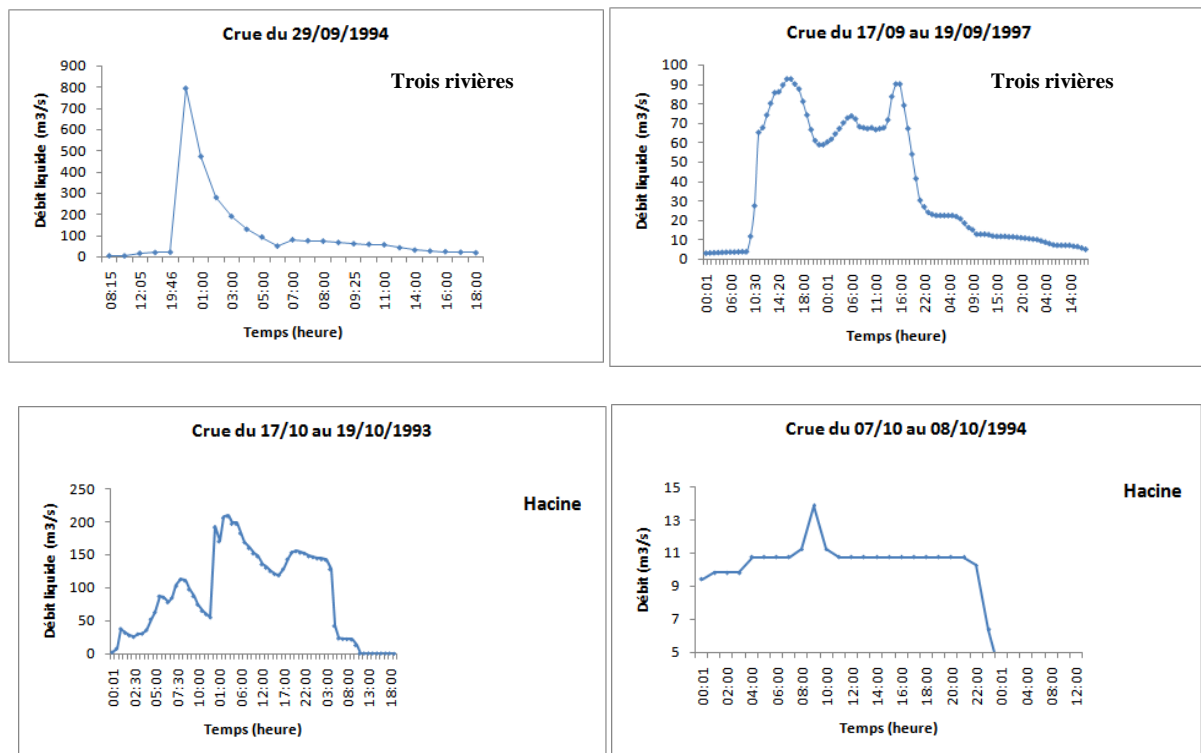


Figure 6.4: Hydrogrammes de quelques crues des sous bassins de l'oued El Hammam

6.4.4. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles

Les séries de débits maximums annuels ont été utilisées pour l'analyse fréquentielle, par ajustement à des lois statistiques caractéristiques pour l'étude des événements extrêmes.

Les débits maximums annuels des sous bassins de l'oued El Hammam s'ajustent mieux à la loi de Galton (figure 6.5). L'application de cette loi pour le calcul des débits extrêmes à des récurrences données donne pour nos différents sous bassins (tableau 6.15).

Tableau 6.15: Débits maximums pour des périodes de récurrence des principales stations

Période de retour (an)	10	100	1000
Oued Sahouat	694.9	2622.9	6927.5
Oued Saida	541.9	1311.9	2504.3
Oued Taria	297	864.1	1886.6
Trois rivières	709.3	3169.8	9471.3
Hacine	159.1	329	559.7

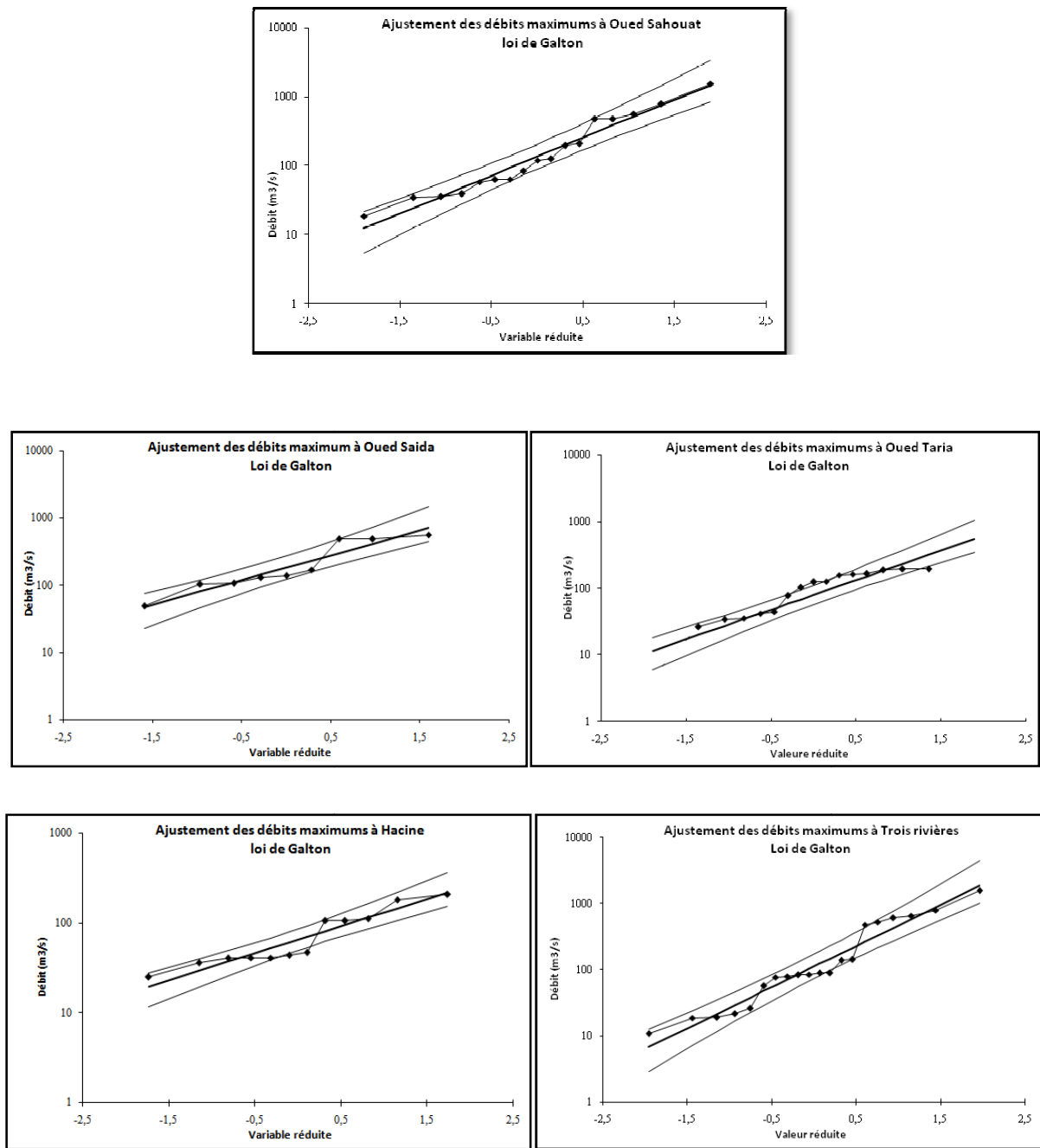


Figure 6.5: Ajustement des débits maximums des sous bassins versants de l'Oued El Hammam

Chapitre VII

Cartographie de l'érosion hydrique

7.1. Introduction

En Algérie, l'érosion hydrique en zones montagneuses, écosystèmes fragilisés par les épisodes de sécheresse et par l'activité anthropique, est un phénomène aux conséquences désastreuses pour les milieux en raison des nuisances qui lui sont associées. À l'amont du bassin, elle entraîne une baisse de la production agricole, une forte diminution des revenus des populations concernées et l'accroissement de l'exode rural. À l'aval, on assiste à une diminution de la capacité de stockage des barrages par envasement. Les conséquences socioéconomiques de ces pertes sont très importantes.

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays méditerranéens (Boukheir et al. 2001). Elle continue à prendre des proportions considérables de sol, en particulier sur les pentes, à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains (roches tendres, sols fragiles, pentes fortes et dégradation du couvert végétal) et de l'impact défavorable des activités humaines (déforestation, incendies, mauvaise conduite des travaux agricoles, urbanisme chaotique, surexploitation des carrières, etc.).

La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) sont de plus en plus utilisés pour l'étude des phénomènes de surface et forment des outils essentiels dans les systèmes interactifs d'aide à la décision et opérationnels pour des opérations de gestion du risque (Wachal and Hudak, 2000 ; Shrimalil et al. 2001 ; Lee, 2004 ; Boukheir et al. 2006). L'exécution des mesures efficaces de conservation de sol doit d'abord être précédée par une évaluation dans l'espace du risque d'érosion (Moussa et al. 2002 ; Souchère et al. 2005).

Pour estimer le taux ou l'état de l'érosion, plusieurs méthodes sont adoptées, dont les plus utilisées sont : l'équation universelle de perte de sol (Wischmeier and Smith, 1978), sa version modifiée (Foster et al. 1996) et la technique de prédiction de l'érosion hydrique (Laflen et al. 1991). Le choix du modèle dépend de la variabilité de la surface du bassin, de la disponibilité des données ponctuelles et des données de précipitations (Bonn, 1998). Cependant, lorsque ces méthodes de calcul des pertes de sol, qui sont établies sur une base parcellaire, sont extrapolées à des échelles plus englobantes, il en résulte généralement certaines contraintes d'utilisation qui ne sont pas toujours respectées (Chakroun, 1993).

Depuis quelques années, les méthodes de calcul des pertes de sol sont associées aux SIG et à la télédétection. Il est vrai, qu'avec ces méthodes modernes, on découvre progressivement l'intérêt de la spatialisation des méthodes de calcul des pertes de sol, de la cartographie pour représenter les résultats des pertes de sol sur de grandes étendues et de la création de scénarios pour les interventions humaines sur le milieu (Bonn, 1998).

Dans ce chapitre, nous proposons une méthodologie cartographique pour les zones vulnérables à l'érosion hydrique qui constituent la source des matériaux solides arrachés et transportés par l'eau, en se basant sur des données de terrain, des données de télédétection et des données topographiques. Le SIG développé nous a permis de produire une carte de sensibilité à l'érosion, issue de la superposition et l'analyse de plusieurs facteurs, tels que : la pente, la nature des matériaux affleurant et le couvert végétal.

7.2. Matériels et méthodes

La méthodologie suivie au cours de cette étude repose sur des données satellitaires, topographiques, géologiques. Ces données sont ensuite intégrées et analysées dans un environnement SIG pour la restitution et la cartographie des zones exposées à l'érosion hydrique.

- une image ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 1B du satellite TERRA; ce capteur est justement conçu pour les études géologiques (Abrams, 2000) ; il a une résolution spatiale élevée (15 m) dans le visible et le proche infrarouge (VPIR) ainsi que la possibilité d'observation stéréoscopique dans la bande 3 ; il possède aussi une bonne résolution spectrale dans l'infrarouge moyen (IM).
- Une carte topographique de la région étudiée avec une équidistance des courbes de niveau de 10 m ; cette carte a été numérisée et géo-positionnée en fonction de la projection.
- Une carte géologique numérisée et géo-positionnée en fonction de la projection
- Une carte de pente numérisée et géo-positionnée en fonction de la projection
- Une carte du couvert végétal numérisée et géo-positionnée en fonction de la projection

Le modèle numérique d'altitude (MNA) obtenu à partir de la numérisation des courbes de niveau de la carte topographique de la zone d'étude, a permis d'établir une carte d'altitude (hypsométrie) et une carte des classes de pente.

L'identification des différents faciès lithologiques a été effectuée à l'aide de la carte géologique de la Macta. Les lithofaciès ont été ensuite classées selon leurs degrés de friabilité.

La carte de répartition des formes végétales est extraite de la carte de l'occupation des terres du bassin versant de l'Oued El hammam (Kamal et al, 1986). Les formations végétales ont été classées en fonction de la densité, de la hauteur et du système cultural.

L'organigramme de la méthodologie suivie est illustré sur la figure ci-dessous.

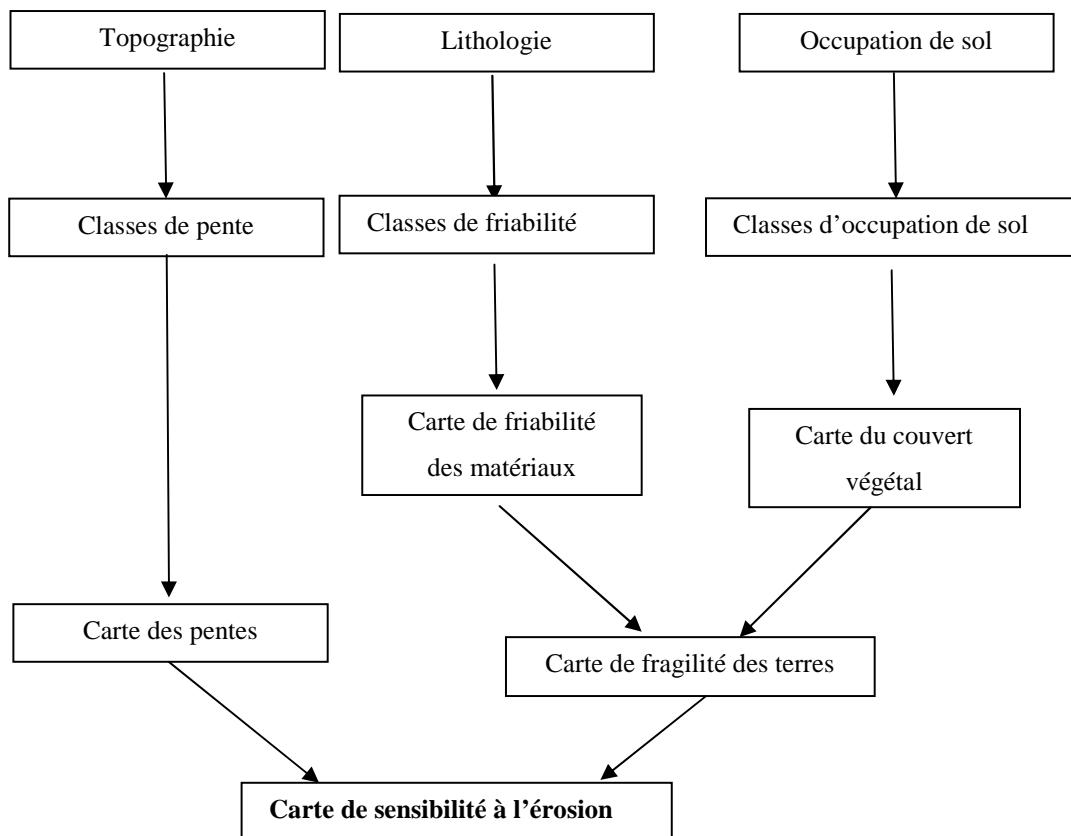


Figure 7.1 : Organigramme de la méthodologie suivie

7.2.1. Carte d'occupation des sols

La classification dirigée par la méthode de maximum de vraisemblance, basée sur l'observation directe des catégories d'utilisation des terres, a permis d'obtenir une carte d'occupation des terres. Onze classes de couverture végétale apparaissent. Chaque classe a été affectée à un degré de protection contre l'érosion hydrique (tableau 7.1).

- ✓ degré 1 : non protecteur.
- ✓ degré 2 : peu protecteur.
- ✓ degré 3 : moyennement protecteur.
- ✓ degré 4 : fortement protecteur.

Tableau 7.1: Classes de sensibilité du couvert végétal à l'érosion

Couvert végétal	Degré de protection
Sols nus	1
Parcours très dégradés	2
Parcours Agriculture extensive	2
Terres labourables	3
Agriculture semi-intensive	3
Céréales	3
Agriculture extensive	3
Matorral clair arboré : faciès à <i>Tetraclinis articulata</i> et <i>Oleo lentisque</i>	4
Matorral dense arboré : faciès à <i>Tetraclinis articulata</i>	4
Matorral clair arboré : faciès à <i>Tetraclinis articulata</i> et <i>Quercus ilex</i>	4
Vigne	4

La classification de Roose (1977) nous a servis pour dégager une classification appropriée. Roose classe les couverts végétaux en trois groupes

- couvert végétal permanent.
- couvert végétal temporaire.
- couvert végétal incomplet.

Ce mode de classification a été détaillé en subdivisant le groupe couvert végétal incomplet en deux groupes : pâturages et sols nus.

d) Le couvert végétal permanent comprend

- Couvert forestier
- matorral clair arboré : faciès à *Tetraclinis articulata* et *Oleo lentisque*.
- matorral dense arboré : faciès à *Tetraclinis articulata*.
- matorral clair arboré : faciès *Tetraclinis articulata* et *Quercus ilex*.
- Reboisements forestiers.
- cultures pérennes
- Plantation viticole et arboriculture fruitière.

e) Le couvert végétal temporaire comprend

- les cultures annuelles
- Céréales, agriculture extensive et semi intensive et les terres labourables.

f) Le couvert végétal incomplet comprend

- Les pâturages : regroupent les parcours très dégradés et les moins dégradés
- Sols nus : comprend les terrains non cultivés

La classification du couvert végétale et l'attribution du degré de protection contre l'érosion ont permis l'élaboration d'une nouvelle carte d'occupation des sols.

La répartition du couvert végétale au niveau du bassin versant est respectivement; 9,51% (terres peu et non protecteur), 61,17% (terres moyennement protecteur) et seulement 8,17% est considéré comme protecteur (Figure 4.8, chapitre IV).

7.2.2. Carte des pentes

Le modèle numérique de terrain MNT (SRTM avec une résolution de 30 m) a permis de produire la carte des pentes (figure 4.7, chapitre IV), qui a été subdivisée en quatre classes de pentes : 0 à 5%; 5 à 15%; 15 à 25% et supérieure de 25%. Pour chaque classe de pente est assigné un indice variant entre 1 et 4 (tableau 7.2), 1 étant affecté aux pentes faibles (< 5°), 4 aux pentes fortes (> 15°).

Tableau 7.2: Classes de pente et indices attribués

Pentes (%)	Indice attribué
0-5	1
5-15	2
15-25	3
> 25	4

7.2.3. Carte de friabilité

La carte lithologique du bassin versant de l'oued Hammam laisse apparaître une grande diversité des formations superficielles avec prédominance des sols argileux issus des formations marneuses. Les classes de sensibilité des sols sont attribuées à partir de la description de la nature des roches sur la carte géologique, et de leur sensibilité à la battance et à la fissuration (tableau 7.3). On peut ainsi distinguer quatre classes de matériaux (tableau 7.4) : résistant, moyennement résistants, vulnérables et très vulnérables. À chaque classe est assigné un indice variant entre 1 et 4. 1 étant affecté aux matériaux les plus exposés à l'érosion et 4 aux matériaux les moins exposés.

Tableau 7.3 : Caractéristiques et classement de sensibilités des types de sols

Type de sol	Caractéristiques	Sensibilité à la battance	Sensibilité à la fissuration
Sablo-limoneux sur calcaire du pliocène	– Moyennement à peu profond – Texture équilibrée – Sols très filtrants – Stables sur croûte calcaire	Faible	Faible
Calcaire marne de l'Albien et Aptien	Présence de calcaire et d'argiles	Limité	Faible
Marne indurée du crétacé (vert clair armée)	Texture limono-argileuse	Limité	Moyenne à excellente
Conglomérat formé de galet et de ciment alternant des roches très dures du Miocène	Texture sablo-limoneux-argileux	Faible	Faible
Marne sableuse alternant avec des bancs plus durs de calcaire	Texture argilo-sableuse	Limité	Faible
Grès jaune plus ou moins friable du Miocène	Texture sablo-limoneuse	Moyenne	Faible
Sable argileux jaune et banc gréseux du Pliocène	Texture sablo-argileuse	Limité	Faible
Marnes et argiles marneuses avec bancs calcaires instables de couleur grise du Miocène (vert clair grisé)	Texture limono-argileuse	Limité	Moyenne à excellente
Marnes avec des bancs de grès friables de l'Éocène	Texture limono-argileuse	Limité	Moyenne à excellente
Gypse du Trias	Sols salsodiques – abondance de sulfate de calcium	Limité	Excellente
Alluvions	Texture limono-sablo-argileuse	Limité	Faible

(Bouchetata et al. 2006)

Tableau 7.4: Classes de friabilité des matériaux et indices attribués

Faciès	Friabilité des matériaux	Indice attribué
Marnes et grés	Matériaux très vulnérable	1
Alluvions	Matériaux vulnérable	2
Marnes et calcaires	Matériaux vulnérable	2
Argiles et schistes	Matériaux moyennement résistants	3
Calcaires dolomitiques et dolomies	Matériaux moyennement résistants	3
Calcaires lacustres du pliocène	Matériaux résistants	4
Grés et sables du miocène	Matériaux résistants	4
Grés	Matériaux résistants	4

La carte lithologique obtenue (figure 4.10, chapitre IV), fait ressortir que la classe des sols très fortement et fortement sensibles représente 71,58% de la surface totale, cette lithologie tendre et fragile, engendre sans doute une dynamique érosive importante.

7.3. Résultats

La méthodologie développée dans cette étude utilise des règles qualitatives, des évaluations et une hiérarchisation des paramètres intervenant dans l'érosion hydrique : occupation des terres (Figure 4.8), friabilité des matériaux (Figure 4.10) et degré de pente (Figure 4.7). L'ensemble de ces données est intégré dans un SIG pour une meilleure gestion de l'information. La combinaison de ces cartes, suivant la règle de décision mentionnée sur le tableau 7.8, a permis de produire une carte thématique appelée carte de fragilité des terres (Figure 7.2). Celle-ci comprend quatre classes : très fragiles (0.33%), fragiles (35.43%), moyennement fragiles (58.90%) et peu fragiles (5.34%).

Tableau 7.5: Règles de décision de fragilité des terres

Occupation de sol	Fragilité des terres en fonction de friabilité des matériaux			
	Très Vulnérable	Vulnérable	Moyennement Résistant	Résistant
Non protecteur	Très fragile	Très fragile	Très fragile	Fragile
Peu protecteur	Très fragile	Très fragile	Moyennement fragile	Moyennement Fragile
Moyennement protecteur	Fragile	Moyennement Fragile	Peu fragile	Peu fragile
Fortement protecteur	Moyennement fragile	Peu fragile	Peu fragile	Peu fragile

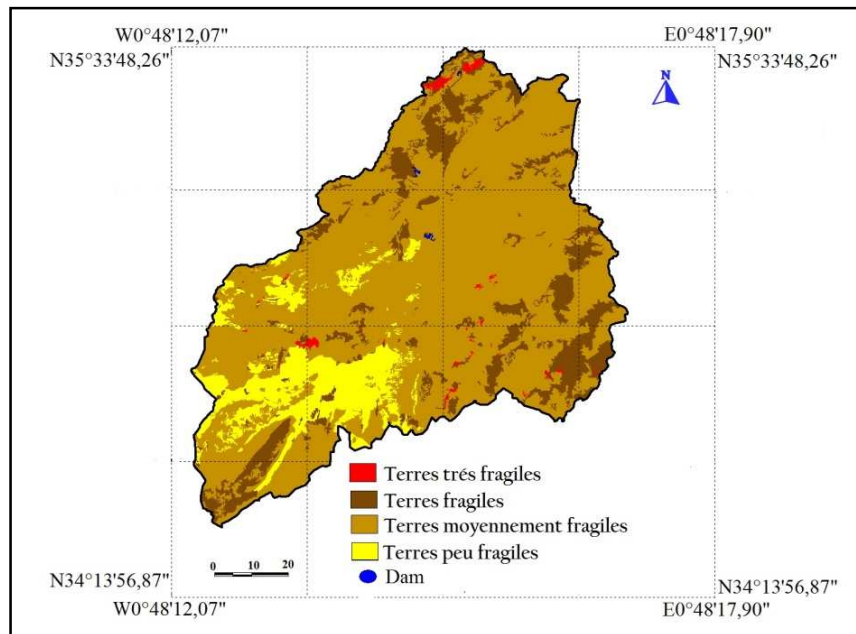


Figure 7.2: Carte de fragilité des terres

La carte de sensibilité à l'érosion (figure 7.3) a été élaborée par l'interaction entre la fragilité des terres et le degré de pentes, à l'aide de la règle de décision présentée dans le tableau 7.9. Trois classes sont délimitées : faible (65,18%), moyenne (26,18%) et forte (8,64%).

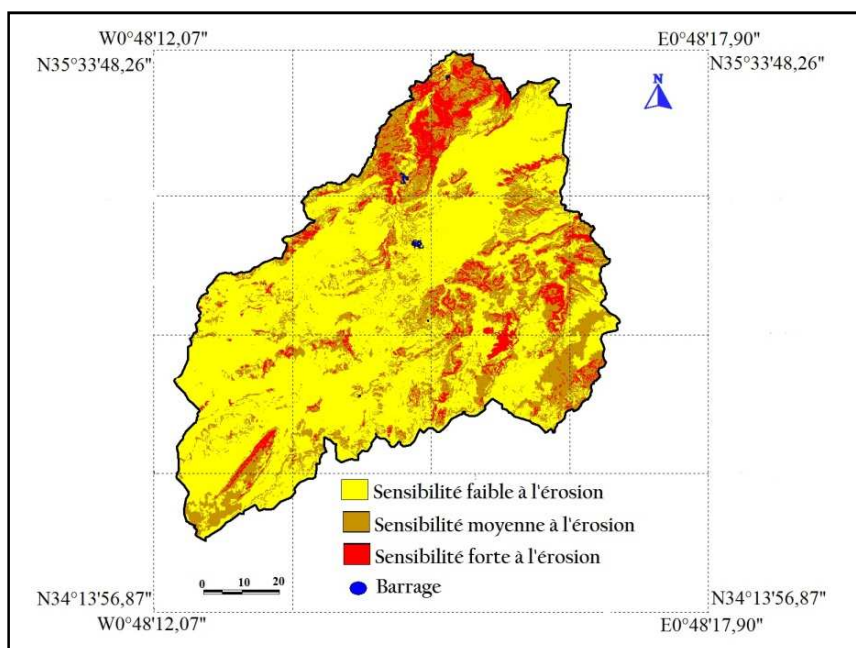


Figure 7.3: Carte de sensibilité à l'érosion

Tableau 7.6 : Règles de décision de sensibilité à l'érosion

Pente (%)	Sensibilité à l'érosion en fonction de fragilité des terres			
	Très Fragile	Fragile	Moyennement fragile	Peu Fragile
0-5	Moyenne	Faible	Faible	Faible
5-15	Forte	Forte	Moyenne	Faible
15-25	Forte	Forte	Forte	Moyenne
>25	Forte	Forte	Forte	Forte

Les cartes thématiques de fragilité des terres et de sensibilité à l'érosion montrent que les superficies de terres moyennement fragiles présentent une faible sensibilité à l'érosion et concerne 65,18% de la zone étudiée. Ces zones sont présentés dans toute la région, essentiellement sur des terrains avec une pente faible et moyenne (<15%), couverts de culture et du matorral. La sensibilité moyenne (tableau 7.10), représente respectivement 39,3% et 18,8% de superficie des bassins d'Ouizert et Bouhanifia. La sensibilité forte, touche légèrement ces deux bassins avec respectivement 10,7% et 3,5% de leurs surfaces totales, et fortement le bassin versant de Fergoug au nord (32%), où on rencontre des terrains argileuses à forte pente (> 15°) et un couvert végétal presque absent.

Tableau 7.7 : Répartition en % de la sensibilité des sols à l'érosion

Bassins	Sensibilité à l'érosion		
	Faible	Moyenne	Forte
Oued El Hammam	65,18	26,18	8,64
Ouizert	50	39,3	10,7
Bouhanifia	77,7	18,8	3,5
Fergoug	23	45	32

7.4. Discussion

Les classes dominantes de la sensibilité à l'érosion correspondent aux niveaux faibles et moyens. Ceux-ci affectent 91% du terrain d'étude. Ces superficies correspondent aux zones de pentes faibles et moyennes, qui représentent respectivement 66,5 % et 29,5% de la surface totale du bassin versant de l'oued El Hammam. Ce résultat montre que la sensibilité à l'érosion de la région d'étude, est essentiellement contrôlée par le degré de pente et la densité du couvert végétal. Quant à l'influence de la friabilité sur l'érosion est déclenchée par l'action humaine suite aux pratiques agricoles sur les terrains à fortes pentes. C'est le cas du bassin versant de Fergoug (précisément le sous bassin de l'oued Fergoug), où les pentes supérieures à 25% représentent 35,31% et celles supérieures de 12,5% représentent 61,53% de sa surface totale (Bouchetata et al. 2006) ; ces superficies essentiellement argileuses destinées aux pâturages et aux cultures vivrière intensives, concourt à produire des terres fragiles à très fragile et par conséquent une sensibilité forte à l'érosion.

7.8. Conclusion

Les éléments contenus dans les cartes topographiques, les cartes lithologiques et d'occupation des terres ont été croisés dans un système d'information géographique. L'analyse et la modélisation spatiale de la friabilité du substratum lithologique, du couvert végétale et le degré de pente, ont permis d'avoir une idée claire sur la gestion du bassin versant d'Oued El Hammam et par conséquent produire un projet plus en harmonie avec la nécessité de protéger les barrages, situé en aval, contre l'envasement. Dans le bassin versant de l'oued El Hammam, les pentes faibles et moyenne occupent 96% de superficies, et sont concentrés dans le bassin d'Ouizert et Bouhanifia, le reste, qui est de 4 % de surface, est réservé aux fortes pentes réparties dans différentes endroits du bassin de l'oued El Hammam mais fortement concentrés pour le bassin de Fergoug. La cartographie des zones à l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued El Hammam a permit de distinguer trois classe de sensibilité. La classe faible et moyenne occupent 91% de la surface totale. Ces niveaux de sensibilité sont dus aux pentes faibles et moyennes dominant le bassin étudié et intéressent le bassin d'Ouizert et de Bouhanifia. La classe des sols fortement sensibles à l'érosion affecte légèrement ces deux derniers et fortement le bassin de Fergoug.

CHAPITRE VIII

ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE

EN SUSPENSION

8.1. Nature des sédiments transportés

8.1.1. Généralités

Les particules élémentaires des sédiments fins ont des dimensions et des formes très différentes, ceux du type vase ou boues, contribuent fréquemment à réduire la rentabilité d'une installation en imposant des travaux onéreux d'entretien (Parzonka,1984). C'est pourquoi les connaissances minéralogiques, chimiques et granulométriques de ces particules sont nécessaires.

Pour notre étude, nous nous sommes intéressés sur l'analyse granulométrique, qui donne une idée sur la répartition des particules sur le bassin et permet d'identifier la composition de la vase du barrage, la densité sèche et la concentration massique de la mixture permet l'évaluation de la vase en terme poids et volume solide qu'on utilisera ultérieurement lors de la quantification de l'envasement.

8.1.2. Caractéristiques physiques

On donne quelques relations fondamentales des caractéristiques physiques des vases facilitant la compréhension des paramètres qu'on utilise.

- **Poids spécifique des grains solides γ_s**

C'est le quotient du poids des grains par un volume absolu, déterminé à partir de l'essai, au pycnomètre.

- **Poids volumique de la mixture γ_m**

$$\gamma_m = c_v \times \gamma_s + (1 - c_v) \times \gamma_w$$

- **Concentration en volume de la mixture C_v**

$$C_v = \frac{1}{1 + w \frac{\gamma_s}{\gamma_w}} \quad C_v = \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_s \gamma_w} \quad C_v = \frac{T_s}{1000 \times \gamma_s}$$

- **Concentration en poids de la mixture C_s**

$$c_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_m} \times \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \quad c_s = \frac{1}{1+w}$$

- **Concentration massique de la mixture T_s**

$$T_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} (\gamma_m - \gamma_w) \times 1000 \quad , \quad T_s = c_s \times \gamma_m = c_v \times \gamma_s$$

8.1.3. Protocole expérimental

Afin de déterminer les caractéristiques physiques (granulométrie) des sédiments qui se sont transportés par les affluents et déposés dans les barrages de la triplex. Nous avons prélevés des échantillons de vase de chaque retenue. Pour la retenue d'Ouizert, nous avons effectué un prélèvement des sédiments au niveaux des oueds ; Oued Sahouat, Oued Saida et Taria. Concernant les lâchés d'eau (Bouhanifia-Fergoug), quatre échantillons de sédiments ont été prélevés le long de l'oued El Hammam à différentes distances du barrage de Fergoug.

8.1.4. Résultats et discussion

La lithologie et la topographie des bassins versant influent sur la nature des sédiments piégés dans les retenues, ce qui induit une granulométrie des vases différente d'un barrage à l'autre. la vase des barrages d'Ouizert et de Fergoug est de texture fine, celle de Bouhanifia est de texture grossière (tableau 8.1).

Tableau 8.1: Caractéristiques physiques des sédiments et des vases

Caractéristiques physiques	Oued Sahouat	Oued Saida	Oued Taria	Vase d'Ouizert	Vase de Bouhanifa	vase de Fergoug
T_s (g/cm ³)				1451	1451	1150
Y_s (g/cm ³)				2,69	2,6	2,55
Cailloux(%)	0	0	0	0	1,3	0
Graviers (%)	08	0.25	10.4	0,003	53,7	0
Sables grossiers(%)	73	96.95	61.65	9,67	31	1,2
Sables Fins(%)	14	02	20.94	19,63	13	4,2
Limon(%)	02	0.6	5.26	30	0,1	18,6
Argile (%)	03	0.2	1.75	40	0,85	76

a)- Barrage d'Ouizert

Les sédiments d'oued Saida et Taria sont en majorité sableux, même à oued Sahouat dont le prélèvement a été réalisé à 2km en amont du barrage. Néanmoins cette charge de particules grossières (graviers, sables) se voit diminuée (tableau), au fur et à mesure qu'on s'approche du barrage d'Ouizert ; la vitesse d'écoulement commence à diminuer à cause des contrepentes présentes à ce niveau de l'oued Sahouat (chapitre), les eaux abandonnent alors la majeure partie de matériaux les plus lourds ,donc les plus grossières, seuls les éléments moins grossiers (limon + argile), peuvent transiter en suspension et se décantent dès que la vitesse d'écoulement devient nulle.

b)- Barrage de Bouhanifia et Fergoug

Les formations de grès, de grès et sables occupent des superficies importantes du bassin versant de Bouhanifia dans les hautes altitudes et au niveau de la plaine. Les sédiments grossiers résultant de l'érosion de ces formations sont ainsi charriés par les quatre affluents drainant le bassin, vers la station de Trois rivières pour enfin finir à se déposer dans la retenue. La vase fine du barrage de Fergoug constitue le produit de l'érosion du bassin versant , formé de 74% d'argile et schiste.

c)- Granulométrie des sédiments des lâchés d'eau (Bouhanifia-Fergoug)

Pour l'irrigation de la plaine de l'Habra, située en aval du barrage de Fergoug et pour des besoins en eau potable et industrielle, et sur la base de la commande d'eau demandée par les gestionnaires du barrage de Fergoug. Des lâchés d'eau s'opèrent de Bouhanifia par la prise d'eau et transporté par l'oued El-Hammam, sur une distance de 56,2 km. Ces volumes d'eau livrés vers le Fergoug ne sont guère dépourvus de matières solides. Ces dernières sont mesurées en aval du Bouhanifia à la station nommée "canal bouhanifia". L'analyse granulométrique des sédiments des lâchés, montre que la majorité des sédiments chassés (tableau 8.2), sont des sables grossiers ; 98% de sables ont été détectés à une distance de 5,4km du barrage de Fergoug. Les lâchés contribuent donc à l'envasement de ce dernier par un apport solide sableux.

Tableau 8.2 : Granulométrie des sédiments des lâchés ((Bouhanifia-Fergoug)

Echantillons	1	2	3	4
Distance au barrage de Bouhanifia (km)	7	42.2	46.1	50.8
d ₅₀ (mm)	0.83	0.7	0.55	0.42
Cailloux (%)	0.9	0	0	0
Gravier (%)	21.8	16.7	6.9	1.1
Sables grossiers (%)	73.3	78.3	83.5	79.5
Sables fins (%)	4	5	9.3	18.4
Limons (%)	0	0	0.2	0.55
Argiles (%)	0	0	0.1	0.45

8.1.5. Morphologie des affluents de l'oued El Hammam

Un cours d'eau est un système dynamique dont la forme (en long et en travers) dépend principalement du processus d'érosion/dépôts de matériaux. Ce mécanisme est lui-même déterminé essentiellement par les débits liquides et solides, « variables motrices » de l'hydromorphologie d'un cours d'eau. L'équilibre du cours d'eau oscillera en effet entre érosion et dépôts, selon que l'un ou l'autre des débits sera prédominant (Mahé, 2010).

La classification des principaux affluents du bassin versant de l'oued El Hammam selon la pente moyenne et la sinuosité (tableau 8.3), permet d'avoir une idée sur le comportement hydrologique de ces cours d'eau vis-à-vis du transport solide.

Tableau 8.3 : Caractéristiques morphologiques des affluents

Oued	Altitude maximale (m)	Altitude minimale (m)	Pente moyenne (‰)	Sinuosité	Observation
El Hammam	270,8	81,8	6,9	1,57	Méandrique
Sahouat	470	286,9	14,9	2,09	Méandrique
Saida	753,7	433,9	11,1	1,27	Rectiligne
Taria	738,8	433,9	8,2	1,14	Rectiligne
Melrir	741,4	286,5	8,3	1,19	Rectiligne
Sefioum	1104,4	509	9,1	1,21	Rectiligne
Berbour	926,5	509	14,2	1,2	Rectiligne
Hounet	553,4	286,9	11,5	1,36	Sinueux
Fekan	435,2	296,8	10,2	1,16	Rectiligne

L'oued Sahouat est méandrique, ce qui laisse supposer l'existence de zone d'épandage dans son tracé. L'oued Saida est plus pentue que celui de Taria, avec sa taille réduite, pourra bénéficier d'un ruissellement et d'un transport de sédiment important.

L'oued Sefioum et Berbour qui prennent leurs sources à des altitudes importantes se rejoignent à l'oued Hounet pour lui fournir un cumul appréciable d'apports liquides et solides. L'oued Fekan caractérisé par un temps de concentration faible et un tracé plus rectiligne, en associant avec l'oued Hounet, se voit potentiellement responsable de l'envasement du barrage de Bouhanifia.

8.2. Etude du transport solide en suspension

8.2.1. Présentation des données

La quantification du transport solide du bassin versant de l'oued El Hammam portera sur les transports solides des sous bassins d'Ouizert ,Bouhanifia et Fergoug , ces deux derniers bassins sont respectivement contrôlé par les stations hydrométriques de Trois rivières et Hacine , alors que le bassin d'Ouizert est contrôlé par trois stations :oued Sahouat, oued Saida et oued Taria. Les données de mesure des concentrations des matières en suspension nous ont été fournies par les services hydrologiques de l'ANRH et concernent les périodes suivantes (tableau 8.4).

Tableau 8.4: Caractéristique des stations hydrométriques et périodes de mesure

Bassins	Stations	Code	Période
Ouizert	Oued Sahouat	111302	1990-2005
	Oued Saida	111129	1990-2006
	Oued Taria	111201	1990-2006
Bouhanifia	Trois rivières	1115 01	1985-2005
Fergoug	Hacine	111518	1993-2005

Les stations se trouvent à quelques kilomètres des barrages, généralement sous un pont. Elles représentent tous une section à échelle limnimétrique à écoulement uniforme. Dans cette section on note presque quotidiennement la hauteur H. comme ces stations sont consacrées à l'étude du transport solide (débit solide en suspension), on fait des prélèvements d'échantillons par des bouteilles d'un litre d'eau écoulee en même temps qu'on relève les hauteurs. Cette bouteille permet de déterminer la concentration de l'eau en vase, donné en g/l. Une observation plus large est faite lors des crues et pour les écoulements à fortes concentrations.

En période normale on prélevait une fois tous les deux jours. L'étude est basée sur les valeurs instantanées des débits liquides (Q_l), donnés en m^3/s , mesurés aux différentes stations.

Le calcul du débit solide en suspension est basé sur la mesure du débit liquide de l'écoulement puisque : $Q_s = C \times Q_l$

Q_s : Débit solide en suspension (kg/s)

Q_l : Débit liquide (m^3/s)

C : Concentration ou turbidité (g/l)

8.2.2. Calcul des apports

Les apports solides en tonnes ou en millions de tonnes, A_s (10^6t ou MT) et les apports spécifiques en tonnes par kilomètre carré par an, A_{ss} ($t/km^2/an$) sont données par :

$$A_s = Q_s.N.10^9$$

$$A_{ss} = (A_s.10^6) / S$$

Avec :

A_s : apport solide annuel, mensuel ou saisonnier (MT)

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

N : temps en secondes. (s)

A_{ss} : apport solide spécifique ($t/km^2/an$)

S : superficie du bassin versant (km^2)

a)- Les apports annuels

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

$$A_s = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j C_j \quad \text{où,}$$

C_j : est la concentration mesurée à l'instant t_j

Q_j : correspondant au débit liquide à l'instant t_j ,

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, A_l , l'apport liquide annuel engendrant le flux des apports solides A_s , est calculé par la formule

$$A_l = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j$$

Le (tableau 8.5) présente les apports liquides (A_l), solides (A_s) et les dégradations (A_{ss}) spécifiques au niveau des différents bassins aux différentes périodes de mesure.

L'analyse de ces données, permet de déduire que :

1) Le bassin d'Ouizert

Ce bassin est constitué de deux sous bassins, oued Saida et oued Taria. Sur une période de 16 années (90/91) et (05/06), l'apport solide moyen interannuel est respectivement de 307000 et 344000 tonnes, la dégradation spécifique moyenne est aussi de 494,23 et 235,08 t/km²/an. Elle varie de 12 à 710 t/km²/an pour le sous bassin de Taria, pour celui de Saida, elle est de 0,04 à 1528 t/km²/an.

Pour l'oued Sahouat, l'apport solide moyen interannuel est de 1,487 millions de tonnes, soit un débit solide moyen annuel de 47,15 kg/s pour une lame écoulée de 22,27 mm, la dégradation spécifique moyenne est de 713,08 t/km²/an. Elle varie de 28,56 à 2059,24 t/km²/an.

2) Le bassin de Bouhanifia

Dans le cas du bassin de Bouhanifia, pour une lame écoulée moyenne de 5,09 mm/an, on enregistre un débit solide moyen annuel de 21,48 kg/s, soit un apport solide moyen de 677672 tonnes, les dégradations spécifiques varient de 1 à 1006 t/km²/an, soit une moyenne de 140 t/km²/an.

3) Le bassin de Fergoug

L'oued El Hammam à Fergoug se caractérise par une lame écoulée moyenne de 47,52 mm/an, apportant en moyenne, annuellement 750627 tonnes de sédiments. La dégradation spécifique moyenne annuelle est de 811 t/km²/an, pour des valeurs variant de 21 à 2865 t/km²/an, déduit d'un débit solide de 23.8 kg/s.

La différence qui existe entre les apports solides des différents bassins, à l'exception de celui du Fergoug, est principalement liée à la différence des superficies ; en effet les courbes en fonction de la surface des différents paramètres de l'écoulement et des apports solides (figure 8.1), montrent clairement l'influence de la surface sans pour autant être affirmatif, étant donnée le nombre réduit de bassins étudiés.

Tableau 8.5: Valeurs des apports liquides, solides et des dégradations spécifiques au niveau des sous bassins de l'oued el hammam

Année	Bassin d'Ouzert								
	Oued Sahouat			Oued Saïda			Oued Taria		
	A ₁ Hm ³	As MT	Ass T/km ²	A ₁ Hm ³	As MT	Ass T/km ²	A ₁ Hm ³	As MT	Ass T/km ²
1990-1991	115,62	3,85	1845,46	21,10	0,146	235,02	21,086	0,252	172,01
1991-1992	44	0,957	458,72	1,46	0,0014	2,25	2,184	0,0177	12,08
1992-1993	1,037	0,755	361,9	0,671	0,000026	0,04	1,894	0,0418	28,53
1993-1994	10,88	0,265	127,02	3,417	0,0105	16,90	12,4	0,281	191,80
1994-1995	65,65	4,296	2059,24	18,054	0,420	676,11	30,811	1,04	709,89
1995-1996	49	1,768	847,47	53,42	0,709	1141,34	30,181	0,686	468,26
1996-1997	50,39	1,579	856,87	21,57	0,605	973,92	13,838	0,397	271
1997-1998	120,65	2,844	1363,24	3,185	0,045	72,44	14,879	0,502	342,66
1998-1999	2,51	0,0596	28,568	11,492	0,130	209,27	3,917	0,134	91,46
1999-2000	14,26	0,546	261,72	28,491	0,804	1294,27	12,435	0,472	322,18
2000-2001	1,33	0,0258	12,367	29,156	0,949	1527,68	23,86	0,654	446,41
2001-2002	20,33	0,326	156,26	18,70	0,365	587,57	8,274	0,276	188,39
2002-2003	146,15	3,787	1815,26	13,24	0,136	218,93	8,2	0,182	124,23
2003-2004	44,23	0,937	449,14	21,88	0,412	663,23	13,587	0,384	262,11
2004-2005	11,09	0,319	152,91	14,82	0,175	281,71	4,612	0,109	74,40
2005-2006	-	-	-	2,316	0,0044	7,08	2,6	0,0818	55,83
Moyenne	46,475	1,487	713,08	16,43	0,307	494,23	12,797	0,344	235,08

Année	Bassin Bouhanifia			Bassin Fergoug		
	Al Hm ³	As MT	Ass T/km ²	Al Hm ³	As MT	Ass T/km ²
1985-1986	22,66	0,109	20,27			
1986-1987	32,427	0,953	177,27			
1987-1988	18,916	0,0825	15,34			
1988-1989	8,335	0,18	33,48			
1989-1990	79,157	1,15	213,91			
1990-1991	71,246	1,46	271,57			
1991-1992	13,701	0,068	12,64			
1992-1993	2,39	0,006	1,11			
1993-1994	18,419	0,454	84,45	69,913	2,104	2470,35
1994-1995	75,257	5,406	1005,58	81,27	2,440	2864,85
1995-1996	15,678	0,418	77,75	93,88	0,493	578,84
1996-1997	40,695	1,37	254,83	10,018	0,0231	27,12
1997-1998	42,601	0,73	135,78	37,646	0,497	583,53
1998-1999	4,187	0,057	10,6	12,715	0,0179	21,01
1999-2000	0,945	0,0088	1,63	3,528	0,313	367,50
2000-2001	0,844	0,0068	1,26	30,659	0,193	226,6
2001-2002	20,733	0,355	66,03	6,17	0,233	273,57
2002-2003	7,392	0,066	12,27	45,03	0,345	405,07
2003-2004	62,974	1,72	319,94	71,168	0,234	274,74
2004-2005	9,292	0,428	79,61	20	1,387	1628,5
Moyenne	27,39	0,677	139,76	40,16	0,75	810,14

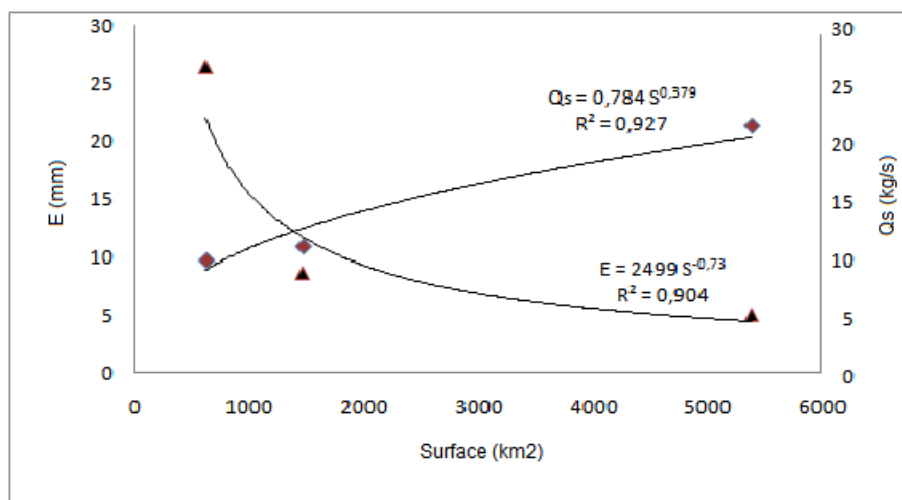


Figure 8.1: Variation de l'écoulement et du transport solide annuels en fonction de la surface des sous bassins

b) variabilité interannuelle des apports solides

Les variations interannuelles des apports solides montrent une grande irrégularité pour les différents bassins, liée à l'irrégularité des précipitations et donc des apports liquides.

1) Bassin de Ouizert

➤ Oued sahouat

L'apport solide moyen du bassin d'Ouizert est deux fois supérieur que celui du Bouhanifia et Fergoug. Sur une période de 16 années de 1990/91 au 2005/06 (figure 8.2), on a enregistré des crues importantes : la crue d'août 1991, la crue de septembre 1994 et, septembre 1995, août 1997 et août 2000. L'apport solide charrié est respectivement : 90%, 94%, 89%, 76,5% et 68% de l'apport annuel. L'année 1994/1995 a été exceptionnelle avec un apport solide de 4,296 millions de tonnes, soit 20% du tonnage globale. La dégradation spécifique de l'année 94/95 est de 2059,24 t/km²/an, elle est 3 fois supérieure à la valeur moyenne de la période avec un apport liquide de 65,65 Hm³, presque 1,5 fois plus grand, La turbidité moyenne annuelle varie entre 0.02g/l (1999/2000) et 239,34g/l (1994/1995).

➤ Oued Saida et Taria

L'apport solide interannuel moyen de ces deux sous bassin est presque pareil. Pour l'oued Saida (figure 8.2), les années suivantes (95/96) (96/97) (99/00) (00/01) ont charriées (62,45%) du tonnage global, dont 35,7% est apporté par les deux dernières années ; la plus importante crue est celle du 23 octobre 2000 qui a charrié 54,2% de l'apport annuel, La dégradation spécifique de l'année 2000/2001 est de 1527,7 t/km²/an, elle est 3 fois supérieure à la valeur moyenne de la période avec un apport liquide de 29,15 Hm³, presque 2 fois plus grand. La turbidité moyenne annuelle varie entre 0.02g/l (1990/1991) et 110,08 g/l (2000/2001).

pour le cas d'oued Taria, les années suivantes (94/95) (95/96) (97/98) (00/01) ont charriées (52,3%) du tonnage global, dont 31,3% est apporté par les deux premières années ; la plus importante crue est celle du 17 octobre 1994 qui a charrié 51,2% de l'apport annuel, La dégradation spécifique de l'année 1994/1995 est de 709,89 t/km²/an, elle est 3 fois supérieure à la valeur moyenne de la période avec un apport liquide de 30,81 Hm³, 2 fois plus grand. La turbidité moyenne annuelle varie entre 0.1g/l (1990/1991) et 140 g/l (2000/2001). La différence qui existe entre les apports solides des différents bassins est principalement liée à la différence des superficies des bassins, les contextes, climatique et géologique étant semblables.

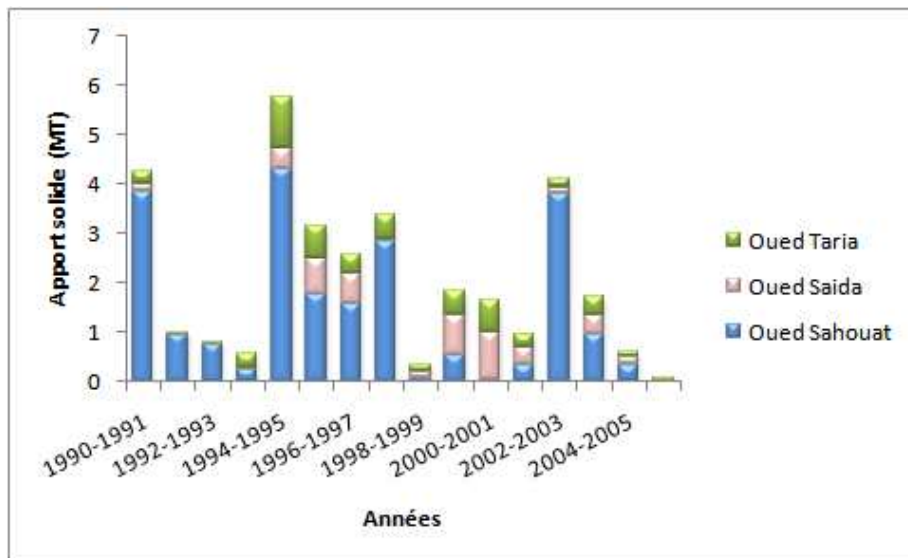


Figure 8.2 : Apports solides annuels des oueds Sahouat, Taria et Saida

2) Bassin de Bouhanifia

Pour ce bassin, (figure 8.3) sur une période de 20 années de 1985/86 à 2004/05 ; on a enregistré quelques crues qui ont permis un apport solide appréciable: la crue de mai 1990, la crue de mars 1991, la crue du 25 août 1997 ; dont l'apport solide charrié est respectivement : 74,4% , 84,3% et 65% de l'apport annuel. L'année 1994/1995 a été exceptionnelle avec un apport solide de 5,406 millions de tonnes, dont une crue de 09 jours au mois de septembre a charrié 89% de l'apport de l'année. Soit 44,3% du tonnage global. La dégradation spécifique de l'année 94/95 est de 1005,6 t/km²/an, elle est 7 fois supérieure à la valeur moyenne de la période avec un apport liquide de 75,25 Hm³, presque 3 fois plus grand, La turbidité moyenne annuelle varie entre 0.02g/l (2004/2005) et 239,34g/l (1994/1995).

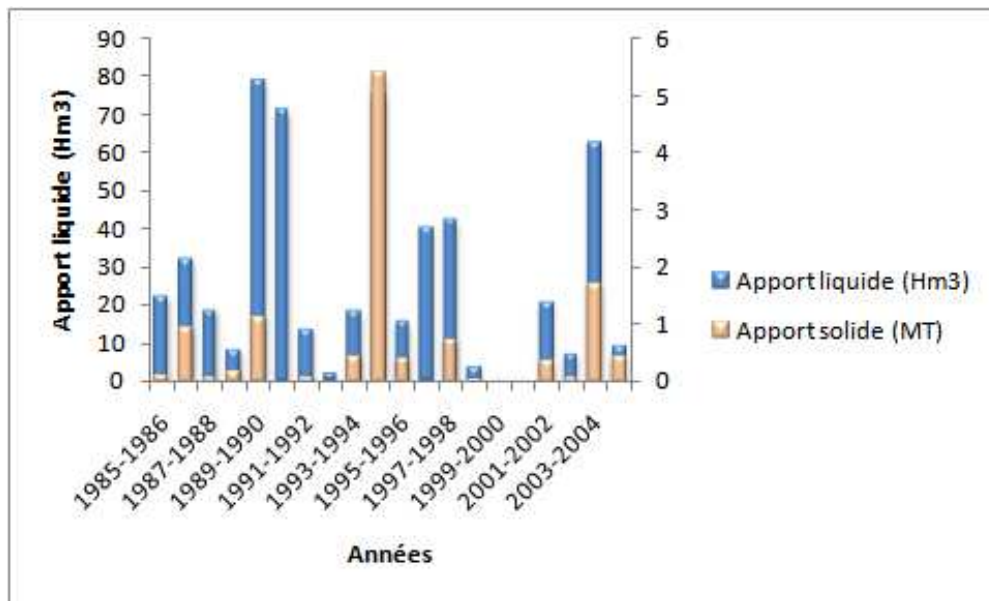


Figure 8.3: Apports liquides et solides annuels à la station de Trois rivières

3) Bassin de Fergoug

Pour l'oued el hammam à Fergoug (figure 8.4), sur une période de 12 années de 1993/94 à 2004/05 ; deux années (93/94 et 94/95) ont charrié plus de la moitié (55%) du tonnage global. L'année 94/95 a charrié 29,55%, La dégradation spécifique de l'année 94/95 est de 2864,85 t/km²/an, elle est 3,5 fois supérieure à la valeur moyenne de la période avec un apport liquide de 81,27 Hm³, 2 fois plus grand.

La turbidité moyenne annuelle varie entre 0.16g/l (2004/05) et 318 g/l (93/94 et 94/95). Il faut noter que la crue du 17 au 19 octobre 1994 a apporté 1054654 tonnes de sédiments sur les 2.44 millions de tonnes, soit 43,2% de l'apport de l'année. Aussi la crue du 13 novembre 2004 a charriée 99% de l'apport de l'année (2004-2005), cette même année a apporté 17% du tonnage global.

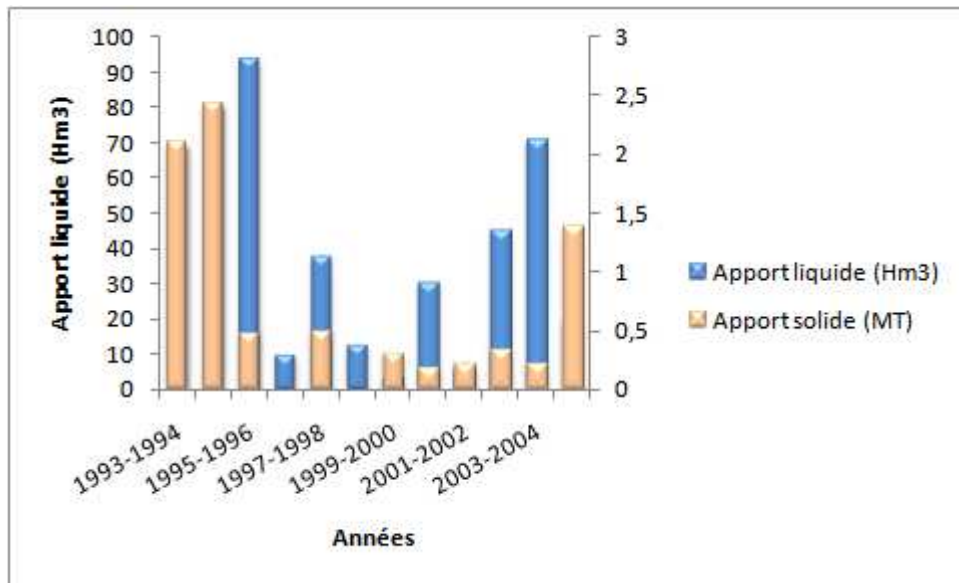


Figure 8.4: Apports liquides et solides annuels à la station de Hacine

c) Apports mensuels

Le flux mensuel des matières solides en suspension exporté par les différents oueds est calculé de la même manière que le flux annuel, pour chaque mois considéré de l'année.

1) Bassin d'Ouizert

➤ Oued Saida

Sur une période de 16 années (tableau 8.6), 77% de l'apport solide et 66% de l'apport liquide sont mesurés au cours de quatre mois seulement (figure 8.5) : en octobre 28,92%, en mars 14,63%, en avril 19,83%, et en juin 13,43%. L'apport solide des mois de juillet et août est quasi nul. La crue du 20 avril 1997 a apporté 94% de la charge annuelle ; 73,4% et 44% de la charge annuelle en suspension ont été mesurés

lors de la crue du mois d'octobre 1999 et d'octobre 2000. La crue du mois de juin 1996 a charrié 38% de l'apport annuel.

Tableau 8.6: Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Saida

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
A_1 (Hm ³)	1,4	5,19	2,4	2,06	1,58	2,81	8,61	5,37	1,45	7,12	-	-
A_s (MT)	0,0426	0,217	0,0575	0,0114	0,0197	0,0296	0,110	0,149	0,0133	0,101	-	-
A_{ss} (T/km ²)	68,71	350,35	92,67	18,35	31,8	47,72	177,27	240,24	21,55	162,71	-	-
E (mm)	2,25	8,35	3,87	3,32	2,55	4,53	13,86	8,64	2,34	11,46	-	-

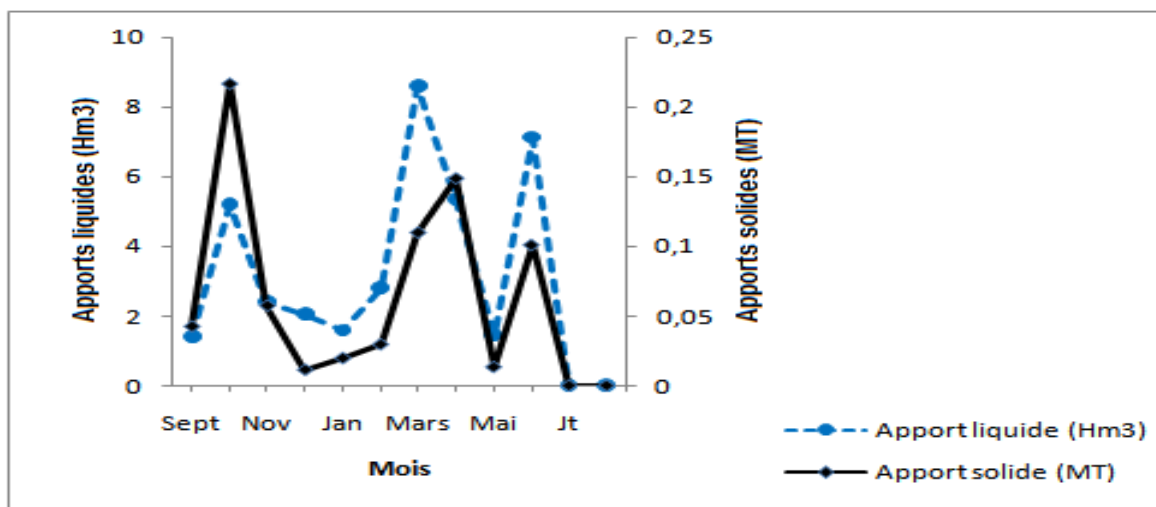


Figure 8.5: Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Saida

➤ Oued Taria

Sur la même période (tableau 8.7), les apports solides aussi bien liquides sont faibles devant ceux d'oued Saida (figure 8.6). 72% de matières solides en suspension sont mesurés au cours des cinq mois seulement : en septembre 11,64%, en octobre 30,13%, en décembre 11,38%, en mars 8% et en aout 10,56%. Les principales crues qui ont contribué à cet apport sont : la crue du 09 octobre 1999, 24 aout 1997 qui ont charrié chacune 50% de l'apport annuel. 57% ont été apporté lors de la crue du 23 octobre 2000.

Tableau 8.7: Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Taria

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Al (Hm ³)	2,28	4,54	1,75	2,7	1,41	1,76	3,17	1,40	1,26	0,59	0,26	1,87
As (MT)	0,0701	0,181	0,0385	0,0685	0,0303	0,0264	0,0484	0,0270	0,0365	0,0078	0,0032	0,0636
Ass (T/km ²)	47,89	123,88	26,27	46,79	20,73	18,03	33,09	18,48	24,97	5,31	2,21	43,45
E (mm)	1,56	3,10	1,19	1,84	0,96	1,20	2,16	0,95	0,86	0,40	0,18	1,27

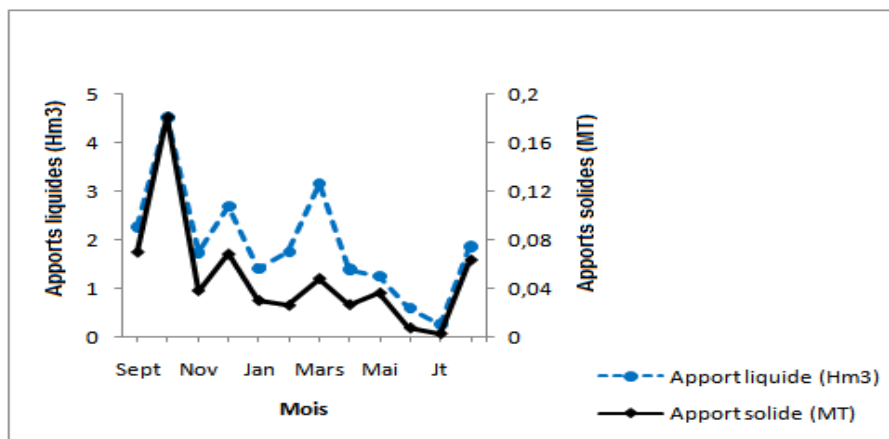


Figure 8.6: Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Taria

➤ Oued Sahouat

Sur la période (1990/2006) (figure 8.7), 66,7% de l'apport solide en suspension est mesuré au cours des trois mois seulement (tableau 8.8) : en septembre 27%, en novembre 11,22%, et en aout 28,47%. En effet 94 % ont été charrié lors de la crue du 28 septembre 1994, 68% durant la crue du 27 aout 1997 et la crue du 04 aout 2000 de l'apport annuel. La dégradation spécifique le plus élevé est observé au mois d'aout (410,66 t/km²/an).

Tableau 8.8: Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Sahouat

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Al (Hm ³)	16,17	7,7	13,07	5,55	6,42	5,81	8,88	5,07	2,33	6,78	0,97	21,24
As (MT)	0,812	0,171	0,337	0,135	0,125	0,162	0,083	0,177	0,044	0,094	0,0094	0,856
Ass (T/km ²)	389,21	82,15	161,80	64,69	60,24	77,82	39,81	84,98	21,04	45,21	4,54	410,66
E (mm)	7,75	3,69	6,26	2,66	3,08	2,78	4,25	2,43	1,11	3,25	0,46	10,18

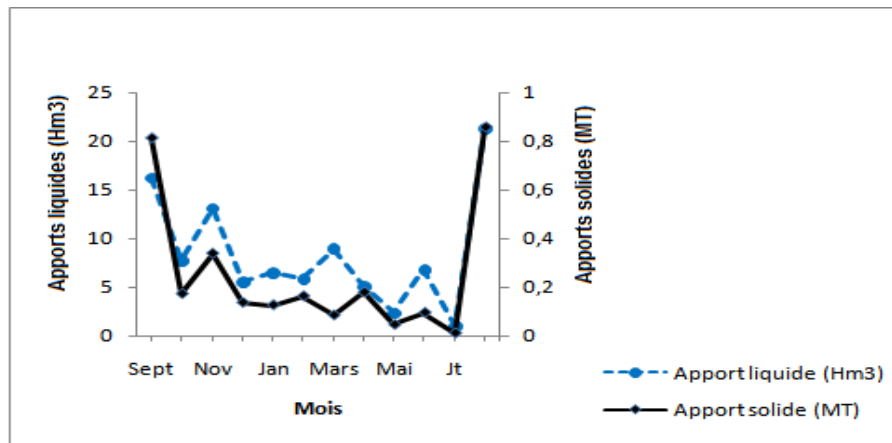


Figure 8.7: Apports liquides et solides moyens mensuels à oued Sahouat

2) Bassin de Bouhanifia

A la station des trois rivières sur la période (1985/05), il apparaît (figure 8.8) que c'est pendant les mois de septembre, mars, octobre, mai, aout et novembre que l'action érosive est active (tableau 8.9). En effet l'apport solide de septembre représente 32,61% du total annuel, l'apport solide des autres mois est respectivement : 15,9%, 12,77%, 10,31%, 9,38% et 8,48%. L'essentiel de l'apport solide est causé par les crues de : mai 1990, mars 1991, septembre 1994 et aout 1997. Le mois de mai 1990 a apporté 76,35% de la charge annuelle. Pour ce bassin, les orages violents du mois d'aout manifestent un apport liquide et solide appréciables.

Tableau 8.9: Apports liquides et solides moyens mensuels au bassin de Bouhanifia

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Al (Hm ³)	7,97	4,87	4,6	1,31	6,46	4,77	10,25	1,42	9,00	2,75	2,78	6,14
As (MT)	0,468	0,183	0,121	0,0717	0,0344	0,0197	0,2283	0,0574	0,148	0,0279	0,0042	0,134
Ass (T/km ²)	87,05	34,04	22,5	13,33	6,39	3,66	42,46	10,67	27,53	5,19	0,78	24,92
E (mm)	1,48	0,90	0,85	0,24	1,20	0,88	1,90	0,26	1,67	0,51	0,52	1,14

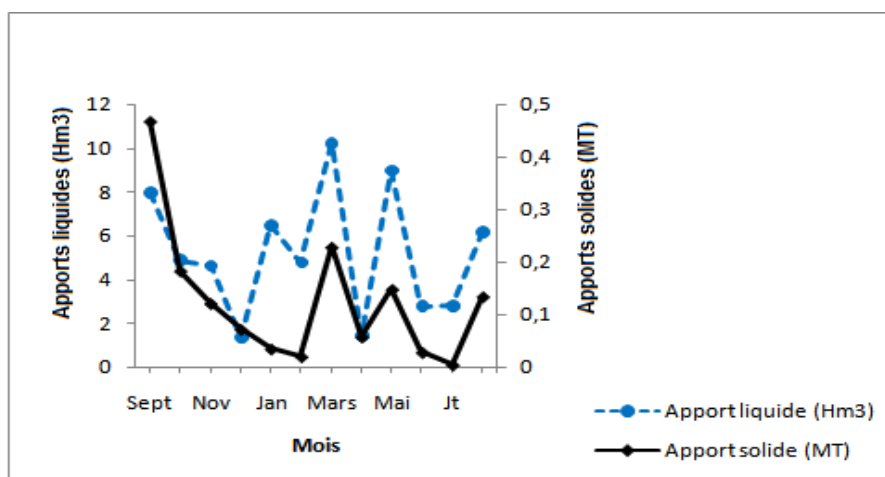


Figure 8.8: Apports liquides et solides moyens mensuels au bassin de Bouhanifia

3) Bassin de Fergoug

Les valeurs mensuelles de la charge en suspension et les apports liquides (tableau 8.10), révèlent une forte variabilité (figure 8.9). 87% de cette charge est mesuré au cours de quatre mois seulement : en septembre 8,81%, en octobre 44,67%, en novembre 22,25%, et en décembre 7,87%. 69% de la charge annuelle en suspension ont été mesurés lors du mois d'octobre 1994.

Tableau 8.10: Apports liquides et solides moyens mensuels au bassin de Fergoug

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Al (Hm ³)	5,61	17,52	5,18	5,61	2,77	3,18	11,09	4,12	5,25	12,51	2,84	2,2
As (MT)	0,0954	0,483	0,241	0,0853	0,0307	0,0397	0,0292	0,0254	0,0107	0,03	0,0015	0,01
Ass (T/km ²)	112,01	567,1	282,96	100,15	36,04	46,61	34,28	29,82	12,56	35,22	1,76	11,74
E (mm)	6,58	20,57	6,08	6,58	3,25	3,73	13,02	4,83	6,16	14,68	3,33	2,58

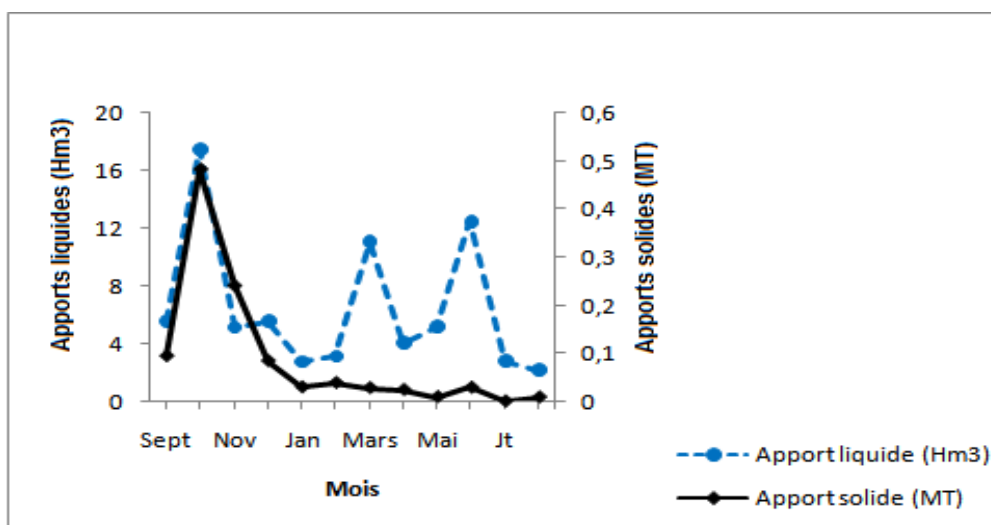


Figure 8.9: Apports liquides et solides moyens mensuels au bassin de Fergoug

d) Apports saisonniers

1) Bassin d'Ouizert

➤ Oued Saida

78,5% du transport solide en suspension s'effectue pendant l'automne et le printemps (tableau 8.11). La saison d'été caractérisé seulement par le mois de juin, apporte 13,43% de matières solides (figure 8.10), cette saison se distingue par des orages violents qui apportent des quantités appréciables de matières en suspension.

Tableau 8.11: Apports liquides et solides moyens saisonniers à oued Saida

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Al (Hm ³)	9	6,46	15,43	8,57
As (MT)	0,317	0,0607	0,272	0,101
Ass (T/km ²)	511,74	97,87	439,07	162,71
E (mm)	14,48	10,41	24,84	13,80

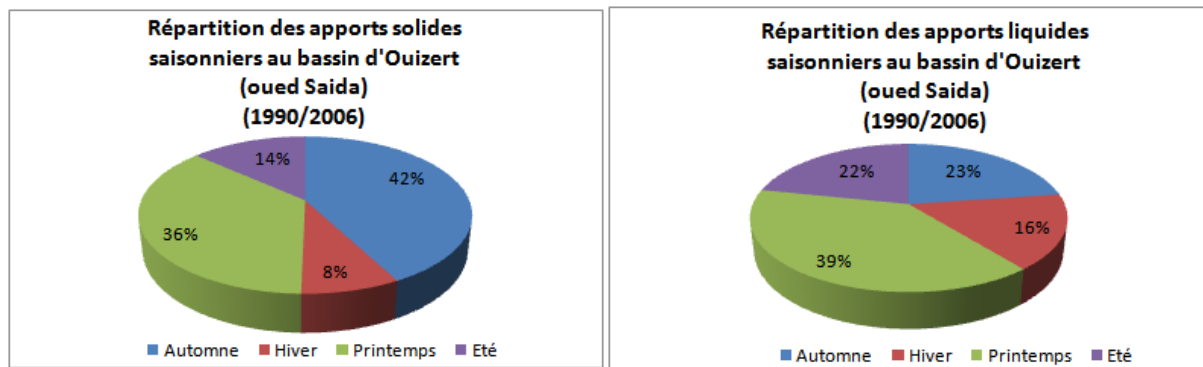


Figure 8.10: Répartition des apports liquides et solides au bassin d’Ouziert (oued Saida)

➤ **Oued Taria**

Selon le tableau 8.12 et la figure 8.11, 87,6% d’apport solide est mesuré au cours des trois saisons seulement : en automne 37,28%, en hiver 25,53% et en printemps 25,31%, l’apport de la saison estivale est faible devant celui de l’oued Saida. La dégradation spécifique calculée est elle aussi faible.

Tableau 8.12: Apports liquides et solides moyens saisonniers à oued Taria

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
A_l (Hm ³)	8,58	5,88	5,83	2,73
A_s (MT)	0,290	0,125	0,112	0,074
A_{ss} (T/km ²)	198,05	85,56	76,55	50,98
E (mm)	5,86	4,01	3,98	1,86

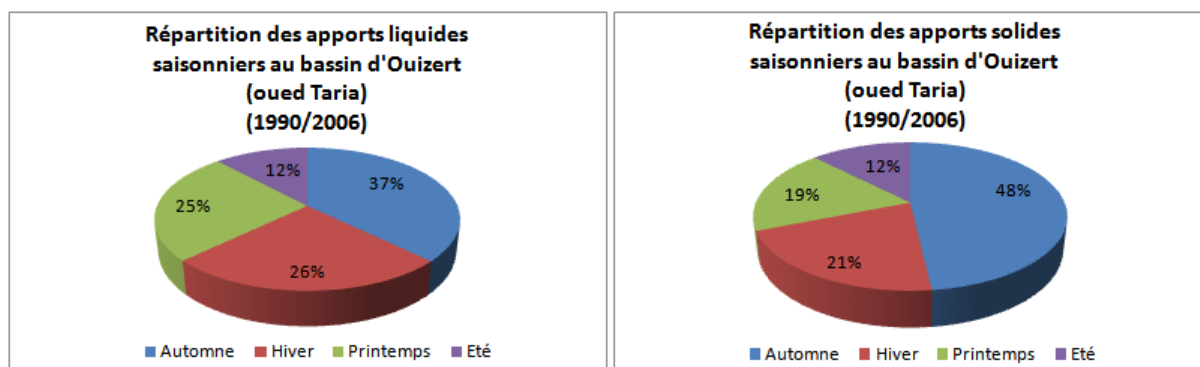


Figure 8.11: Répartition des apports liquides et solides au bassin d’Ouziert (oued Taria)

➤ Oued Sahouat

75,82% de l'apport solide est ramené au cours des deux saisons seulement (tableau 8.13) : en automne 43,9% et en été 31,92% (figure 8.12), ce qui veut dire que les crues d'hiver et de printemps déclenchés en amont du bassin (oued Saida et Taria) n'ont pas une influence directe sur le sous bassin de Sahouat, seules les orages violents d'été suivi par les précipitations de la saison d'automne, tombant sur un sol sec et faiblement couvert, érodent des quantités considérables de matières solides.

Tableau 8.13: Apports liquides et solides moyens saisonniers à oued Sahouat

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
Al (Hm ³)	36,94	17,79	16,28	29
As (MT)	1,321	0,423	0,304	0,960
Ass (T/km ²)	633,17	202,75	145,84	460,42
E (mm)	17,71	8,53	7,80	13,90

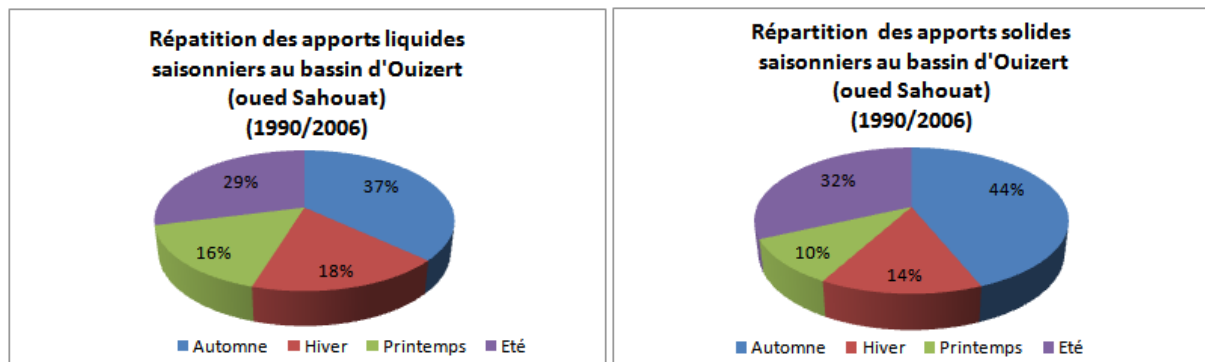


Figure 8.12: Répartition des apports liquides et solides au bassin d'Ouizert
(oued Sahouat)

2) Bassin de Bouhanifia

L'analyse du tableau 8.14, et la figure 8.13, laisse apparaître que l'automne et le printemps se distinguent par leurs apports liquides forts, engendrant un flux important de matières solides en suspension. Les plus importants sont enregistrés en automne (53,87%) et à un degré moindre au printemps (30,21%) de l'apport annuel. Pour l'automne, la forte charge s'explique par le fait que les précipitations souvent intenses, tombent sur un sol asséché et mal protégé par la végétation (Roose et al, 1999).

Au printemps, la charge en suspension n'augmente pas proportionnellement aux apports liquides bien que le flux saisonnier reste inférieur à celui mesuré en automne malgré une hausse significative des totaux pluviométriques. L'apport solide de l'été est appréciable devant celui de l'hiver, cette saison se distingue par des orages estivaux qui ramènent des quantités considérables de matières en suspension.

Tableau 8.14: Apports liquides et solides moyens saisonniers au bassin de Bouhanifia

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
A_l (Hm ³)	17,46	12,55	20,68	11,68
A_s (MT)	0,773	0,0613	0,433	0,167
A_{ss} (T/km ²)	143,78	11,40	80,54	31,06
E (mm)	3,24	2,33	3,84	2,17

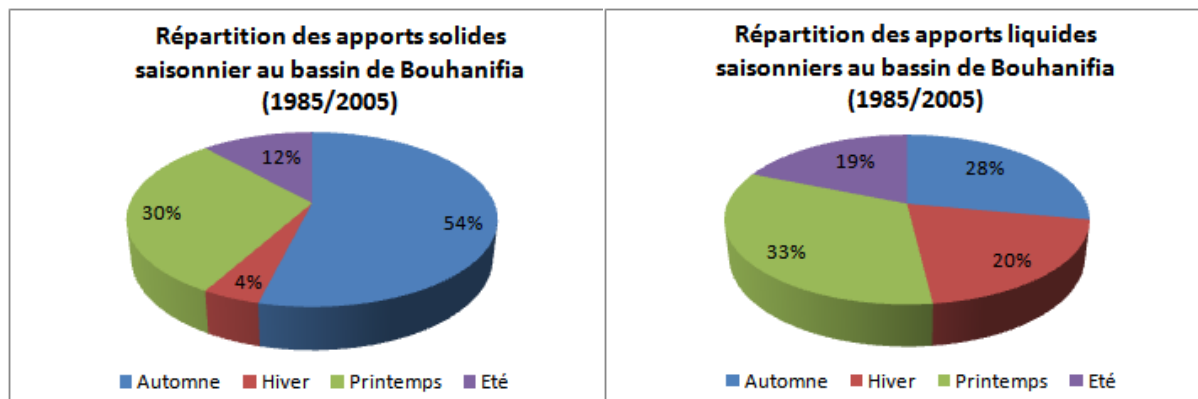


Figure 8.13: Répartition des apports liquides et solides au bassin de Bouhanifia

3) Bassin de Fergoug

75,85% et 14,38% du transport des matières en suspension s'effectue pendant l'automne et l'hiver (tableau 8.15). Les saisons de printemps et d'été sont des saisons à érosion insignifiante (figure 8.14) malgré l'apport liquide important qu'elles présentent ; ceux-ci est du à l'état de saturation du sol d'une part et la faiblesse de l'intensité des averses.

Tableau 8.15: Apports liquides et solides moyens saisonniers au bassin de Fergoug

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
A_1 (Hm ³)	28,32	11,57	20,46	17,55
A_s (MT)	0,820	0,155	0,065	0,041
A_{ss} (T/km ²)	962,78	181,98	76,31	48,14
E (mm)	33,25	13,58	24,02	20,6

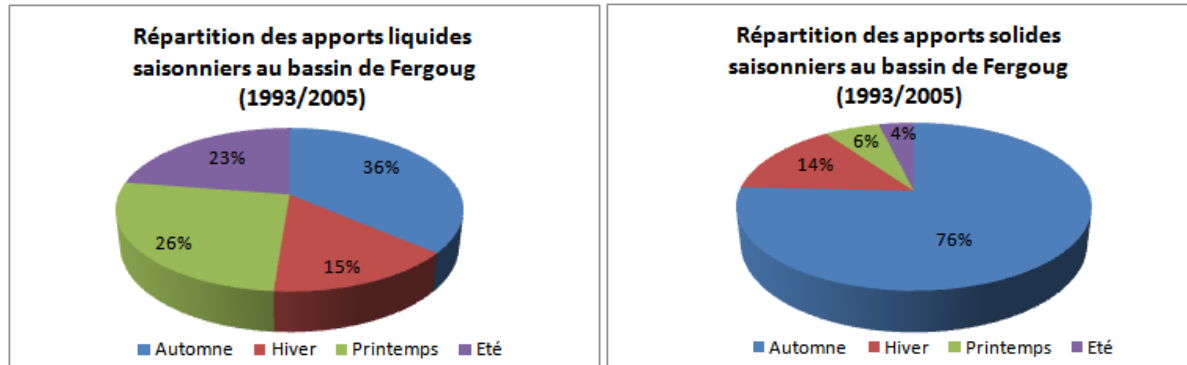


Fig 8.14: Répartition des apports liquides et solides au bassin de Fergoug

8.2.3. Relation des transports solides avec les précipitations et les écoulements

Pour l'ensemble des stations, les précipitations présente une relation discordante avec les écoulements et les transports solides annuels (tableau 8.16, figures en annexe), excepté la station d'oued Saida et Taria, ou on constate une légère liaison entre les pluies et les écoulements. Une relation concordante entre les écoulements et les dégradations spécifiques, s'observe pour le bassin versant d'Ouizert avec ses deux affluents (Saida et Taria). Les orages violents d'été et les précipitations d'automne caractérisant ce bassin, tombent sur un sol sec et dénudé et arrache de quantités considérables de matières solides, 856000 et 812000 de tonnes sont charriés durant les mois d'aout et septembre. Les écoulements de printemps succèdent alors à la saturation totale du bassin. 36% et 25% de la charge en suspension annuelle, est enregistré durant le printemps pour l'oued Saida et Taria ; ces volumes élevés enregistrés durant cette saison résulte des sapements des berges qui succède à la saturation total du bassin versant. Le comportement hydrologique du bassin versant de Bouhanifia ressemble à celui d'Ouizert ; lui aussi est caractérisé par des orages au mois d'aout, qui véhicules des quantités appréciables de sédiments, sans oublier celles de l'automne et du printemps.

Tableau 8.16: Corrélations annuelles entre précipitations, écoulement et érosion

	Précipitations-Ecoulement		Précipitations-Erosion		Ecoulement-Erosion	
	Droite d'ajustement	Corrélation "R"	Droite d'ajustement	Corrélation "R"	Droite d'ajustement	Corrélation "R"
Oued Sahouat	$Y=0,025X-16,1$	0,06	$Y=2,64X+90,92$	0,22	$Y=27,8X+100,2$	0,87
Oued Saida	$Y=0,179X-30$	0,74	$Y=2,1X-166,3$	0,38	$Y=18,95X+7,16$	0,82
Oued Taria	$Y=0,053X-5,44$	0,67	$Y=1,143X-69,3$	0,49	$Y=0,053X+5,44$	0,67
Trois rivières	$Y=0,017X+1,6$	0,17	$Y=0,776X-18,27$	0,57	$Y=35,15X+39,3$	0,74
Hacine	$Y=0,41X-61,43$	0,65	$Y=9,308X-1650$	0,57	$Y=13,2X+187,5$	0,50

8.2.4. Conclusion

Le calcul des différentes valeurs des paramètres de l'écoulement liquide et du transport solide fait ressortir que l'action érosive est différent d'un bassin à l'autre (tableau 8.17). La dégradation spécifique moyenne varie entre 139,79 t/km²/an pour le bassin de Bouhanifia et 810,14 t/km²/an pour le bassin de Fergoug. Pour l'oued Taria, oued Saida et oued Sahouat appartenant au bassin d'Ouizert, elle est respectivement de 253,08, 494,22 et 713,08 t/km²/an. Ces taux d'érosion différents, révèlent une disparité spatiale qui résulte principalement de la différence de la lithologie, du couvert végétal, de la pente et de la taille des bassins versants ; le bassin de Fergoug semble le plus touché par ce phénomène.

Tableau 8.17: Caractéristiques des transports solides dans les sous bassins de l'oued El Hammam

Bassins	Ouizert			Bouhanifia	Fergoug
	Sahouat	Saida	Taria		
As (MT)	1,487	0,307	0,344	0,677	0,750
Ass (T/km ² /an)	713,08	494,23	235,08	139,76	810,14
Qs (kg/s)	47,15	9,73	10,90	21,48	23,8
E (mm)	22,27	20,59	7,12	5,09	47,15

La variabilité interannuelle de ce phénomène est frappante, ainsi on passe de 28,56 à 2059,24 t/km²/an pour l'oued Sahouat, de 0,04 à 1528 T/km²/an pour l'oued Saida, de 12 à 710 t/km²/an pour l'oued Taria, de 1 à 1006 t/km²/an pour le bassin de Bouhanifia et de 21 à 2865 t/km²/an pour le Fergoug. A l'échelle saisonnière, c'est à l'automne que se produit le maximum du transport solide pour l'ensemble des bassins.

En deuxième position, on trouve le printemps pour l'oued Saida et le bassin de Bouhanifia, l'hiver pour l'oued Taria et le bassin de Fergoug, l'été pour l'oued Sahouat. Toutefois pour l'oued Sahouat, nous pensons que l'importance des transports en été est due à des orages d'été exceptionnels. Pour l'oued taria et le bassin versant de Bouhanifia, les valeurs de dégradation moyenne trouvées, sont proches de ceux estimés respectivement à 236 t/km²/an par Cherif (2012) et à 125 t/km²/an par Regagba (2010).

Les études réalisées sur l'érosion hydrique au niveau de différentes régions du pays montrent que le taux annuel est variable d'une région à une autre et d'un bassin versant à un autre (Touaibia et al. 2001). L'étude de l'érosion spécifique effectuée sur 30 bassins versants algériens donne des valeurs variant de 30 à 3350 t/km²/an (Mekkerta et Tisot, 1993), elle atteint 5000 t/km²/an dans le bassin versant de l'oued Agrioum dans l'est Algérie (Remini et al. 2009) Ou encore, le bassin de l'oued Djendjen, qui présente des valeurs de dégradation spécifique supérieures à 5.000 t/km²/an pouvant atteindre les 10.375 t/km²/an (Bourouba, 1993). Au Nord ouest algérien, après des études approfondies pendant 12 années, sur les dynamiques érosives sur parcelles expérimentales de 100 m² dans la région (Monts de Beni Chougrane-Mascara et Tlemcen), Morsli (2012), stipule que : cette zone où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres, est considérée la région la plus érodée du pays. Cette érosion peut être insignifiante dans de nombreux cas, comme elle peut atteindre des chiffres records (54 t/ha/an) comparables à ceux des bad-lands. L'érosion ravinante a atteint les 100 t/ha/an dans les monts de Beni chougrane (Morsli, 2002) et peut atteindre 300 t/ha/an (Roose et al. 2000 ; Morsli et al. 2012)

CHAPITRE IX

MODELISATION DES TRANSPORTS

SOLIDES EN SUSPENSION

9.1. Introduction

La recherche de modèles reliant les paramètres hydroclimatiques (précipitations, écoulements et/ou transport de matériaux solides) a fait l'objet de nombreuses études : Walling D.E. et al. (1981), Demmak A. (1982), Megnounif A. et al. (2000, 2003), Katlan Z. et al. (1987), Probst J.L. et al. (1992), Terfous A. et al. (1999, 2001, 2003), Ghenim A., (2001), Achit M. (2002), Benkhaled A. et Remini, (2003),.... L'objectif de ces auteurs est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes (Bouanani, 2005).

La relation empirique qui lie le débit solide au débit liquide pour une région donnée (Walling 1974, 1978; Fenn et al. 1985; Jansson, 1996; Mossa, 1996; Asselman 1999, 2000; Syvitski and Morehead, 1999; Syvitski et al., 2000; Morehead et al., 2003) est généralement de forme puissance : $Q_s = a Q_l^b$

La relation en puissance entre la concentration des sédiments en suspension et le débit a été adoptée pour plusieurs cours d'eau Algériens [A. Ghenim, 2001 ; A. Terfous, A. Megnounif, A. Bouanani, 2001 ; A. Benkhaled, B. Remini, 2003 ; A. Megnounif, A. Terfous, A. Bouanani, 2003 ; M. Achite, M. Meddi, 2004. A. Ghenim, A. Terfous, A. Seddini, 2007]. Depuis, plusieurs chercheurs ont essayé d'identifier surtout la valeur de l'exposant b. Leopold et al. (1953) proposent pour les rivières de l'ouest des Etats Unis d'Amérique des valeurs de b variant entre 2 et 3, d'autres auteurs tels que Parsons et al. (1963), Muller et Forstner (1968), Bruschin et Trau (1977), Wood (1977), Finlatson (1978), Walling et Webb (1981, 1982), Meybeck (1984) ainsi que Probst et Bazerabachi (1986) les limitent entre 1 et 2, en fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants, ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau. Bouanani, 2005, trouvent des valeurs de b comprise entre 1,5 et 2 pour les bassins de Mouilah et Sebdu, valeurs proches de celles trouvées à oued Mina (Touaibia *et al.*, 2001 ; Achit, 2002) et à oued Wahrane (Benkhaled et Remini, 2003).

9.2. Données utilisées

L'étude de la relation débit solide-débit liquide est réalisée à partir des données des débits instantanés et des concentrations des sédiments en suspension collectées au niveau des différents bassins étudiés (Ouzert [Oued Sahouat (1990-2006), Oued Saida (1990-2006), Oued Taria (1990-2006)], Bouhanifia (1985-2005) et Fergoug (1993-2005)). L'analyse de ces données (chap. VIII), montre une variation d'année en année et de saison en saison en volume et en quantité de sédiments transportés. Pour déterminer la relation débit solide – débit liquide, une approche à différentes échelles temporelles, basée sur les modèles de régression, est adoptée, les modèles les plus représentatifs sont pris en considération.

a) Echelle interannuelle

La relation liant le débit des matières en suspension au débit liquide des séries entières des trois bassins est de type puissance (figure 9.1). La bonne relation trouvée est réservée pour le bassin d'Ouzert à oued Saida ($R= 0,94$) ; alors qu'à oued Sahouat et au bassin de Bouhanifia , les corrélations obtenues (tableau 9.1) sont plus au moins significatives et varient dans l'intervalle (0.78–0.77), et insignifiante pour le bassin de Fergoug et celui d'Ouzert à oued Taria.

Les valeurs des paramètres a et b de la relation puissance varie peu d'un bassin à l'autre. Pour le paramètre a, il varie de 5,03 pour l'Ouzert à oued Sahouat , à 0,31 pour l'oued Saida et à 4,19 pour le Bouhanifia. L'exposant b varie de 1,43 pour l'Ouzert à oued Sahouat à 1,38 pour le Bouhanifia, à oued Saida, il est de 2,12. Ces valeurs sont proches de celles trouvées à oued Mekker (Cherif et al., 2015), à oued Sebdou (Ghenim et al., 2013).

Tableau 9.1: Paramètre de la relation débit solide-débit liquide à l'échelle interannuelle

Bassins		Période	Nombre de points	a	b	Coef. corrélation R
Ouziert	Sahouat	1990-2006	4245	5,03	1,43	0,78
	Saida	1990-2006	1386	0,31	2,12	0,94
	Taria	1990-2006	6591	0,75	0,32	0,11
Bouhanifia		1985-2005	3869	4,19	1,38	0,77
Fergoug		1993-2005	3705	85,23	-0,2	0,08

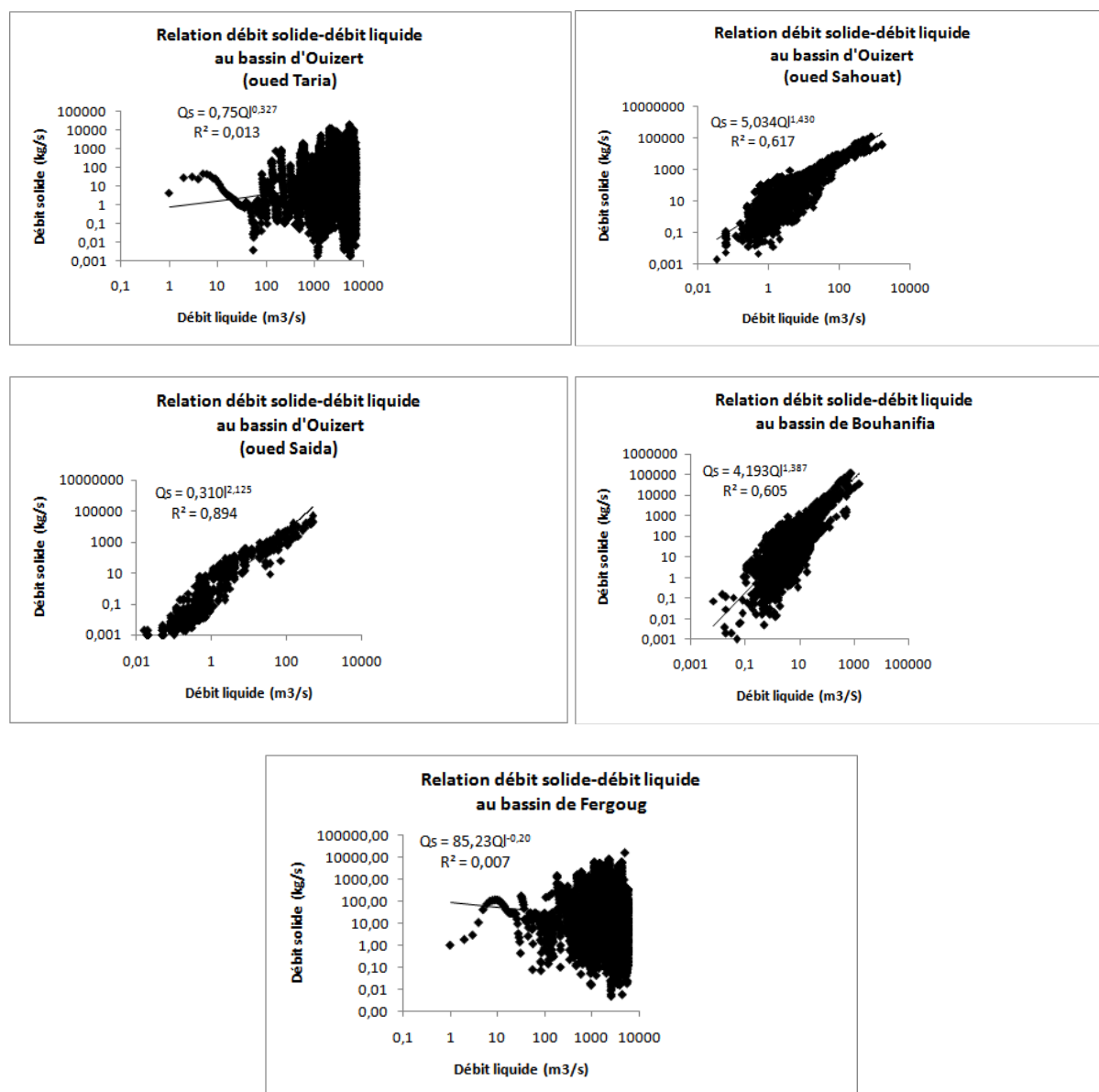


Figure 9.1 : Relations débits solides en fonction des débits liquides instantanés dans les sous bassins de l'oued El Hammam

b) Echelle saisonnière

Les modèles de corrélation obtenus à partir des valeurs instantanées de débits solides-débits liquides, regroupées en quatre saisons (Automne, Hiver, Printemps et Eté) se résument au tableau 9.2. Le modèle puissance est retenu pour les deux bassins (Ouzert et fergoug), pour le Bouhanifia, le modèle polynomiale semble le plus représentatif.

Tableau 9.2: Paramètre de la relation débit solide-débit liquide à l'échelle saisonnière

Saisons Bassins		Automne			Hiver			Printemps			Eté		
		a	b	R	a	b	R	a	b	R	a	b	R
Ouzert	Sahouat	4,94	1,42	0,81	1,73	2,86	0,9	3,9	1,5	0,85	5,35	1,48	0,84
	saida	0,488	2,1	0,95	0,18	2,06	0,93	0,4	2,14	0,94	0,7	1,82	0,97
	Taria	4,8	5,5	0,92	0,40	0,48	0,04	3,12	1,51	0,91	10,58	-0,05	0,00
Bouhanifia		8,65	1,22	0,78	1,43	1,71	0,79	3,02	1,5	0,79	8,06	1,07	0,71
		-	-	0,94	-	-	0,91	-	-	0,7	-	-	0,99
Fergoug		14,99	0,84	0,61	9,01	0,94	0,67	3,09	0,97	0,77	1,821	0,80	0,72

a et b: paramètre du modèle en puissance ;r: coefficient de corrélation; n:taille de l'échantillon

1) Bassin d'Ouzert (oued Sahouat)

A oued sahouat, la corrélation débit solide-débit liquide est significative pour l'ensemble des saisons (figure 9.2), le facteur de détermination varie de 0,81 à 0,9. Les modèles saisonniers, donnent pour l'automne et l'été des valeurs de a et b sont proches de celle du modèle annuel. Le facteur a de la relation puissance est le plus élevé (4,94-5,35) pour ces saisons. Ce facteur exprime l'état du sol d'un bassin d'une manière générale et son degré de saturation en particulier (Benkhalel et Remini, 2003), en effet 66% d'apport liquide annuelle est attribué à ces deux saisons. Malgré la faiblesse des apports solides, les meilleurs coefficients de corrélation sont donnés à l'hiver et printemps, cela dénote qu'à de forts débits liquides sont associés de faibles débits solides. Cela s'explique aussi par les valeurs élevées de l'exposant b (2,86-1,5). En effet dans ce bassin, en hiver et printemps, l'état du sol doit se trouver avec une certaine saturation qui limitent les effets de la pluie.

Pour la saison d'été, l'oued Sahouat a connu durant la période de mesures (1990-2006) deux crues estivales très importantes, en aout 1991 (avec un débit de pointe de $482,34\text{m}^3/\text{s}$ et un apport solide de 3,47 MT) et aout 1997 (avec un débit de pointe de $1578\text{m}^3/\text{s}$ et un apport solide de 1,07 MT), ce qui exprime une valeur aussi élevée de l'exposant b.

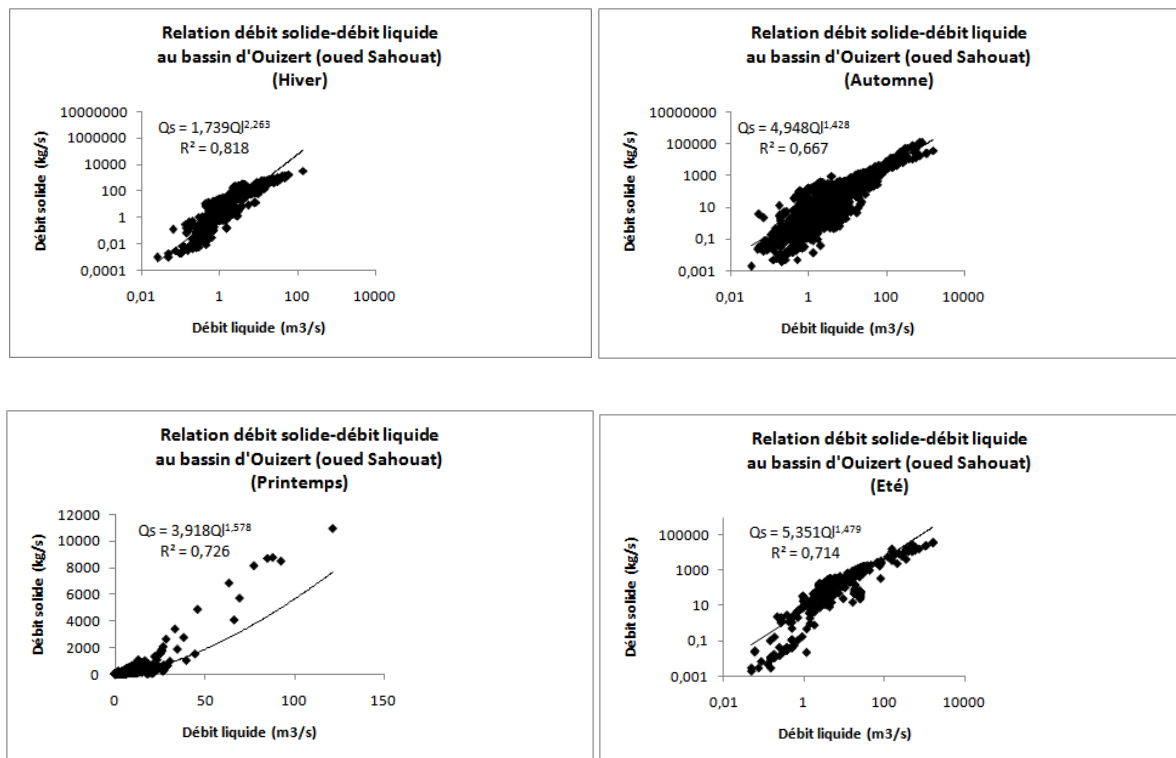


Figure 9.2: Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin d'Ouizert (oued Sahouat)

2) Bassin d'Ouizert (oued Saida)

L'oued Saida dont l'activité érosive est assez importante présente les meilleures corrélations entre débits solides-débits liquides (figure 9.3), les coefficients de détermination sont compris entre 0,93 et 0,97. Les valeurs de l'exposant b sont plus élevées et dépassent 2, expliquant l'importance de la dynamique érosive pour les quatre saisons. Pour le modèle d'automne et printemps, ces valeurs sont proches de celle du modèle annuel. Le paramètre a qui est en général inférieur de 1, exprime la faiblesse des débits liquides aussi bien que solides.

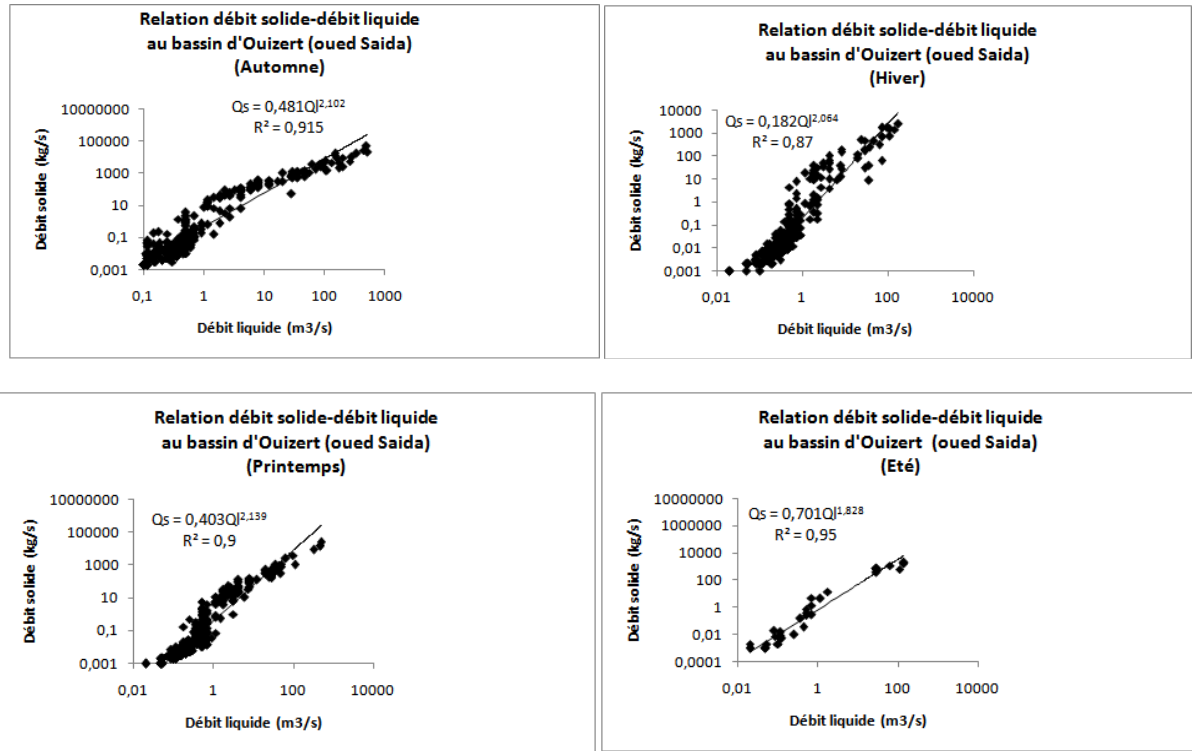
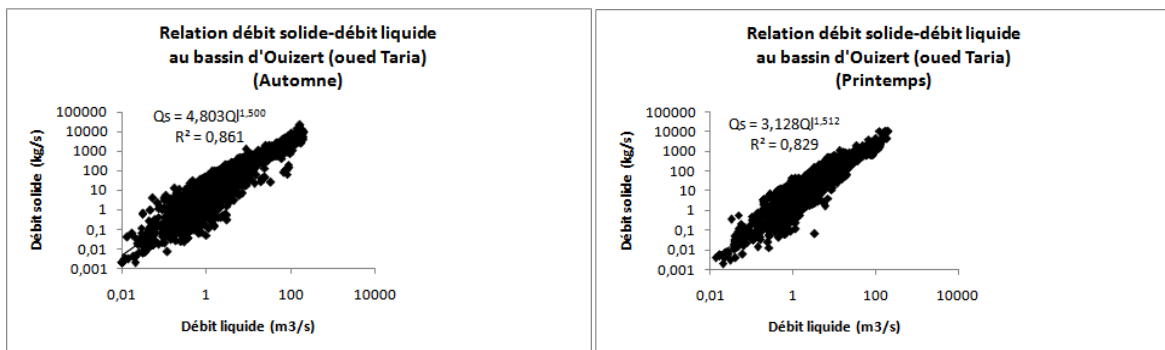


Figure 9.3: Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin d’Ouizert (oued Saida)

3) Bassin d’Ouizert (oued Taria)

À oued Taria, les meilleurs coefficients de détermination se présentent en automne et en printemps (figure 9.4). ils sont respectivement de 0,92 et 0,91. Le facteur a est élevé, tandis que l’exposant b est relativement faible, cela s’explique par le fait que l’action érosive se trouve diminuée par rapport aux écoulement abondants.



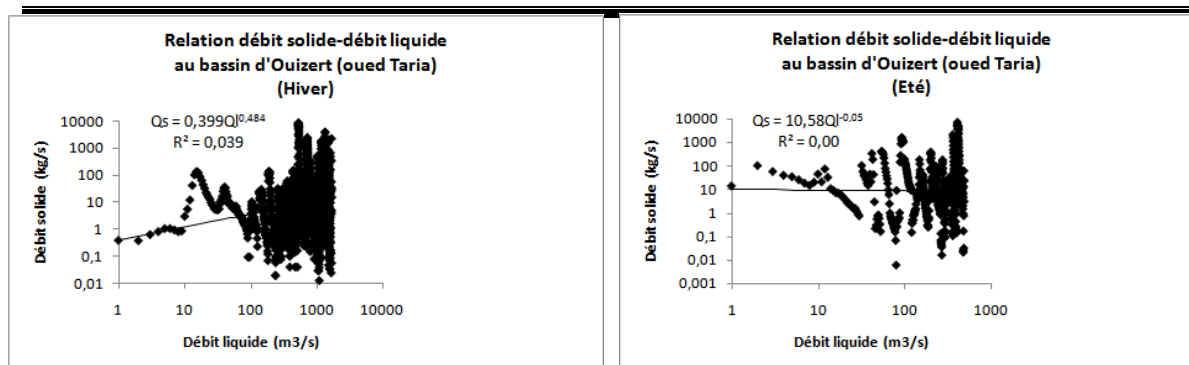


Figure 9.4: Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin d'Ouizert (oued Taria)

4) Bassin de Bouhanifia

A trois rivières, les couples de valeurs (débit solide-débit liquide) obéi à deux types de relations (figure 9.5): relation puissance et polynomiale. La relation de puissance est plus au moins significative, les coefficients de détermination obtenus sont compris entre 0,71 et 0,79. L'exposant b lui aussi est faible traduisant une action érosive moins importante, le paramètre a est élevé pour les saisons d'automne et d'été, traduisant un degré de saturation du sol important, qui abouti alors à de faible apports solides pour un écoulement abondant. La relation polynomiale donne les meilleurs coefficients de corrélation, les saisons d'automne et d'été touchent les valeurs de 0,94 et 0,99. Pour ce bassin, les crues d'automne charrient 54% de l'apport annuel.

La crue la plus importante est celle du 29 septembre 1994, avec un débit de pointe de $792,4 \text{ m}^3/\text{s}$ et un apport solide de 89% de l'apport annuel.

Aussi les crues du mois d'aout sont fréquentes à la station des trois rivières, la plus importante est celle du 25 aout 1997 avec un débit maximum de $1578 \text{ m}^3/\text{s}$ et un apport solide de 65% de l'apport annuel. Les crues du mois d'aout suivi par celles de la saison d'automne, surviennent sur un sol sec et facilement érodable produisent des apports solides important.

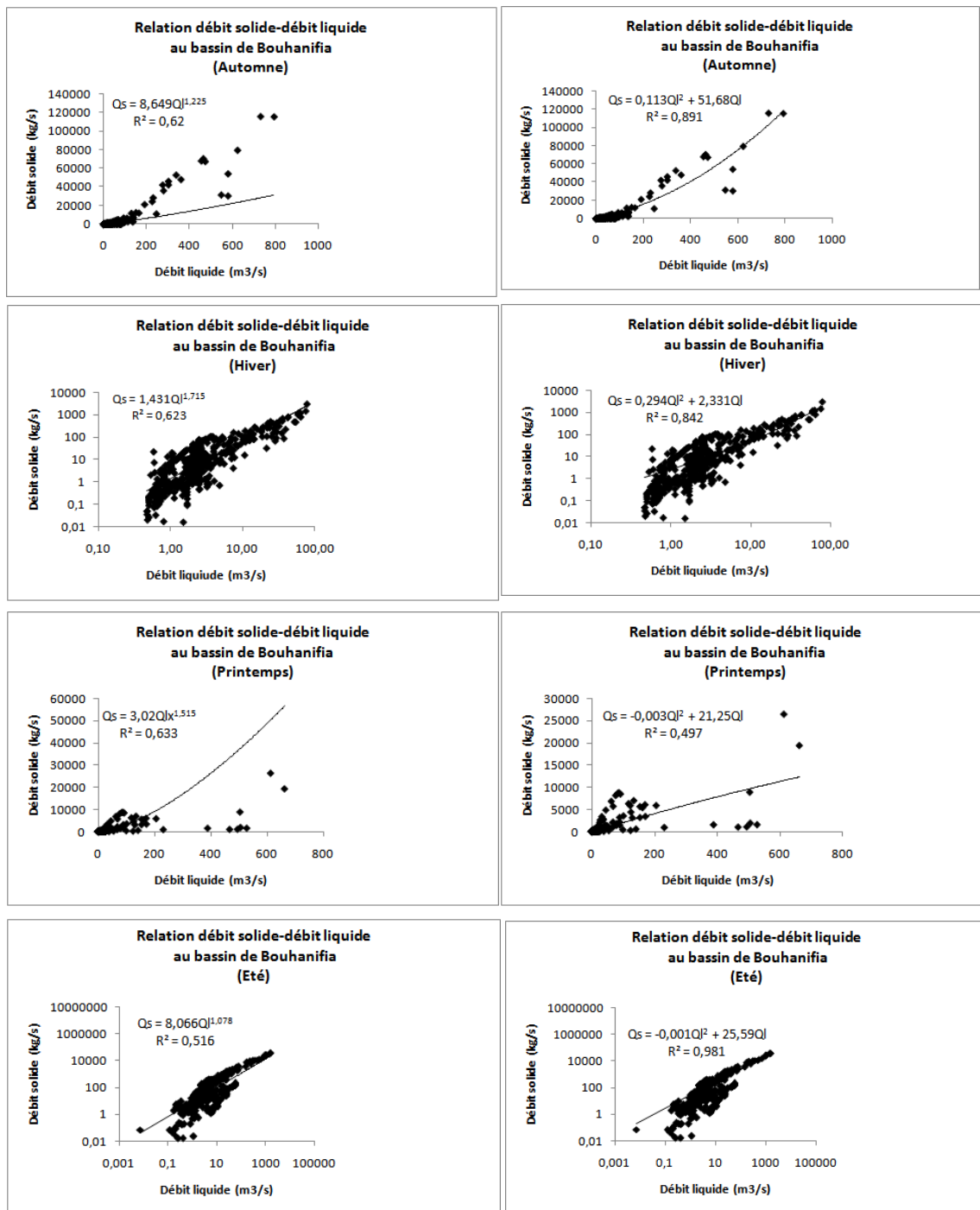


Figure 9.5: Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin de Bouhanifia (station de Trois rivières)

5) Bassin de Fergoug

C'est en printemps ou la relation débit solide-débit liquide obtenu est plus au moins significative (figure 9.6). Malgré la faiblesse des apports solides, l'exposant b en cette saison augmente pour atteindre la valeur de 0,97, cela dénote qu'à de forts débits liquides sont associés de faibles débits solides. La valeur du facteur a le plus élevé (15) est enregistré pour l'automne. Ceci peut expliquer l'importance de la dynamique érosive en cette saison, sachant que cette dernière charrie 76% de l'apport solide annuel.

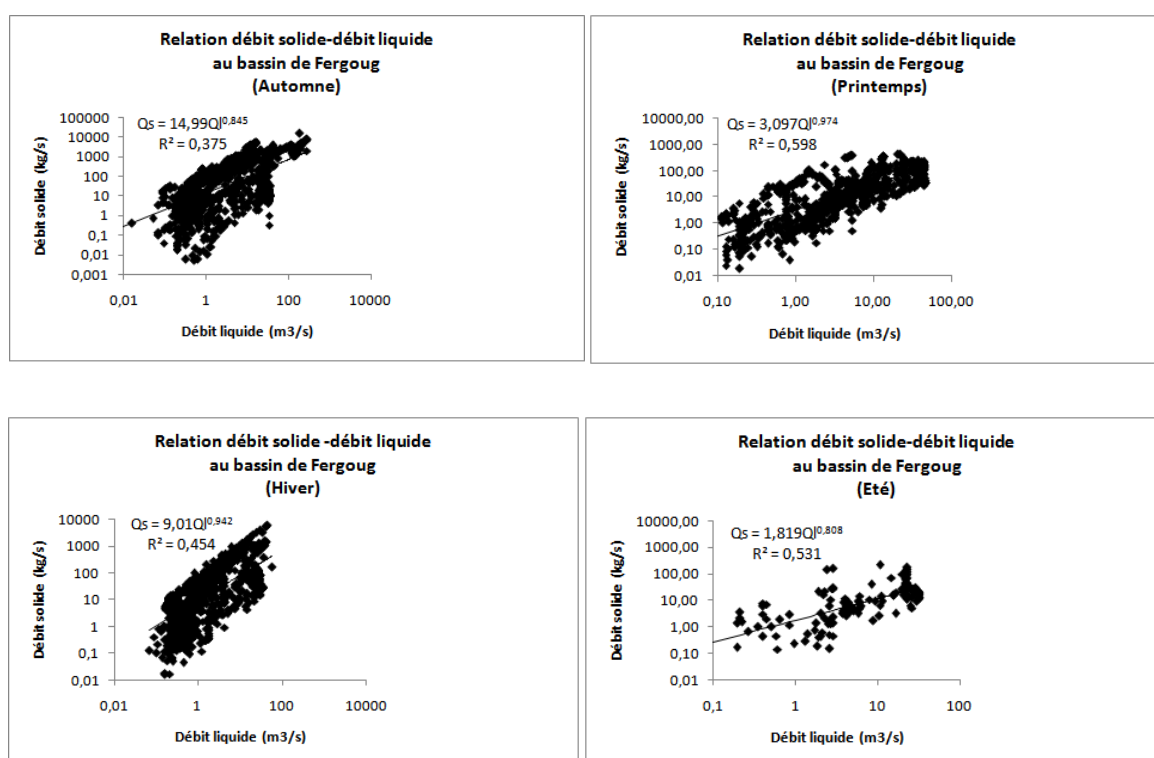


Figure 9.6: Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin de Fergoug (station de Hacine)

9.3. Evolution de la concentration des sédiments en suspension et des débits liquides

9.3.1 Introduction

La relation entre la concentration des sédiments en suspension, C , et le débit liquide Q , d'un cours d'eau est une relation fondamentale dans le domaine du transport solide en rivière. Les types de relation C - Q , dans leur ensemble restent mal connus. Dans cette étude, on cherche à caractériser la relation C - Q à travers une série d'événements chronologiques (crues). L'analyse à mener est orientée beaucoup plus vers l'aspect graphique qui donnerait la mise en graphe selon l'ordre chronologique de C et de Q . Il s'agit d'une méthode, entre autres, qui permettrait un approfondissement de la connaissance de cette relation à l'échelle locale (Benkhaled et Remini, 2003).

Plusieurs facteurs affectent la relation concentration-débit liquide, l'intensité des précipitations et leurs distributions spatiales, volume et vitesse d'écoulement, les distances parcourues des eaux des crues dans le cours d'eau principal (Bouanani, 2005)

La classification de ces relations en se basant sur le rapport C/Q a permis à J.P. Williams (1989) d'établir cinq modèles : Courbe simple, boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, linéaire simple plus une boucle, et forme de huit.

9.3.2 Application au bassin versant de l'Oued El Hammam

L'application de l'approche des Hystérisis pour les différentes crues enregistrées au niveau des sous bassins de l'Oued El Hammam a abouti à la distribution (tableau 9.3) des différentes modèles d'évolution des relations concentration en matières en suspension avec les débits liquides.

Tableau 9.3: Répartition des classes d'évolution de la relation concentration-débit liquide

Modèles Sous bassins	Nombre de crues	Courbe simple (%)	Clockwise loop (%)	Counterclockwise loop (%)	Forme huit (%)
Oued Sahouat	20	60	15	20	5
Oued Saida	12	50	25	25	0
Oued Taria	30	50	24	13	13
Trois rivières	24	50	4	46	0
Hacine	14	22	71	7	0

a) Bassin d'Ouizert à oued Sahouat

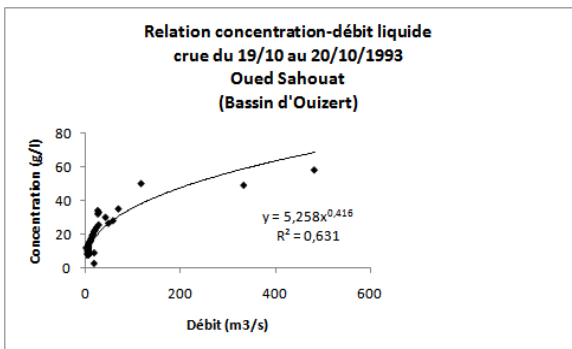
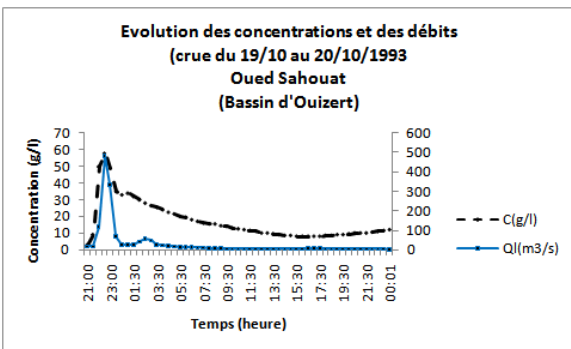
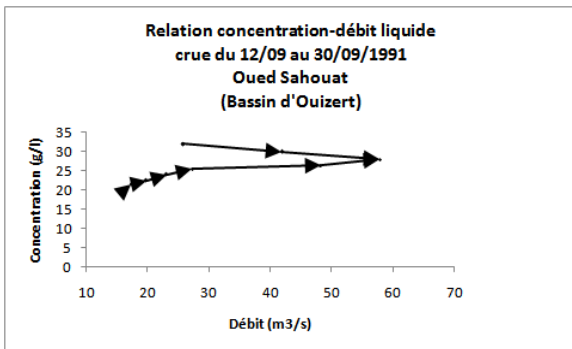
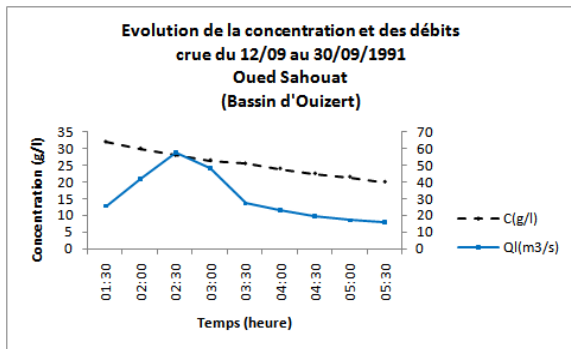
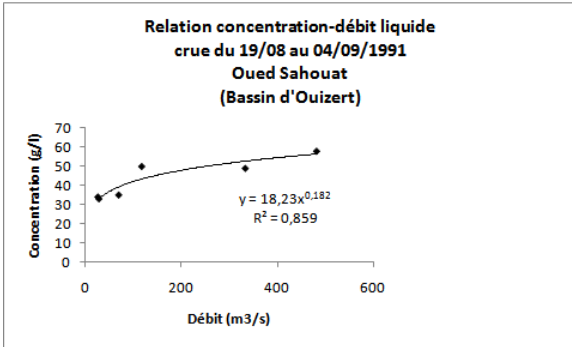
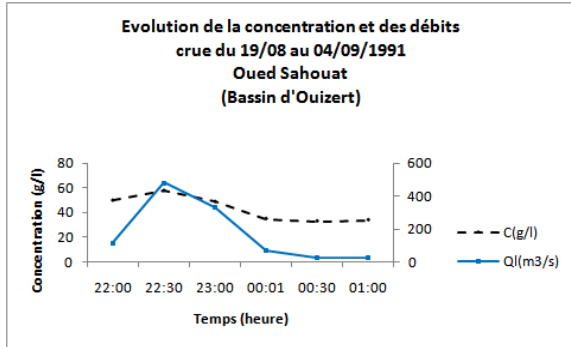
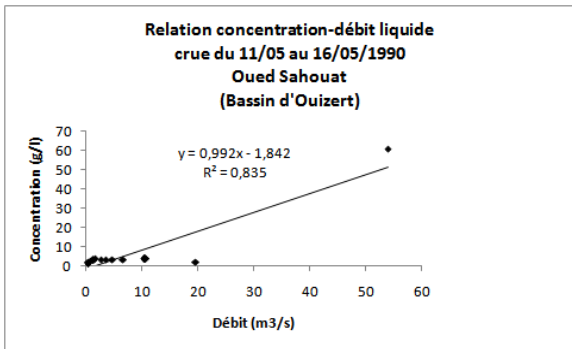
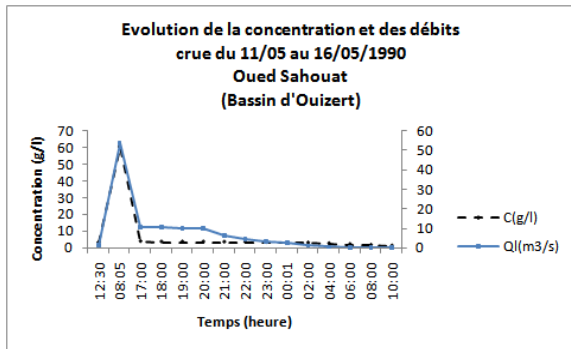
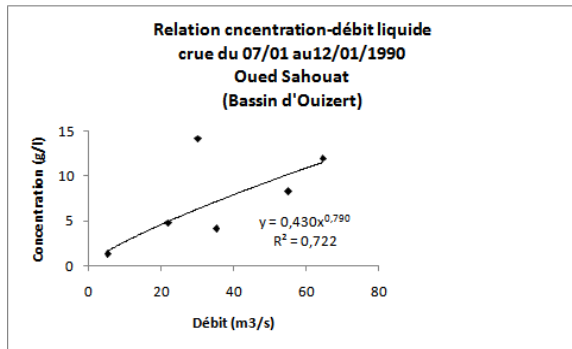
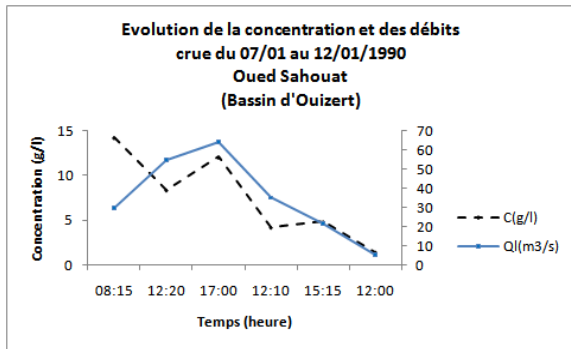
A la station d'**oued** Sahouat, les courbes (figure 9.7) de l'évolution des couples (concentrations, débits liquides) suivent quatre modèles :

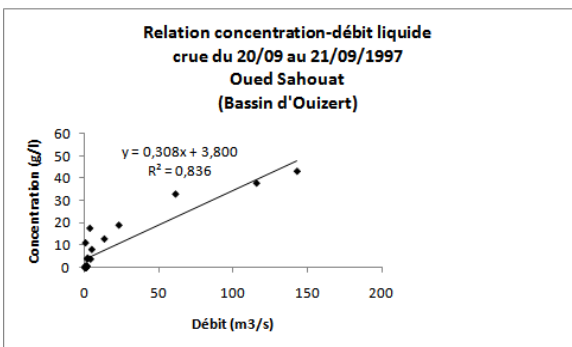
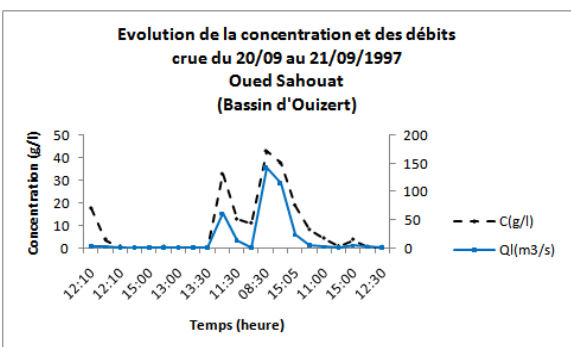
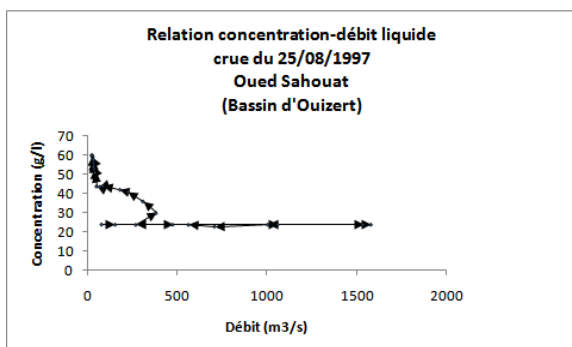
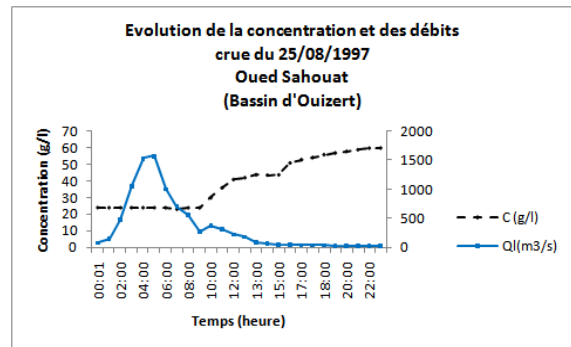
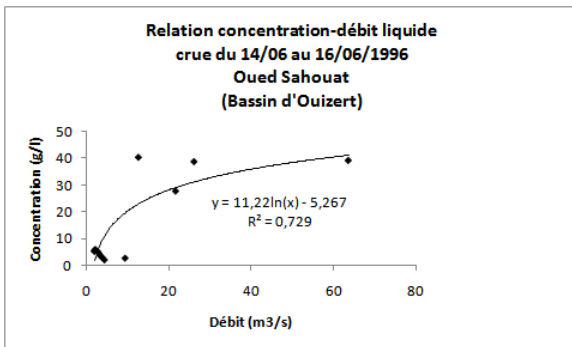
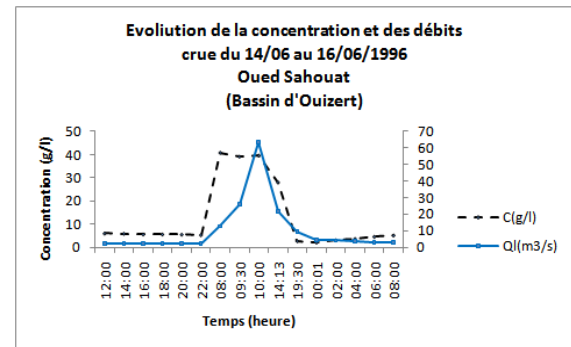
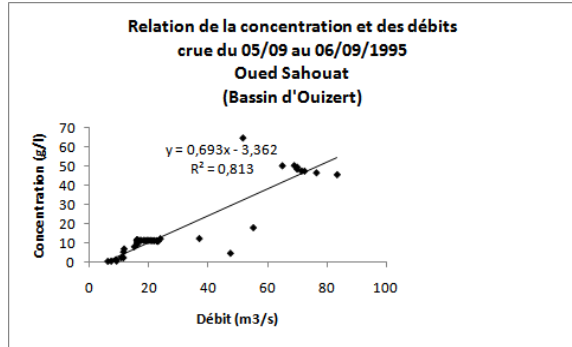
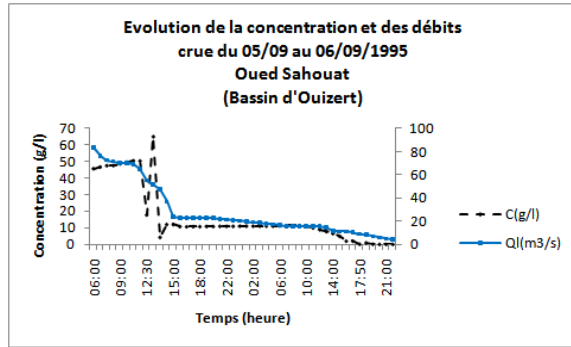
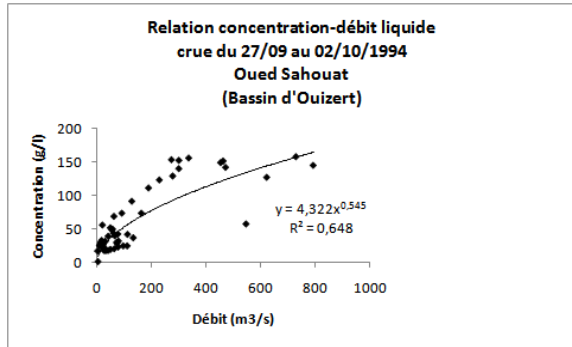
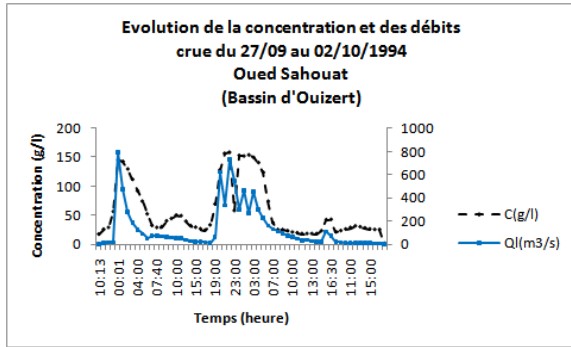
- 60% des crues se présentent sous le modèle de la courbe simple. Ces crues ont eu lieu, surtout en automne (42%), en hiver (25%) et en été(25%), et à un degré moindre en printemps(8%). Pour le sous bassin d'oued Sahouat, 76% de l'apport solide est ramené au cours des saisons d'automne et d'été suite à des orages violents estivaux succédés par les pluies d'automne. Ce qui traduit un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Wood, 1977) et/ou à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes.

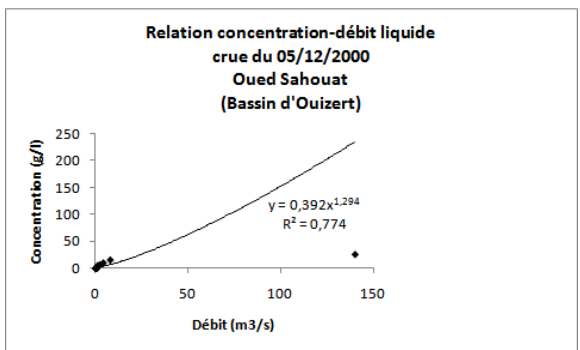
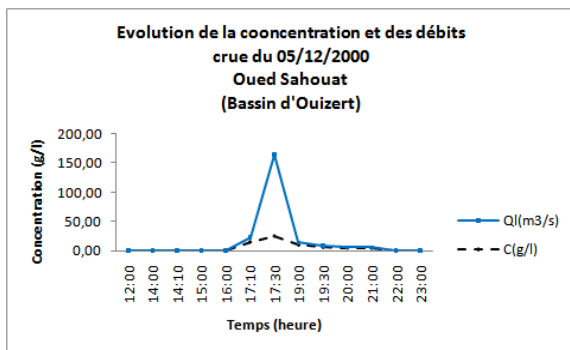
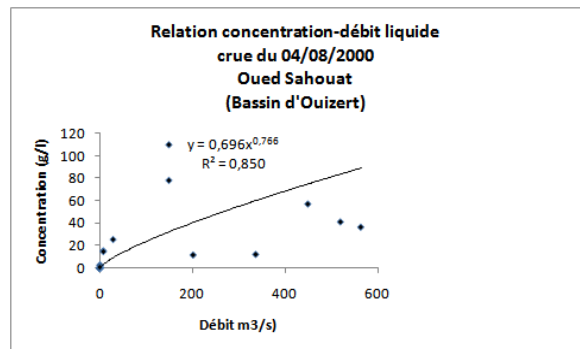
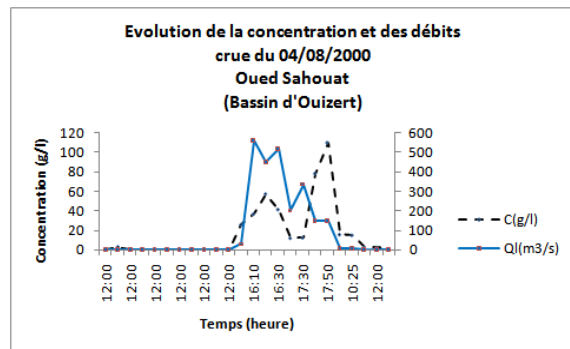
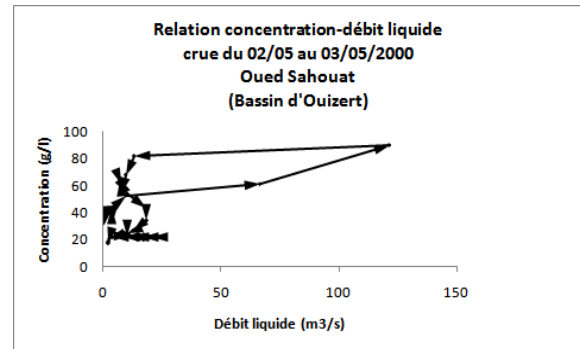
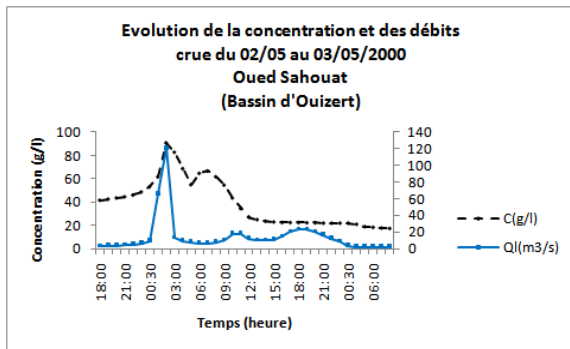
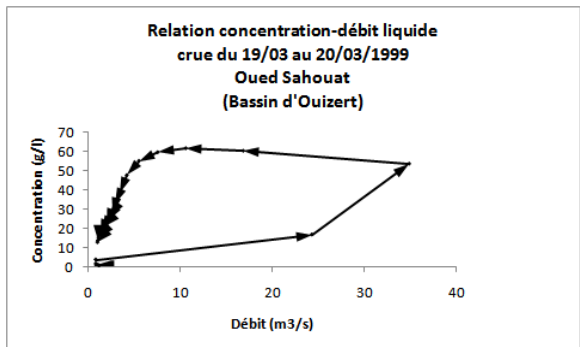
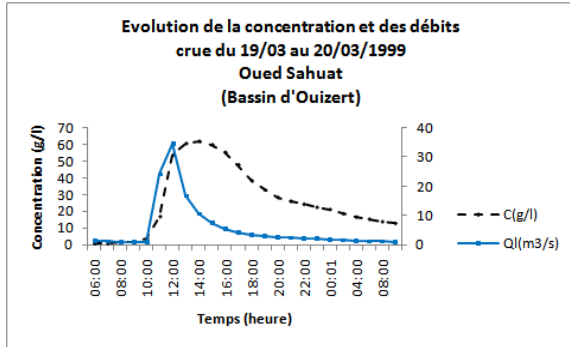
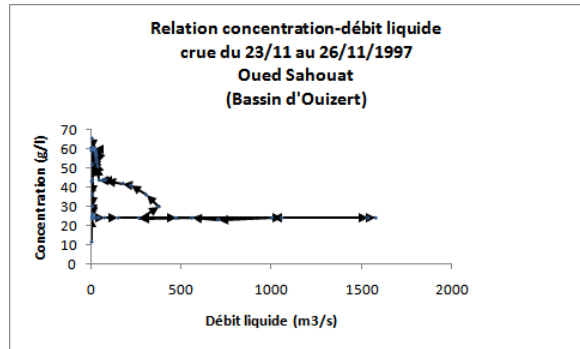
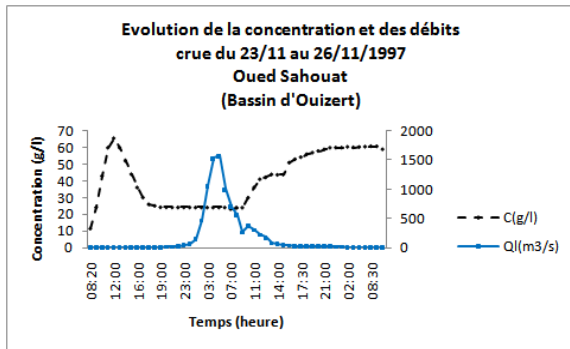
- 15% des crues se présentent sous le modèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre. Et ca concerne surtout les crues d'automne et à moindre degré celles du printemps. Cela pourrait être dû à des averses de faibles intensités et de longue durée qui permettra l'apparition du pic des concentrations avant le pic des débits.

-Le modèle en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, se présente surtout pour les crues du printemps. Le sol étant plus au moins saturé et couvert, résiste mieux à la pluie. L'action érosive se trouve alors diminuée par rapport aux écoulements abondants.

-La boucle en forme de huit se présente pour une seule crue automnale : celle du 09 octobre 2002. Cela peut s'expliquer par un dynamique érosif important dès les premières crues, et par un épuisement du stock de sédiment avec le temps.







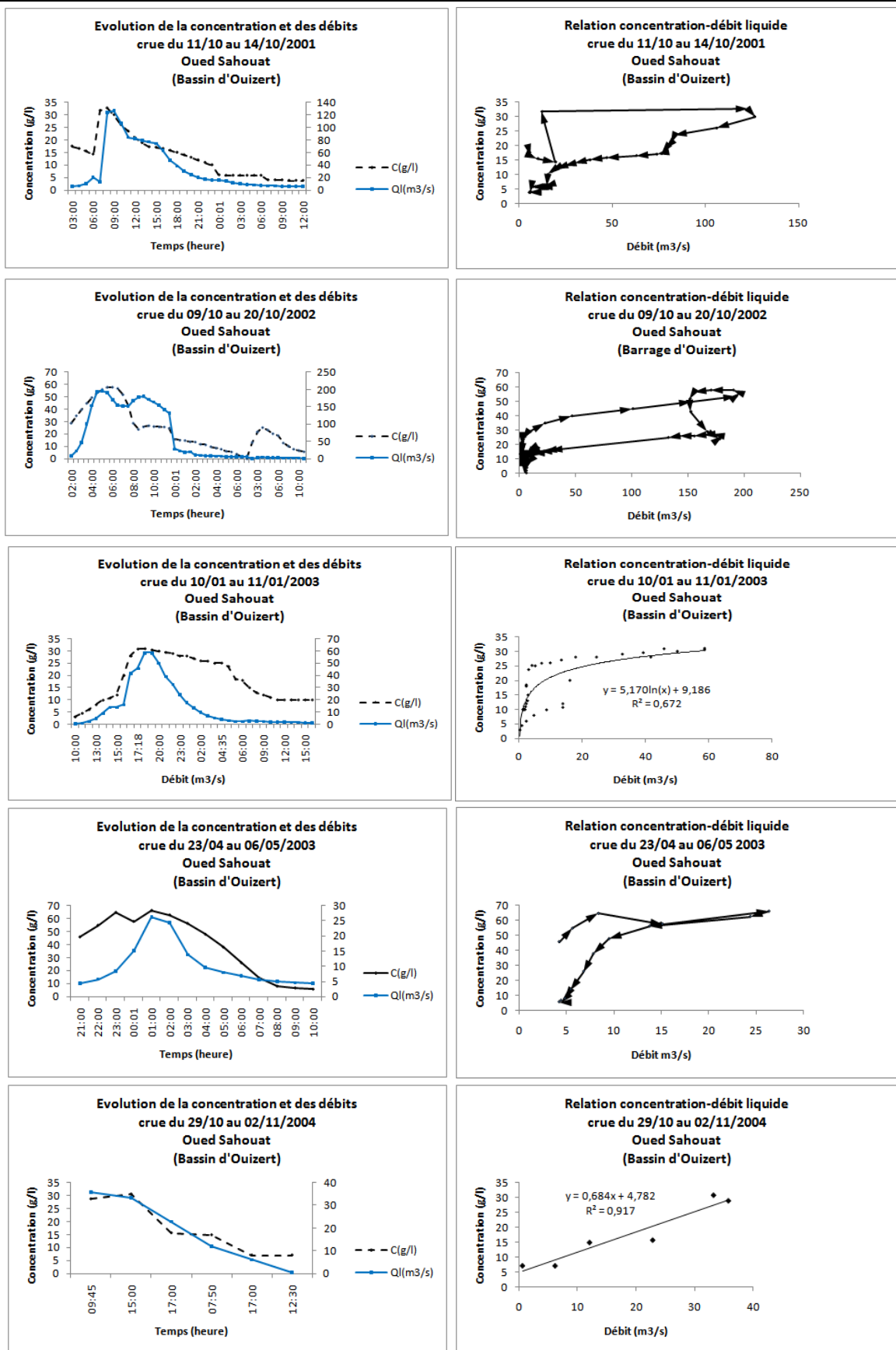
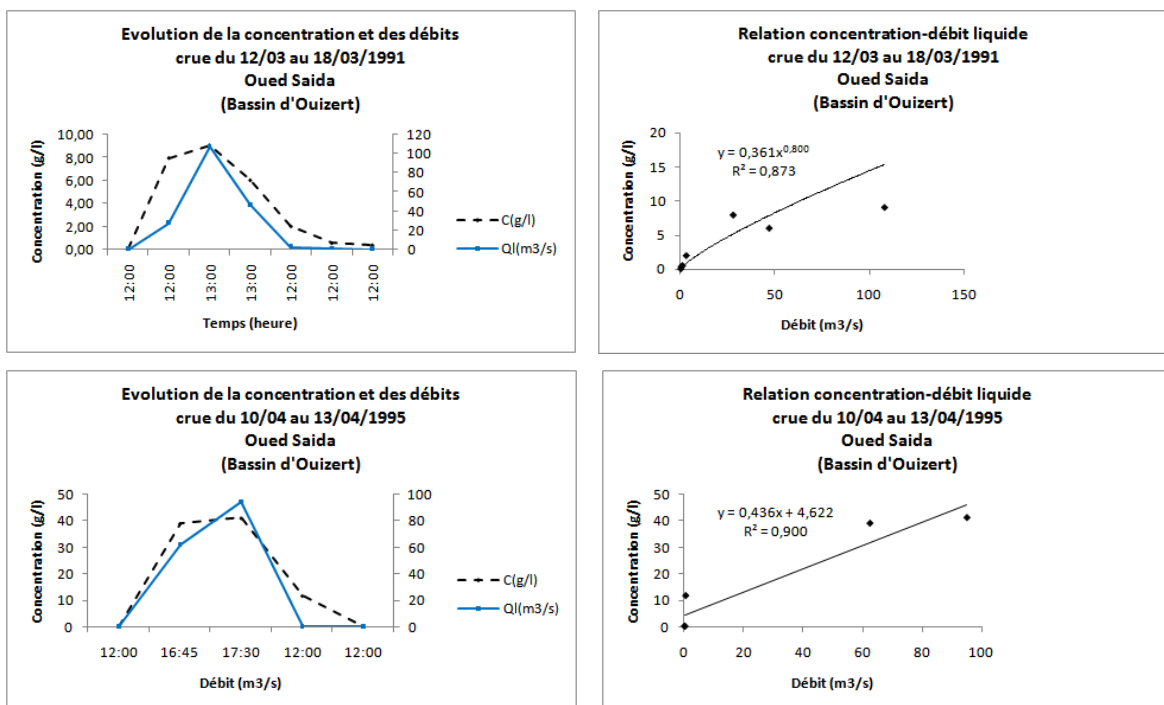


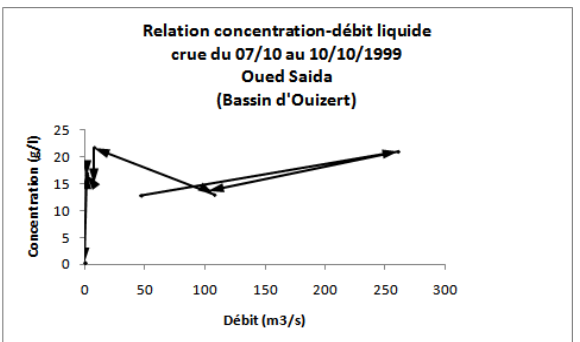
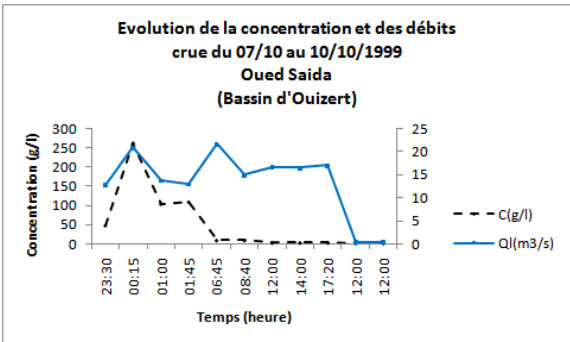
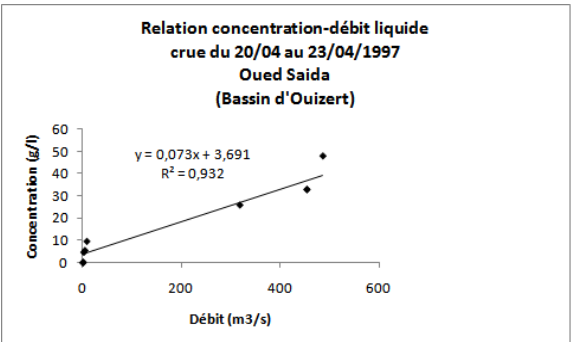
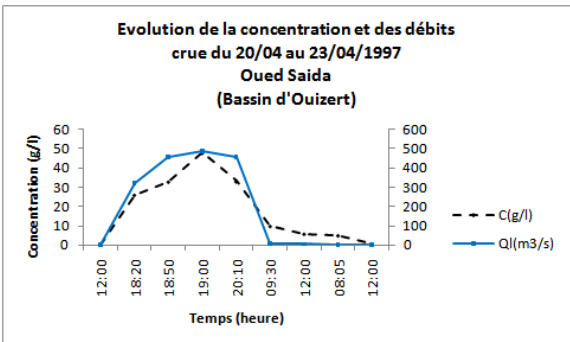
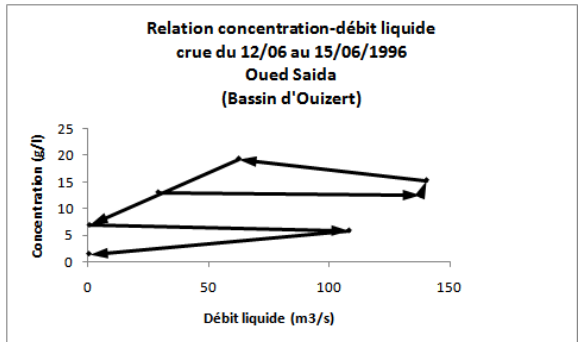
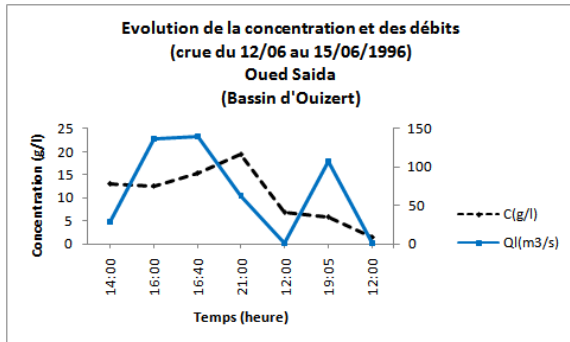
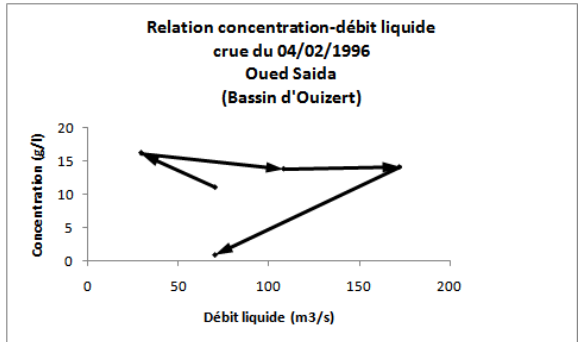
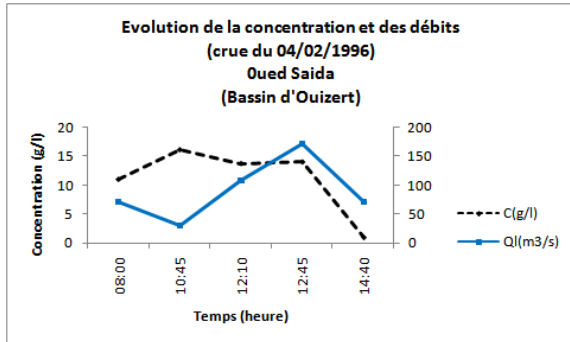
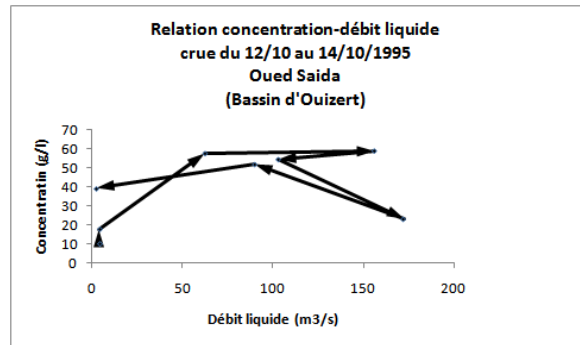
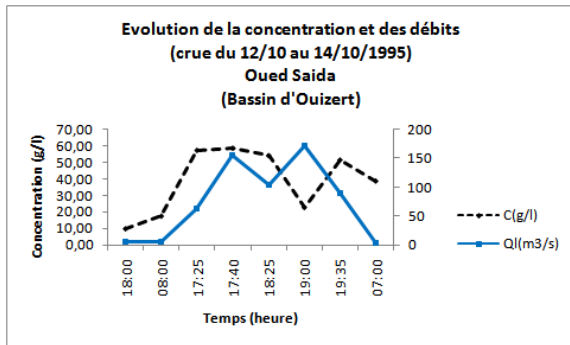
Figure 9.7: Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues de l'oued Sahouat (Bassin d'Ouizert)

b) Bassin d'Ouizert à oued Saida

A la station d'oued Saida, les courbes (figure 9.8) de l'évolution des couples (concentrations, débits liquides) suivent trois modèles :

- La courbe simple, surtout pour les crues du printemps, pourrait être associée à un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Wood, 1977). A oued Saida, le mois le plus pluvieux de l'année est celui de Mars (42 mm) ; la saison du printemps se caractérise par des précipitations plus importantes que celle de l'automne, ce qui explique l'importance de l'érosion et du transport solide enregistré pendant cette saison.
- 25% des crues se présentent sous le modèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, surtout pour les crues du printemps et d'automne. ceci peut être dû à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes d'automne.
- 25% des crues se présentent sous le modèle en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Ces crues ont eu lieu surtout en automne et à un degré moindre en été. Ça pourrait être dû à des averses de fortes intensités et de courtes durées, qui engendrent l'apparition du pic des débits avant celui des concentrations.





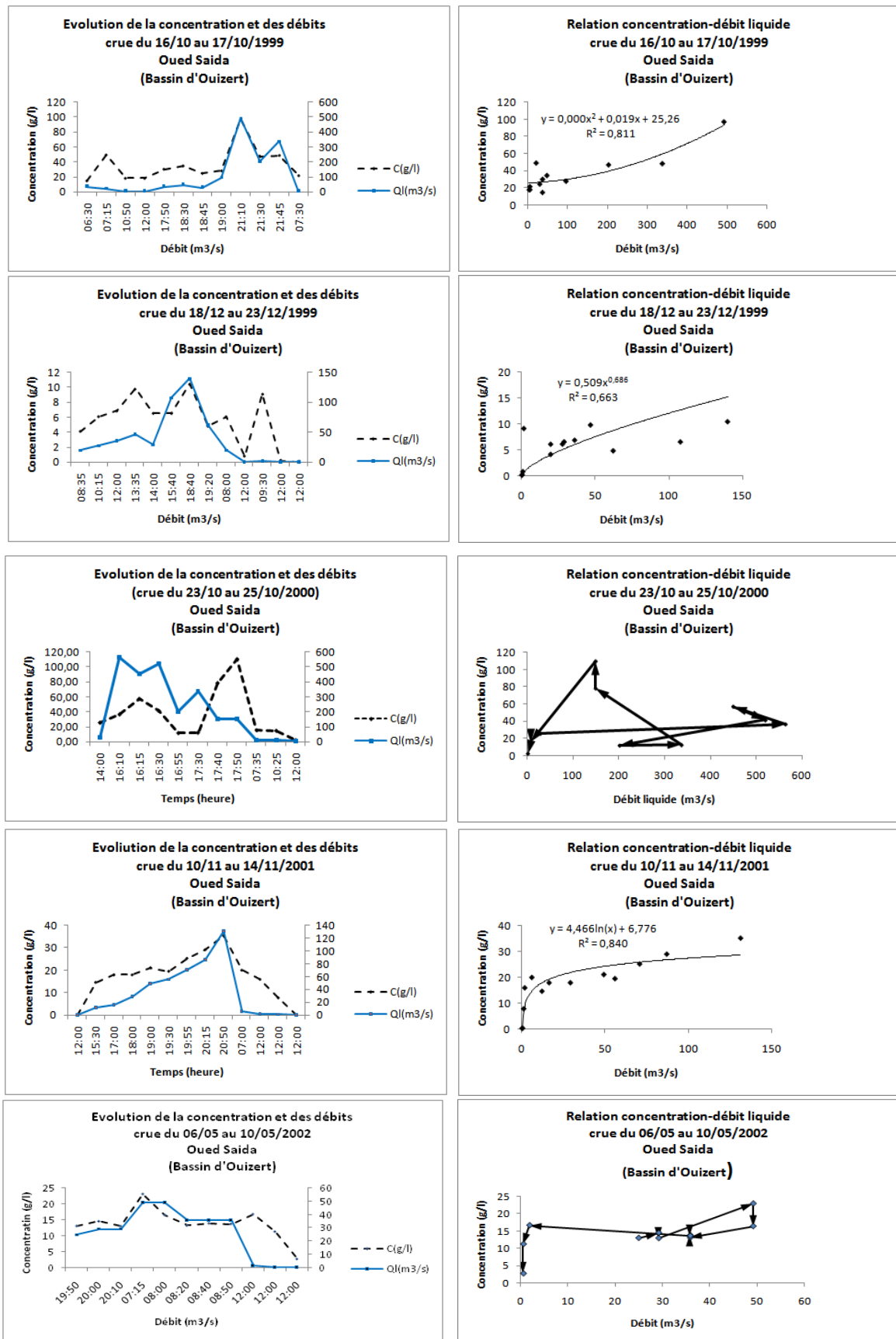


Figure 9.8: Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues de l’oued Saïda (Bassin d’Ouizert)

c) Bassin d'Ouizert à oued Taria

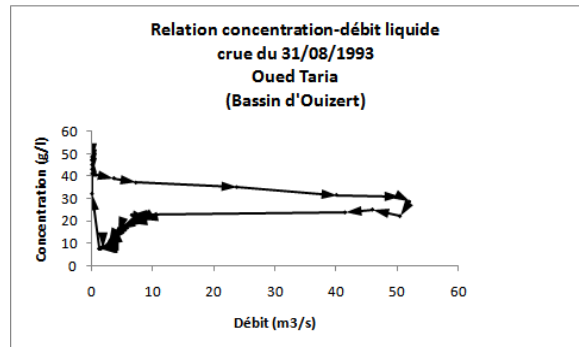
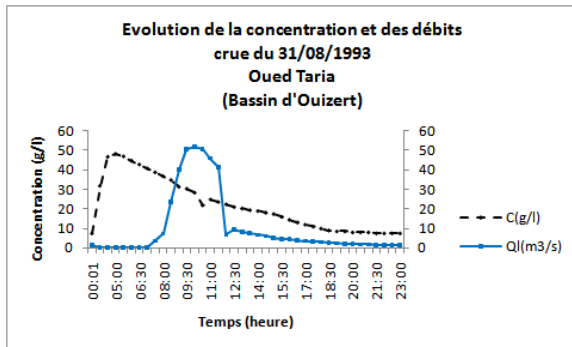
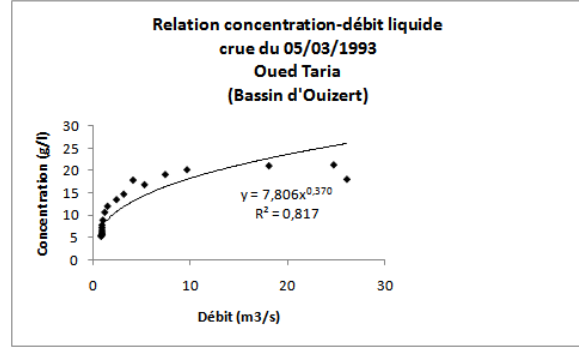
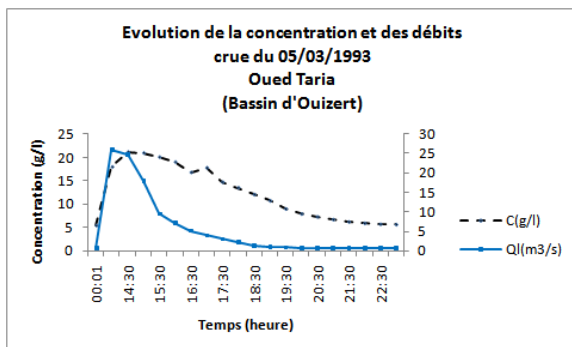
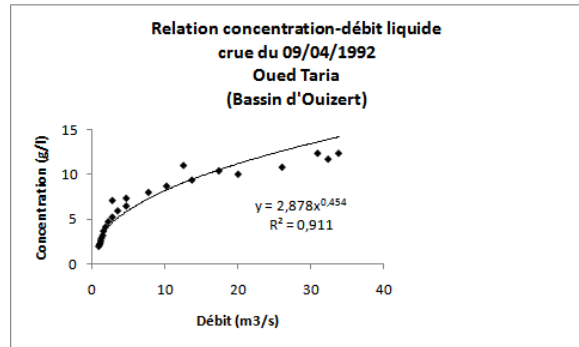
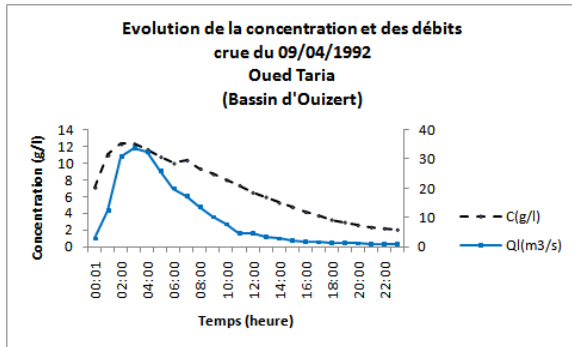
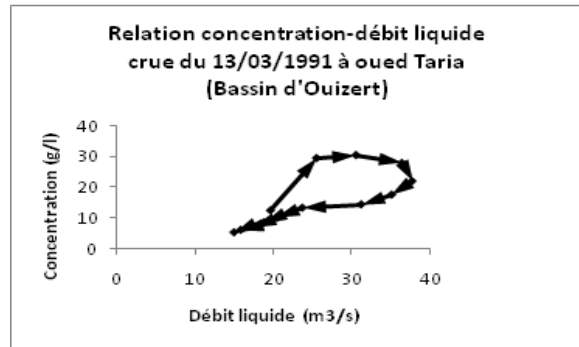
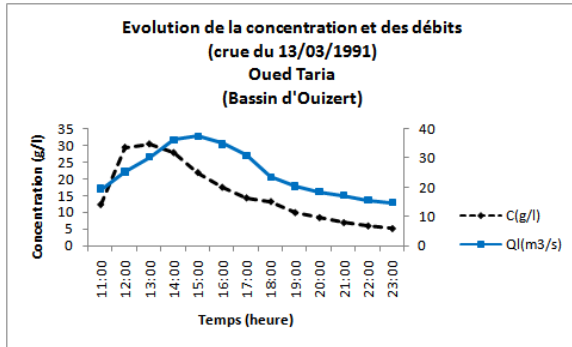
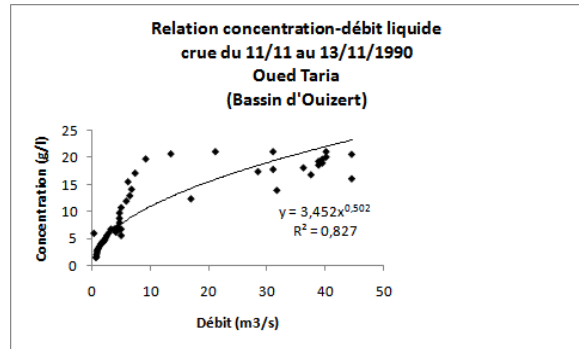
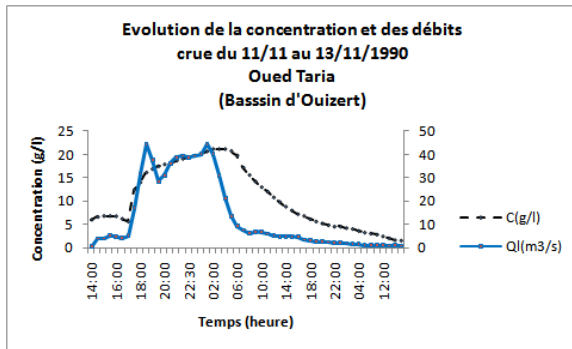
A la station d'oued Taria, les courbes (figure 9.9) de l'évolution des couples (concentrations, débits liquides) suivent quatre modèles :

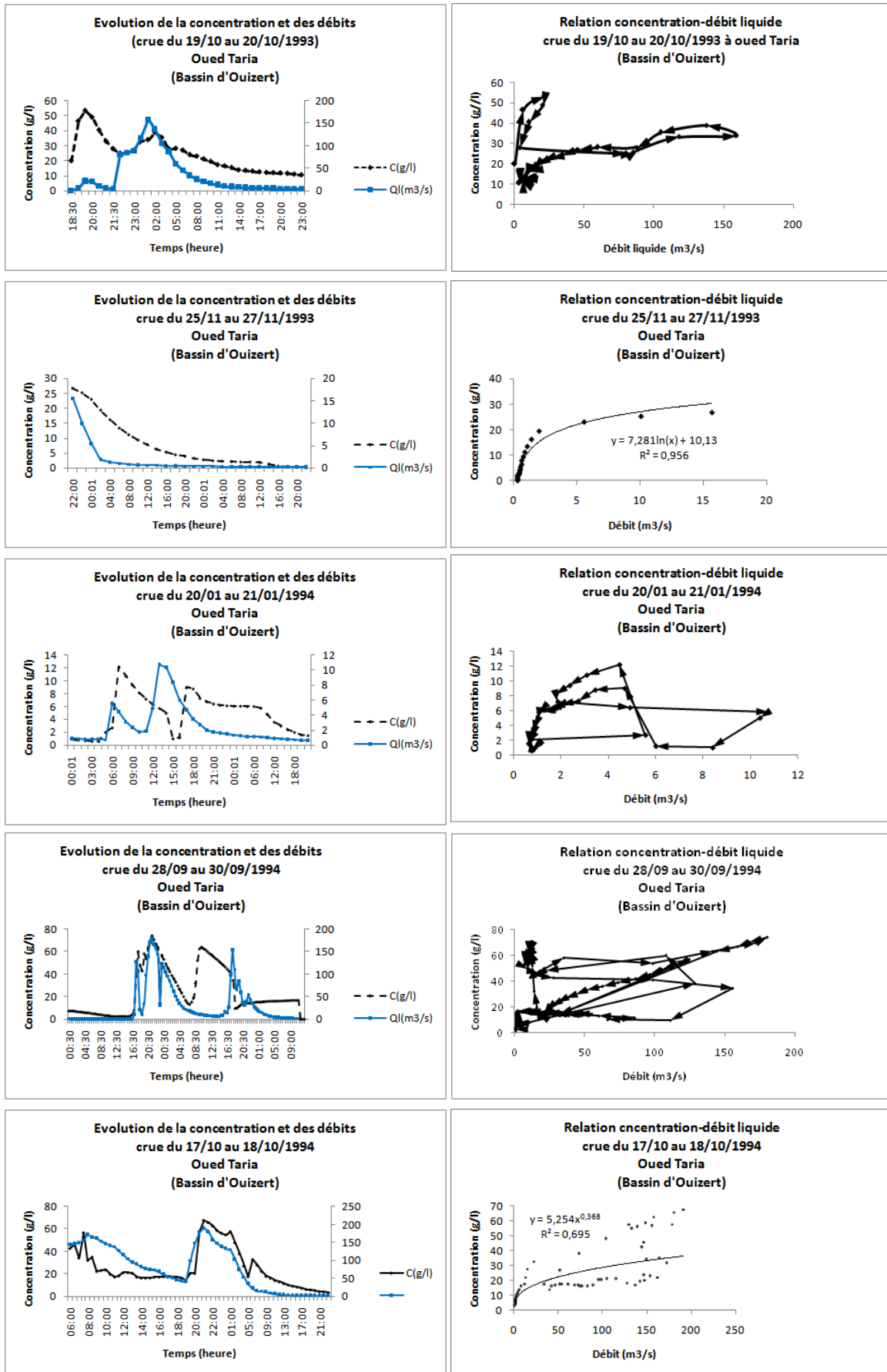
- 50% des crues se présentent sous le modèle de la courbe simple, surtout pour les crues d'automne, du printemps et d'hiver, et à un degré moindre pour l'été .Ca pourrait être associé à un apport continu de sédiments pendant les crues et/ou à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes.

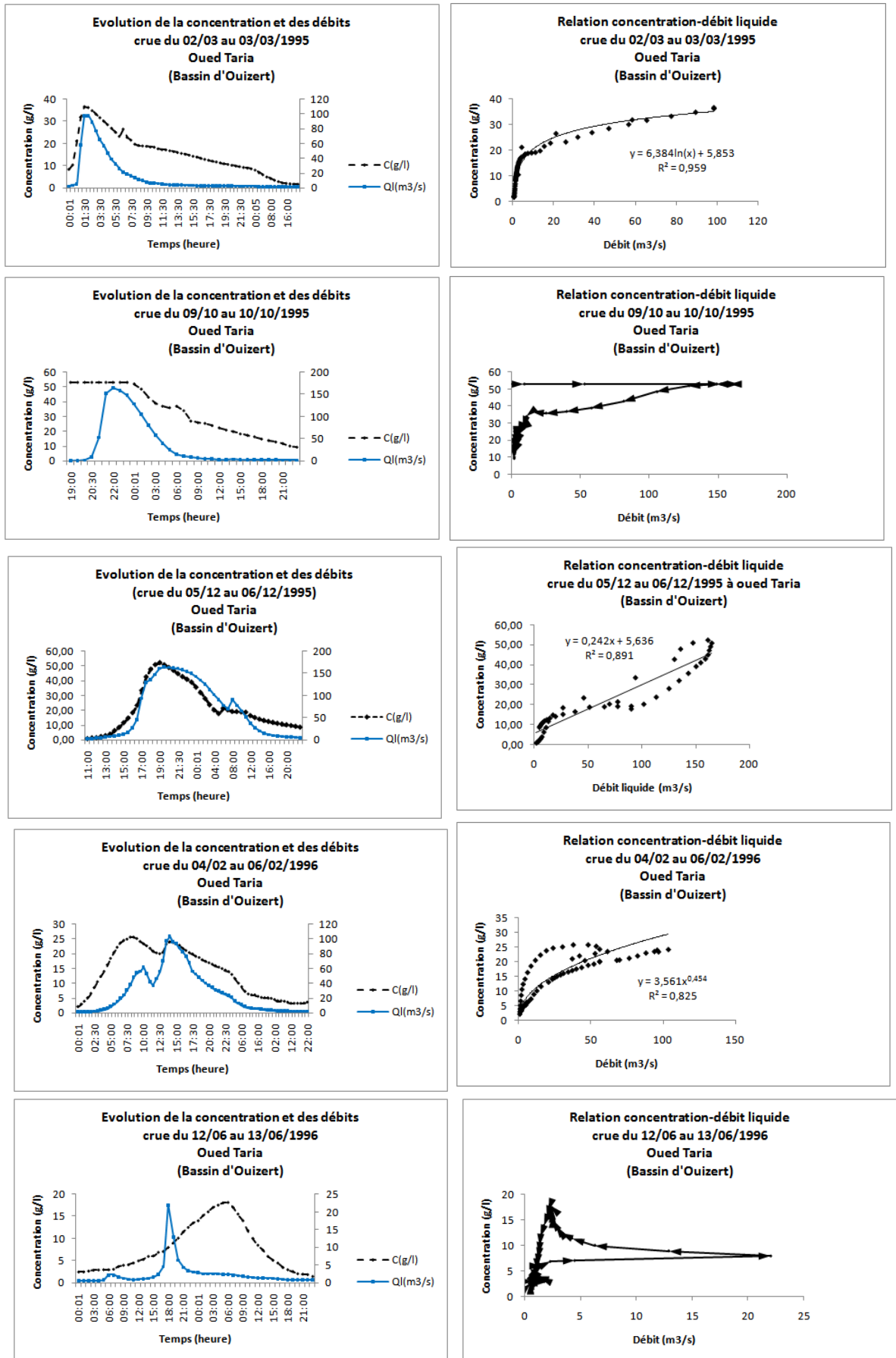
- 24% des crues se présentent sous le modèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, surtout en automne et en hiver. Ceci peut expliquer l'importance de la dynamique érosive pendant ces saisons. Après une saison généralement sans pluies et ou le sol est fragilisé, les premières pluies d'automne donnent des concentrations importantes en sédiments en suspension.

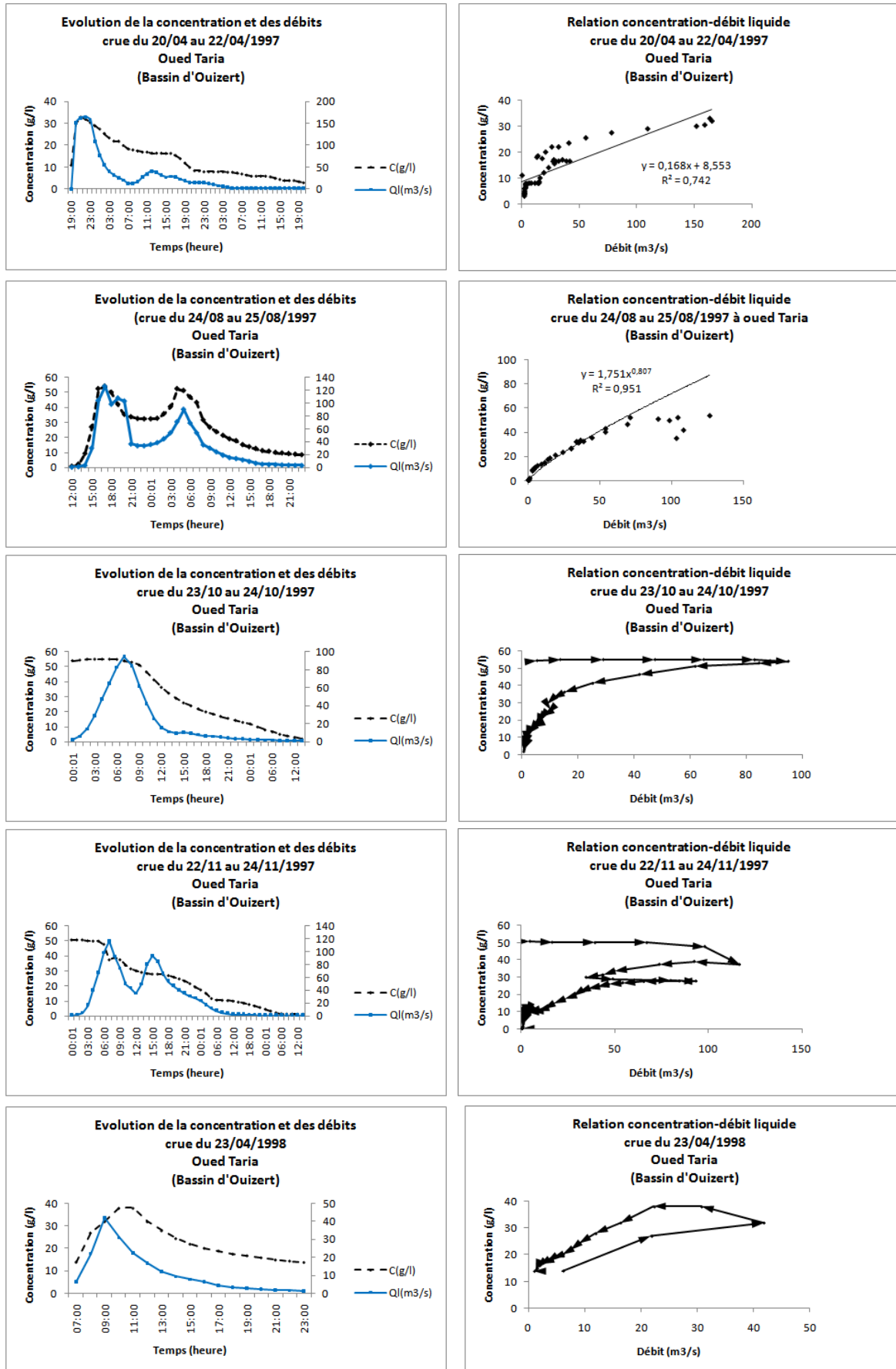
-Le modèle en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, se présente surtout pour les crues du printemps. Pendant cette saison, l'état du sol et la couverture végétale font que l'action érosive se trouve diminuée par rapport aux écoulements abondants.

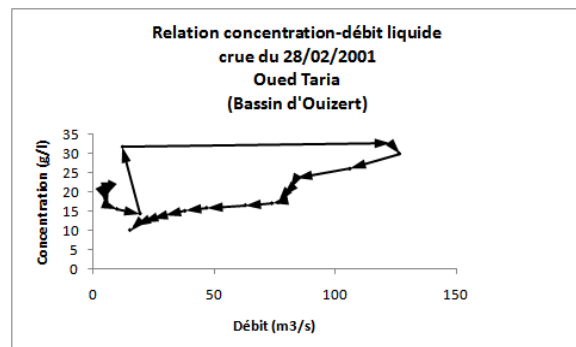
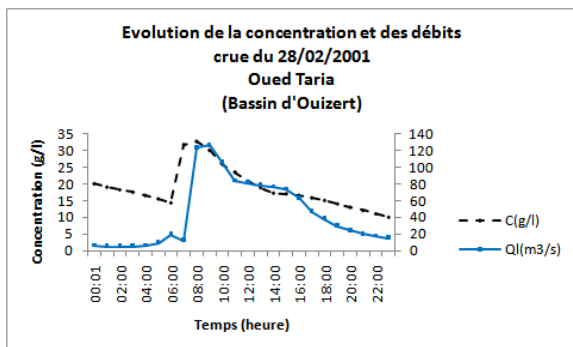
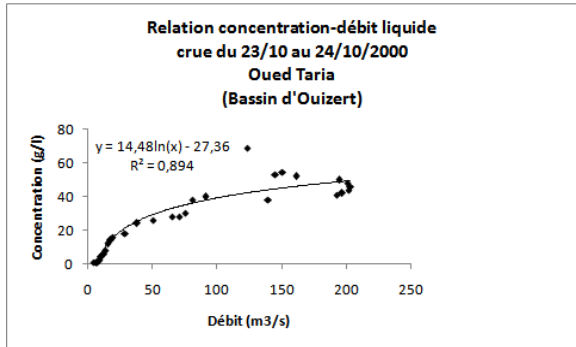
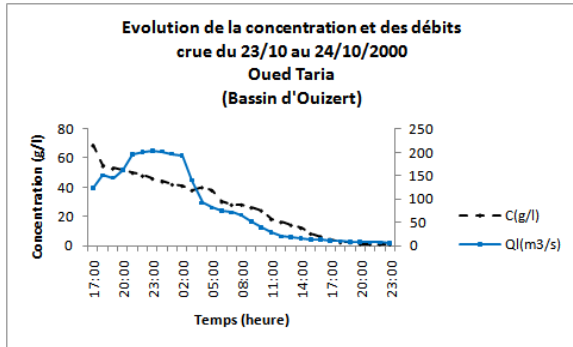
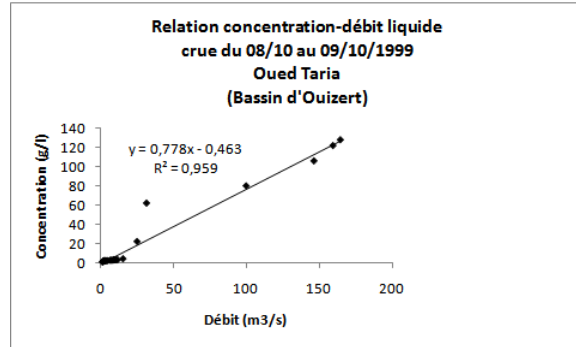
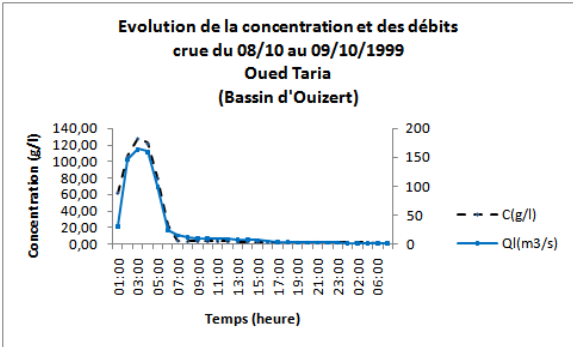
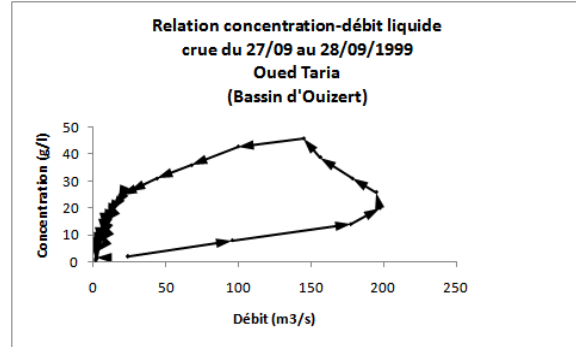
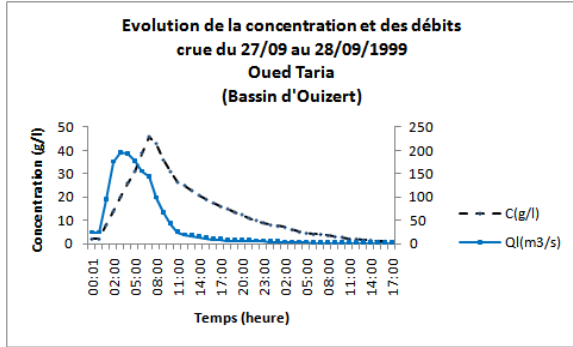
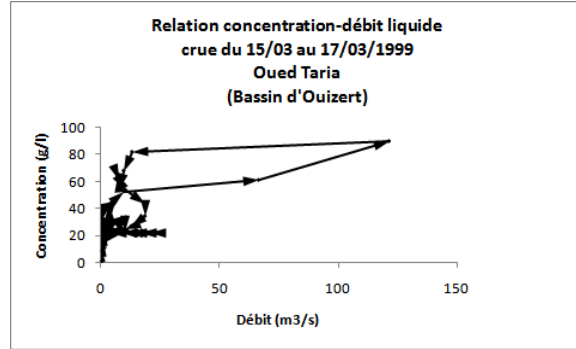
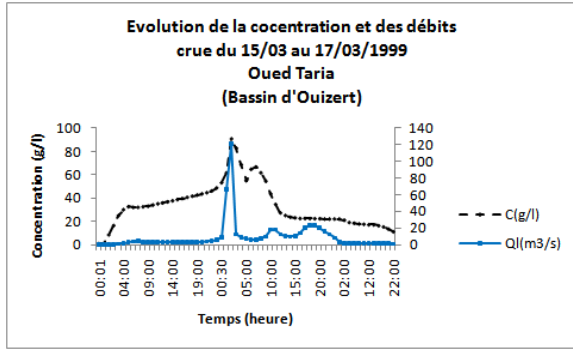
-Le modèle en forme de huit (8) ou « figure eight » qui se caractérise par l'apparition du pic de concentration avant celui du débit pendant la montée de la crue, qui donnera une boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre. Après, le pic de la concentration diminue doucement en fonction du temps, relativement aux débits liquides, pendant la décrue et on obtient une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Williams, 1989). Ce modèle se présente pour deux crues automnales : celle du 19 octobre 1993 et du 28 septembre 1994, une crue hivernale : celle du 20 janvier 1994 et une crue printanière : celle du 07 mai 2002. Cela peut s'expliquer par la disponibilité des sédiments produits par des crues précédentes.











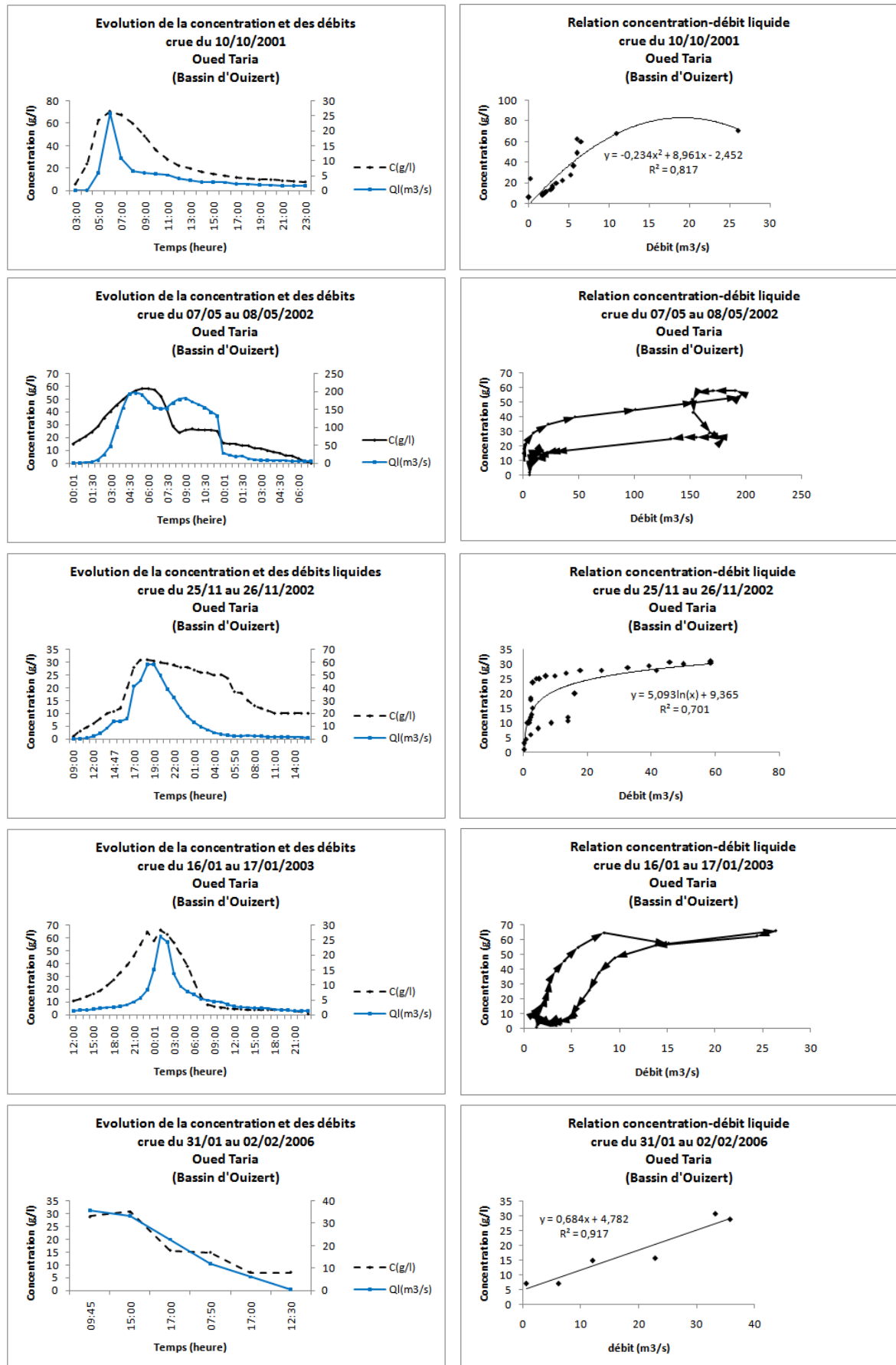


Figure 9.9: Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues de l'oued Taria (Bassin d'Ouizert)

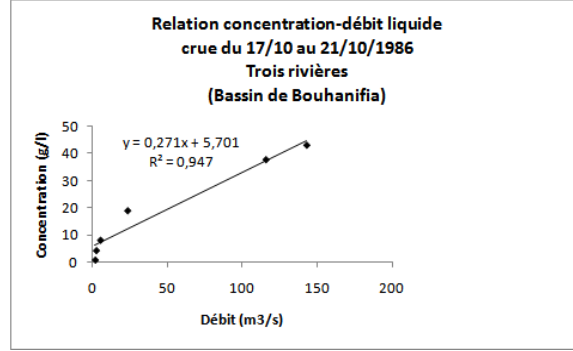
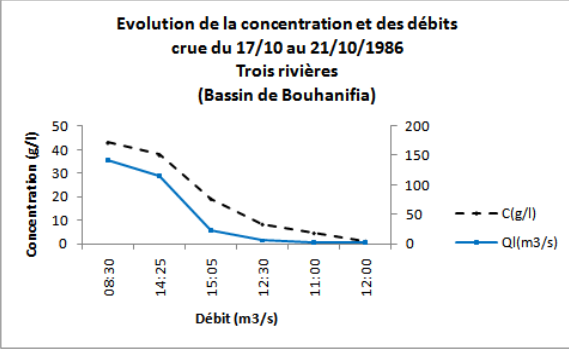
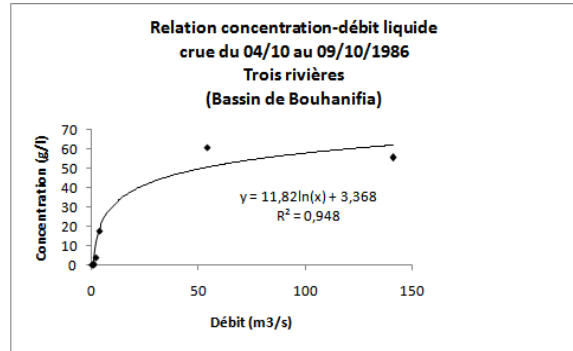
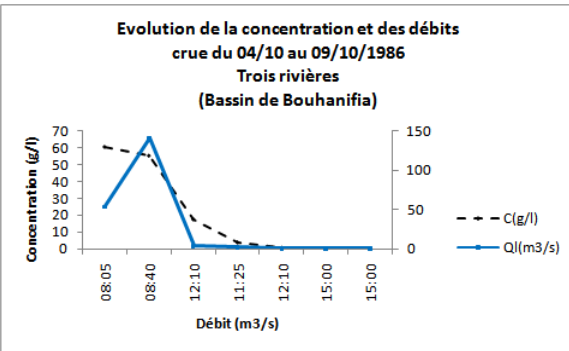
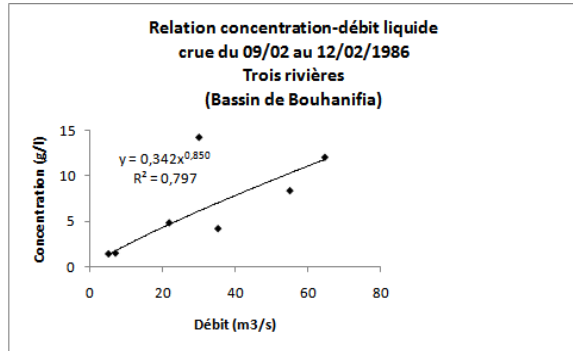
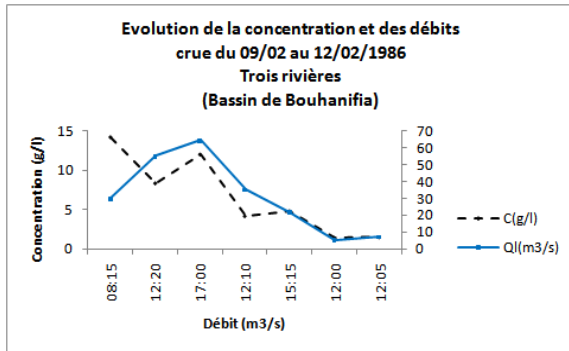
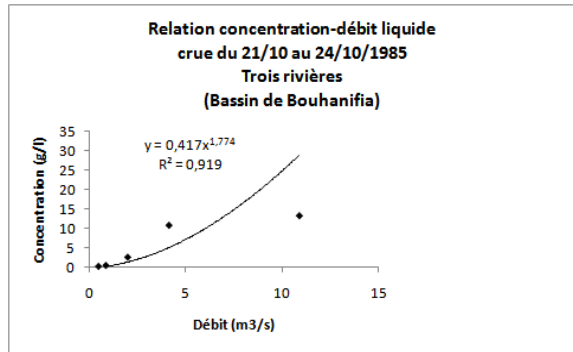
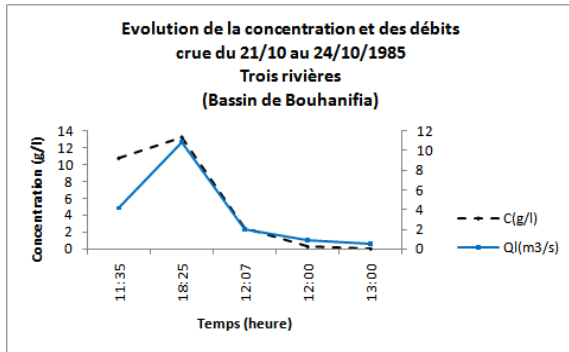
d) Bassin de Bouhanifia

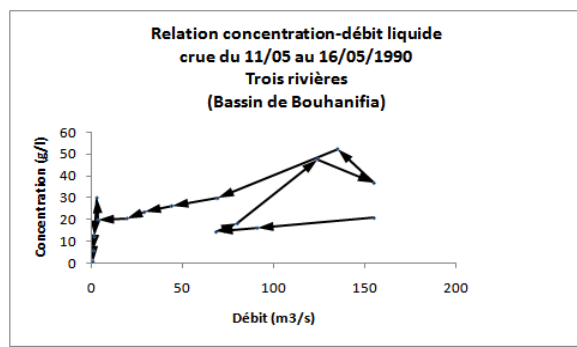
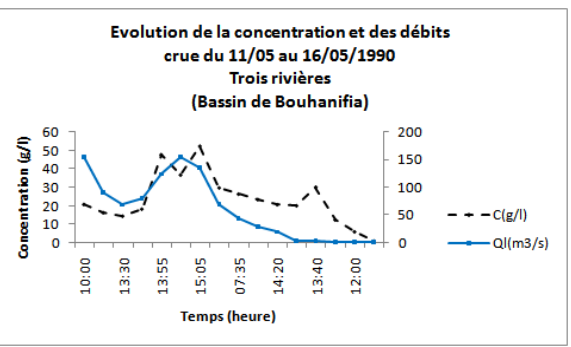
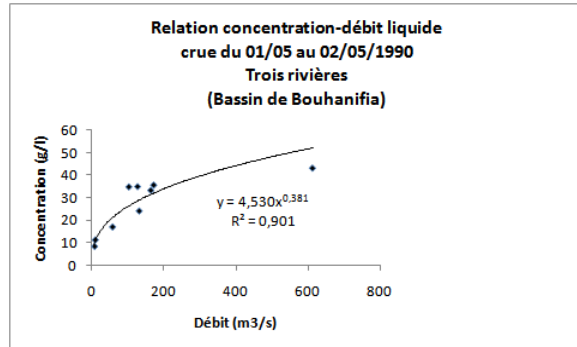
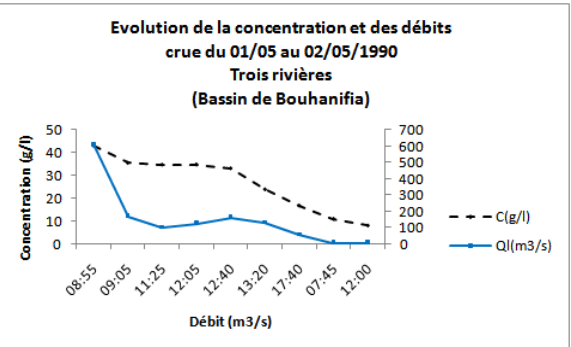
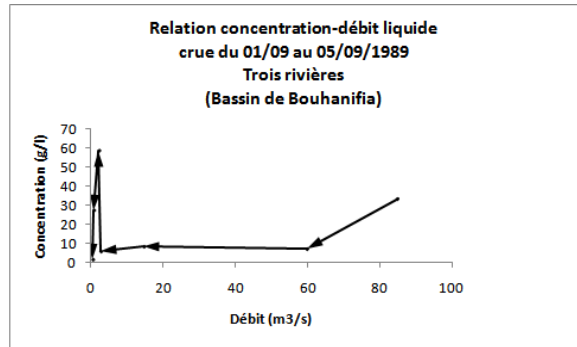
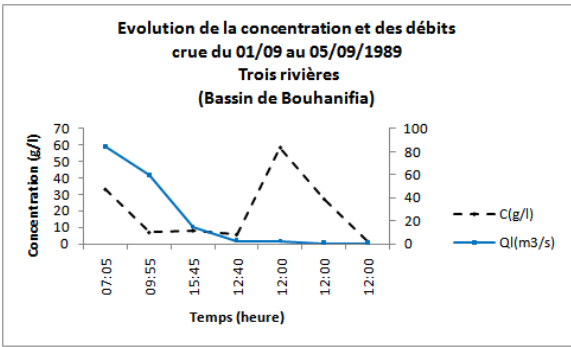
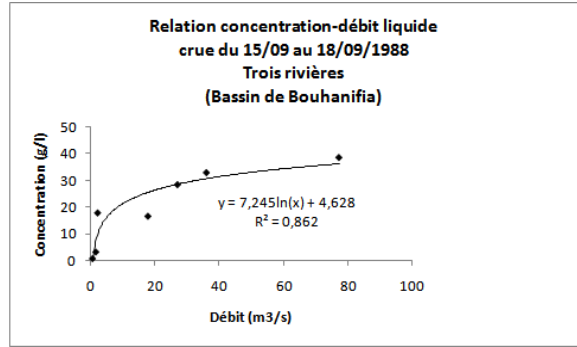
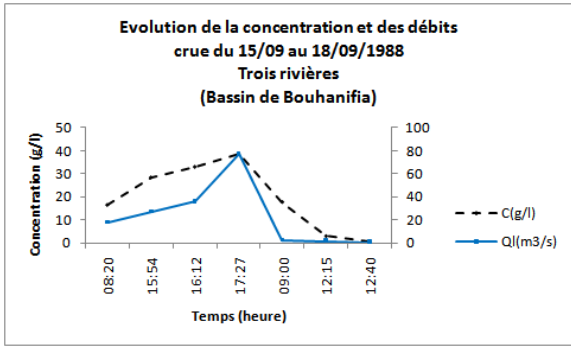
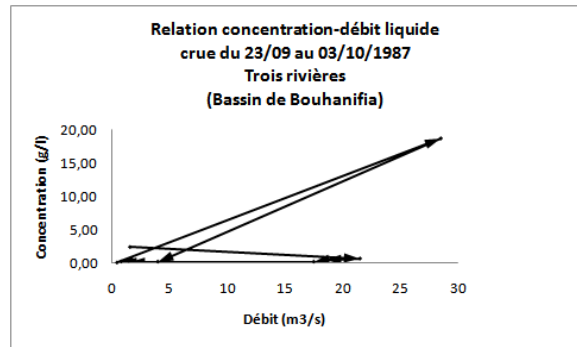
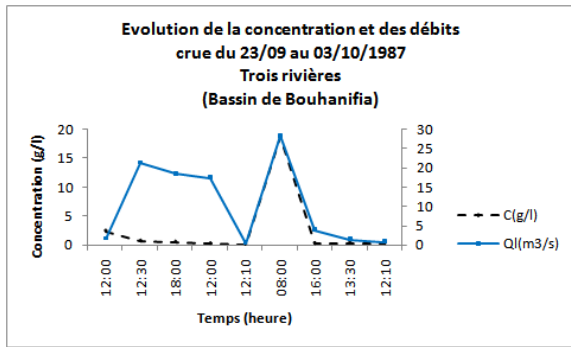
A la station de Trois rivières, les courbes (figure 9.10) de l'évolution des couples (concentrations, débits liquides) suivent trois modèles :

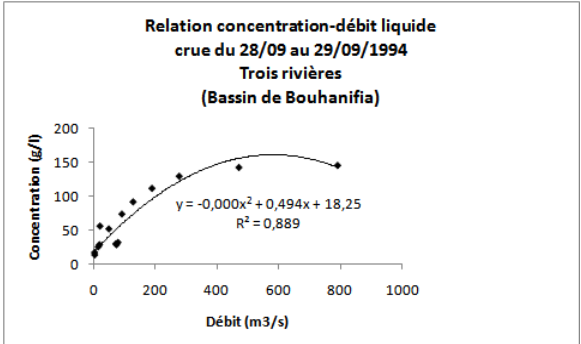
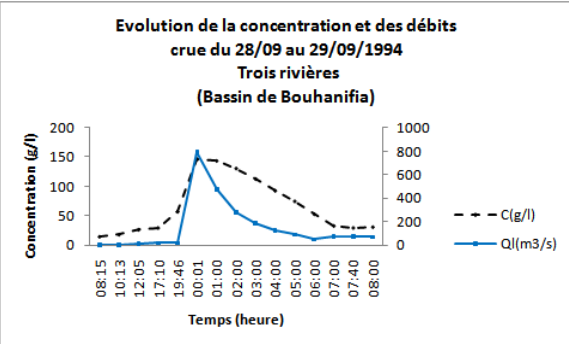
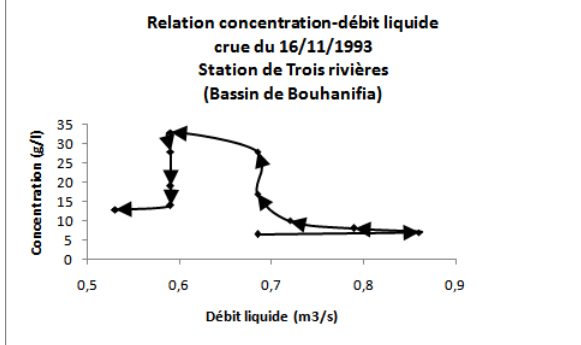
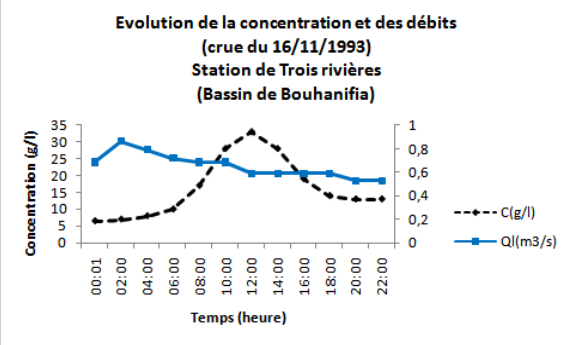
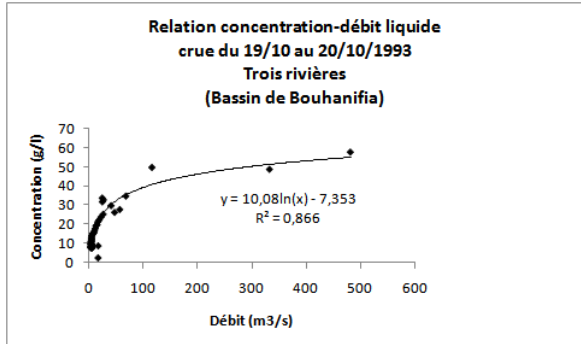
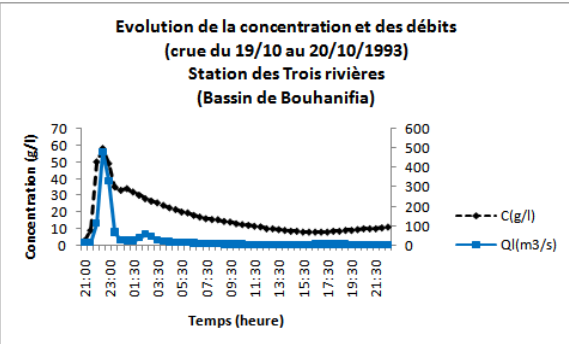
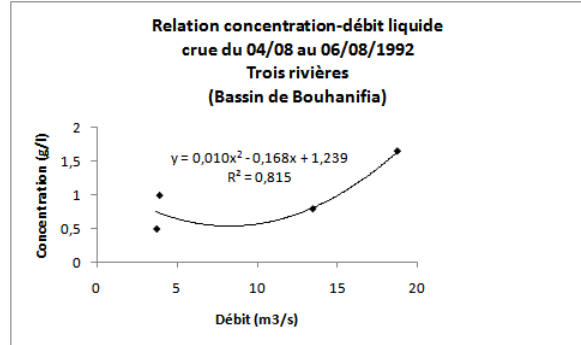
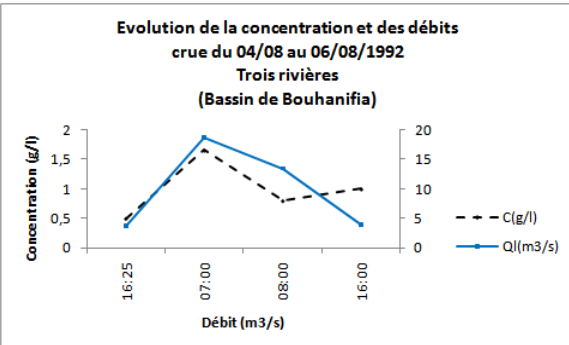
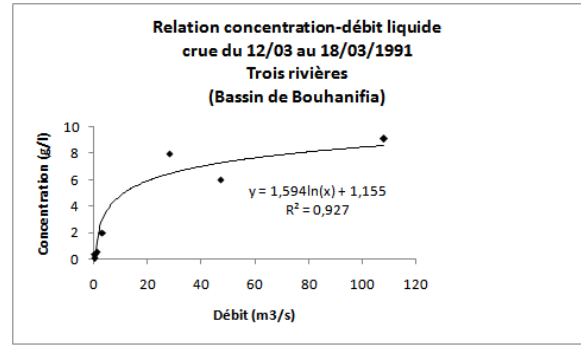
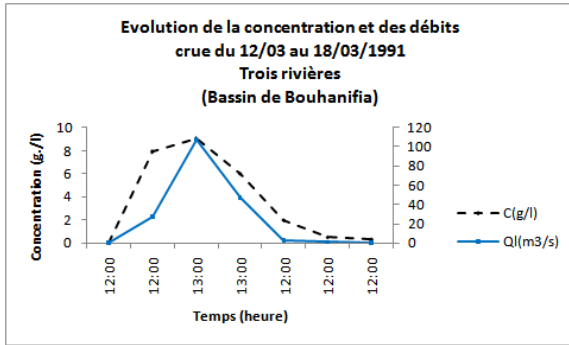
- La courbe simple, surtout pour les crues d'automne (58% des crues), printemps (25% des crues) et l'été (17% des crues). Ca pourrait être associé à un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Wood, 1977) et/ou à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes. Du fait que, 84% de l'apport solide annuel est charrié par l'automne et le printemps
- Le modèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, se présente à un degré faible (4% des crues), et concerne la crue du 24/09/1987, ce type de modèle résulte des averses brèves et intenses, qui engendrent l'apparition du pic de concentrations des sédiments avant le pic des débits.
- 46% des crues se présentent sous le modèle en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Ces crues ont lieu surtout en automne (55%) et au printemps (27%) et à un degré moindre et équitable (18%), en hiver et en été.

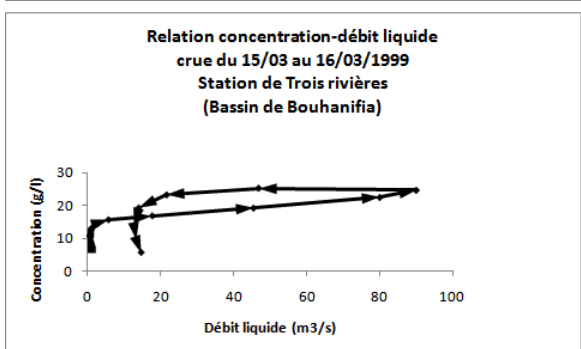
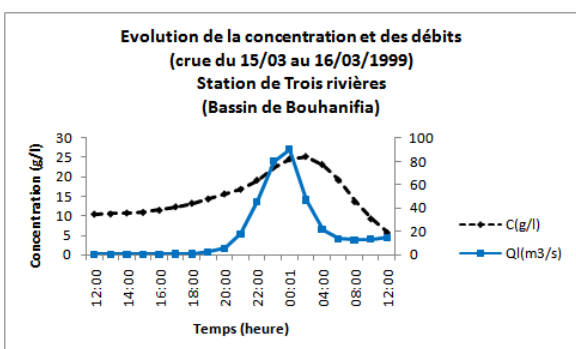
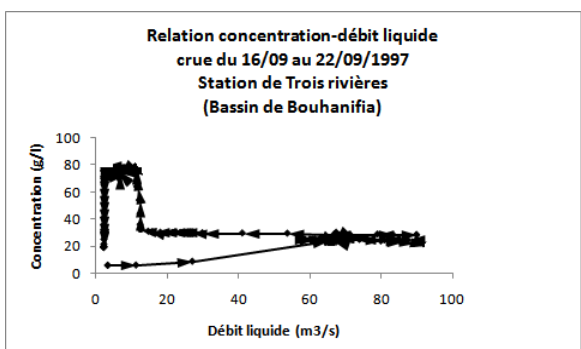
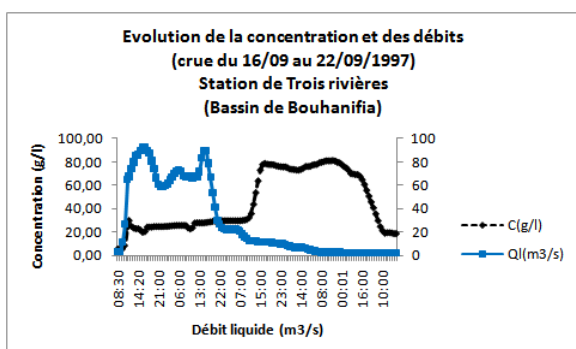
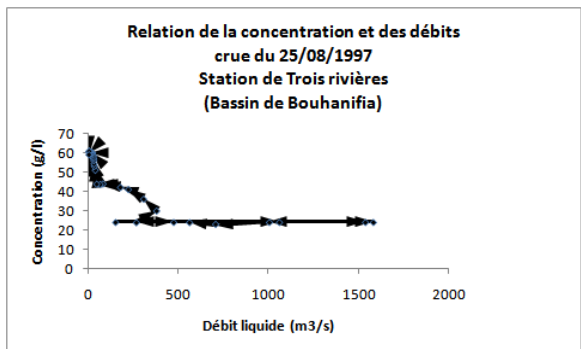
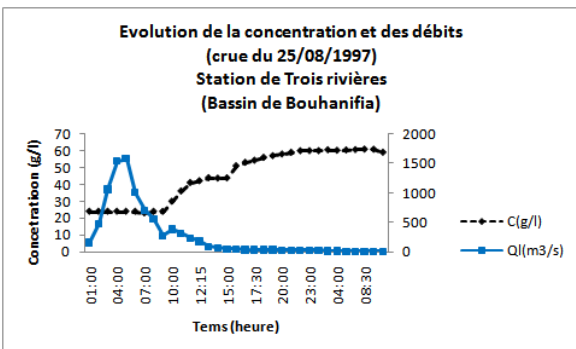
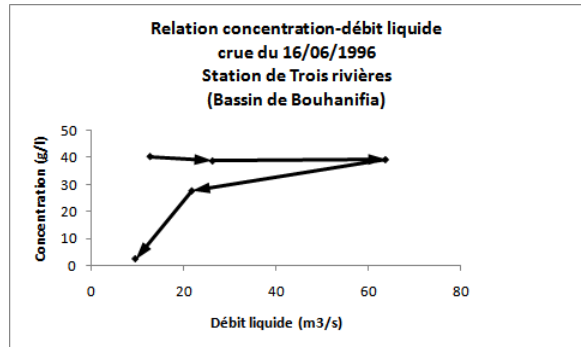
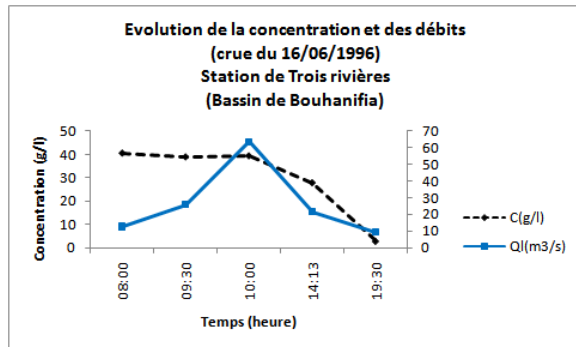
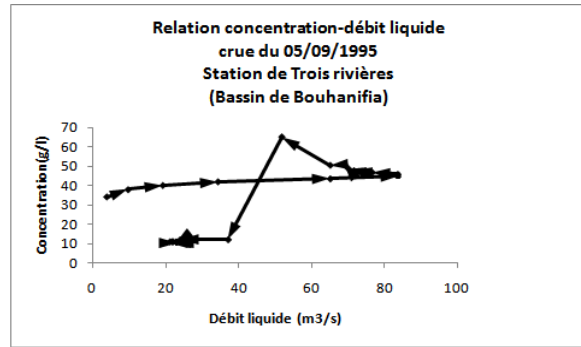
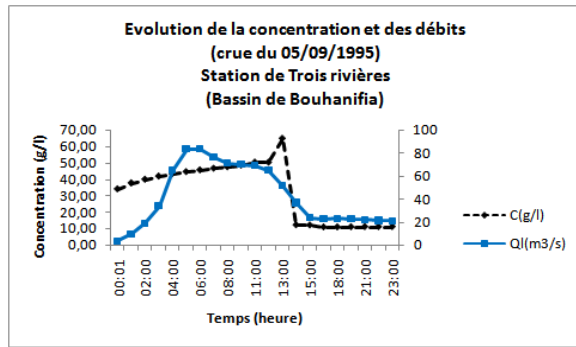
Les averses de fortes intensités et de courtes durées survenues en automne, sur un sol sec et facilement érodable engendrent au départ, une excellente synchronisation entre la concentration des matières en suspension et les débits liquides. Cela donne un modèle en courbe. En deuxième période, le flux de sédiments n'arrive pas à rejoindre l'écoulement rapide. Du fait de l'étendue du bassin de Bouhanifia, les irrégularités de ses affluents (Melrir, Hounet et Fekan) qui empêchent le mouvement des sédiments par rapport à celui de l'eau, et le temps de parcours long de l'onde de crue (133 km de thalweg principale), le flux de sédiments tend alors à être entraîné derrière l'onde de crue, ce qui engendre un retard de pic de concentration de sédiment à la station de Trois rivières en aval. Pour l'hiver et le printemps, le sol plus au moins saturé et couvert, résiste mieux à la pluie, le transport solide se verra légèrement retardé par rapport à l'écoulement. Le modèle en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre se présente pour une seule crue estivale : celle du 25/08/1997, qui a engendré une

concentration maximale en sédiment de 60g/l et un apport solide de 65% de l'apport annuel, avec un débit maximum de 1578m³/s.









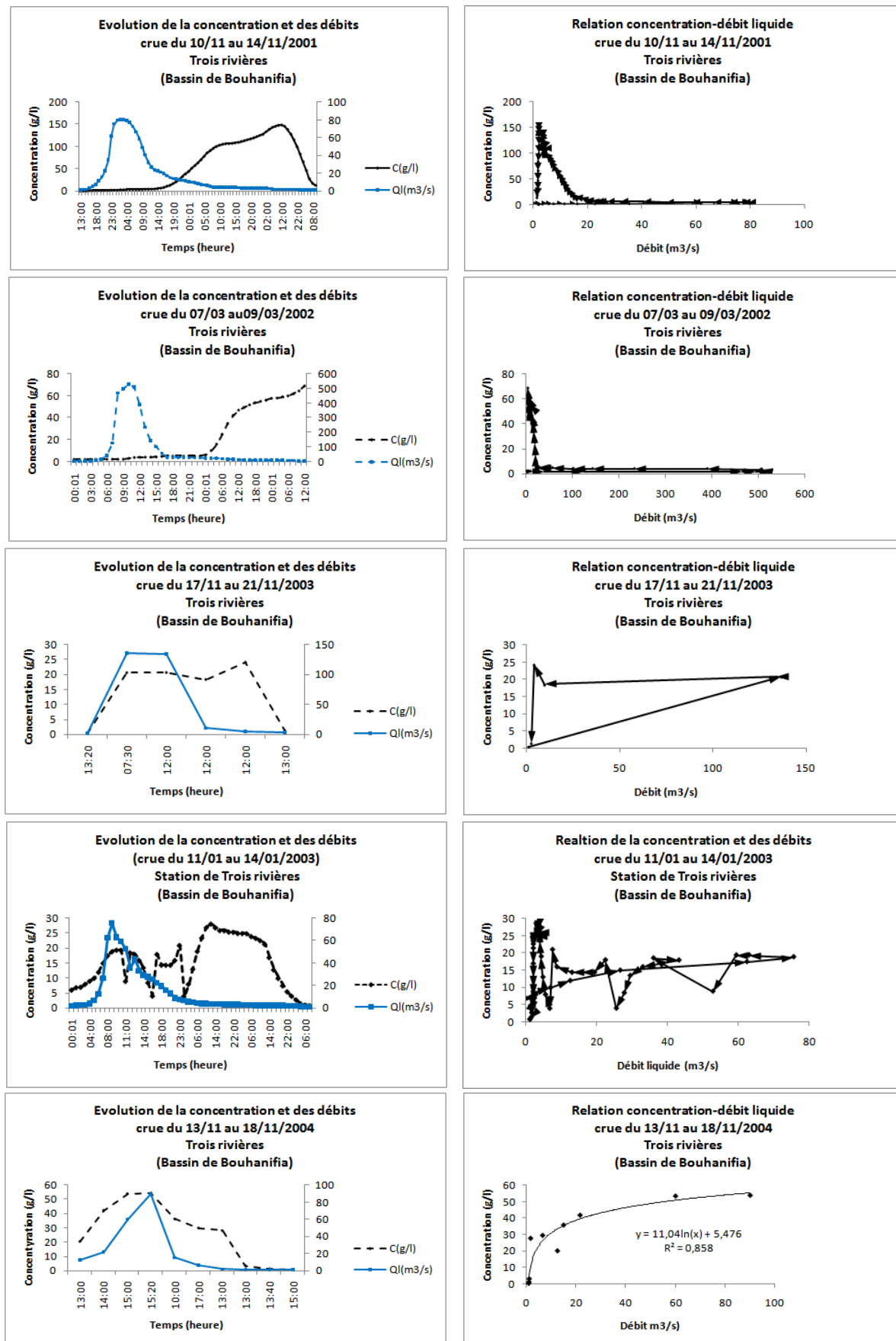


Figure 9.10: Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues à la station de Trois rivières (Bassin de Bouhanifia)

e) Bassin de Fergoug

A la station de Hacine, les courbes (figure 9.11) de l'évolution des couples (concentrations, débits liquides) suivent trois modèles :

- La courbe simple, surtout pour les crues d'automne et d'hiver .Ca pourrait être associée à un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Wood, 1977) et/ou à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes.

- le modèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, se présente pour les crues des quatre saisons (71,42% de crues) et plus particulièrement de celles de l'automne. Les crues d'automne surviennent après une saison sèche ou le sol est particulièrement fragilisé et facilement érodable, les premières pluies, généralement brèves et intenses réussissent à emportés les fines particules détachées. Ceci permettra l'apparition du pic de concentrations des sédiments avant le pic des débits. Selon Heidel (1956), dans les petits cours d'eau, la concentration maximum des sédiments se produit habituellement avant le débit maximum. La boucle dans le sens des aiguilles d'une montre peut être due à deux causes principales :

➤ A un épuisement du stock de sédiment disponible avant le maximum du débit (Arnborg et al. 1967 ; Walling, 1974 ; Wood, 1977 ; Wansickel et Beschta, 1983). L'épuisement ou la diminution des sédiments peut s'expliquer soit, par un petit apport disponible, soit par un débit continu et/ou intense.

➤ Le deuxième postulat consiste à la formation d'obstacles au passage de la crue maximale (Arnborg et al. 1967). Le « clockwise loop » a tendance à se produire plus au début de la saison des pluies qu'après (Sidle et Campbell, 1985). Ceci est lié à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes, comparés à un manque ou une diminution des réserves en sédiments à la fin de la saison sèche.

Le modèle « clockwise loop » se présente aussi pour les crues d'hiver, du printemps et d'été. Ceci pourrait être du à un apport continu de sédiments pendant les crues et/ ou à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes (Wood, 1977).

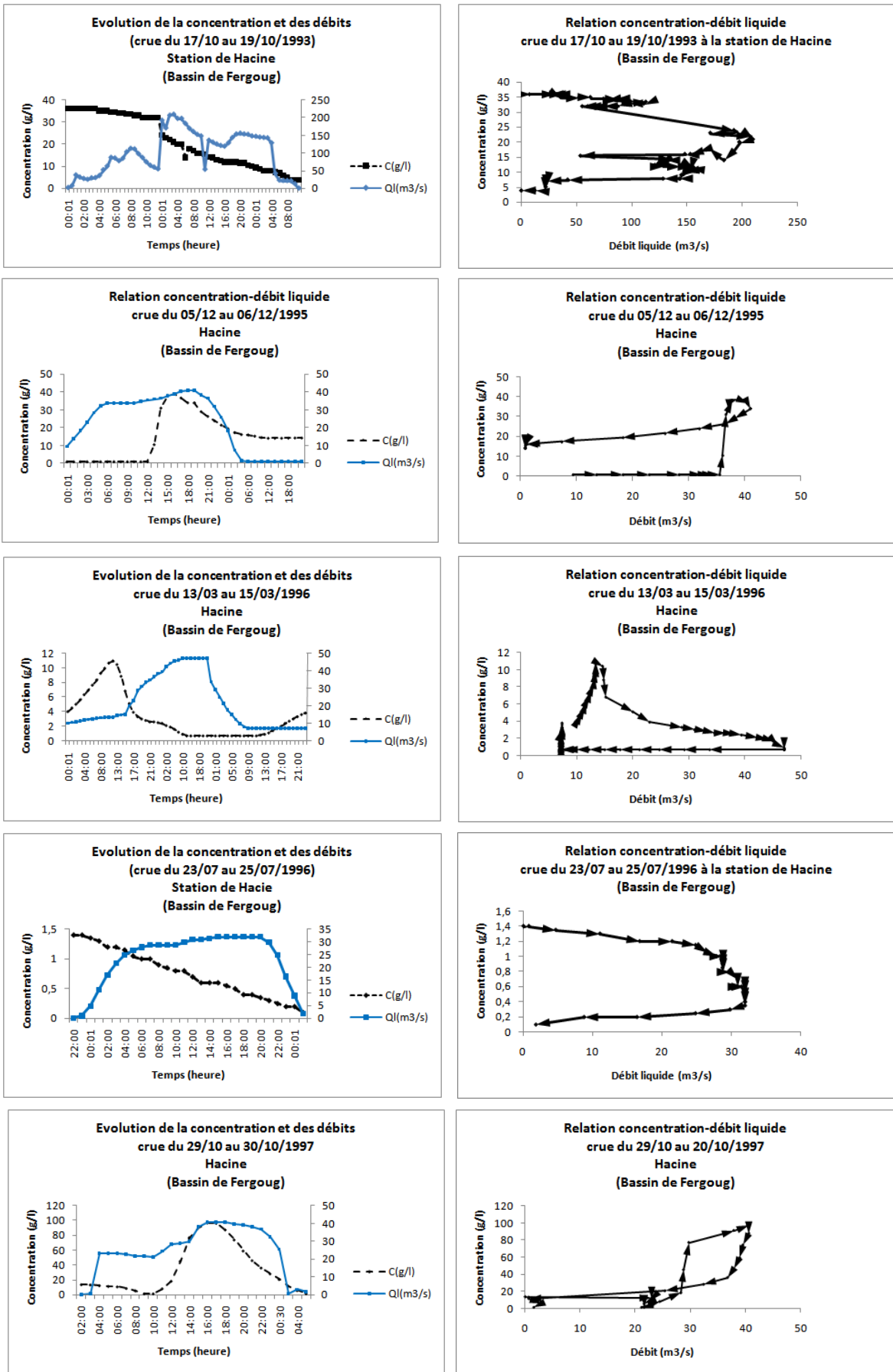
-Le modèle en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, « counterclockwise loop » résulte de l'une des trois causes suivantes:

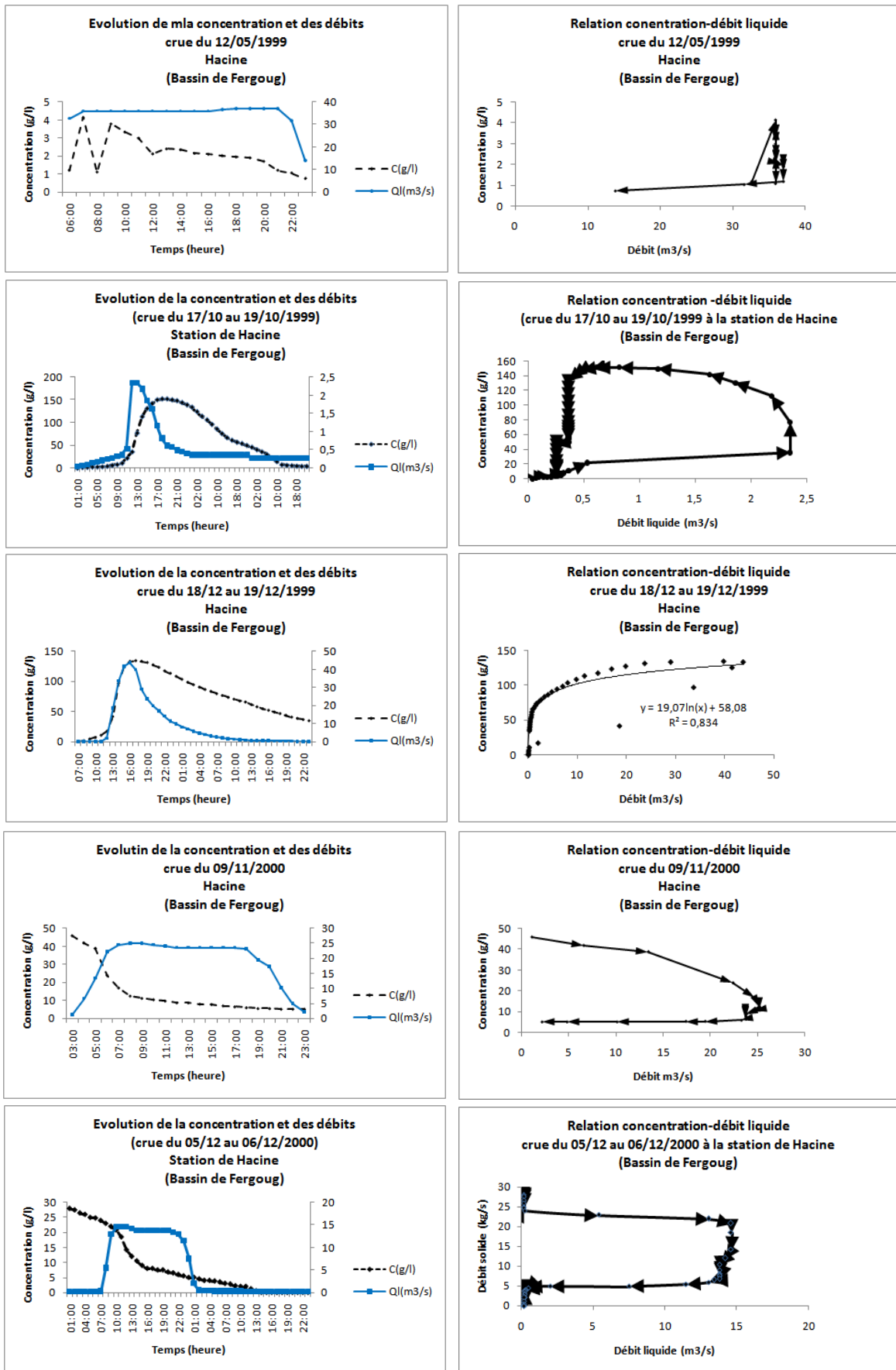
Une des causes possible, est le temps de parcours de l'onde de crue et du flux des sédiments, particulièrement en raison de la distance entre la source de la crue et la station de jaugeage (Heidel, 1956). Les variations des débits tendent à suivre les vitesses de l'onde de crue. Cette vitesse est généralement plus rapide que la vitesse moyenne d'écoulement (Williams G.P., 1989). Puisque les sédiments en suspension tendent à être transportés avec une vitesse proche de celle de l'écoulement moyen, le flux de sédiments tend à traîner derrière l'onde de crue. Aussi le temps de retard (latence) augmente avec la distance en aval. Le retard du pic des sédiments à une station en aval se manifeste au niveau des écoulements dans un cours d'eau caractérisé par des irrégularités qui empêchent le mouvement des sédiments par rapport à celui de l'eau.

La deuxième cause rapportée des boucles dans le sens contraire des aiguilles d'une montre est l'érodabilité importante du sol en même temps que de l'érosion prolongée pendant la crue (Kung et Chiang, 1977).

La troisième cause est la variabilité de la distribution saisonnière des pluies et de la production des sédiments dans le bassin (Bouanani, 2005).

Au bassin de Fergoug, la boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre se présente pour une seule crue en automne, résultante d'une averse de forte intensité et de courte durée, qui engendre l'apparition du pic des débits avant celui des concentrations.





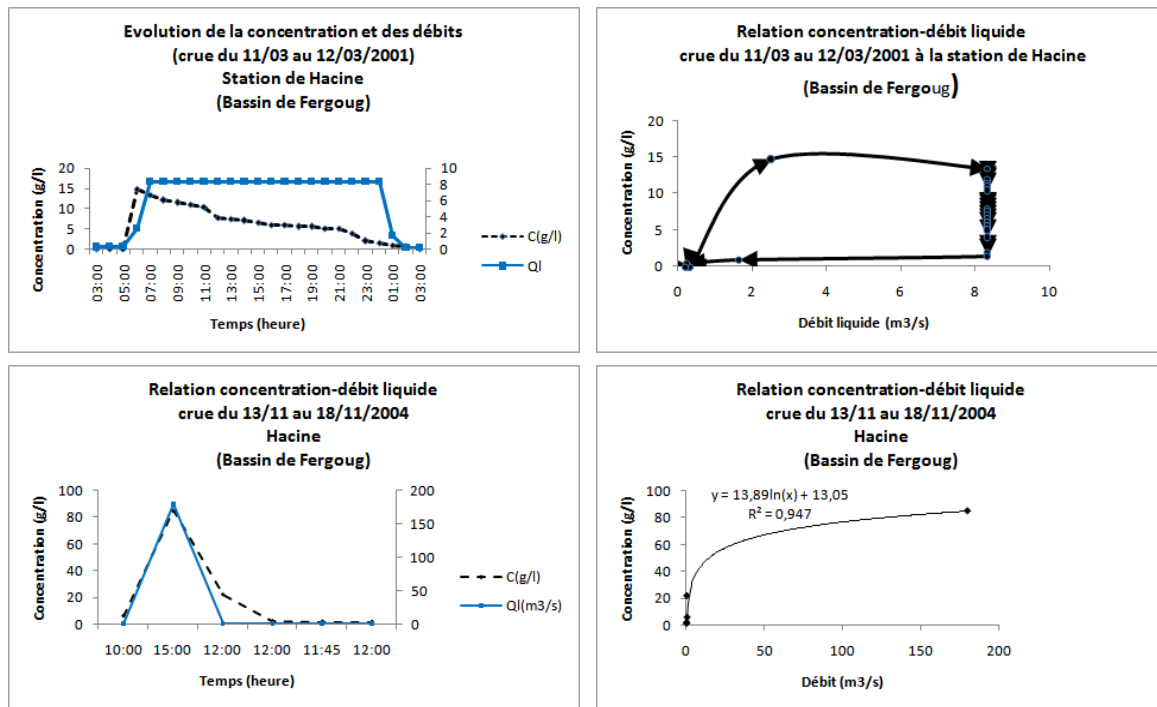


Figure 9.11: Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides durant les crues à la station de Hacine (Bassin de Fergoug)

La dominance du modèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre à la station de Hacine, peut être illustrée (figure 9.12) par l'analyse de l'évolution de deux crues successives (crue du 06 et 17 octobre 1994):

-Pour la crue du 06 octobre 1994, les concentrations des matières en suspension évoluent en excellente synchronisation avec le débit liquide. On remarque que le pic de concentration (318 g/L) et le pic de débit liquide (15,9 m³/s) sont simultanés, ce qui montre l'apport continu des sédiments pendant toute la durée de la crue (Wood, 1977). Pendant cette crue, l'eau conserve une forte concentration sur une durée d'environ 20 heures, ce qui est dû : à l'intensité remarquable des précipitations, au stockage dans le chenal d'apports en provenance directe des versants; et au fait que la crue a eu la possibilité de se charger pendant toute sa durée par la reprise d'un stock sédimentaire en place. Ce dernier peut être lié à la disponibilité en sédiments produits par les crues précédentes et stockés dans le lit fluvial (les crues de septembre).

-Pour la crue du 17 octobre 1994, après 11 jours d'écoulement, le modèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre s'installe, par apparition d'un pic de concentration de 36g/l avant le maximum de débit (278m³/s).

Cela pourrait être dû à l'existence d'une couche de pavage formée sur le lit de l'oued antérieurement à la crue (Arnborg et al. 1967). Cette situation peut être aussi obtenue lorsqu'il y a une réduction des matériaux en suspension juste avant l'obtention du débit maximal (Arnborg et al. 1967, Wood, 1977 ; Battala & Sala, 1992 ; Benkhaled et Remini, 2003) ou une limitation d'approvisionnement en matériaux (Moog & Whiting, 1998). Ou à la formation d'obstacles au passage de la crue maximale, vu que l'oued El Hammam est méandrique. De plus, la boucle dans le sens des aiguilles d'une montre est considérée comme une caractéristique commune aux petits bassins (Emmett, 1970 ; Walling, 1974).

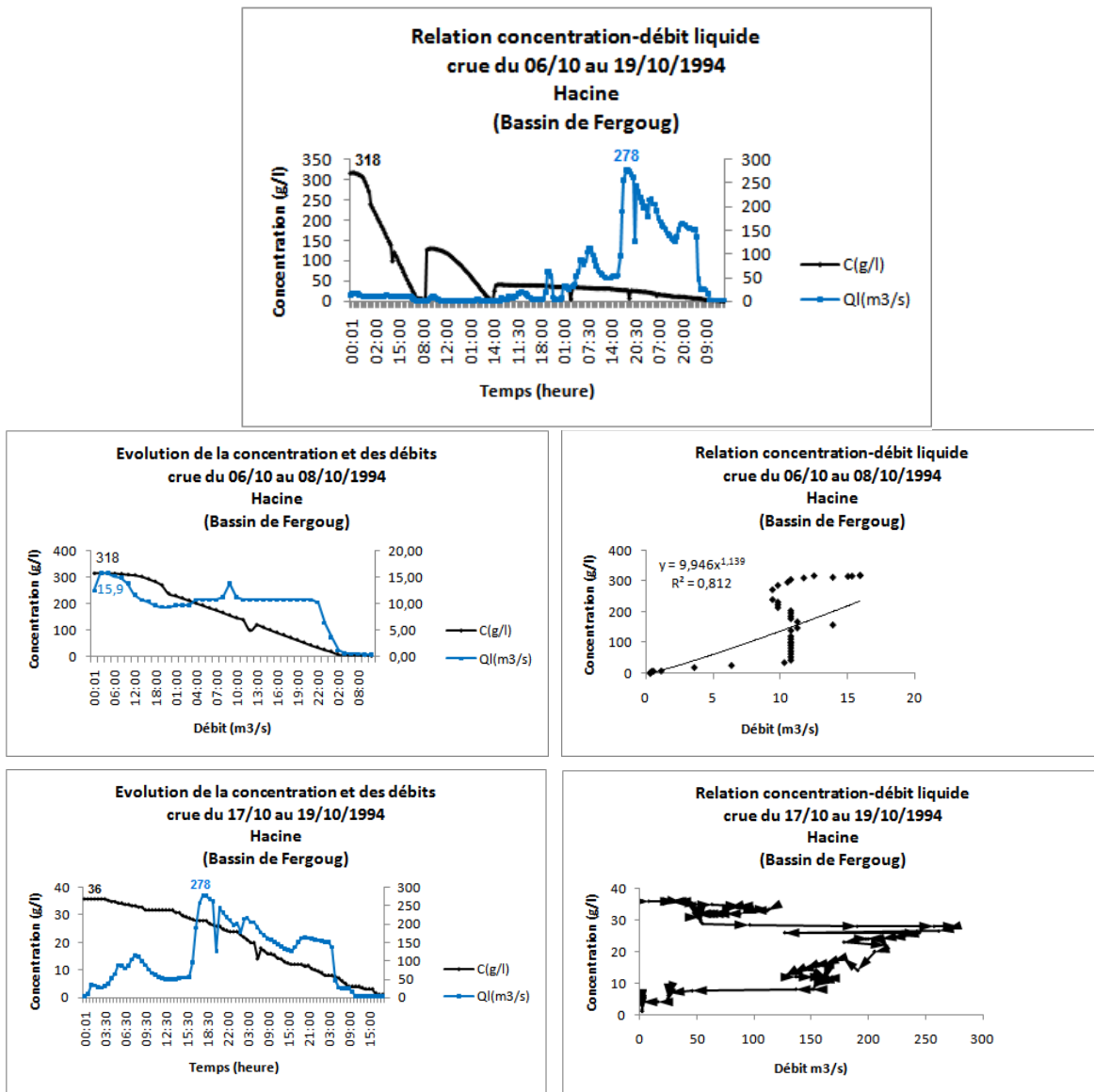


Figure 9.12: Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides pendant les crues du 06/10/1994 et 17/10/1994 à la station de Hacine (Bassin de Fergoug)

CHAPITRE X

Envasement quantitatif des barrages

10.1. Introduction

L'envasement réduisant d'année en année la capacité des barrages retenus. Il s'ensuit que l'exploitation devient de plus en plus précaire, puis tellement déficiente qu'il faut, au bout d'un laps de temps plus au moins long, construire de nouveaux ouvrages qui s'imposent bien avant la mort par envasement total des anciens barrage. Un barrage réservoir agonise des sa naissance et si dans un système aucun ouvrage ne vient le doubler ou si aucun remède ne lui est apporté, il peut très bien n'être plus d'aucune efficacité dès que le mal atteint un certain degré d'acuité (Parzonka, 1984).

10.1. Caractéristiques des barrages étudiés

a) Barrage d'Ouizert

Le barrage d'Ouizert est situé à 17 Km au Sud de Ain-Fekan dans la wilaya de Mascara. Sa construction débuta en 1974 et sa mise en eau a été faite en 1986. La construction du barrage dans les gorges d'Ouizert a créé dans la vallée de l'oued Sahouet un lac artificiel de 10 km de longueur environ. C'est un barrage poids, d'une hauteur de 60 m et d'une capacité de 100 millions de m³, destiné à accroître le degré de régularisation de l'oued El Hammam. 12 millions de m³ sont destinés à l'irrigation de 20.000 hectares de la plaine d'El Habra située au Nord de Mohammadia, 20Mm³ sont consacrés à l'alimentation de la zone industrielle d'Arzew et l'AEP d'Oran. De plus, ce barrage permet de limiter les apports solides en entrée du barrage de Bouhanifia. L'apport moyen annuel de ce barrage est de l'ordre de 45 Hm³/an.



Photo 1: Vue générale du Barrage d'Ouzert (Benfetta et al .2008)

b) Barrage de Bouhanifia

Le barrage de Bouhanifia est situé à 4 km au sud de la ville de Bouhanfia, à 22 km au Sud- Ouest de Mascara et à 57 km à l'amont du barrage de Fergoug. Suite à la catastrophe survenu au barrage de Fergoug en 1927, il a été décidé de construire ce barrage en amont, afin d'amortir les crues exceptionnelles. Les travaux de réalisation ont commencé en 1930, et font achever en 1951. Suite à des incidents techniques, la mise en eau a été étalé jusqu'au 1940. . C'est un barrage en enrochement, d'une capacité de 73 millions de mètre cube pour une retenue normale à la côte 295 m, destiné pour les irrigations de la région de Hacine et de Mohammadia.



Photo 2: Vue Générale - Barrage Bouhanifia

c) Barrage de Fergoug

Le barrage de Fergoug est situé sur l'oued l'Habra, immédiatement à l'aval du confluent de l'oued El Hammam et de l'oued Fergoug, 10km au sud de la ville de Mohammadia. Le premier barrage construit sur ce site remonte à la période Romaine. Un deuxième barrage a été reconstruit en 1732, et fut emporté par les eaux en 1850. En 1867, un barrage de grande envergure d'une capacité de 30 Mm^3 a été réalisé et fût endommagé à deux reprises en 1872 et 1881 et fut rétabli à chaque fois. En 1885, le barrage était totalement dévasé, par les eaux qui s'écoulaient librement depuis 1881. Le 26, une crue exceptionnelle estimée à plus de 3000 détruisit ce barrage. Le deuxième barrage fut construit en 1927-1934. En novembre 1927, il a subit une crue exceptionnelle estimait à $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, et qui a lavé 3 millions de mètres cube de vase. En 1934, une surélévation en béton armé et un tiran d'ancrage a été exécuté sur le reste du barrage, pour servir de reprise aux lâchés du barrage de Bouhanifia, réalisé en amont. Enfin, le barrage actuel, fut reconstruit en 1967, et mis en exploitation en 1970. La cote maximale de la retenue est de 100.5 m, le volume emmagasiné à cette cote est de 18 million de m^3 , destiné à l'alimentation en eau potable (Oran-Arzew Mohammadia), l'alimentation en eau d'industrie (Arzew) et l'irrigation de la plaine de l'Habra (20.000Ha).



Photo 3 : Vue Générale - Barrage Fergoug

10.2. Les principaux problèmes des barrages étudiés

▪ Evaporation et fuites

Le barrage d'Ouizert est confronté à deux problèmes majeurs : l'évaporation et les fuites. Le phénomène de l'évaporation des lacs de barrages en Algérie est considérable. En utilisant les données de l'évaporation journalières de 39 grands barrages d'une capacité de 3,8 milliards de m^3 , Remini (2005) a constaté que durant la période 1992-2002, la quantité évaporée représente la moitié du volume consommé par l'irrigation, l'alimentation en eau potable et l'industrie, ce volume représente une perte moyenne annuelle de 6,5 % de la capacité totale. Au niveau du barrage d'Ouizert, l'évaporation est en moyenne de 7 millions de m^3 par année durant la période d'exploitation 1994-2002. Pour la période (2005-2014), l'évaporation du lac est toujours importante (figure 10.1), la moyenne calculée est d'environ 4%. Néanmoins certaines années consécutives ; (2009 -2010) et (2013-2014) ont enregistrées respectivement $11Hm^3$ et $15Hm^3$, soit une perte de capacité annuelle de 6,5% pour les années de fortes évaporation.

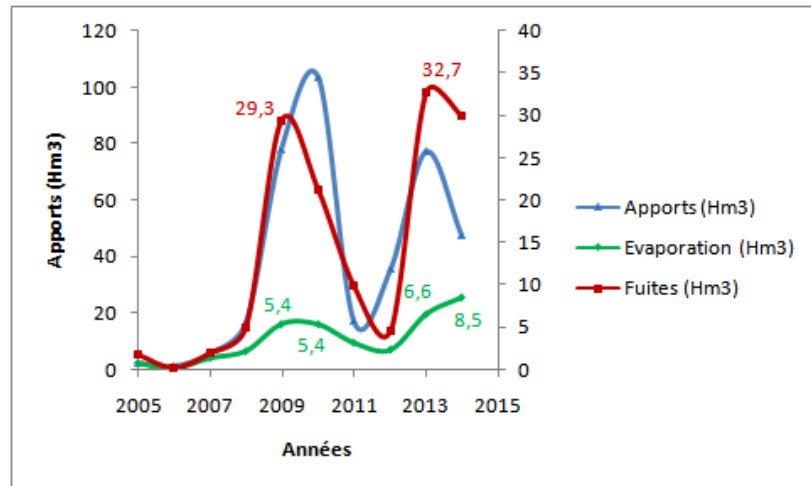


Figure 10.1: Evolution des fuites et de l'évaporation du barrage d'Ouizert (2005-2015)

Les fuites à travers les rives et les fondations du barrage sont très importantes par rapport à l'évaporation, elles sont jugées préoccupantes pour la stabilité de l'ouvrage. Le volume des fuites a dépassé les 20 millions de m³ durant 4 années successives (1994-1998) pour une capacité totale du barrage égale à 100 millions de m³, soit 20% du volume utile (Remini, 2005). Les fuites s'aggravent ces dernières années ; on a enregistré respectivement, un volume de fuite de 50,5 Hm³ et 62,6 Hm³ durant les années successives (2009-2010) et (2013-2014). La moyenne annuelle des fuites est estimée à 13,6 Hm³. soit une perte de capacité annuelle du barrage de 13,6%.

▪ Eutrophisation

Ces dernières années les rejets des eaux usées d'origine urbaine et industrielle ont augmenté dans les oueds. Ceci constitue une menace pour la qualité des ressources en eau dans les barrages. Plusieurs tronçons d'oueds sont déjà pollués (Tafna, Mekerra, Chellif, Soummam et Seybouse). Si le phénomène persiste encore, des retenues de barrages comme Beni Bahdel, Bakhada, Ouizert, Bouhanifia, Fergoug, Oued Lekhel, Hammam Grouz et Oued Harbil seront pollués (Remini, 2010). Selon une étude réalisée (Guechmi, 2014), portant sur la pollution dans le bassin versant de l'oued El Hammam, 50% des analyses d'eau de surfaces prélevés sur l'oued El Hammam et ses affluents, montre la présence en quantités importantes de matières organiques non biodégradables, le rapport DCO/DBO₅ varie de 2,7 à 12 mg/l. le degré de pollution calculé par la méthode (IPO), indice de pollution

organique, est fort à très fort. Cette pollution est causée par les rejets d'eaux usées d'origine

10.3. Bilan de l'envasement des barrages étudiés

L'étude quantitative du transport solide revêt une importance considérable pour les barrages. On pourra constater, en analysant la quantité annuelle de solide déposé au barrage, l'évolution dans le temps du dépôt et par voie de conséquence sa durée de vie.

L'établissement des bilans d'envasement repose sur les levés bathymétriques réalisés, et tient compte des volumes d'eau déversés des lachures (Annexe I), et des dévasements.

a) barrage de ouizert

Le barrage d'Ouizert a été mis en eau en 1986, les sondages bathymétriques ont été réalisés en 2000 et en 2004 (Tableau 10.1) ; le temps exact de cet envasement est de 4 ans. Le volume des sédiments déposés est de 3 Mm³, correspondant à un apport solide de 435300 tonnes, aboutissant à une ablation moyenne de 521,64 t/km²/an.

Tableau 10.1 : Levés bathymétriques et bilan d'envasement du barrage d'Ouizert

Années d'observations			Capacités (Mm ³)		
2000			94		
2004			91		
Périodes d'observations	Envasement (Mm ³)	Taux d'envasement (%)	Envasement Moyen annuel (Mm ³)	Taux de comblement (%/an)	Durée de vie du barrage (an)
2000-2004	03	03	0,75	0,75	133

b) Barrage de Bouhanifia

Le barrage de Bouhanifia à été mis en eau en 1940, les sondages bathymétrique ont été réalisées en juillet 1974, novembre 1985, 2004 et en 2011; les temps exacts de cet envasement sont respectivement : 11,3 ,19 et 37 ans. Les capacités observées et envasement correspondants se résument au tableau suivant.

Tableau 10.2: Levés bathymétriques et bilan d'envasement du barrage de Bouhanifia

Années d'observations			Capacités (Mm ³)		
1974			56		
1985			51,64		
2004			38,11		
2011			34,52		
Périodes d'observations	Envasement (Mm ³)	Taux d'envasement (%)	Envasement Moyen annuel (Mm3)	Taux de comblement (%/an)	Durée de vie du barrage (an)
1974-1985	4,36	6	0.38	0.53	188
1985-2004	13,43	18.4	0.70	0.97	103
2004-2011	3,69	5,05	0,52	0,72	139
1974-2004	17,79	24.4	0.58	0.81	123
1974-2011	21,48	29,3	0,57	0,79	127

1) Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia (1974-1985)

Envasement mesure : 4.36 Mm³

Lâchés : 864.937 Mm³d'eau a 0.6 g/l

Soit 51862,2 tonnes représentant : 357658,3 m³

Total des apports solides : 4717658,3 m³ de vase

Soit 6845322,2 tonnes, ce qui donne un taux d'érosion de 112,68 t/km²/an.

2) Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia (1985-2004)

Envasement mesure : 13.43 Mm³

Lâchés : 2107.055Mm³ d'eau à 0.5 g/l

Soit 1053527,5 tonnes représentant 726069,95 m³

Total des apports solides : 14156069,95 m³ de vase

Soit 20540457,5 tonnes, ce qui donne une ablation moyenne de 201,1 t/km²/an

3) Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia (1974-2004)

Envasement mesure : 17.79 Mm³

Lâchés : 2972Mm³ d'eau à 0.6 g/l

Soit 1783200 tonnes représentant 1228945,5 m³

Total des apports solides : 19018945,5 m³ de vase

Soit 27596490 tonnes, ce qui donne un taux d'érosion de 171,11 t/km²/an

4) Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia(2004-2011)

Envasement mesuré : 3.59 Mm³

Lâchés : 173.29 Mm³ d'eau à 0.6 g/l

Soit 103974 tonnes représentant 71656,78 m³

Total d'apport solides : 3661656,78 m³ de vase

Soit 5313063,98 tonnes ; ce qui donne un taux d'érosion de 141,18 t/km²/an

5) Bilan d'envasement au barrage de Bouhanifia(1974-2011)

Envasement mesuré : 21.38 Mm³

Lâchés : 3145.29 Mm³ d'eau à 0.6 g/l

Soit 1887174 tonnes représentant 1300602,34 m³

Total d'apport solides : 22680602,34 m³ de vase

Soit 32909554 tonnes ; ce qui donne un taux d'érosion de 165,44 t/km²/an

6) Bilan d'envasement actuel au barrage de Bouhanifia

Envasement mesuré : 21.38 Mm³ (1974-2011)

Dévasement prévu : 06 Mm³

Le volume de vase sera de 15,38 Mm³, soit un gain de capacité de 8,2%, le taux d'envasement sera de 21,06%, ce qui procure au barrage une durée de vie de 176 ans.

b) Barrage de Fergoug

Le barrage de fergoug a été mis en eau en 1970, les sondages bathymétrique ont été fait en octobre 1973 et en juillet 1983 et 1989, en 1998 et en 2004. Donc, le temps exact de cet envasement est de 15.8, 25 ans et 31 ans. L'envasement est remarquable au niveau de ce barrage (tableau 10.3).

Tableau 10.3: Levés bathymétriques et bilan d'envasement du barrage de Fergoug

Années d'observations			Capacités (m ³)		
1973			12570267		
1983			5536084		
1989			2901235		
1998			3100000		
2004			400000		
Période d'observation	Envasement (m ³)	Taux D'envasement (%)	Envasement moyen annuel (m ³)	Taux de comblement (%/an)	Durée de vie du barrage (an)
1973-1989	9669032	53.71	611964.05	3.4	29
1973-1998	9470267	52.61	378810.68	2.1	48
1973-2004	12170267	67.61	392589.25	2.18	46

1) Bilan d'envasement au barrage de Fergoug (1973-1989)

	Total sur 15.8 ans	Moyenne annuelle
Envasement mesuré :	669032 m ³	611964.04 m ³
Evacuation par les chasses :		400000 m ³
Total des apports solides :		1011964.04 m ³ de vase

Soit 1163758.64 tonne, ce qui donne un taux d'érosion de 1366,4 t/km²/an.

2) Bilan d'envasement au barrage de Fergoug (1973-1998)

	Totale sur 25 ans	Moyenne annuelle
Envasement mesuré :	9470267	378810,68 m ³
Evacuation par les chasses :		400000 m ³
Total des apports solides :		778810,68 m ³ de vase

Soit 895632,28 tonnes, ce qui procure une ablation moyenne de 1051,6 t/km²/an.

3) Bilan d'envasement au barrage de Fergoug (1973-2004)

	Totale sur 31 ans	moyenne annuelle
Envasement mesuré :	12170267	92589,25 m ³
Evacuation par les chasses :		400000 m ³
Total de apport solides :		792589,25 m ³ de vase

Soit 911477,64 tonnes ;ce qui donne un taux d'érosion de 1070,2 t/km²/an

L'établissement des différents bilans pour différentes périodes d'observations a bien montré la gravité de l'état actuel du barrage de fergoug et d'autre part un aperçu sur l'évolution de l'envasement des barrages en amont. Le taux d'envasement le plus élevé est observé pour le barrage de Fergoug. Actuellement, ce dernier enregistre 98%, suivi par Bouhanifia avec 52,71% et Ouizert avec 09%. La perte de capacité annuelle calculée pour des périodes assez longues, donne: 2,86% pour le barrage de Fergoug, 1,03% pour le barrage de Bouhanifia et 0,5% pour celui d'Ouizert. Le faible taux d'envasement enregistré pour ce dernier pourrait être dû à la présence d'une zone d'épandage à son amont ; l'examen de la granulométrie des sédiments déposé sur l'oued Sahouat (tableau 8.1, chapitre VIII) , à 952,03 km en amont du barrage, montre la présence d'une fraction importante de matières solides grossières (graviers et sables) abandonné à cette endroit. Le profil en long de l'oued Sahouat (figure 10.2), permet de localisé cette zone ; il s'agit d'une zone d'épandage, réparti sur une distance de 935,6 m (tableau 10.4), où l'oued présente deux contres pentes de 6% et 4,03% face à une pente intermédiaire de 2,31%.

Ces contres pentes de l'oued agissent avec la sinuosité de l'oued, sur l'écoulement qui se trouve rapidement modifié, ce qui déplace le système de mobilisation de sédiments de tailles plus importantes vers le dépôt.

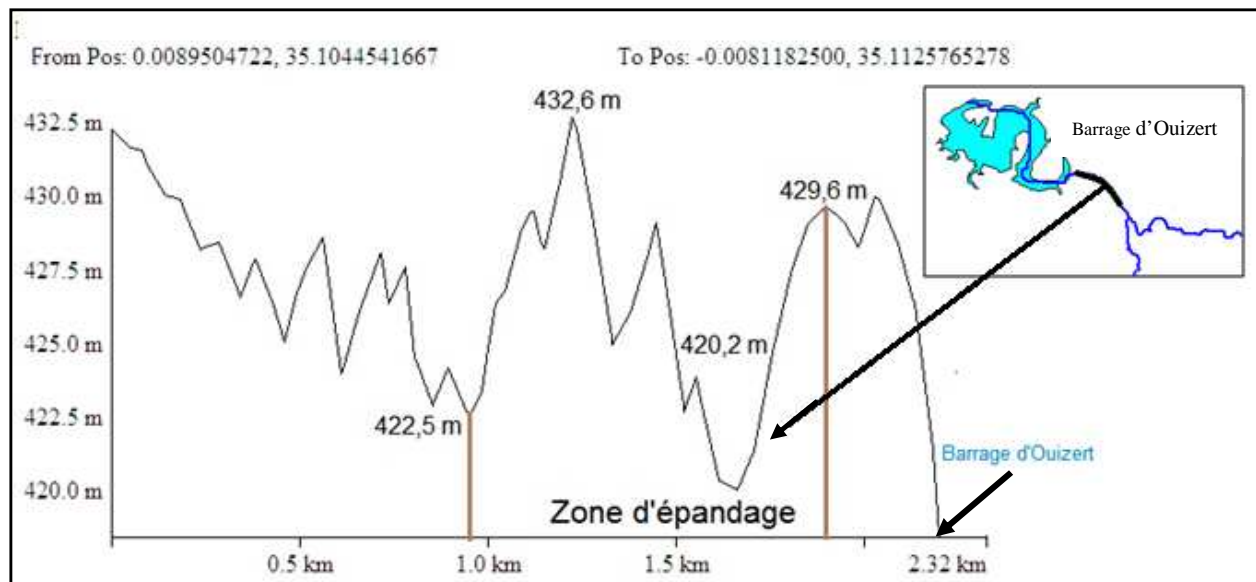


Figure 10.2 : Localisation de la zone d'épandage

Tableau 10.4: Caractéristiques topographiques de la zone d'épandage

Profil en long de la zone d'épandage	Altitude (m)		Distance (m)	Dénivelée (m)	Pente moyenne (%)
	Maximale	Minimale			
Profil 1	432,6	422,5	167,6	10,1	6,02
Profil 2	432,6	420,2	535	12,4	2,31
Profil 3	429,6	420,2	233	9,4	4,03

10.4. Modèles de prévision de l'envasement

Plusieurs auteurs se sont intéressés sur l'élaboration de modèle de prédiction de l'envasement vu la rareté des levés bathymétrique, parmi eux, les formules d'ORTH et de REMINI, qui semblent donner de bons résultats pour les barrages algériens.

c) Formule d'ORTH

Le premier à avoir décrit ce processus fut F.ORTH (1934). Il suppose que la capacité résiduelle varie dans le temps en fonction d'une loi à décroissance exponentielle, c'est-à-dire

qu'après tant d'années d'exploitation, elle est égale à :

$$C_t = C_{Rn}(a^t)$$

C_{Rn} : Capacité initiale

C_t : Capacité résiduelle après t années de service

a : Paramètre propre à chaque retenue

Toute la difficulté réside dans la détermination du paramètre ‘a’. Dans ce but on se propose de résoudre le problème de la façon suivante :

On peut écrire si V_{st} étant le volume envasé après t années.

$$C_t = C_{Rn} - V_{st} = C_{Rn}(a^t)$$

$$V_{st} = C_{Rn}(1 - a^t)$$

Si on suppose que durant la première année d’exploitation $t = 1$, le volume de sédiment accumulé V_{s1} est égal à l’apport solide moyen annuel Q_s on aura :

$$Q_{st} = C_{Rn}(1 - a^t) \quad , \text{ Ce qui entraîne que :}$$

$$a = 1 - \left[\frac{Q_{st}}{C_{Rn}} \right]$$

La formule de prévision devient : $C_t = C_{Rn} \left(1 - \frac{Q_{st}}{C_{Rn}} \right)^t$

d) Formule de REMINI

Le dépouillement des données de plus d’une centaine de levés bathymétriques d’une soixantaine de barrages réparties sur l’ensemble de la région du Maghreb, a permis à Remini (2005), de classer deux catégories d’envasement : faible et fort taux de sédimentation en leur attribuant deux relations :

- **Pour les barrages à fort taux d’envasement :**

$$V/V_0 = 1,6228t^{0,8707}$$

- Pour les barrages à faible taux d'envasement :

$$V/V_0 = 0,2574 t + 0,7472$$

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats de calcul de l'envasement prévisionnel par l'application des deux formules.

Tableau 10.5: Prévision de l'envasement du barrage de Bouhanifia "Formule d'Orth"

Années	Années de service (t)	Capacité observée (Mm ³)	Capacité calculée (Mm ³)	Envasement observé (Mm ³)	Envasement calculé (Mm ³)	Taux d'envasement calculé (%)
1940	0	73	73	0	0	0
1974	34	56	57,78	17	15,22	20,85
1985	45	51,64	54,43	21,36	18,57	25,44
2004	64	38,11	45,18	34,89	27,82	38,11
2011	71	34,52	43	38,48	30	41,10
2020	80		37,48		35,52	48,66
2030	90		34,48		38,52	52,77
2040	100		31,72		41,28	56,55
2060	120		26,85		46,15	63,22
3000	160		19,24		53,76	73,64
3002	162		18,92		54,08	74,08
3003	163		18,76		54,24	74,30
3020	180		16,28		56,72	77,70
3100	260		8,34		64,66	88,58
3200	360		3,63		69,37	95,03
3300	460		1,57		71,43	97,85
3640	800		00		73	100

Tableau 10.6: Prévision de l'envasement du barrage de Bouhanifia "Formule de Remini"

Années	Années de service (t)	Capacité observée (Mm ³)	Envasement observé (Mm ³)	Taux d'envasement observé (%)	Taux d'envasement calculé (%)
1940	0	73	0	0	0
1974	34	56	17	23,28	25,53
1985	45	51,64	21,36	29,26	32,58
2004	64	38,11	34,89	47,79	44,28
2011	71	34,52	38,48	52,71	48,47
2020	80				53,78
2030	90				59,58
2040	100				65,31
2060	120				76,54
3000	160				98,33
3002	162				99,4
3003	163				100

Malgré une bonne corrélation constatée entre les valeurs d'envasement estimées par les deux formules (figure 10.3), on retient les résultats obtenus par la relation de prévision de Remini pour le barrage de Bouhanifia ; ces résultats se rapprochent beaucoup mieux des

mesures de levés bathymétriques que ceux obtenus par la formule d'ORTH (fig 10.4), et elles aboutissent à une durée de vie proche de ceux calculé à partir de mesures d'envasement (163 ans). La formule d'ORTH donne des durées de vie trop exagérées (800 et 1400 ans) pour les deux barrages. Les valeurs observées d'envasement au barrage d'Ouizert sont discordantes avec les valeurs estimées par les formules ; ce qui peut être lié au nombre réduit de levés bathymétriques de ce barrage.

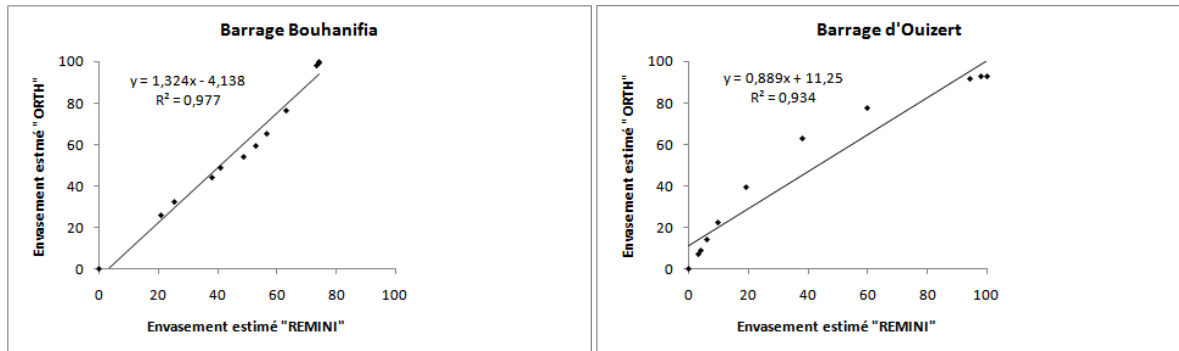


Figure 10.3: Corrélation entre valeurs estimées de l'envasement des barrages

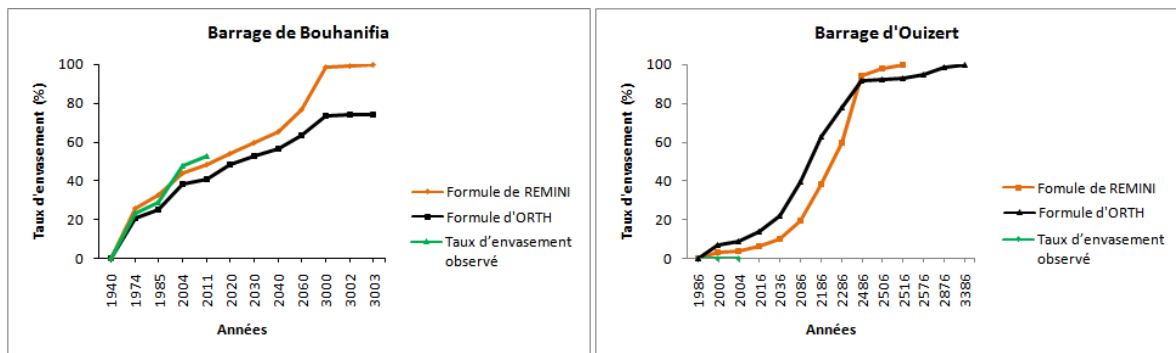


Figure 10.4: Evolution temporelle de l'envasement

Tableau 10.7 : Prévision de l'envasement du barrage d'Ouizert "Formule d'Orth"

Années	Années de service (t)	Capacité observ�e (Mm ³)	Capacité calcul�e (Mm ³)	Envasement observé (Mm ³)	Envasement calculé (Mm ³)
1986	0	100	100	0	0
2000	14	94	93.22	6	6.78
2004	18	91	91.34	9	8.66
2016	30		86.04		13.96
2036	50		77.83		22.17
2086	100		60.57		39.43
2186	200		36,96		63.04
2286	300		22.23		77.77
2486	500		8.15		91.85
2506	520		7,38		92,62
2516	530		7,01		92,99
2576	590		5,2		94,8
2876	890		1,15		98,85
3386	1400		00		100

Tableau 10.8: Prévision de l'envasement du barrage d'Ouizert "Formule de Remini"

Années	Années de service (t)	Capacité observ�e (Mm ³)	Envasement observé (Mm ³)	Taux d'envasement observé (%)	Taux d'envasement calculé (%)
1986	0	100	0	0	0
2000	14	94	6	0,06	3,17
2004	18	91	9	0,09	3,92
2016	30				6,18
2036	50				9,94
2086	100				19,33
2186	200				38,12
2286	300				59,91
2486	500				94,49
2506	520				98,25
2516	530				100

CHAPITRE XI

Impact de l'envasement sur les terres agricoles

11.1. Introduction

La plaine de l'Habra qui s'étend sur une centaine de kilomètres en aval du barrage de Fergoug a subi des dégradations irréversibles suite aux dragages. Les matériaux déposés sans protection adaptée sont resoumis à l'érosion depuis leurs aires de stockage et leur entraînement vers la plaine continue de façon encore plus spectaculaire.

La vase de Fergoug de nature argileuse véhiculée par les eaux d'irrigation et appliquée sur les terres agricoles, produira sans doute les mêmes conséquences que celles des rejets de dévasement. Dans le but d'éclaircir ce point, nous avons entamé un travail au laboratoire qui consiste à introduire des concentrations différentes de matières en suspension, inspirées des lâchés du barrage sur ces dits sols, dans le but de dégager une éventuelle relation existante entre la charge en sédiments de l'eau d'irrigation et la perméabilité des sols.

11.2. Situation géographique de la plaine de l'Habra

La plaine de l'Habra est une dépression sublittorale de l'Oranie localisé dans la région Nord-Ouest Algérienne. Elle s'étend sur 139,1 Km² environ .Elle est située entre 0° 07' 47" Ouest et 0° 07' 37" Est de longitude et entre 35° 32' 56" et 35° 42' 05" de latitude Nord. Délimitée, au Nord par les marais de la Macta, au Sud par les flancs de montagne de Béni chougrane, à l'Ouest par oued Habra et à l'Est par Oued Mellah (figure 11.1).

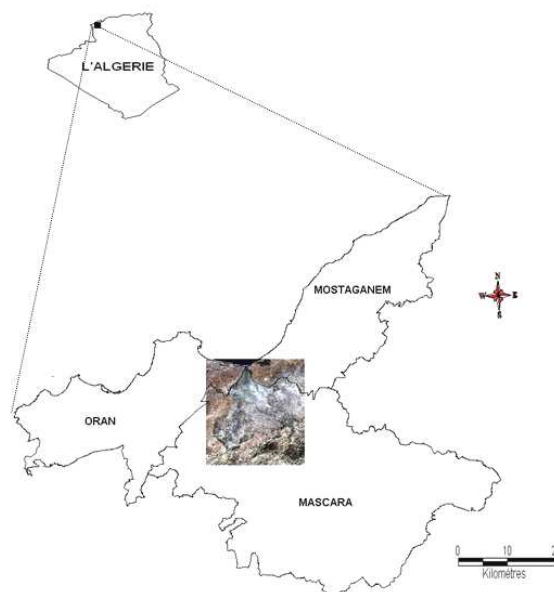


Figure 11.1: Situation géographique de la plaine de l'Habra

11.3. Caractéristiques de la plaine de l'Habra :

La plaine de l'Habra, appelée aussi plaine de Mohammadia, est une zone d'une surface totale de 36500 Ha, qui regroupe une partie des terres riches cultivées et une autre partie propre à la culture mais réservée aux parcours pour le cheptel.

La climatologie de la zone, favorable aux agrumes, a conduit hâtivement les colons pour s'y installer dans cette zone et à planter près de 60% de la surface irriguée du périmètre dénommant ainsi la zone "plaine des agrumes". Les agrumes de Mohammadia, qui fournissaient une production avoisinant le million de quintaux pendant les premières années de l'indépendance et dont un grand volume était exporté, constituaient pour le pays une source de rentrée de devises non négligeable et financeraient, en partie, le développement de l'agriculture. La superficie irriguée qui était de 19600 Ha depuis plusieurs années, ne dépassant pas actuellement 5454 Ha. Cette réduction de superficie est principalement dû, d'une part, à la rareté de l'eau agricole suite à de longue période de sécheresse et d'autre part à l'envasement du barrage de Fergoug en amont.

11.4. Données

Le sol échantillonné est limono-sableux, de faible salinité, perméable avec une porosité atteignant les 50 %. L'eau d'irrigation de la plaine est celle fourni par les lâchés du barrage de Fergoug. La vase de ce dernier, de texture argileuse, est à l'origine des matières en suspension transportées. La charge de ces dernières (tableau 11.1), varie d'un minimum de 26 mg/l, d'une moyenne de 192 mg/l et d'un maximum de 2463 mg/l. ces concentrations sont inspirées des lâchés réalisés durant trois années successives (2005-2008).

Tableau 11.1: Valeurs de matières en suspension de l'eau du Barrage de Fergoug

	janv	févr	mars	Avr	mai	juin	Juil	août	sept	oct	nov	déc
Matières en suspension (mg/l)	130	182	223	550	62	174	122	60	130	26	62	258
	147	2463	187	118	174	226	86	38	97	101	66	62
	238	94	154	190	846	50	42	54	26	102	207	87
	94	238	274	34	54	42	58	46	/	62	/	78

11.5. Matériels et méthodes

Les échantillons de sols à structures conservés sont d'abord séchés et saturé d'eau au laboratoire. La perméabilité est déterminée d'après la quantité d'eau s'écoulant par unité de temps, on travaillant sous charge constante. . Le calcul du coefficient de perméabilité (K) se fait par la formule de Darcy :

$$Q = KS(H/L)$$

$$Q = KS \quad \text{Avec : } Q = (V/T)$$

$$\text{Donc : } K = S(V/T)$$

Q : débit en cm^3/s

K : coefficient de perméabilité en cm/heure

V : volume en cm^3 ou en ml d'eau recueillie pendant une heure

T : temps en heures

S : section intérieure du tube en cm^2

Une fois le coefficient de perméabilité est calculé, la perméabilité du sol est classée selon le tableau ci-dessous. Le test de perméabilité à l'eau distillé révèle que le sol étudié est perméable ($K= 3,6 \text{ cm}/\text{heure}$).

Tableau 11.2: Valeurs de K pour différents sols (charge constante)

Sols imperméables	— de 0,4 cm/heure
Sols peu perméables	de 0,4 à 2 cm/heure
Sols perméables	de 2 à 20 cm/heure
Sols très perméables	+ de 20 cm/heure

(Duchaufour, 1970)

11.6. Résultats et discussions

a) Relation entre la perméabilité et le nombre d'irrigation

Les différentes concentrations en matières en suspension variant de 26 à 8000mg/l, sont mélangés à l'eau et appliquées au sol pour plusieurs fois (8fois) . Les résultats obtenus (tableau 11.3), montre l'existence d'une corrélation significative qui lie la perméabilité avec le nombre d'irrigation et la concentration en matières en suspension.

Tableau 11.3: Corrélation entre la perméabilité et le nombre d'irrigation

MES (mg/l)	Droite d'ajustement	Coefficient de corrélation "R"
26	$Y=-0.1126X+4.0493$	0.95
192	$Y=-0.1867X+3.9875$	0.99
500	$Y=-0.2943X+3.7367$	0.98
700	$Y=-0.2146X+3.2193$	0.95
2000	$Y=-0.3317X+2.9727$	0.94
2463	$Y=-0.2938X+2.6371$	0.95
4000	$Y=-0.3531X+2.5327$	0.91
6000	$Y=-0.3837X+2.6447$	0.95
8000	$Y=-0.2040X+1.5073$	0.92

Plus on irrigue, plus la perméabilité diminue (figure 11.2). Cette dernière diminue avec l'augmentation de la concentration et du nombre d'irrigation. Le sol devient peu perméable lorsque la concentration en matières en suspension se situe entre 500mg/l et 6000 mg/l, et pratiquement imperméable pour des concentrations supérieures à 8000mg/l (photos 4).

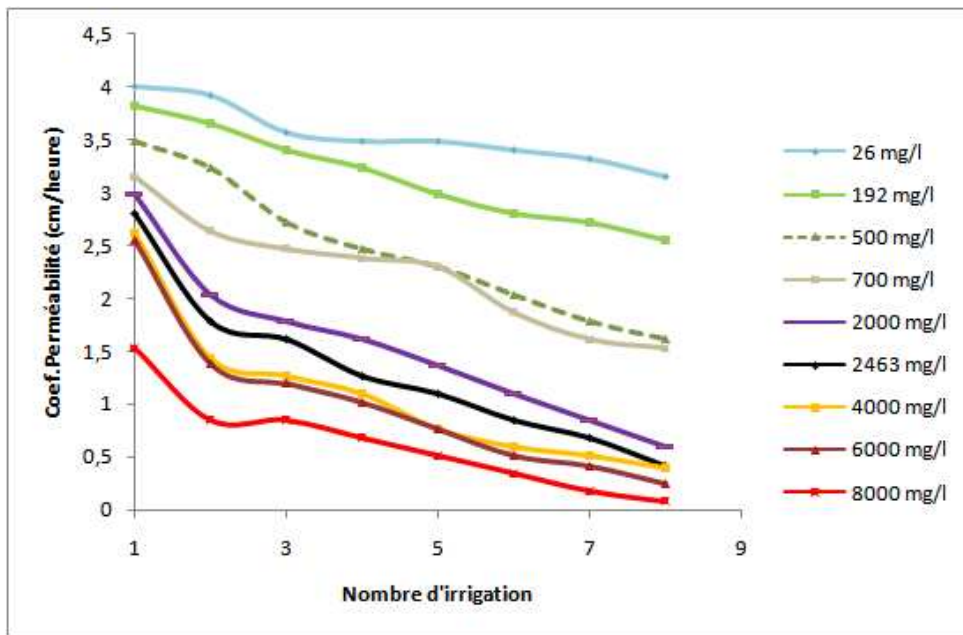


Figure 11.2: Relation entre la perméabilité du sol et le nombre d'irrigation

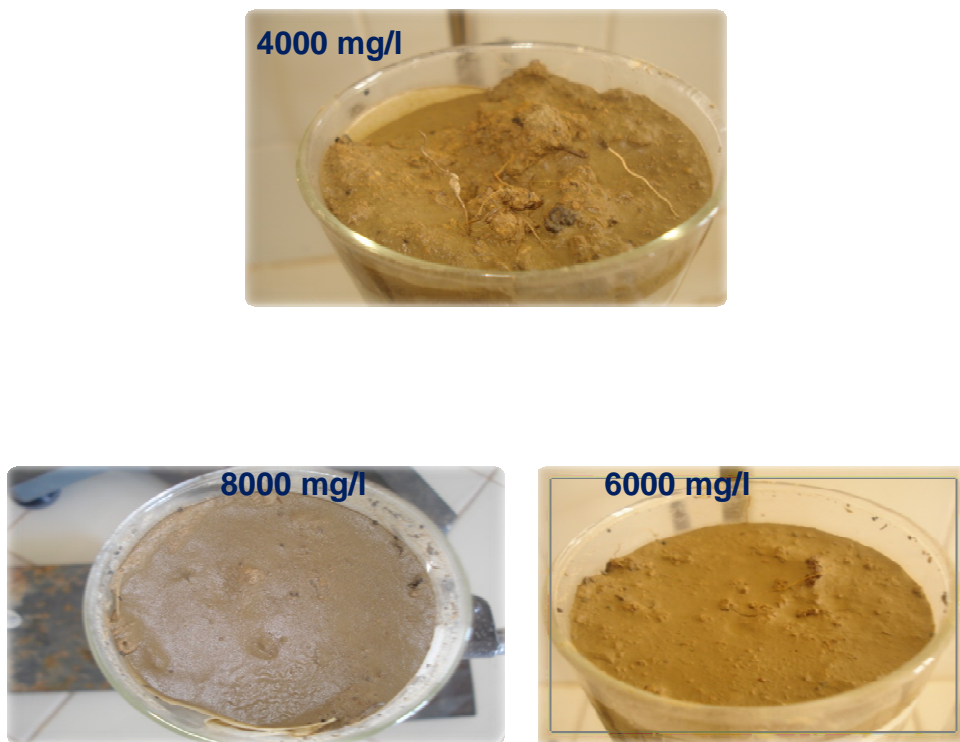


Photo 4 : Effet de l'eau chargée en matières en suspension sur l'état du sol

A partir de ces relations, connaissant la concentration en matières en suspension de l'eau d'irrigation, on peut déduire le nombre d'arrosage qui provoque l'imperméabilisation de la terre. L'application de ces relation au site étudié est un peu délicat, vu la variation importante des matières en suspension de l'eau d'une année à une autre et d'un mois à l'autre (figure 11.3)

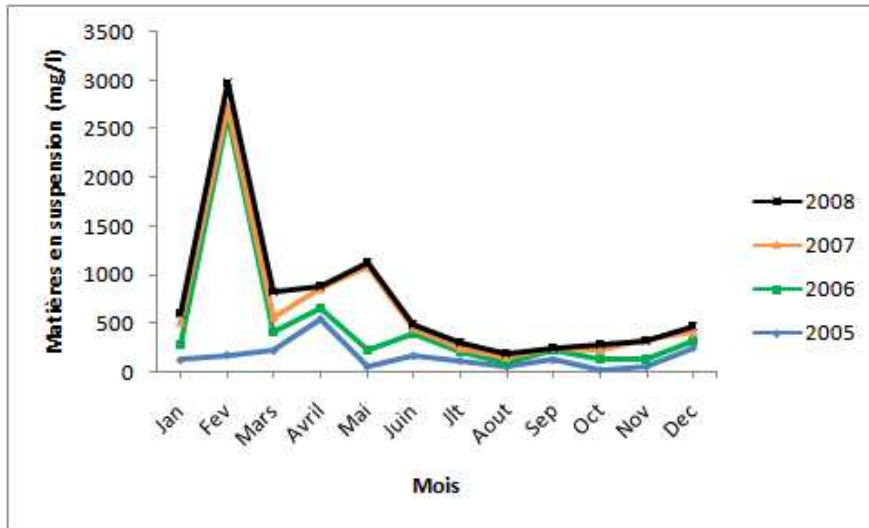


Figure 11.3: Variations interannuelles des matières en suspension

Le calcul du nombre d'irrigation basé sur le tour d'arrosage au niveau de La plaine de l'Habra qui est limité à une moyenne de six irrigations par année, de Mai à Octobre, permet d'estimer le temps probable à partir duquel l'imperméabilisation s'annonce ; ce temps est respectivement de : 06 années pour la charge en suspension minimale (26 mg/l), 04 années pour la charge en suspension moyenne (192 mg/l), et d'une année et demi environ pour la concentration maximale de la charge (2463 mg/l). Ces résultats obtenus donnent un ordre de grandeur seulement, puisque en réalité les sols subissent un labour d'hiver qui permet d'améliorer l'état structural par accroissement de la porosité et fragmentation des volumes du sol tassés. La validation de ces corrélations suppose un suivi permanent et continu de la mesure de la perméabilité au niveau de la parcelle (in situ).

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, mené sur le bassin versant de l'Oued El Hammam, aux nuances climatiques variées, nous avons essayé de dégager les grands traits de son fonctionnement en se basant sur l'analyse de données morphologiques, pluviométriques, hydrologiques et transport solide observées.

Les trois sous bassins composant le bassin versant de l'oued El Hammam sont plus au moins allongés et assez bien drainés, les temps de concentration varient selon la taille, le relief et la densité de drainage de 09h33 à 14h59. Le relief est assez fort à fort, car la plupart des cours d'eau prennent leurs sources à des altitudes assez importantes. Les céréales occupent (58 %) de la surface totale du bassin versant ; cultures couvrant le sol saisonnièrement et le laissant nu pendant la plus grande partie de l'année, le couvert végétal considéré protecteur ne représente que 8% de superficie. Les dolomies et calcaires dolomitiques occupent presque la totalité de la superficie du bassin d'Ouizert, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface. Ces formations perméables sont à considérer aussi dans le bassin de Bouhanifia. Le bassin de Fergoug se distingue par 76% d'argiles et schistes ; formations plus facilement érodables.

Les séries pluviométriques des 27 stations utilisées pour le calcul des bilans hydrologiques, correspondent à des périodes de faible pluviosité, La pluie moyenne annuelle calculée sur une période de 26ans (1979-2005) est de 283 mm. Le régime pluviométrique dans le bassin de l'Oued El Hammam montre une irrégularité aussi bien spatiale que temporelle, ainsi la variabilité interannuelle des pluies ($0,26 < C_v < 0,32$) est assez faible dans l'ensemble, par rapport à la variabilité des précipitations mensuelles, qui s'exprime parfois par un coefficient de variation 13 fois plus élevé. La forte dispersion est essentiellement présente pendant la saison estivale ($1,43 < C_v < 3,66$). De cette variation mensuelle et saisonnière, deux périodes distinctes se dégagent: une période sèche qui correspond à la saison d'été (juin, juillet, août), caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué. et une période humide qui correspond au reste de l'année. L'organisation des saisons n'est pas homogène dans la région d'étude, mais en moyenne, le maximum saisonnier se situe en hiver (91,95 mm). L'évapotranspiration est importante dans ce bassin, dû à des températures élevées pouvant atteindre parfois les 42°C.

La variation interannuelle des débits moyens, est plus importante à celle des précipitations, ($0,39 < C_v < 0,77$) et est extrêmement variable à l'échelle mensuel ($0,53 < C_v < 2,16$). Contrairement aux précipitation, cette forte variabilité de l'écoulement concerne d'une part, la période de saison froide qui s'explique par l'importance et la fréquence des crues en

CONCLUSION GENERALE

cette saison, et d'autre part la période chaude qui peut être justifié par l'alimentation souterraine et l'apport liquide des lâchés des barrages aux oueds. Le calcul des bilans inter annuels ont fait ressortir la faiblesse du coefficient d'écoulement, notamment au niveau des bassins d'Ouizert (5,88%) et de Bouhanifia (5,39%) et au contraire, l'importance du coefficient d'écoulement au niveau du Fergoug (24,81%) serait due à sa taille plus réduite, son relief accidenté et sa lithologie imperméable. Pour l'ensemble du bassin de l'oued El Hammam, un déficit d'écoulement de près de 94% est constatée.

L'étude des crues, a mis successivement en évidence : le caractère torrentiel des crues, lié principalement à la forte intensité des précipitations, leur mécanisme de propagation et enfin leur répartition fréquentielle régie par les lois de Galton.

Dans le bassin versant de l'oued El Hammam, les pentes faibles et moyenne occupent 96% de superficies, et sont concentrés dans le bassin d'Ouizert et Bouhanifia, le reste, qui est de 4 % de surface, est réservé aux fortes pentes réparties dans différentes endroits du bassin de l'oued El Hammam, mais fortement concentrés pour le bassin de Fergoug. La cartographie des zones à l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued El Hammam a permit de distinguer trois classes de sensibilité. La classe faible et moyenne occupent 91% de la surface totale. Ces niveaux de sensibilité sont dus aux pentes faibles et moyennes dominant le bassin étudié et intéressent particulièrement, le bassin d'Ouizert et de Bouhanifia. La classe des sols fortement sensibles à l'érosion affecte légèrement ces deux derniers et fortement le bassin de Fergoug. La sensibilité à l'érosion de la région d'étude est essentiellement contrôlée par le degré de pente et la densité du couvert végétal. Quant à l'influence de la friabilité sur l'érosion est déclenchée par l'action humaine suite aux pratiques agricoles sur les terrains à fortes pentes.

Avant d'aborder la quantification des transports solides, nous sommes intéressé sur la détermination de la granulométrie des sédiments véhiculés par les principaux oueds, et piégés au niveau des retenues. Nous avons aussi relevé quelques caractéristiques topographiques de ces oueds. Les résultats obtenus, révèle : la possibilité d'existence d'une zone d'épandage à l'amont du barrage d'Ouizert, accumulant l'essentiel de sédiments grossier. Pour le barrage de Bouhanifia, l'oued Hounet et Fekan sont probablement, potentiellement responsable de l'envasement de ce barrage. Quant au barrage de Fergoug, la finesse de sa vase traduit la dynamique érosive de son bassin versant, les lâchés d'eau réalisés à partir du barrage de Bouhanifia, à sédiments de texture grossière, participe peu à l'envasement du Fergoug.

CONCLUSION GENERALE

Le calcul des différentes valeurs des paramètres de l'écoulement liquide et du transport solide fait ressortir que, l'action érosive est différente d'un bassin à l'autre. La dégradation spécifique moyenne varie entre 139,79 t/km²/an pour le bassin de Bouhanifia et 810,14 t/km²/an pour le bassin de Fergoug. Pour l'oued Taria, oued Saida et oued Sahouat appartenant au bassin d'Ouizert, elle est respectivement de 253,08 ; 494,22 et 713,08 t/km²/an. Ces taux d'érosion différents, révèlent une disparité spatiale qui résulte principalement de la différence de la lithologie, du couvert végétal, de la pente et de la taille des bassins versants ; le bassin de Fergoug semble le plus touché par ce phénomène. A cette variabilité spatiale s'ajoute la variabilité temporelle aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle. La variabilité interannuelle de ce phénomène est frappante, ainsi on passe de 28,56 à 2059,24 t/km²/an pour l'oued Sahouat, de 0,04 à 1528 t/km²/an pour l'oued Saida, de 12 à 710 t/km²/an pour l'oued Taria, de 1 à 1006 t/km²/an pour le bassin de Bouhanifia et de 21 à 2865 t/km²/an pour le Fergoug. A l'échelle saisonnière, c'est à l'automne que se produit le maximum du transport solide pour l'ensemble des bassins. En deuxième position, on trouve le printemps pour l'oued Saida et le bassin de Bouhanifia, l'hiver pour l'oued Taria et le bassin de Fergoug, l'été pour l'oued Sahouat. Toutefois pour l'oued Sahouat, nous pensons que l'importance des transports en été est due à des orages d'été exceptionnels. Pour l'oued Taria et le bassin versant de Bouhanifia, les valeurs de dégradation moyenne trouvées, sont proches de ceux estimés respectivement à 236 t/km²/an par Cherif (2012) et à 125 t/km²/an par Regagba (2010).

En ce qui concerne la modélisation débit liquide-débit solide, La relation liant les débits solides en suspension au débit liquide pour nos trois bassins est de type puissance. La bonne relation trouvée est réservée pour le bassin d'Ouizert à oued Saida ($R= 0,94$) ; alors qu'à oued Sahouat et au bassin de Bouhanifia , les corrélations obtenues sont plus au moins significatives et varient dans l'intervalle (0.78–0.77). Les valeurs des paramètres a et b de la relation puissance varient peu d'un bassin à l'autre. Pour le paramètre a, il varie de 0,31 à 5,03. L'exposant b varie de 1,38 à 2,12. Ces valeurs sont proches de celles trouvées à oued Mekker (Cherif et al. 2015) et à oued Sebdou (Ghenim et al. 2013). A l'échelle saisonnière, le modèle puissance est retenu pour les deux bassins (Ouizert et Fergoug). Pour le Bouhanifia, c'est le modèle polynomiale qui semble le plus représentatif.

Les modèles saisonniers à oued Sahouat, donnent pour l'automne et l'été des valeurs de a et b proches de celle du modèle instantané. Les crues estivales très importantes traduisent les valeurs élevées de l'exposant b. L'oued Saida dont l'activité érosive est assez importante

CONCLUSION GENERALE

présente les meilleures corrélations entre débits solides-débits liquides. Le modèle d'automne et printemps, donnent des valeurs de a et b, proches de celle du modèle annuel. Les valeurs de l'exposant b sont plus élevées et dépassent 2, expliquant l'importance de la dynamique érosive pendant les quatre saisons. À oued Taria, les meilleurs coefficients de détermination se présentent en automne et en printemps, ils sont respectivement de 0,92 et 0,91. Le facteur a est élevé, tandis que l'exposant b est relativement faible, cela s'explique par le fait que l'action érosive se trouve diminuée par rapport aux écoulement abondants.

A trois rivières, les couples de valeurs (débit solide-débit liquide) obéi à deux types de relations : relation puissance et polynomiale .la relation de puissance est plus au moins significative, les coefficients de détermination obtenus sont compris entre 0,71 et 0,79. L'exposant b lui aussi est faible traduisant une action érosive moins importante, le paramètre a est élevé pour les saisons d'automne et d'été, traduisant un degré de saturation du sol important, qui abouti alors à de faible apports solides pour un écoulement abondant.

La relation polynomiale donne les meilleurs coefficients de corrélation, les saisons d'automne et d'été touchent les valeurs de 0,94 et 0,99. Pour ce bassin, les crues d'automne charrient 54% de l'apport annuel. Les crues du mois d'aout sont aussi fréquentes à la station de trois rivières. A Hacine, C'est en printemps ou la relation débit solide-débit liquide obtenu est plus au moins significative , malgré la faiblesse des apports solides, l'exposant b en cette saison augmente pour atteindre la valeur de 0,97, cela dénote qu'à de forts débits liquides sont associés de faibles débits solides. La valeur du facteur a le plus élevé (15) est enregistré pour l'automne. Ceci peut expliquer l'importance de la dynamique érosive en cette saison, sachant que cette dernière charrie 76% de l'apport solide annuel.

L'analyse de l'évolution des concentrations en fonction des débits liquides durant les crues, montre que la réponse des concentrations aux débits suit quatre modèles (simple, boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et forme en huit). Le modèle en courbe simple est le plus fréquent pour les bassins d'Ouizert et Bouhanifia, traduisant une action érosive instantanée et un transport des sédiments en suspension rapide provoqués par des averses courtes et violentes sur des sols généralement secs, fragiles et peu protégés. Le mdèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre, caractérisant les petits bassins, est fréquent pour le bassin de Fergoug.

Les résultats de l'application des eaux chargées de différentes concentration en matières solide sur les sols de la plaine de l'Habra au laboratoire, montre l'existence d'une

CONCLUSION GENERALE

bonne corrélation entre la perméabilité des terres, le nombre d'irrigation et la concentration en matières en suspension.

En ce qui concerne le devenir des barrages de la triplex, des projets de développement de ce bassin versant sont en perspective. Un périmètre d'irrigation, situé entre la commune d'Oued Taria et celle d'Aïn Fekan, est en cours de réalisation dans la plaine de Ghriss, qui recèle des terres les plus fertiles de la wilaya. Le transfert des eaux se fera à partir du barrage d'Ouizert et, Les travaux portent sur la réalisation d'une conduite de transfert des eaux du barrage Ouizert (commune de Oued Taria) vers deux grands réservoirs de 20 000 mètres cubes chacun sur une distance de 24 kilomètres, dans la commune de Tizi qui assureront l'irrigation de 5158 hectares de terres agricoles répartis sur six communes et consacrées à la production de fruits et légumes.

Une opération de désenvasement de 6 millions mètres cubes de vase du barrage de Bouhanifia, est lancé en juin 2013. 8000 mètres cubes de vase seront évacués par jour. La nouvelle technique, adoptée pour ce projet consiste à décharger la boue dans 15 bassins réalisés sur une superficie de 200 hectares en amont du barrage, L'eau utilisée dans cette opération est de nouveau réinjectée dans le barrage au lieu d'être déversée dans l'oued et se perdre. Le volume de cette eau équivaut à trois fois celui de la vase, ce qui permettra la récupération de 18 millions de mètres cube.

Pour subvenir aux besoins en eau agricoles que le barrage de Fergoug est loin de les satisfaire, un projet de réalisation d'une conduite de transfert des eaux du barrage de Bouhanifia vers la retenue de Fergoug est lancé, ce qui confortera l'irrigation du périmètre de l'Habra. Le réaménagement du périmètre irrigué de la plaine Habra permettra de fournir de l'eau d'irrigation à 9971 hectares réservés à l'agrumiculture.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- ACHITE M. 2002.** Approche statistique d'évaluation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina (Nord ouest algérien). *Watmed, Tunisia*. 10-13 oct. Vol2.p.894-899.
- ACHITE A., REZAK S., BENBOUALI A. 2003.** Contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigation en zone semi aride cas des eaux souterraines de la nappe superficielle de la plaine de ghriss (wilaya de Mascara). afeid.montpellier.cemagref.fr
- ACHITE M., MEDDI M. 2004.** Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*. Vol. 15. N° 4. p. 367-373.
- ACHITE M., MEDDI M. 2005.** Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (nord-ouest algérien). *Revue des sciences de l'eau*. Vol. 18. N° spéciale. p. 37-56.
- ACHITE M., OULLON S. 2007.** Suspended sediment transport in semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). *Journal of Hydrology*. Vol. 343. p. 187-202.
- AMMARI A.2012.** Vulnérabilité à l'Envasement des Barrages (cas du bassin Hydrographique des Côtiers Algérois).Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra.pp.172.
- ARNBORG L., WALKER H.J., PEIPPO J. 1967.** Suspended load in the Colville River, Alaska,1962 in : *Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events*.
- AUGIER C. 1967.** Quelques elements essentiels de la couverture sédimentaire des hauts plateau.Pub.Serv.Carte.Geol.Algérie.N°série.34 .p.47-80.
- ASSELMAN N.E.M. 2000.** Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234 (3-4).p. 228-248
- BATTALA R.J. 1994.** Temporal variability of suspended sediment transport in Mediterranean sandygravel-bed river. In: *Suspended sediment transport in flash floods of the semiarid northern Negev,Israel*. (ed.by Alexandrov Y., Laronne J.B.). IAHS pub. N°.278.-2003.p. 346-352.
- BATTALA R.J., SALA M. 1992.**Temporal variability of suspended sediment in a Mediterraneanriver. *International conference Canberra, Australia, IAHS Publication 224*.p. 229-305.
- BELLEUDY, P., VALETTE A., GRAFF B. 2009.** Passive hydrophone monitoring of bedload in River beds: first trials and exploration: USGS. *Scientific Investigations Report*.
- BENBLIDIA, M., SALEMN A. et DEMMAK A. 2001.** Extraction des sédiments dans les retenues. *La Houille Blanche*. Vol. 6. N°7. p. 76-78.

Références bibliographiques

- BENBLIDIA, M., SALEMN A. et DEMMAK A. 2001.** Extraction des sédiments dans les retenues. La Houille Blanche. Vol. 6. N°7. p. 76-78.
- BENCHETRIT M. 1972.** L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement de l'Algérie. Paris. PUF. pp.216.
- BENFFATTA H ; REMINI B. 2008.** Les fuites d'eau à travers le barrage Algérien de Ouizert. Sécheresse. 19. p.185-192.
- BENKHALED A., REMINI B. 2003.** Analyse de la relation de puissance : débit solide-débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). Revue Sciences de l'eau. Vol. 16. N° 3. p. 333-356.
- BENKHALED A., REMINI B. 2003.** Temporal variability of sediment concentration and hysteresis in the Wadi Wahrane basin. Algéria. Hydrological Science Journal. N° 48 (2). p. 243-255.
- BOIFFIN J.1984.** La dégradation structurelle des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de Docteur ingénieur. INA – PG. France. pp.320.
- BONN F. 1998.** La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG possibilités, erreurs et limites. Sécheresse. N° 3.Vol. 9.p. 185-192.
- BOUANANI A, 2005.** Hydrologie, Transport solide et modélisation Étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie).Thèse de doctorat d'état. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. pp.249.
- BOUCHETATA A., BOUCHETATA T. 2006.** Propositions d'aménagement du sous bassin versant de Fergoug (Algérie) fragilisé par des épisodes de sécheresse et soumis à l'érosion hydrique. Sécheresse.Vol.17 (3). p. 415-424.
- BOUKHEIR R., CERDAN O., ABDALLAH C. 2006.** Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. Geomorphology. Vol. 82. p. 347–359.
- BOUKHEIR R., GIRARD M.-C., KHAWLIE M. ABDALLAH C. 2001.** Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens : une revue bibliographique. Etude et gestion des sols. Vol. 8. N° 4. p. 231-245.
- BOUROUBA M. 1993.** Bilan de l'érosion des bassins versants de l'Algérie Orientale. In TIGR. N° 85-86. p. 15-24.
- BOUTELDJA N. 2005.** Contribution à la modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Hodna sous bassins versants du Ksob et de Soubella (Algérie). Thèse de doctorat en Géographie. Université de la Provence Aix-Marseille. France.

Références bibliographiques

- CAPOLINI J. 1967a.** Étude géomorphologiques des conditions d'envasement du port de Ghazouet. Etude SES 1013/DH2. Alger.pp.16.
- CAPOLINI J., PIENS S., RAMANA R. 1969.** Bassin versant du Cheliff : Oued Rhiou, Sly, Fodda, Deurdeur, Zeddine, Ebda : prévision des apports des crues et des débits solides. Étude SES 13/12/DH2. Alger. pp.41p.
- CAPOLINI J.1967b.** Bassin versant de l'oued Fodda "Carte de sensibilité à l'érosion". Etude SES. Alger. pp.6.
- CHADI A., HADJI T.1992.** Erosion des sols et envasement des barrages. Revue Algérie-équipement N°5.p. 10-13.
- CHAKROUN H. 1993.** Intégration d'un modèle hydrologique conçu pour la télédétection d'un modèle de perte du sol dans un SIG département de géographie et télédétection, université de Sherbrooke 39 p.
- CHERIF EL., ERRIH M., MADANI H. 2009.** Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne. Hydrological Sciences Journal. Vol. 54. Issue 2.p.338-348.
- COSANDEY C. ROBINSON M. 2000.** Hydrologie continentale. Armand Colin.Collection U. Géographie. Paris.
- DEGOUTTE G.2004.**Hydraulique, morphologie et dynamique fluviale. Hydraulique à surface libre. Formation GREF1.
- DALLONI M.1924.** Note préliminaire sur les terrains crétaqués des monts de la mina et du massif du Beni chougrane (Tell oranais).Service carte.Geol. de l'algérie.Bull.Fasc.1.
- DELOYE R. 1958.** La conservation de la fertilité des sols Coll. Techniques agricoles méditerranéennes.Université de Californie.pp.167.
- DEMMAK A. 1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie. Thèse de docteur ingénieur. Paris.Univ.Pierre et Marie Curie pp.323.
- DEMMAK A., OUAAR M., GUEDJTAL A. 1991.** Quantification de l'érosion à l'exutoire de micro-bassins en zone semi-aride. Utilisation de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris. p. 179-188
- EINSTEIN H.A 1950.** The bed load function for sediment transportation in open channel flows. Technical Bulletin 1026. USDA.
- EL MAHI A. 2012.** Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord) Hydrological Sciences Journal. 57:8.p.1642-1661

Références bibliographiques

- ELOUSSI A. 2004.** Impact des changements climatique sur la régionalisation pluviométrique pour le bassin de la Macta. Thèse de magistère. Centre universitaire de Mascara.
- FENN C.R., GURNELL A.M., BEECROFT I.R. 1985.**An evaluation of the use of suspended sediment rating curves for the prediction of suspended sediment concentration in a proglacial stream. *Geografiska annaler (A)* 67(1-2).p.71-82.
- FOURNIER F. 1960.** Climat et érosion. Presse Universitaire de France. Paris. France
- FOURNIER F. 1967.** La recherche en érosion et conservation des sols dans le continent africain. *Sols Africains*. London. XII. 1. p. 5-51.
- FRECAULT F. 1971.** La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et la dynamique fluviales en milieu tempéré océanique. Thèse de doctorat.Brest. Reprod. Univ. Lille III. pp.840
- GAUTIER H. 1938.**Observation hydrogéologique sur la plaine de Pérrégaux.*Bull.Serv.Carte.Gel.Algérie.3° série.4° fasc.*Alger.
- GE.O.R.E .2001.**Gestion optimale des ressources en eau. Projet GE.O.R.E. Coopération Allemande au Développement. Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques.Ministère de l'Agriculture.Coopération Technique Tuniso-allemande.
- GHENIM A ., MEGNOUNIF A. 2013.**Estimation de la précision de la relation en puissance reliant la concentration au débit liquide. *Rev. Nature et Technologie.C- Sciences de l'Environnement*. N° 09.Juin 2013. p.54- 60
- GHENIM A., TERFOUS A., SEDDINI A. 2007.** Étude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes : cas du bassin-versant de l'oued Sebdou (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*. Vol. 18. N°1. p. 39-44.
- GLIZ M., REMINI B. 2011.** Impact de l'irrigation avec des eaux chargées en matières en suspension sur la perméabilité du sol (cas de la plaine de l'Habra). Communication. Colloque international sur l'eau et développement durable. Le 22 et 23 février. Alger.
- GOMER D.1992.** Ecoulement et érosion dans des bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen. Eschborn (Allemagne) : GTZ-ANRH. 207 p.
- GRECO J. 1966.** L'érosion, la défense et la restauration des sols, et le reboisement en Algérie. Min. Agri. Ref. Agr. Alger. pp.303.
- GUECHEMI N. 2014.**Cartographie de degré de pollution organique des eaux de l'oued El Hammam (aptitude à l'irrigation).Mémoire de master. Université de Mascara.
- GUETARNI A.1990.** Brochure technique du barrage de Fergoug. Ing.Chef de projet de dévasement du barrage de Fergoug.

Références bibliographiques

HASBAIA M., HEDJAZI A., BENAYADA L. 2012. Variabilité de l'érosion hydrique dans le bassin du Hodna: cas du sous-bassin versant de l'oued Elham. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.1.p.28-32.

HASBAIA M., BENAYADA L., BOURNANE A. 2010. Estimation and analysis of suspended sediment transport in an interior semi-arid watershed of Algeria, case of wadi Soubella in Hodna basin. Congrès Water: Hydrology, Hydraulics and Water Resources in an Uncertain Environment. Quebec City. July 5-7. Canada.

HEDDADJ D.1997. La lutte contre l'érosion en Algérie : Bull. Réseau érosion.17.p.168-175.

HERNANDEZ M., MILLER S.N., GOODRICH D.C., GOFF B.F., KEPNER W.G., EDMONDS C.M., JONES K.B.2000. Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. Environmental Monitoring and Assessment.64. p.285-298.

HEUSCH B., MILLIERES-LACROIX A. 1971. Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. Application au Maghreb. Mines et Géologie (Rabat).Vol.33.p.21-39.

Jansson M.B. 1996. Estimating of sediment rating curve of the Reventazon river at Polomo using loggest mean loads within discharges classes. Journal of Hydrology. 183.p.227-241.

KELLER P., BOUCHARD JP.1989. Etude bibliographique de l'alluvionnement des retenues par les sédiments fins. Rapport interne edf.E43/D46.

KHALDI A.2005. Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida». Thèse de doctorat. Université d'Oran.pp.230.

KOUTI A.1985. Approche de la dynamique actuelle dans un bassin versant du tell oranais : cas du bassin d'Oued Fergoug (Benichougrane). Thèse de doctorat 3^{ème} cycle.Paris.pp. 150.

KUNG S.Y ., CHIANG T.C. 1977. Soil erosion and its control in small gully watersheds in the rolling loess area on the middle reaches of the Yellow River.Peking.pp.21.

LARRAS J.1992.Hydraulique et granulats. Collection du centre de recherches et d'essais de Chatton.Edition Eyrolles.

Le BISSONNAIS Y. 1988. Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous la pluie. Thèse Université Orléans/INRA. pp.220.

LEOPOLD LB. MADDOCK T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implication. Professional paper 252. U.S.Geol.Surv.pp.57

LUCAS G. 1952. Bordure nord des Hautes Plaines dans l'Algerie occidentale. 19 e congr. Geol. Inter. Alger, Mon.reg. Ser. 1 : Algerie.N° 21. pp.139.

Références bibliographiques

MAHE V. 2010. La morphologie des cours d'eau. Union national. Revue les cahiers de l'eau. N°3. PARIS. p.4-23.

MAZOUR M., ROOSE E., 2002. Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du Nord-ouest de l'Algérie. Bull. Réseau Erosion 21.p.320 - 330.

MEDDI M., MORSLI B. 2001. Etude de l'érosion et du ruissellement sur bassins-versants expérimentaux dans les Monts de Beni-Chougrane (Ouest d'Algérie).ZCemorph NFAllemagne.. p. 45-52.

MEDDI M., TALIA A ., MARTIN C. 2009. Evolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (nord ouest de l'Algérie) .Article scientifique. Géographie physique et environnement. Vol.III. p.61-84.

MEDDI M.1992. Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Mina (Algérie). Thèse de doctorat Uniq. Université Louis Pasteur. Strasbourg. pp.285.

MEDINGER J. M. 1960. Transport solide des oueds algériens. Annuaire hydrologique de l'Algérie (années 50-59). Alger.

MEGNOUNIF A., TERFOUS A., BOUANANI A. 2003. Production et transport des matières solides en suspension dans le basin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérie). Revue des sciences de l'eau. Vol. 16. N° 3. p. 369-380

MEILAH C.1993. Mise en œuvre d'un SIG des ressources en eau et en sol sur une zone pilote, rapport BRGM R37633, Direction services sol et s/sol France.

MEKERTA B., SEMCHA A., BENDAOU M., TROALEN J.P. 2007.Caractérisation et répartition spatiale des propriétés géotechniques des sédiments d'envasement de la retenue du barrage du Fergoug .Colloque International sur les Sols et Matériaux à Problèmes (SOMAPRO). Tunis. Du 9-11.p. 79-86.

MOREHEAD M.D., SYVITSKI, J.P.HUTTON E.W.H., PECKHAM S.D. 2002.Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins. Global and Planetary change. 39. p. 95 –110.

MORSLI B.,HALITIM A. ROOSE E.2002. Effet des systèmes de culture sur le ruissellement et les pertes en terre, en carbone et en effet des systèmes de gestion sur l'érosion et le stock du carbone dans les monts du tell occidental d'Algérie. Bull. Reseau Erosion. 23.p. 416-430.

MORSLI B, HALITIM A. 2002. Influence du mode de gestion sur l'érosion et le carbone dans le Nord-Ouest algérien cas des Monts de Beni-Chougrane. Résumés des actes du Colloque International « Gestion de la Biomasse, Erosion et Séquestration du Carbone ".Montpellier. pp.96.

Références bibliographiques

- MORSLI B. 1996.** Caractérisation, distribution et susceptibilité à l'érosion des sols de montagne, cas des monts de Beni-Chougrane . Thèse de Magister. INA. Alger. pp. 180 p.
- MORSLI B., MAZOUR M., MEDJEL N., HAMOUDI A., ROOSE E. 2004.** Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du Nord-Ouest de l'Algérie. Sécheresse. Vol.15.p.96-104.
- MORSLI B., HABI M., Meddi M.2013.**Dynamique de l'érosion en zone méditerranéenne algérienne : facteurs explicatifs de variation du ruissellement et de l'érosion sous différentes occupations du sol. Rev.Science de l'eau.Vol. 26.N° 2. p. 89-105
- MORSLI B., HABI M., MAZOUR M., HAMOUDI A., HALITIM A. 2012.** Érosion et ruissellement en montagnes méditerranéennes d'Algérie du N-O : analyse des facteurs conditionnels sous pluies naturelles et artificielles. Rev.Maroc. Sci. Agron. Veter. 1 .p. 33-40.
- MORSLI B., MEDDI M. 2002.** Étude du ruissellement et du transport solide sur parcelles expérimentales. Utilisation de la simulation de pluies. Actes du Séminaire sur la gestion de l'eau, université Mascara. Algérie. p. 80-8.
- MOUSSA R., VOLTZ M., ANDRIEUX P. 2002.** Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behavior of a farmed catchment during floods events. Hydrological Processes. Vol.16. p.393-412.
- OLIVRY J.C. 1991.** Cours d'initiation à l'étude et la mesure de l'érosion et des transports solides. Cah. ORSTOM. Sér. Pédol. Vol. XXV.pp.110.
- PARZONKA W. 1984.**Analyse du processus de tassement et d'érosion des vases aux barrages de l'Algérie occidentale. Séminaire "Transport and Sédimentation ".Wroclaw, paper D2.
- PILGRIM D., CHAPMAN T.G., DORAN D. 1988.** Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. Hydrological Sciences Journal.Vol.33(4). p.379-40.
- PITAUD G. 1973.** Etude hydrogéologique pour la mise en valeur de la vallée de l'Oued Saida (rapport de synthèse), division ressource hydrique.pp 58-73.
- POESEN J. 1984.** The influence of slope angle on infiltration rate and orntonian overland flow of volume. Z. Géomorph. N.F suppl-Bd :p.117 -131.
- POESEN J. 1987.** The role of slope angle in surface seal formation. In : Gardner V, èd. International Geomorphology II. Actes de la conférence de Manchester.p.437-48
- PROBST J.L., BAZERBACHI A., 1986.** Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. Sci. Géol. Bull. 39(1).p.79-98.

Références bibliographiques

- PROBST, J. L. SUCHET, P. A. 1992.** Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa), *Hydrological Sciences Journal*, vol. 37, no 6, p. 621-636.
- RECKING A. 2010.** A comparaison between flume and field bed load transport data and consequences for surface-based bed load transport prediction. *Water Resources*. Vol 46.issue 3
- REGAGBA-M.Z., BOUALEM A MEDERBAL K. 2010.** Simulation of Solid Transport from the Sub-watersheds and Hydrometrics Stations in the Catchment Area of the Wadi El Hammam (Algeria). *Journal of Applied Sciences Research*. 6(8).p.1195-1201.
- REMENIERAS G. 1980.** L'hydrologie de l'ingénieur .Eyrolles. Paris.pp. 456.
- REMINI B. 1997.** Envasement des Retenues de barrages en Algérie. Mécanisme et moyen de lutte par la technique du Soutirage. Doctorat d'état, E.N.P, Mars, 342 pages.
- REMINI B. 2005.** L'évaporation des lacs de barrages dans les régions arides et semi aride : exemples algériens. *Larhyss Journal*.N° 04. Juin 2005. p.81-89
- REMINI B.2000.** L'envasement des barrages. *Bull. Réseau érosion*.20.p.71-165.
- REMINI B., AVENARD J. M., KETTAB A., 1997.** Évolution dans le temps de l'envasement dans une retenue de barrage dans laquelle est pratiquée la technique de soutirage, *La Houille Blanche*, N°6. p. 4-8.
- REMINI B. 2010.** La problématique de l'eau en Algérie. *Larhyss Journal*.N° 08. p.27-46.
- REMINI B., HALLOUCHE W. 2005.** Prévion de l'envasement dans les barrages du Magreb. *Larhyss Journal*. N°4, Juin. p.69-80.
- ROCHE M. (1963).** Hydrologie de surface . Paris, Gauthier Villars. pp.430.
- ROOSE E . 2002.** Banquettes mécaniques et techniques traditionnelles de GCES pour la zone méditerranéenne semi-aride de Tunisie. *Bulletin du Réseau Érosion*.Vol. 21. p. 130-154.
- ROOSE E.1977.** Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Travaux et Documents*. N° 78. Paris. Orstom éditions
- ROOSE, E., CHEBBANI, R., ET BOUROUGAA, L., 1999.** Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Bulletin Orstom. Réseau Erosion*.19.p.85-95.
- SACCARDY L. 1950.** Note sur le calcul des banquettes de restauration des sols. *Terres et eaux*, Alger.p.3-19.

Références bibliographiques

- SARI D. 1977.** L'homme et l'érosion dans l'Ouarsenis. SNED (Société nationale d'édition et de diffusion). Alger. Algérie. pp.624 .
- SELTZER P. 1946.** Le climat de l'Algérie. Alger. Institut de Météorologie et de Physique du Globe. Carbonnel. pp.219.
- SIDLE R.C., CAMPBELL A.G. 1985.** Patterns of suspended sediment transport in coastal Alaska stream. Water Resour. Bull. (21)6. p.909-917.
- SOUCHERE V., CERDAN O., DUBREUIL N., LE BISSONNAIS Y. KING C. 2005.** Modeling the impact of agri-environmental scenarios on overland flow in a cultivated catchment (Normandy, France). Catena. Vol. 61. p. 229-240.
- STENGEL P et GELIN S. 1998.** Sol : interface fragile. INRA. France.
- SYVITSKI J.P., MORHEAD M.D., BAHR DB., MULDER T. 2000.** Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. Water Resources Research. 36 (9). p.2747-2760.
- TERFOUS A., MAGNOUNIF A. BOUANANI A. 2001.** Etude de transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). Revue des sciences de l'eau. Vol. 14. N°2. p. 173-185.
- TEXIRONT J. 1960.** Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. C/R de l'assemblée de l'AIHS de Toronto. p.1957-1958.
- TOUBIA B., 2000.** Érosion-transport solide-envasement de barrage : cas du bassin versant de l'oued Mina dans la wilaya de Relizane. Thèse de doctorat d'état. École nationale des sciences agronomique. Alger.
- TRIBAK, A., EL GAROUANI, A., ABAHROUR, M. 2009.** Evaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du Pré-Rif oriental (Maroc): cas du sous bassin de l'oued Tlata. Sécheresse. Vol. 20. No. 4 p. 333–337.
- UNESCO. 1986.** Problème d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. Project 5.3 of the International Hydrological Program. Prepared under the presidency of A. Saubarg, director of the publication WR White. pp.161.
- VANONI V.A. 1977.** Sedimentation engineering. ASCE. Hydraulic Division.
- WALLING D.E. 1984.** The Sediment Yields of African rivers. IAHS Publications. 144:pp.265-283.
- WALLING D.E., WEBB B.W. 1981.** The reliability of suspended sediment load data. IAHS Publications. 133:pp.177-194.

Références bibliographiques

WALLING. D.E. 1974. Suspended sediment and solute yield from small catchment prior to urbanisation in : Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers (ed. by G.P.Willams, 1989). *Journel. Hydrol.*111:p.89-106.

WILLIAMS G.P.1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologie events in rivers. *Journel Hydrol.*N°111.pp89-106.

WISCHMEIER WH. 1978.: Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. *Agricultur Hand- Book.* N°537.USA.

WOOD P.A 1977. Controls of variation in suspended sediment concentration. *Revue Sedimentol.* N° 24,pp 437-445.

YLES F. 2014. Hydrologie et transport solide dans le bassin versant de l'oued saida : modélisation pluie-débit et débit liquide-transport solide. Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. pp.130.

ZAIBAK M. 2007. Contribution à une approche cartographique de l'érosion spécifique dans le bassin versant de l'Oued Cheliff. Mémoire de Magistère. ENSH/Blida

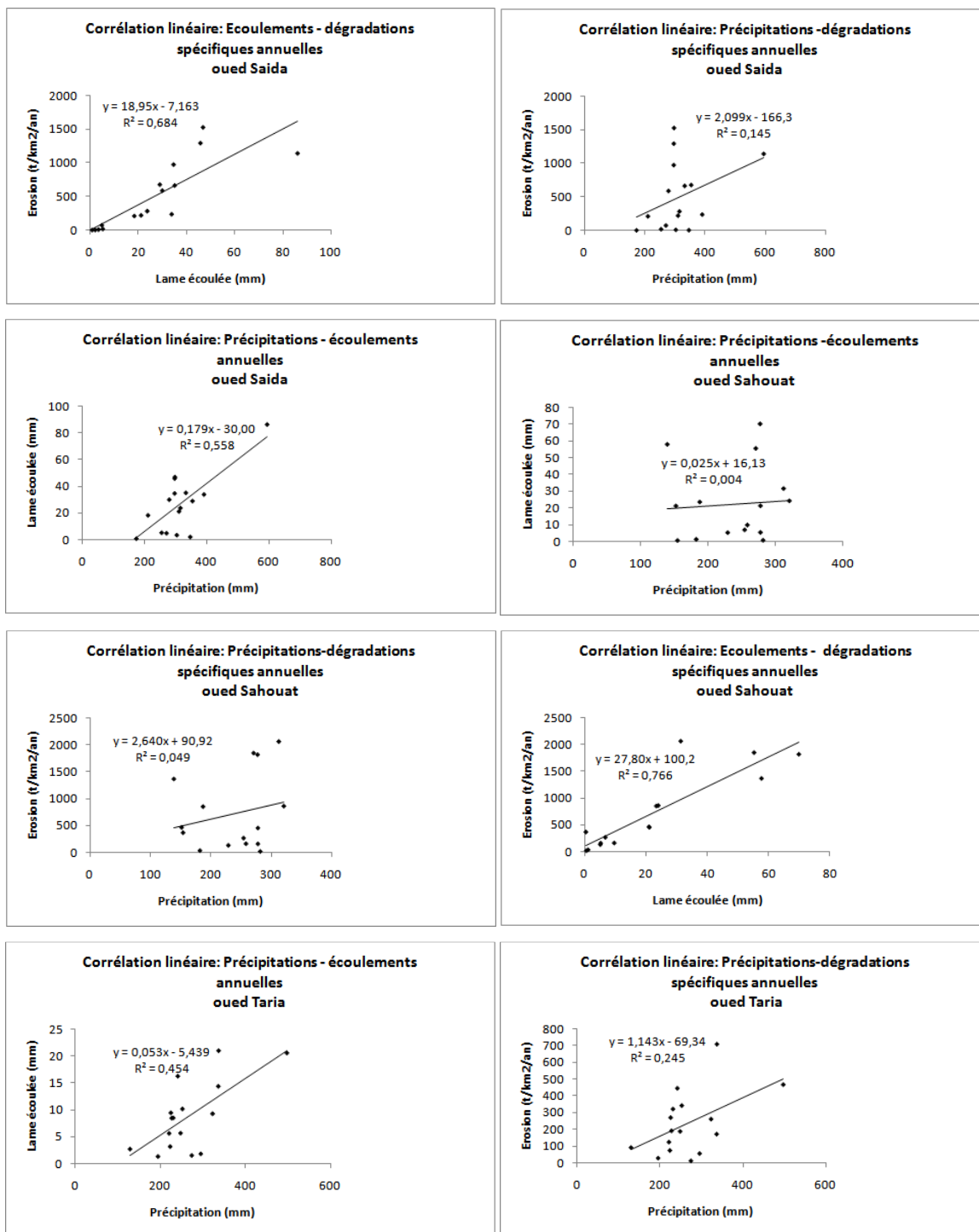
Annexes

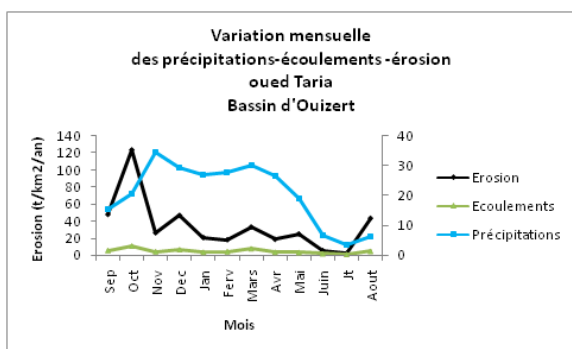
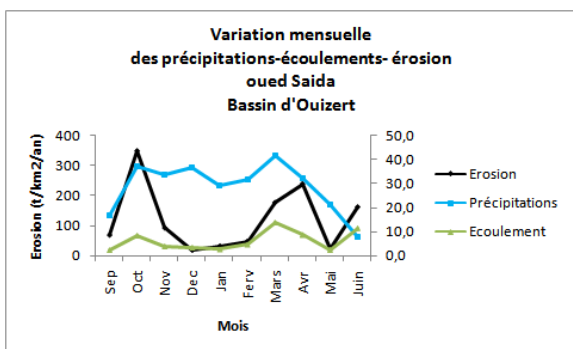
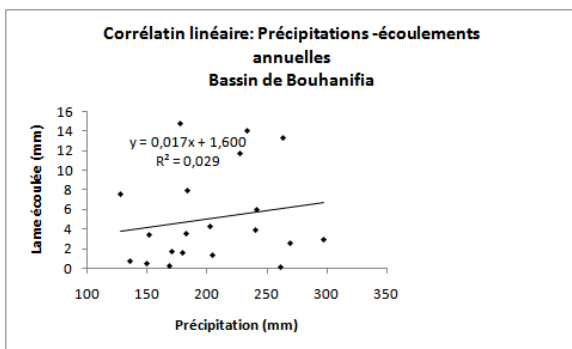
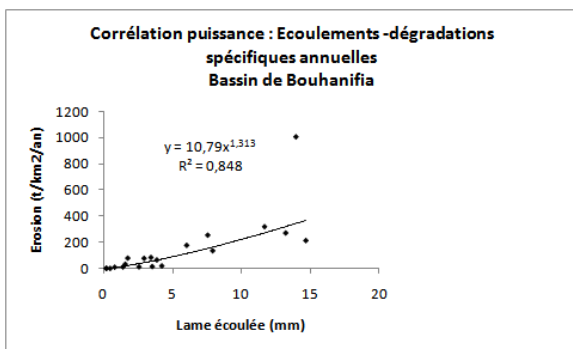
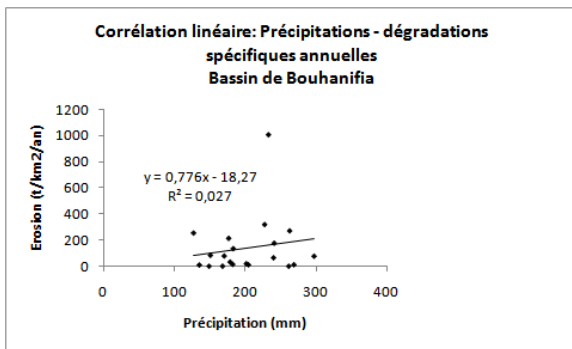
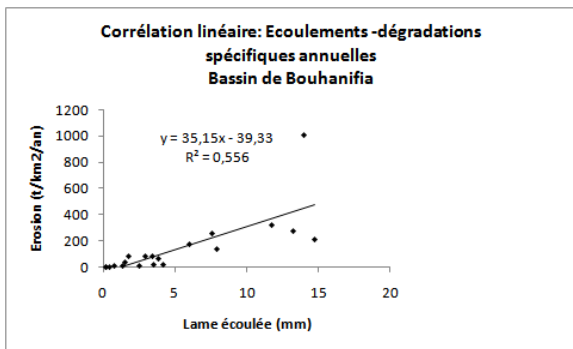
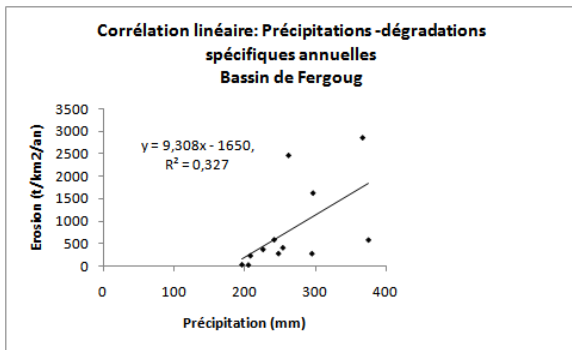
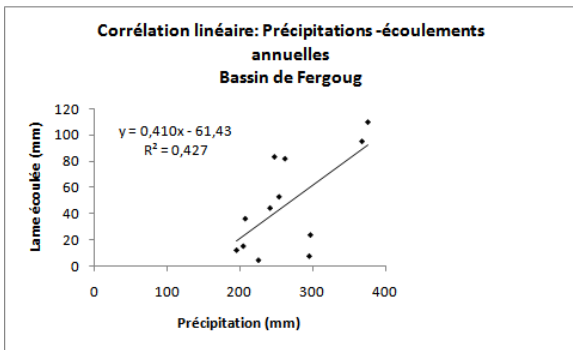
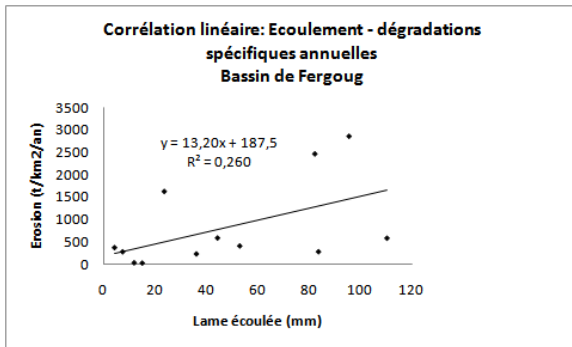
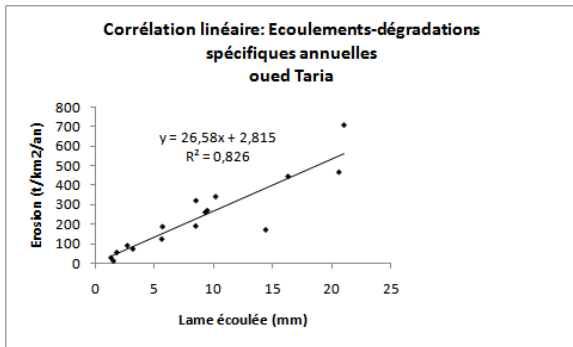
Annexe 1 (chapitre viii)

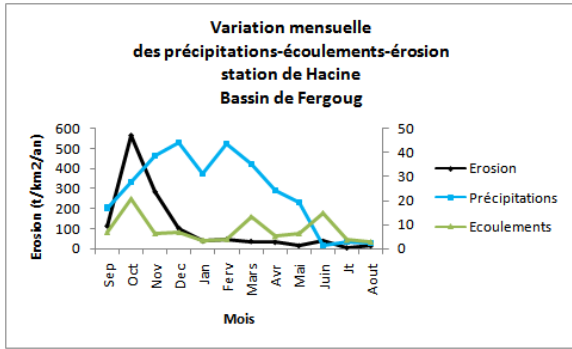
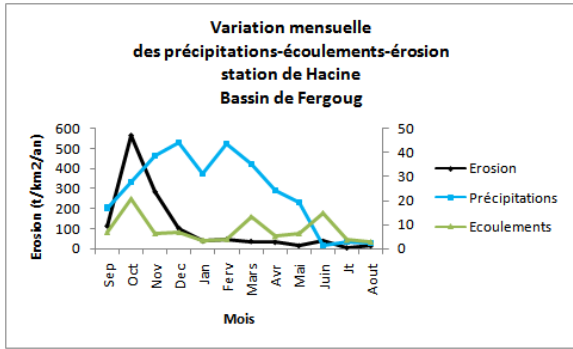
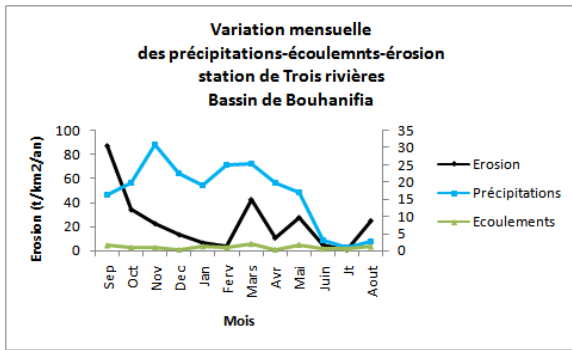
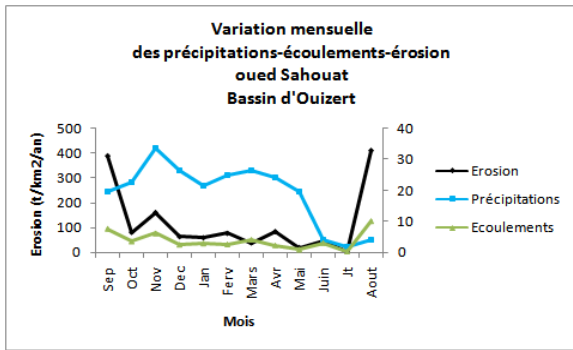
Corrélations Précipitations –écoulements-dégradation spécifiques

Annuels et mensuels

Sous bassins de l'oued El Hammam







Annexe 2 (chapitre x)

Lâchés du barrage de Bouhanifia (1974-1985)

Année hydrologique	Lâchés (Hm ³)
1973-1974	147.533
1974-1975	124.756
1975-1976	113
1976-1977	110.495
1977-1978	63.84
1978-1979	58.15
1979-1980	58.53
1980-1981	85.51
1981-1982	62.66
1982-1983	66.24
1983-1984	36.79
1984-1985	93.49
Total	864,937

Lâchés du barrage de Bouhanifia (1985-2004)

Année hydrologique	Lâchés (Hm ³)
1985-1986	47.944
1986-1987	56.803
1987-1988	47.233
1988-1989	483.895
1989-1990	173.95
1990-1991	167.7
1991-1992	157.98
1992-1993	115.24
1993-1994	126.71
1994-1995	124.59
1995-1996	71.56
1996-1997	90.9
1997-1998	98.56
1998-1999	86.94
1999-2000	96.67
2000-2001	95.62
2001-2002	99.56
2002-2003	41.25
2003-2004	56.26
Total	2065.615

Annexe 3 (chapitre xi)

Annuaire (Analyses Complémentaires)

Code Station: 111506

Nom: Barrage FERGOUG

Type 01

Année 2005

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Min	Max
T	7	12.5	16.8	11.5	23.5	28.5	27	29	27	21.5	16.5	13	7	29
Ph	8.4	8.1	7.4	8.2	7.7	7.3	7.3	8	8	7.4	7.9	7.9	73	8.4
Volume/dé					0.4						0.5	0.3	0.3	0.5
Cond	2250	2260	2130	2460	3230	2640	2240	1680	2290	2500	2320	2070	1680	3230
Turb	77	96	130	182	29	83	40	32	46	6	31	71	6	182
Saturat %	95.4	105.7	155.2	82.5	144.2	97.5	75.1	89	117.1	92.9	107.8	124.5	76.1	165.2
O2dis	11.8	10.9	14.6	8.7	12	7.5	5.9	6.8	9.2	8	10.2	12.7	5.9	14.6
MES105° (mg/l)	86	114	145	342	42	98	74	40	70	14	38	146	14	342
MES600° (mg/l)	44	68	78	208	20	76	48	20	60	12	24	112	12	208
Rs105	1860	1660	1600	1880	2280	1660	1500	1060	1480	1880	1600	1900	1060	2280
Ca	142	96	76	47	93	56	71	52	67	35	64	48	35	142
Mg	89	80	96	91	142	103	90	68	89	71	78	117	68	142
Na	345	292	299	345	437	350	276	223	285	329	322	366	223	437
K	13	8	12	12	14	14	16	13	16	15	16	16	8	16
Cl	529	442	424	355	596	44	458	314	403	445	453	477	314	596
SO ₄	500	424	509	580	700	459	390	201	402	386	355	446	201	700
CO ₃	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
HCO ₃	298	256	205	201	168	195	153	224	268	221	181	242	153	298
ALC														
AGR														
CO ₂ libre														
SiO ₂	4	38	0	2	0.6	0.3	4.2	1.7	5	0	0	6	0	38
MatDec														
H ₂ S														
DCO	20	60	20	50	70	30	80	50	50	50	60	60	20	80
DBOS	3.7	10.2	4	12.2	14.2	8.4	16.4	11.4	10.2	12.3	12.4	12.6	3.7	16.4
MOAcide	6.5	7.5	15	7	9.2	9	6.2	9	7	7.5	8.4	8.3	6.2	15
COT	21.71	18.47	6.36				4.89	8.08	9.35				4.89	21.71
NO ₃	14	6	6	3	5	5	2	3	1	5	4	11	1	14
NO ₂	0.16	0.22	0.3	0.19	0.13	0.02	0.13	0.04	0.06	0.05	0.09	1.1	0.02	1.1
NH ₄	2.1	0.93	0.05	0.13	0	0.1	0.18	0.23	1.09	0.15	0.03	0.06	0	2.1
Nkjeldahl														
PO ₄	0.35	0.1	0.04	0.24	0.4	0.04	0.09	0.23	0.31	0.24	1.48	0.31	0.04	1.48
Ptot	0.52	0.67	0.49	0.91	0.73	0.28	1.07	0.73	0.63	0.42	1.93	0.75	0.28	1.93

SOURCE : A.N.R.H

Code Station: 111506

Nom: Barrage FERGOUG

Type 01

Année 2006

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Min	Max
T	12	9	14.5	21	21	24.2	28	30	27	20.5	19	13.5	9	30
Ph	7.5	7.6	7.4	7.3	7.1	7.5	7.6	7.5	7.9	7.7	7.8	7.7	7.1	7.9
Volume/dé	0.35	0.35	0.38	0.7	0.35	0.35	0.35	0.35	0.3	0.316	0.4	0.4	0.3	0.7
Cond	2170	2300	2740	2230	1970	2400	2590	1680	2550	2740	2880	2900	1680	2900
Turb	49	720	70	66	54	64	39	22	43	44	35	24	22	720
Saturat %	79.7	78.6	102.3	178.6	71.4	82.7	109.7	136.8	99.2	92.5	73.3	92.2	71.4	178.6
O ₂ dis	8.3	8.8	10.1	15.5	6.2	6.8	8.5	10.3	7.8	8.1	6.6	9.3	6.2	15.5
MES105° (mg/l)	87	1455	95	78	98	162	50	26	65	65	42	38	26	1455
MES600° (mg/l)	60	1008	92	40	76	64	36	12	32	36	24	24	12	1008
Rs105	1810	2280	2260	1700	1900	1880	1900	1200	2080	2080	2280	2480	1200	2480
Ca	64	128	70	90	143	74	47	63	81	37	107	108	37	143
Mg	128	74	150	95	55	109	129	74	112	155	119	134	55	155
Na	382	382	437	340	366	403	419	221	414	432	460	478	221	478
K	15	13	16	12	15	17	16	15	17	18	18	16	12	18
Cl	559	334	627	511	295	570	593	327	579	618	688	743	295	743
SO ₄	418	850	490	371	818	456	482	259	452	518	514	541	259	850
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO ₃	293	140	271	190	167	213	179	215	215	233	268	255	140	293
ALC														
AGR														
CO ₂ libre														
SiO ₂	1	10.8	5.4	1.9	7.1	2.7	2.6	6	4.3	4.1	3.9	1	1	10.8
MatDec														
H2S														
DCO	70	20	50	100	10	100	50	50	30	70	10	20	10	100
DBOS	17	3.7	11.5	20.3	2.3	20.6	9.8		6.9	17.3	1.9	3.6	1.9	20.6
MOAcide	7.6	5.4	7.5	7.2	4.9	6.2	7.3	6.1	7.4	8.8	7.6	8.4	4.9	8.8
COT			15.14	7.95	8.84	3.25	19.19	10.21					3.25	19.19
NO ₃	10	25	24	15	16	2	7	5	2	3	2	4	2	25
NO ₂	0.15	0.47	1.2	0.55	1.77	0.15	0.14	0.05	0.09	0.07	0.1	0.06	0.05	1.2
NH ₄	0.26	0.92	2.2	0.97	1.59	0.27	0.15	0.2	0.43	0.34	0.04	0.11	0.04	2.2
Nkjeldahl				1.4	1.75	1.4	0.35	0.7	2.1	1.05	0.7	0.35	0.35	2.1
PO ₄	0.2	0.03	0.19	0.22	0.1	0.02	0.09	0.01	0.2	0.1	0.12	0.16	0.01	0.22
Ptot	0.4	0.33	0.77	0.79	0.57	0.17	0.16	0.12	0.4	0.36	0.37	0.34	0.12	0.79

SOURCE : A.N.R.H

Annexes

Code Station: 111506

Nom: Barrage FERGOUG

Type 01

Année 2007

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Min	Max
T	9	13	15	15	18	24	27	29	27	25	15	12	9	29
Ph	7.3	7.7	7.9	7.9	7.5	7.4	7.4	7.9	7.4	7.1	7.4	7.9	7.1	7.9
Volume/dé	0.4	0.4	0.336	0.4	0.4	0.066	0.262	0.053	0.188	0.341	0.4	0.387	0.053	0.4
Cond	2810	2660	3300	2770	3130	3270	2130	2450	2280	1930	1680	2270	1680	3300
Turb	147	53	87	94	529	26	23	28	14	40	126	42	14	529
Saturat %	84	97.1	70.7	124	91.5	76.4	104.3	107.3	86.5	117.1	86.1	83.5	70.7	124
O ₂ dis	9.4	9.9	6.9	12.1	8.4	6.3	8.2	8.2	6.8	9.5	8.4	8.7	6.3	12.1
MES105°(mg/l)	154	66	98	126	558	34	26	34	18	62	131	55	18	558
MES600°(mg/l)	84	28	56	64	288	16	16	20	8	40	76	32	8	288
Rs105	2860	2400	2680	2260	2440	2860	2060	1900	1760	1880	1480	1900	1480	2860
Ca	226	213	213	200	131	147	110	98	107	100	61	140	61	226
Mg	72	74	84	68	94	122	81	90	90	88	73	63	63	122
Na	506	386	506	455	524	566	400	405	350	357	276	283	276	566
K	18	15	17	14	20	21	20	21	20	20	11	12	11	21
Cl	545	430	573	416	505	682	511	545	498	505	164	225	164	682
SO ₄	864	890	918	922	1048	922	590	618	542	533	442	734	533	1048
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO ₃	289	153	199	137	88	135	135	115	120	135	115	134	88	289
ALC														
AGR														
CO ₂ libre														
SiO ₂	9	5.4	22.1	2.1	6.2	6.8	3	3.2	8	10	5.5	7	2.1	22.1
MatDec														
H ₂ S														
DCO	50	30	50	40	30	80	100	20	40	69	30	50	20	100
DBOS	8.6	5.1	11.3	8.2	8	13.4	14.4	3.8	10.2	13.3	8	18.2	3.8	18.2
MOAcide	6.5	5.7	7.8	7.6	9.6	7.7	8.8	12.8	8.5	13	5.7	5.2	5.2	13
COT														
NO ₃	18	20	17	14	10	9	6	6	7	3	11	5	3	20
NO ₂	0.69	0.59	0.85	1	2.61	0.65	0.6	0.06	0.35	0.04	0.55	0.9	0.04	2.61
NH ₄	3.62	2.3	1.54	0.1	0.37	1.26	0.35	0.09	0.27	0.02	0.84	1.9	0.02	3.62
Nkjeldahl	5.6	2.8	2.1		1.4	2.8	0.7	0.7	0.7	0.07	1.05	2.1	0.07	5.6
PO ₄	0.17	0.07	0.11	0.08	0.11	0.08	0.12	0.07	0.05	0.02	0.15	0.1	0.02	0.17
Ptot	0.37	0.2	0.29	0.17	0.38	0.14	0.24	0.1	0.08	0.07	0.2	0.2	0.07	0.38

SOURCE : A.N.R.H

Annexes

Code Station: 111506

Nom: Barrage FERGOUG

Type 01

Année 2008

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Min	Max
T	11	10.5	16	22	23	25	29	29	27	23.5		10	10	29
Ph	7.4	7.6	7.4	8.2	7.6	7.9	7.8	8.1	7.6	7.6		7.9	7.4	8.2
Volume/dé	0.341	0.173	0.023	0.149	0.46	0.186	0.124	0.178	0.153	0.219		0.477	0.023	0.477
Cond	2310	1920	1990	1880	1820	2270	2260	1279	1418	1946		1420	1279	2310
Turb	53	144	131	13	32	25	29	23	123	32		40	13	144
Saturat %	126.5	101.9	109.8	97.3	122.9	80.2	91.6	103.4	131	111.8		77.8	77.8	131
O ₂ dis	13.5	11	10.5	8.3	10.3	6.5	7	7.9	10.3	9.3		8.5	6.5	13.5
MES105° (mg/l)	62	154	162	22	38	26	38	30		38		50	22	162
MES600° (mg/l)	32	84	112	12	16	16	20	16		24		28	12	112
Rs105	2000	1700	1900	1500	1400	2080	2060	1060	1260	1860		1130	1060	2080
Ca	144	100	88	84	72	208	173	48	36	108	0	106	0	208
Mg	79	58	73	61	43	81	85	77	82	84		54	43	85
Na	419	322	315	294	308	304	426	154	186	290		186	154	426
K	18	17	15	15	15	17	12	12	12	16		10	10	18
Cl	430	409	423	409	412	262	341	251	339	409		259	251	430
SO ₄	764	399	477	275	348	1040	1062	161	181	486		333	161	1062
CO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
HCO ₃	208	199	153	215	121	101	128	294	231	201		198	101	294
ALC														
AGR														
CO ₂ libre														
SiO ₂	2	1.2	2	4.6	1.4	4.1	2	10	5	7		6	1.2	10
MatDec														
H ₂ S											-1			
DCO	39	39	40	20	49	30	29	20	20	30		29	20	49
DBOS	14	7.4	14	4.9	24	4.1	13.5	2.3	4.8	4.8		5.7	2.3	24
MOAcide	11	4.8	10.4	6.5	7.5	5.5	5	8	9.8	12.7		5.4	4.8	12.7
COT				12.17	14.49								12.17	14.49
NO ₃	5	9	10	4	4	5	3	4	6	2		8	2	10
NO ₂	0.8	1.34	0.5	0.15	0.02	0.16	0.03	0.06	0.03	0.05		0.24	0.02	0.8
NH ₄	1.8	1.9	0.51	0.06	0	0.02	0.04	0.01	0.1	0.03		0.15	0	1.9
Nkjeldahl	2.1	2.1	1.05	0.35	0.35	0.07	0.35	0.35	0.35	0.07		0.7	0.07	2.1
PO ₄	0.97	0.73	0.24	0.14	0.06	0.08	0.02	0.12	0.23	0.04		0.12	0.02	0.97
Ptot	1.3	0.93	0.41	0.23	0.1	0.12	0.06	0.16	0.47	0.09		0.2	0.06	1.3

SOURCE : A.N.R.H

Annexe 3

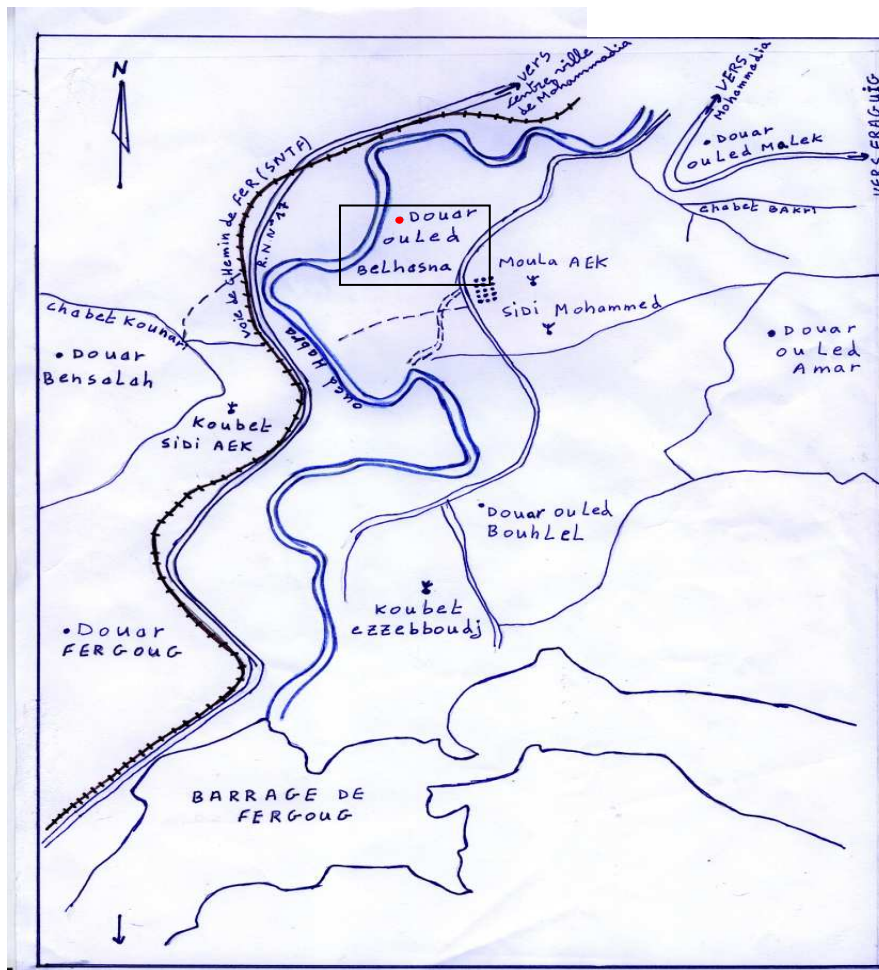


Figure N° 01 : Carte de situation géographique du site d'étude

(Source : A.N.R.H ; 2008)

-Test de perméabilité par l'eau distillée

-Les résultats obtenus sur la vitesse de filtration (coefficient de perméabilité)

Répétition	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000047	0,00352	$3,91.10^{-08}$	$1,11.10^{-5}$	4,00
02	1200	0,000046	0,00352	$3,83.10^{-8}$	$1,08.10^{-5}$	3,92
03	1200	0,000045	0,00352	$3,75.10^{-8}$	$1,06.10^{-5}$	3,83
04	1200	0,000043	0,00352	$3,58.10^{-8}$	$1,01.10^{-5}$	3,66
05	1200	0,000040	0,00352	$3,33.10^{-8}$	$9,46.10^{-6}$	3,40
06	1200	0,000038	0,00352	$3,16.10^{-8}$	$8,99.10^{-6}$	3,23

Résultats obtenus au laboratoire

Répétition	«K»	Type de sol
01	4,00	Sols perméables
02	3,92	Sols perméables
03	3,83	Sols perméables
04	3,66	Sols perméables
05	3,40	Sols perméables
06	3,23	Sols perméables

Résultats obtenus au laboratoire

-Test de perméabilité par l'eau chargé en matières en suspension**-Les résultats obtenus sur la vitesse de filtration (coefficient de perméabilité)**1^{er} concentration [26mg/l] :

Nombre D'irrigation	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000047	0,00352	3,91.10 ⁻⁸	1,11.10 ⁻⁵	4,00
02	1200	0,000046	0,00352	3,83.10 ⁻⁸	1,08.10 ⁻⁵	3,92
03	1200	0,000042	0,00352	3,50.10 ⁻⁸	9,94.10 ⁻⁶	3,57
04	1200	0,000041	0,00352	3,41.10 ⁻⁸	9,70.10 ⁻⁶	3,49
05	1200	0,000041	0,00352	3,41.10 ⁻⁸	9,70.10 ⁻⁶	3,49
06	1200	0,000040	0,00352	3,33.10 ⁻⁸	9,46.10 ⁻⁶	3,40
07	1200	0,000039	0,00352	3,25.10 ⁻⁸	9,23.10 ⁻⁶	3,32
08	1200	0,000037	0,00352	3,08.10 ⁻⁸	8,75.10 ⁻⁶	3,15

Résultats obtenus au laboratoire

Nombre d'irrigation	«K»	Type de sol
01	4,00	Sols perméables
02	3,92	Sols perméables
03	3,57	Sols perméables
04	3,49	Sols perméables
05	3,49	Sols perméables
06	3,40	Sols perméables
07	3,32	Sols perméables
08	3,15	Sols perméables

Résultats obtenus au laboratoire

2^{ème} concentration [192mg/l] :

Nombre D'irrigation	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000045	0,00352	3,75.10 ⁻⁸	1,06.10 ⁻⁵	3,83
02	1200	0,000043	0,00352	3,58.10 ⁻⁸	1,01.10 ⁻⁵	3,66
03	1200	0,000040	0,00352	3,33.10 ⁻⁸	9,46.10 ⁻⁶	3,40
04	1200	0,000038	0,00352	3,16.10 ⁻⁸	8,99.10 ⁻⁶	3,23
05	1200	0,000035	0,00352	2,91.10 ⁻⁸	8,28.10 ⁻⁶	2,98
06	1200	0,000033	0,00352	2,75.10 ⁻⁸	7,81.10 ⁻⁶	2,81
07	1200	0,000032	0,00352	2,66.10 ⁻⁸	7,57.10 ⁻⁶	2,72
08	1200	0,000030	0,00352	2,50.10 ⁻⁸	7,10.10 ⁻⁶	2,55

Résultats obtenus au laboratoire

Nombre d'irrigation	«K»	Type de sol
01	3,83	Sols perméables
02	3,66	Sols perméables
03	3,40	Sols perméables
04	3,23	Sols perméables
05	2,98	Sols perméables
06	2,81	Sols perméables
07	2,72	Sols perméables
08	2,55	Sols perméables

Résultats obtenus au laboratoire

3^{ème} concentration [500mg/l]

Nombre D'irrigation	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000041	0,00352	3,41.10 ⁻⁸	9,70.10 ⁻⁶	3,49
02	1200	0,000038	0,00352	3,16.10 ⁻⁸	8,99.10 ⁻⁶	3,23
03	1200	0,000032	0,00352	2,66.10 ⁻⁸	7,57.10 ⁻⁶	2,72
04	1200	0,000029	0,00352	2,41.10 ⁻⁸	6,86.10 ⁻⁶	2,46
05	1200	0,000027	0,00352	2,25.10 ⁻⁸	6,39.10 ⁻⁶	2,30
06	1200	0,000024	0,00352	2,00.10 ⁻⁸	5,68.10 ⁻⁶	2,04
07	1200	0,000021	0,00352	1,75.10 ⁻⁸	4,97.10 ⁻⁶	1,78
08	1200	0,000019	0,00352	1,58.10 ⁻⁸	4,49.10 ⁻⁶	1,61

Résultats obtenus au laboratoire

Nombre d'irrigation	«K»	Type de sol
01	3,49	Sols perméables
02	3,23	Sols perméables
03	2,72	Sols perméables
04	2,46	Sols perméables
05	2,30	Sols perméables
06	2,04	Sols perméables
07	1,62	Sols peu perméables
08	1,61	Sols peu perméables

Résultats obtenus au laboratoire

Annexes

4^{ème} concentration [700mg/l]

Nombre D'irrigation	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000037	0,00352	$3,08 \cdot 10^{-8}$	$8,75 \cdot 10^{-6}$	3,15
02	1200	0,000031	0,00352	$2,58 \cdot 10^{-8}$	$7,33 \cdot 10^{-6}$	2,64
03	1200	0,000029	0,00352	$2,41 \cdot 10^{-8}$	$6,86 \cdot 10^{-6}$	2,47
04	1200	0,000028	0,00352	$2,33 \cdot 10^{-8}$	$6,62 \cdot 10^{-6}$	2,38
05	1200	0,000027	0,00352	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$6,39 \cdot 10^{-6}$	2,30
06	1200	0,000022	0,00352	$1,83 \cdot 10^{-8}$	$5,20 \cdot 10^{-6}$	1,87
07	1200	0,000019	0,00352	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$4,49 \cdot 10^{-6}$	1,61
08	1200	0,000018	0,00352	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$4,26 \cdot 10^{-6}$	1,53

Résultats obtenus au laboratoire

Nombre d'irrigation	«K»	Type de sol
01	3,15	Sols perméables
02	2,64	Sols perméables
03	2,47	Sols perméables
04	2,38	Sols perméables
05	2,30	Sols perméables
06	1,87	Sols peu perméables
07	1,61	Sols peu perméables
08	1,53	Sols peu perméables

Résultats obtenus au laboratoire

Annexes

9^{ème} concentration [2000mg/l]

Nombre d'irrigation	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000035	0,00352	$2,91.10^{-8}$	$8,28.10^{-6}$	2,98
02	1200	0,000024	0,00352	$2,00.10^{-8}$	$5,65.10^{-6}$	2,04
03	1200	0,000021	0,00352	$1,75.10^{-8}$	$4,97.10^{-6}$	1,78
04	1200	0,000019	0,00352	$1,58.10^{-8}$	$4,49.10^{-6}$	1,61
05	1200	0,000016	0,00352	$1,33.10^{-8}$	$3,78.10^{-6}$	1,36
06	1200	0,000013	0,00352	$1,08.10^{-8}$	$3,07.10^{-6}$	1,10
07	1200	0,000010	0,00352	$8,33.10^{-9}$	$2,36.10^{-6}$	0,85
08	1200	0,000007	0,00352	$5,83.10^{-9}$	$1,65.10^{-6}$	0,59

Résultats obtenus au laboratoire

Nombre d'irrigation	«K»	Type de sol
01	2,98	Sols perméables
02	2,04	Sols perméables
03	1,78	Sols peu perméables
04	1,61	Sols peu perméables
05	1,36	Sols peu perméables
06	1,10	Sols peu perméables
07	0,85	Sols peu perméables
08	0,59	Sols peu perméables

Résultats obtenus au laboratoire

Annexes

10^{ème} concentration [2463mg/l] :

Nombre d'irrigation	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000033	0,00352	$2,75.10^{-8}$	$7,81.10^{-6}$	2,81
02	1200	0,000021	0,00352	$1,75.10^{-8}$	$4,97.10^{-6}$	1,78
03	1200	0,000019	0,00352	$1,58.10^{-8}$	$4,49.10^{-6}$	1,61
04	1200	0,000015	0,00352	$1,25.10^{-8}$	$3,55.10^{-6}$	1,27
05	1200	0,000013	0,00352	$1,08.10^{-8}$	$3,07.10^{-6}$	1,10
06	1200	0,000010	0,00352	$8,33.10^{-9}$	$2,36.10^{-6}$	0,85
07	1200	0,000008	0,00352	$6,66.10^{-9}$	$1,89.10^{-6}$	0,68
08	1200	0,000005	0,00352	$4,16.10^{-9}$	$1,18.10^{-6}$	0,42

Résultats obtenus au laboratoire

Nombre d'irrigation	«K»	Type de sol
01	2,81	Sols perméables
02	1,78	Sols peu perméables
03	1,61	Sols peu perméables
04	1,27	Sols peu perméables
05	1,10	Sols peu perméables
06	0,85	Sols peu perméables
07	0,68	Sols peu perméables
08	0,42	Sols peu perméables

Résultats obtenus au laboratoire

11^{ème} concentration [4000mg/l]

Nombre D'irrigation	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000030	0,00352	$2,56 \cdot 10^{-8}$	$7,27 \cdot 10^{-6}$	2,62
02	1200	0,000017	0,00352	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$4,02 \cdot 10^{-6}$	1,44
03	1200	0,000015	0,00352	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$3,55 \cdot 10^{-6}$	1,27
04	1200	0,000013	0,00352	$1,08 \cdot 10^{-8}$	$3,07 \cdot 10^{-6}$	1,10
05	1200	0,000009	0,00352	$7,5 \cdot 10^{-9}$	$2,13 \cdot 10^{-6}$	0,76
06	1200	0,000007	0,00352	$5,83 \cdot 10^{-9}$	$1,65 \cdot 10^{-6}$	0,59
07	1200	0,000006	0,00352	$5,00 \cdot 10^{-9}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$	0,51
08	1200	0,000005	0,00352	$4,16 \cdot 10^{-9}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$	0,42

Résultats obtenus au laboratoire

Nombre d'irrigation	«K»	Type de sol
01	2,72	Sols perméables
02	1,44	Sols peu perméables
03	1,27	Sols peu perméables
04	1,10	Sols peu perméables
05	0,76	Sols peu perméables
06	0,59	Sols peu perméables
07	0,51	Sols peu perméables
08	0,42	Sols peu perméables

Résultats obtenus au laboratoire

12^{ème} concentration [6000mg/l]

Nombre d'irrigation	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000030	0,00352	2,5.10 ⁻⁸	7,10.10 ⁻⁶	2,55
02	1200	0,000021	0,00352	1,75.10 ⁻⁸	4,97.10 ⁻⁶	1,78
03	1200	0,000014	0,00352	1,16.10 ⁻⁸	3,32.10 ⁻⁶	1,19
04	1200	0,000012	0,00352	1,00.10 ⁻⁸	2,84.10 ⁻⁶	1,02
05	1200	0,000009	0,00352	7,5.10 ⁻⁹	2,13.10 ⁻⁶	0,76
06	1200	0,000006	0,00352	5,00.10 ⁻⁹	1,42.10 ⁻⁶	0,51
07	1200	0,000005	0,00352	4,16.10 ⁻⁹	1,18.10 ⁻⁶	0,42
08	1200	0,000003	0,00352	2,5.10 ⁻⁹	7,10.10 ⁻⁷	0,25

Résultats obtenus au laboratoire

Nombre d'irrigation	«K»	Type de sol
01	2,55	Sols perméables
02	1,78	Sols peu perméables
03	1,19	Sols peu perméables
04	1,02	Sols peu perméables
05	0,76	Sols peu perméables
06	0,51	Sols peu perméables
07	0,42	Sols peu perméables
08	0,25	Sols imperméables

Résultats obtenus au laboratoire

13^{ème} concentration [8000mg/l]

Nombre D'irrigation	Temps (second)	Volume d'eau recueilli (m ³)	Section d'entonnoir filtre (m ²)	Le débit Q (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité K (m/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/heure)
01	1200	0,000018	0,00352	1,5.10 ⁻⁸	4,26.10 ⁻⁶	1,53
02	1200	0,000010	0,00352	8,33.10 ⁻⁹	2,36.10 ⁻⁶	0,85
03	1200	0,000010	0,00352	8,33.10 ⁻⁹	2,36.10 ⁻⁶	0,85
04	1200	0,000008	0,00352	6,66.10 ⁻⁹	1,89.10 ⁻⁶	0,68
05	1200	0,000006	0,00352	5,00.10 ⁻⁹	1,42.10 ⁻⁶	0,51
06	1200	0,000004	0,00352	3,33.10 ⁻⁹	9,46.10 ⁻⁷	0,34
07	1200	0,000002	0,00352	1,66.10 ⁻⁹	4,73.10 ⁻⁷	0,17
08	1200	0,000001	0,00352	8,33.10 ⁻¹⁰	2,36.10 ⁻⁷	0,08

Résultats obtenus au laboratoire

Nombre d'irrigation	«K»	Type de sol
01	1,53	Sols peu perméables
02	0,85	Sols peu perméables
03	0,85	Sols peu perméables
04	0,68	Sols peu perméables
05	0,51	Sols peu perméables
06	0,34	Sols imperméables
07	0,17	Sols imperméables
08	0,08	Sols imperméables

Résultats obtenus au laboratoire