

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE
POLYTECHNIQUE
Département d'Hydraulique
Laboratoire LRS/EAU



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Magister en :
HYDRAULIQUE

Par : Ould Slimane Abdelaziz

THEME :

**ETUDE DU TRANSPORT
SOLIDE DANS L'OUED
BOUSSELLAM (BEJAIA)**

Soutenue le 14 décembre 2011 devant le jury :

	Nom & Prénom	Etablissement
Président	Pr : Ahmed Kettab	E.N.P - Alger
Directeur de thèse	Pr : Boualem Remini	Université S-Dahleb
Examineur	Dr : Saâdia Benmamar	E.N.P - Alger
Examineur	Dr : Mohamed Bessenasse	Université S-Dahleb
Examineur	Dr : Abdelmalek Chergui	E.N.P - Alger

Etude du transport solide dans l'oued Boussellam (Bejaia)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à l'endroit de mon directeur de thèse le professeur Remini Boualem. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir proposé ce sujet de recherche d'avoir accepté de m'encadrer. De même j'ai amplement profité de son assistance avertie, de son sens de critique et de son expertise.

Je le remercie également pour la confiance et le temps qu'il m'a donné sans lui ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens à remercier chaleureusement Mr Ahmed Kettab professeur à l'école nationale polytechnique, pour l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté de présider le jury de la soutenance.

Je tiens à remercier vivement Saadia. Benmamar, maître de conférences à l'école nationale polytechnique, pour son soutien, ses conseils et d'avoir accepté d'examiner mon travail. J'admire en elle son ancestrale modestie, sa générosité et surtout son dévouement pour l'enseignement et la recherche.

Mes remerciements, vont également à Mr Mohamed Bessanese docteur à l'université Saad Dahleb et à Mr Abdelmalek Chergui docteur à l'école nationale polytechnique, d'avoir accepté de faire partie du jury et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Je remercie Mr Salim. Benziada, chargé de cours à l'école nationale polytechnique, pour tous ses encouragements et ses conseils.

Ma reconnaissance et mes remerciements à toute l'équipe du département d'hydrologie et à madame Abda chef de département à l'ANRH, pour son aide, sa disponibilité et sa gentillesse.

Mes remerciements à tous les membres de la bibliothèque centrale de l'ANRH et particulièrement à monsieur Tahar Elhadi pour son éternelle aide et l'accueil chaleureux, qu'il m'a toujours réservé.

الخلاصة

التحاليل الهيدرولوجية و نقل الرواسب النهريّة الكليّة بالتحميل وحمل السرير قد تمت في الحوض التجمعي لواد بوسلام عند محطة قياس المياه لسدي يحييا (شرق الجزائر) لمدة 24 سنة. التحاليل تمت من أجل إيجاد أليات قياس الحمولة الصلبة والتعرية. دراسة عميقة للصيب السائل و الصلب و التدفق السائل و الصلب مكنتنا من إيجاد علاقات بينها. التدايعات لسد عين زادا على محطة قياس المياه لسدي يحييا تم تسليط الضوء عليها. نتائج الدراسة المنقولة على أرضية تشي حاف مكنت من إيجاد مدة الريح في عمر السد الحامل لنفس التسمي الكلمات الأساسية- حوض التجميع- الرواسب النهريّة- التعرية- الواد بوسلام سدي يحييا حمل السرير

RESUME

Les analyses hydrologiques et de transport solide total en suspension et par charriage ont été effectués sur le bassin versant de l'oued Bousellam à la station hydrométrique de Sidi-Yahia (est Algerien) sur une période de 24 années. Ces dernières ont été menées dans le but d'élaborer un ensemble d'outils permettant la quantification du transport solide et des taux d'érosion. Une étude approfondie des débits liquides, débits solides, apports liquides et apports solides a permis de corréliser ces différents paramètres dans différentes relations. Les répercussions de la retenue d'Ain Zada sur la station de Sidi-Yahia ont été mises en évidence. Les résultats de l'étude extrapolés sur le site de Tichy-Haf ont permis d'estimer le gain en durée de vie du barrage du même nom.

Mots clés ; Bassin versant, Bousellam, Sidi-Yahia, transport solide, érosion, apport liquide, *apport solide*.

Abstract

Analyzes hydrologic and sediment transport in total suspension and bedload were conducted on the watershed of Bousellam river at the hydrometric station of Sidi Yahia (Eastern Algeria) over a period of 24 years. These were conducted to develop a set of tools for the quantification of sediment transport and erosion rates. A comprehensive study of liquid flow, sediment discharge, sediment yield and liquid intake allowed correlating these parameters in different relationships. The impact of withholding Ain-Zada on the Sidi-Yahia station was highlighted. The results of the study extrapolated on-site Tichy-Haf were used to estimate the gain in life of the dam of the same name.

Keywords; Watershed Bousellam, Sidi-Yahia, sediment transport, erosion, fluid intake.

Tableau des principales notations

Symbole	Intitulé	Unité
App	Apport liquide annuel	m ³ /an
App _m	Apport liquide mensuel	m ³
Apps	Apport liquide saisonnier	m ³
App _{cum}	Apport liquide cumulé	m ³
a	Facteur correctif	-----
C _v	Coefficient de variation	-----
Ch	Coefficient d'hydraulicité	-----
C _{va}	Coefficient de variabilité	m
D _i	Diamètre de grain (l'indice indique « en % plus fin que)	m
D _m	Diamètre moyen arithmétique = $\Sigma(diPi)/P$ (di diamètre, Pi poids)	m
D ₅₀	Diamètre médian	m
E _s	Débit spécifique d'érosion	t/km ² /an
E _{sTix}	Débit spécifique d'érosion Tixeront	t/km ² /an
E _{s Four}	Débit spécifique d'érosion Fournier	t/km ² /an
E _c	Ecoulement annuel	mm
Fr	Nombre de Froude $Fr=U/(gH)^{1/2}$	-----
f	Coefficient de frottement de Darcy Weisbach	-----
G _s	Débit solide total charrié	Kg/s
G _t	Débit solide total	Kg/s
g	Pesanteur	m/s ²
g _s	Débit solide charrié unitaire	Kg/s/m
g _r	Débit solide critique.	Kg/s/m
H	Hauteur d'eau	m
H	Altitude moyenne	m
I	Pente du cours d'eau	-----
HM	Altitude maximale	m

Hm	Altitude minimale	m
K_c	Indice de compacité	-----
k_s	Coefficient de rugosité des fonds	-----
k_r	Coefficient de rugosité des grains solides	-----
L	Largeur du cours d'eau	m
Pc	Périmètre du rectangle équivalent	Km
Lr	Lame ruisselée	mm
Lt	Longueur du thalweg principal	Km
P	Pluie moyenne annuelle	mm
Pj	Pluie maximale journalière	mm
Ql	Débit liquide	m ³ /s
Qs	Débit solide en suspension	Kg/s
Q _{moy}	Débit liquide moyen	m ³ /s
Q _{max}	Débit liquide maximal	m ³ /s
Q _{min}	Débit liquide minimal	m ³ /s
q _s	Débit solide volumique unitaire	m ³ /s/m
R	Rayon hydraulique	m
Re	Nombre de Reynolds $Re = UR / \nu$	-----
Re*	Nombre de Reynolds particulaire $Re^* = u^* D / \nu$	-----
S	Surface du bassin versant	Km ²
s	Densité relative ($s = \rho_s / \rho$)	-----
$\tan\alpha$	Coefficient dynamique de frottement interne du sédiment	-----
U	Vitesse moyenne	m/s
u^*	Vitesse de frottement: $u^* = (\tau / \rho)$	m/s
W	Apport solide annuel	t/an
W _{cum}	Apport solide cumulé	t/an
Ws	Apport solide saisonnier	t/an
App _{cum}	Perte en apport liquide cumulé	m ³
ΔApp	Perte en apport liquide annuel	m ³
ΔApp_m	Perte en apport liquide mensuel	m ³

ΔApp_s	Perte en apport liquide saisonnier	m^3
ΔQ_l	Variation du débit liquide	m^3/s
ΔW_{cum}	Perte en apport solide cumulé	t/an
ρ	Masse volumique de l'eau	kg/m^3
ρ_s	Masse volumique sédimentaire	kg/m^3
τ_c	Contrainte de cisaillement critique	kg/m^3
τ	Contrainte de cisaillement $\tau = \rho g R I$	Kg/cm^2
θ	Paramètre de Shields: $\theta = \tau_o / [(\rho_s - \rho)gD]$	-----
θ_c	Paramètre critique de Shields pour le début de mouvement	-----
θ_l	Paramètre de Shields pour la transition du régime 2 au régime 3	-----
ω	Puissance de l'écoulement : $\omega = \tau U$	-----
ω_c	Puissance critique de l'écoulement

Liste des tableaux

➤ Tableau 1-1 : Capacités des barrages.....	41
➤ Tableau 2-1 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant.....	49
➤ Tableau 2-2 : Classification hydrologique des sols.....	51
➤ Tableau 3-1 : Coefficients de l'hydraulicité et de variation.....	62
➤ Tableau 3-2 : Valeurs moyennes des débits liquides Q min, Q moy, Q max.....	63
➤ Tableau 3-3 : Coefficient de variation et perte en débit liquide mensuel	63
➤ Tableau 3-4 : Perte en débit liquide saisonnier entre les deux périodes	66
➤ Tableau 3-5 : Coefficient de variabilité de l'apport annuel.....	70
➤ Tableau 3-6 : Apport cumulé calculé.....	72
➤ Tableau 3-7 : Apport liquide saisonnier.....	74
➤ Tableau 3-8 : Apport liquide mensuel.....	78
➤ Tableau 4-1 : Valeurs de a b et R^2 (charriage à l'échelle saisonnière (71-88)	90
➤ Tableau 4-2 : Valeurs de a b et R^2 (charriage à l'échelle saisonnière (88-95).....	91
➤ Tableau 4-3 : Coefficient de corrélation de $Q_s = f(Q_l)$ période / 71-95.....	92
➤ Tableau 4-4 : Coefficient de corrélation de $Q_s = f(Q_l)$ période / 71-88.....	92
➤ Tableau 4-5 : Coefficient de corrélation de $Q_s = f(Q_l)$ période / 88-95.....	92
➤ Tableau 4-6 : Valeurs de a b et R^2 (Suspension à l'échelle saisonnière) / 71-88.....	94
➤ Tableau 4-7 : Valeurs de a b et R^2 (Suspension à l'échelle saisonnière) / 88-95.....	94
➤ Tableau 4-8 : Débits solides Q, G _s , G _t et apport solide W.....	96
➤ Tableau 4-9 : Rapport débit charrié G _s au débit en suspension Q _s	99
➤ Tableau 4-10 : Coefficient de variation C _v de l'apport solide annuel.....	102
➤ Tableau 4-11 : Apport solide saisonnier.....	105
➤ Tableau 4-12 : Pourcentage d'apport solide saisonnier.....	106
➤ Tableau 4-13 : Débit spécifique calculé.....	113
➤ Tableau 4-14 : Débit spécifique Tixeront EsTix.....	115
➤ Tableau 4-15 : Débit spécifique Fournier EsFour.....	117
➤ Tableau 4-16 : Valeurs moyennes des débits spécifiques Es	118
➤ Tableau 4-17 : Débit spécifique d'érosion saisonnier.....	119
➤ Tableau 5-1 : Valeurs de l'apport liquide cumulé calculé.....	126
➤ Tableau 5-2 : Valeurs de l'apport solide cumulé calculé.....	128

TABLE DES FIGURES

➤ Figure 2.1 : Carte du bassin versant de Boussellam (Echelle : 1/500.000).....47

➤ Figure 2-2 : Réseaux hydrographiques du bassin versant... 50

➤ Figure 2-3 : Profil en long des principaux cours d'eau.....50

➤ Figure 2-4 : Formations géologiques du bassin versant de la Soummam.....53

➤ Figure 2-5. Carte des sols du Bassin versant de la Soummam.....54

➤ Figure 2-6 : Carte pluviométrique du bassin versant.....57

➤ Figure 3-1 : Evolution du débit liquide maximal annuel.....59

➤ Figure 3-2 : Evolution du débit liquide minimal annuel.....60

➤ Figure 3-3 : Evolution du débit liquide moyen annuel.....61

➤ Figure 3-4 : Evolution du débit liquide mensuel.....64

➤ Figure 3-5 : Variation du coefficient mensuel de débit C M D65

➤ Figure 3-6 : Pourcentage de perte en débit liquide mensuel.....65

➤ Figure 3-7 : Débit liquide saisonnier.....66

➤ Figure 3-8 : Variation du débit liquide saisonnier.....67

➤ Figure 3-9 : Perte en débit liquide saisonnier.....68

➤ Figure 3-10 : Evolution de l'apport liquide annuel.....69

➤ Figure 3-11 : Variation de l'apport liquide annuel par rapport à l'apport moyen
annuel 71-88.....71

➤ Figure 3-12 : Variation de l'apport liquide annuel par rapport à l'apport moyen
annuel 88-95.....71

➤ Figure 3-13 : Evolution de l'apport liquide annuel en fonction du temps. 71-8.....73

➤ Figure 3-14 : Evolution de l'apport liquide annuel en fonction du temps. 88-95.....73

➤ Figure 3-15 : Evolution de l'apport liquide annuel en fonction du temps. 71-95.....74

➤ Figure 3-16 : Evolution de l'apport liquide saisonnier.....75

➤ Figure 3-17 : Apport liquide saisonnier 71-88.....76

➤ Figure 3-18 : Apport liquide saisonnier 88.-95.....76

➤ Figure 3-19 : Perte en apport liquide saisonnier.....77

➤ Figure 3-20 : Variation de l'apport liquide mensuel par rapport à la moyenne
Mensuelle de la période 71-88.....79

➤ Figure 3-21 : Variation de l'apport liquide mensuel par rapport à la moyenne
mensuelle de la période 88-95.....79

➤ Figure 3-22 : Evolution de l'apport liquide mensuel.....80

➤ Figure 3-23 : Variation de l'apport liquide mensuel.....81

➤ Figure 3-24 : Pourcentage en apport liquide mensuel 71-88.....	81
➤ Figure 3-25 : Pourcentage en apport liquide mensuel 88-95.....	82
➤ Figure 3-26 : Perte en apport liquide mensuel.....	83
➤ Figure 3-27 : Pourcentage de perte en apport liquide mensuel.....	83
➤ Figure 4-1 : Nuage de points débit solide charrié Gs- débit liquide Ql / 71-95.....	87
➤ Figure 4-2 : Nuage de points débit solide Gs - débit liquide Ql / 71-88.....	88
➤ Figure 4-3 : Nuage de points débit solide charrié Gs - débit liquide Ql/ 88-95.....	88
➤ Figure 4-4 ; Débit solide charrié en fonction du débit liquide 71-95.....	89
➤ Figure 4-5 : Débit solide charrié en fonction du débit liquide / 71-88.....	89
➤ Figure 4-6 : Débit solide charrié en fonction du débit liquide / 88-95.....	90
➤ Figure 4-7 : Débit solide en suspension Qs en fonction du débit liquide Ql /71-88....	93
➤ Figure 4-8 : Débit solide en suspension Qs en fonction du débit liquide Ql/ 88-95....	93
➤ Figure 4-9 : Evolution du débit solide en suspension Qs dans le temps.....	97
➤ Figure 4-10 : Evolution du débit charrié Gs dans le temps.....	98
➤ Figure 4-11 : Evolutions du débit solide total Gt dans le temps.....	98
➤ Figure 4-12 : Evolution du rapport Gs/Qs en fonction du temps.....	100
➤ Figure 4-13 Evolution de l'apport solide annuel en fonction du temps.....	101
➤ Figure 4-14 : Variation de l'apport solide cumulé en fonction du temps /71-88.....	103
➤ Figure 4-15 : Variation de l'apport solide cumulé en fonction du temps /88-95.....	104
➤ Figure 4-16 : Variation de l'apport solide cumulé en fonction du temps /71-95.....	104
➤ Figure 4-17 : Apport solide saisonnier.....	106
➤ Figure 4-18 : Apport solide saisonnier en pourcentages /71-88.....	107
➤ Figure 4-19 : Apport solide saisonnier en pourcentages /88-95.....	107
➤ Figure 4-20 : Chute en apport solide saisonnier.....	108
➤ Figure 4-21 : Chute en apport solide saisonnier en %.....	109
➤ Figure 4-22 : Apport solide annuel en fonction du débit liquide / 71-88.....	110
➤ Figure 4-23 : Apport solide annuel en fonction du débit liquide / 88-95.....	110
➤ Figure 4-24 : Apport solide en fonction de l'apport liquide / 71-88.....	111
➤ Figure 4-25 : Apport solide en fonction de l'apport liquide / 88-95.....	112
➤ Figure 4-26 : Evolution du débit spécifique Es en fonction du temps.....	114
➤ Figure 4-27 : Evolution du débit spécifique Tixeront en fonction du temps.....	116
➤ Figure 4-28 : Evolution du débit spécifique Fournier en fonction du temps.....	118
➤ Figure 4-29 : Variation du débit spécifique d'érosion saisonnier.....	120
➤ Figure 4-30 : Variation du débit spécifique d'érosion saisonnier en pourcentage.....	120
➤ Figure 4-31 : Variation du débit spécifique d'érosion en fonction de la pluie annuelle /71-88.....	121

- Figure 4-32 : Variation du débit spécifique d'érosion en fonction de la pluie annuelle/ 88-95.....122
- Figure 4-33 : Variation du débit spécifique d'érosion en fonction de l'indice climatique / 71-88.....123
- Figure 4-34 : Variation du débit spécifique d'érosion en fonction de l'indice climatique /88-95123
- Figure 4-35 : Variation du débit spécifique d'érosion en fonction de la lame ruisselée. /71-88.....124
- Figure 4-36 : Variation du débit spécifique d'érosion en fonction de la lame ruisselée. / 88.-95.....125
- Figure 5-1 : Evolution de la perte en apport liquide annuel cumulé en fonction du temps.....127
- Figure 5-2 : Evolution de la chute en apport solide annuel cumulé en fonction du temps129

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

1- Introduction générale.....	1
2- Présentation et cadre de l'étude.....	3
3- But de l'étude.....	3
4- Plan de l'étude.....	3

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU TRANSPORT SOLIDE

1- Introduction générale.....	5
2- Etude théorique du transport solide.....	7
2-1 Introduction.....	7
2-2 Les différents modes de transport solide.....	7
2-2-1 Transport en suspension.....	8
2-2-2 Transport par charriage	8
2-3 Origine de l'érosion.....	9
2-4 Mesure du transport solide en suspension.....	9
2-4-1 Méthodes de mesure des matières en suspension.....	10
2-4-1-1 Prélèvements instantanés.....	10
2-4-1.2 Prélèvements intégrés en profondeur.....	10
2-4-1-3 Prélèvements intégrés en un point pendant un temps court.....	10
2-4-1-4 Prélèvements intégrés pendant un temps long.....	11
2-4-2 Appareillage de mesure du transport solide en suspension.....	11
2-4-2-1 La sonde de Collet	11
2-4-2-2 La sonde Britannique	12
2-4-2-3 Le Bathymètre-Tachy mètre de Glouchkoff.....	12
2-4-2-4 Les turbidisondes.....	12
2-4-2-5 Les appareils de prélèvements en continu.....	13
2-5 Mesure du transport solide par charriage	13
2-5-1 Les nasses de prise en rivière.....	14
2-5-2 La méthode de la cubature des dépôts dans les retenues	14
2-5-3 Méthodes modernes.....	14

2-5-3-1 La méthode des peintures et résines.....	14
2-5-3-2. La méthode des traceurs luminescents.....	14
2-5-3-3 La méthode des traceurs radioactifs.....	16
2-6 Formulation du transport solide par charriage.....	16
2-6-1 Introduction	16
2-6-2 Formules du transport solide	18
3- Présentation de quelques travaux sur le transport solide.....	23
Conclusion.....	44

CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUES PHYSICOClimATIQUES, GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT

1- Caractéristiques physiques du bassin versant.....	46
1-1 Situation géographique du bassin versant.....	46
1-2 Caractéristiques de forme.....	47
1-2-1 Surface du bassin versant.....	47
1-2-2 Les Longueurs du bassin versant.....	47
1-2-3 Indice de compacité.....	48
1-3 Etude du réseau hydrographique.....	49
2- Etude géologique.....	50
2-1 Géologie régionale.....	50
2-2 Géologie du bassin versant.....	53
3- Etude des sols.....	53
4- Le couvert végétal.....	54
5- Etude du climat.....	55
5-1 Aperçu sur le climat de l'Algérie.....	55
5-2 Climat du bassin versant.....	56
6- Pluviométrie.....	56
6-2 Pluviométrie de l'Algérie.....	56
6-3 Pluviométrie du bassin versant.....	56
Conclusion.....	56

CHAPITRE 3 : ETUDE DES DEBITS ET DES APPORTS LIQUIDES

Remarque préliminaire.....	58
Introduction.....	58

1- Etude des différents débits liquides.....	59
1-1 Etude du débit liquide à l'échelle annuelle.....	59
1-1-1 Etude du débit liquide maximal annuel.....	59
1-1-2 Etude du débit liquide minimal annuel.....	59
1-1-2-1 Etude générale.....	59
1-1.2-2 Etude de l'irrégularité interannuelle du débit minimal annuel.....	60
1 -1 -3 Etude du débit liquide moyen annuel.....	61
1-1-3-1 Etude générale.....	61
1-1.3-2 Etude de l'irrégularité interannuelle du débit moyen annuel.....	61
1-2 Etude du débit liquide à l'échelle mensuelle.....	63
1-2-1 Etude de la variation du débit liquide mensuel.....	64
1-2-2 Etude des pertes en débit liquide mensuel.....	64
1-3 Etude du débit liquide à l'échelle saisonnière.....	65
1-3-1 Etude de la variation du débit saisonnier.....	66
1-3-2 Etude de la perte en débit liquide saisonnier.....	67
2- Etude des différents apports liquides.....	68
2-1 Etude de l'apport liquide annuel.....	68
2-1-1 Etude globale de l'apport liquide annuel.....	68
2-1-2 Etude de l'irrégularité de l'apport annuel.....	69
2-1-3 Etude de la variabilité de l'apport annuel.....	69
2-1-4 Etude de l'apport liquide annuel cumulé.....	72
2-2 Etude de l'apport liquide saisonnier.....	74
2-2-1 Etude de la variation de l'apport liquide saisonnier.....	74
2-2-2 Etude des pertes en apport liquide saisonnier.....	75
2-3 Étude de l'apport liquide mensuel.....	78
2-3-1 Etude de la variabilité de l'apport liquide mensuel.....	78
2-3-2 Etude de la variation de l'apport liquide mensuel.....	80
2-3-3 Etude de la perte en apport liquide mensuel.....	82
Conclusion.....	84

CHAPITRE 4 : ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE

1- Introduction.....	85
2- Présentation et mise en forme des données.....	85

3- Etude du transport solide par charriage.....	85
3-1 Introduction.....	85
3-2 Formulation du débit solide par charriage.....	86
3-3 Recherche d'une relation entre le débit charrié G_s et le débit liquide Q_l	87
3-4 Etude du transport solide par charriage à l'échelle saisonnière.....	90
4- Etude du transport solide en suspension.....	90
4-1 Etude globale.....	91
4-2 Etude du transport solide en suspension à l'échelle saisonnière.....	94
5- Etude des débits solides annuels en suspension, par charriage et total.....	95
5-1 Etude du débit solide moyen annuel en suspension.....	96
5-2 Étude du débit solide par charriage moyen annuel G_s	97
5-3 Etude du débit solide total annuel G_t	97
5-4 Etude comparative du débit solide annuel en suspension Q_s et du débit solide Annuel par charriage G_s	99
6- Etude de l'apport solide à l'échelle annuelle.....	100
6-1 Etude de la variation de l'apport solide annuel.....	101
6-2 Etude de l'irrégularité de l'apport solide annuel.....	101
6-3 Etude de l'apport solide annuel cumulé.....	102
6-3-1 Etude globale de l'apport solide annuel Cumulé.....	102
6-3-2 Etude de la variation de l'apport solide annuel cumulé.....	104
7- Etude de l'apport solide saisonnier.....	105
7-1 Etude globale.....	105
7-2 Etude des chutes en apport solide saisonnier.....	108
8- Etude de l'apport solide annuel en fonction du débit liquide annuel.....	109
9- Etude de l'apport solide annuel en fonction de l'apport liquide annuel.....	111
10- Etude des débits spécifiques d'érosion.....	112
10-1 Débit spécifique d'érosion calculé E_s	112
10-1-1 Calcul du débit spécifique d'érosion.....	112
10-1-2 Etude du débit spécifique d'érosion en fonction du temps.....	113
10-2 Calcul du débit spécifique d'érosion par la méthode de T'ixeront.....	114
10-3 Calcul du débit spécifique d'érosion par la méthode de Fournier.....	116

10-4 Comparaison des différents débits spécifiques d'érosion.....	118
10-5 Etude du débit spécifique d'érosion à l'échelle saisonnière.....	119
10-5-1 Etude globale.....	119
10-5-2 Etude de la variation du débit spécifique d'érosion.....	119
11- Relations entre le débit spécifique d'érosion et différents paramètres.....	121
11-1 Relation entre le débit spécifique d'érosion et la pluie annuelle.....	121
11-2 Relation entre le débit spécifique d'érosion et l'indice climatique de Fournier...	122
11-3 Etude de l'érosion spécifique en fonction de la lame ruisselée.....	124
Conclusion.....	125
CHAPITRE 5 : EXPLOITATION DES RESULTATS	
1- Introduction.....	126
2- Etude de l'influence de la retenue d'AinZada sur les apports liquides du barrage de TichyHaf.....	126
3- Etude de l'influence de la retenue d'AinZada sur les apports solides du barrage de TichyHaf.....	128
4- Détermination du gain en durée de vie du barrage de TichyHaf.....	128
CONCLUSION	130
Références bibliographiques.....	135

INTRODUCTION

1 - INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie, a été particulièrement vulnérable aux changements climatiques et au réchauffement qu'a connu la planète ces dernières années. En témoignent, les relevés climatiques pris aux niveaux des différentes stations météorologiques du pays Les sécheresses qu'a connu le pays ces dernières années, ont été sérieusement senties et ne sont pas passées inaperçues.

La rigueur et l'intensité de la sécheresse de ces dernières années, est caractérisée par un important déficit pluviométrique qui s'est répercuté négativement sur les régimes d'écoulement des cours d'eau, par suite sur les taux de remplissage des barrages et des nappes aquifères.

Tous ces changements, ont eu des répercussions directes et très sensibles sur l'ensemble des activités socio-économiques du pays.

Pour faire face à cette situation que traverse le pays et répondre à la demande croissante et sans cesse des divers usages (eau potable, agriculture et industrie), l'Algérie a consenti ces dernières années à travers différents programmes et en dégagant des budgets colossaux des efforts très considérables en matière d'investissement, mobilisation, traitement et transfert des ressources hydriques.

Les résultats en matière de satisfaction des différents besoins en eau sur les plans qualité et quantité, ne peuvent être qualifiés que de satisfaisants et tangibles. Dans ce sens, l'Algérie a tracé une politique et une stratégie en matière de mobilisation, de transfert et de gestion des ressources hydriques qui s'inspire de la politique de l'aménagement du territoire, basée essentiellement sur les axes suivants :

- Durabilité des ressources hydriques.
- - Satisfaction des besoins en eau des populations, des secteurs agricole et industriel.
- Protection des ressources hydrauliques:
- Réalisation de nouveaux barrages et de grands transferts des eaux entre différentes régions.
- Réalisation d'unités de dessalement pour la satisfaction des besoins en eau potable des villes côtières.
- Réutilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation.
- Economie de l'eau dans tous les usages.
- Réhabilitation des réseaux pour minimiser les pertes en eau.
- L'achèvement de barrages et transferts en cours de construction et le lancement de projets de barrages en cours d'étude.

- La réalisation de forages.

Les efforts consentis, sont très importants, les résultats escomptés le sont aussi. Seulement toute cette politique et son essor, sont essentiellement tributaires de cette eau elle-même. En effet, l'eau se trouve aujourd'hui menacée et très sérieusement par deux 'fléaux' :

- 1- Les rejets industriels, qui détériorent l'eau et sa qualité par les différents agents chimiques rejetés dans les cours d'eau. (Ce volet n'intéresse pas notre étude).
- 2- L'érosion hydrique et toutes ses conséquences sur les cours d'eau et les barrages.

L'érosion hydrique, a été et reste toujours un risque pluridimensionnel Son essence, est dans la pluie et sa rigueur. Ses conséquences, sont multiples et très néfastes. Elles sont d'ordre écologique, social et économique.

La conséquence la plus dramatique et celle qui nous intéresse ? est l'envasement des barrages. En effet, par ce phénomène nos barrages subissent d'énormes pertes dans leur capacité. Encore plus grave, dans certains cas leur "survie" est menacée et leur mise 'hors service' est imminente si d'urgentes interventions ne sont pas prises au temps opportun par les services concernés.

La sédimentation des 110 barrages que comptait l'Algérie en 1995, était estimée à 560 millions de mètres cubes, soit un taux de comblement de 12,5 %. En l'an 2000, elle était évaluée à 650 millions de mètres cubes, soit un taux d'envasement de 14,5 %. Quant au barrage de Ghrib de Médéa, sa capacité initiale en 1939, était de 280 millions de mètres cubes et n'était que de 109 millions de mètres cubes en 1977, soit une perte égale à 171 millions de mètres cubes, autrement dit l'équivalent d'un important barrage (Remini.B, 1998)

C'est dans ce contexte global de prise de conscience et de nouvelles visions, dictées par les bouleversements écologiques que connaît la planète. Visions qui rendent à la l'eau sa valeur ; sa vraie valeur ; n'est-elle pas la vie ? N'est-elle pas le principal facteur régulateur de l'essor d'un pays ? Contexte dans lequel valorisation et grand intérêt sont accordés aux potentiels hydriques par le redéploiement d'importants efforts, que vient s'inscrire notre étude espérant conjuguer notre effort à tous ceux qui sont déployés pour apporter notre modeste collaboration.

2 - PRESENTATION ET CADRE DE L'ETUDE

Le problème que pose le transport solide lors des études et dimensionnement des barrages, est crucial. Connaître la quantité exacte de matériaux solides que recevra l'ouvrage facilitera énormément son dimensionnement et réduira de surcroît les coûts. En effet,

surestimer les quantités de matériaux solides déposés dans le barrage surestimera les coûts de revient, les sous-estimés accentuera la mise hors service du barrage après quelques années. Le calcul de la sédimentation dans une retenue, est aussi un outil de prévision, conception et exploitation de l'ouvrage.

Il est connu que lors des études de barrages, la partie transport solide se limite à la détermination du volume mort en se basant sur des formules empiriques qui ne s'adaptent pas forcément au cas étudié. Vu l'importance de connaître aussi exacte que possible les quantités solides transportées, il est plus rationnel de se baser sur les données du cours d'eau concerné par l'ouvrage à réaliser. C'est dans ce sens que vient s'inscrire cette étude

3 - BUT DE L'ETUDE

La présente étude, s'inscrit dans le cadre de l'étude du phénomène de l'érosion hydrique et du transport solide dans le bassin versant de l'oued Boussellam. Elle a pour but l'élaboration d'outils simples, permettant d'évaluer les quantités de sédiments transportés par l'oued et l'estimation du taux d'érosion pour ce bassin versant.

A chaque fois qu'il s'agit de calculer les apports solides au niveau d'un ouvrage hydraulique, on calcule l'apport solide en suspension et devant la difficulté de calculer le transport solide par charriage, ce dernier est estimé en pourcentage de l'apport solide en suspension.

Dans cette étude pour remédier à ce problème, on cherchera à élaborer une méthodologie qui permettra de calculer l'apport solide globale (suspension et charriage).

On s'intéressera également aux écoulements liquides par une étude approfondie des débits et des apports liquides du cours d'eau.

L'étude sera menée au bassin versant de l'oued Boussellam à la station de Sidi yahia (Wilaya Béjaia).

4 - PLAN DE L'ETUDE

Notre étude, s'articulera sur trois axes principaux :

- 1- En premier, on s'intéressera à l'étude théorique du transport solide, à la recherche de la documentation nécessaire et à la collecte de donnée.
- 2- En deuxième lieu, l'étude s'accrochera sur l'exploitation des données par leur traitement et leurs analyses.
- 3- En dernier lieu, l'étude sera consacrée à l'exploitation des résultats et leur application.

Afin de mener à terme ce travail, nous l'avons structuré en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, on s'intéressera à l'étude théorique du transport solide par une étude

approfondie sous ses différents aspects. On parlera du transport solide, de ses origines et de ses causes, des différents modes de transports et des méthodes de sa mesure ainsi que du matériel utilisé.

Dans le deuxième chapitre, on présentera la zone concernée par la présente étude. On parlera de la situation du bassin versant et de ses principales caractéristiques.

Le troisième chapitre, sera consacré à l'étude hydrologique. Cette dernière, s'accentuera sur l'étude des différents débits liquides. On s'intéressera profondément aux apports liquides à différentes échelles.

Le quatrième chapitre, est réservé au transport solide et s'articulera autour d'une étude détaillée des débits et apports solides. On commencera par la recherche de relations liant les différents débits solides aux débits liquides, ensuite on consacrera une partie à l'étude des différents débits et apports solides à différentes échelles. On reliera par une étude des taux d'érosion par l'application de différentes relations et enfin on terminera le chapitre par la recherche de relations entre le taux d'érosion et différents paramètres hydro climatiques.

Le cinquième et dernier chapitre, sera consacré à l'exploitation des résultats et leur extrapolation et application dans un cas particulier.

Chapitre 1

Etude bibliographique du transport solide

1 - INTRODUCTION GENERALE

L'érosion hydrique au Maghreb, est universellement connue. Les conditions physiques, géomorphologiques et hydro-climatiques, lui sont très favorables. Ce phénomène, est très complexe par son caractère irrégulier, aléatoire et par sa discontinuité spatiotemporelle. Son ampleur, est une sérieuse contrainte pour le développement de l'agriculture et à la gestion des ouvrages hydrauliques. Elle cause d'énormes pertes aux réserves d'eau dans cette région.

Les quantités de matériaux solides transportées et les taux d'érosion, atteignent des valeurs très importantes, dépassant la valeur de 5000 t/km²/an dans certaines régions. (Demmak, 1982).

L'Algérie, est l'un des pays les plus menacé, les taux d'érosion sont spectaculaires. En effet, les valeurs du taux d'érosion enregistrées, sont les plus importantes de l'Afrique du Nord. Elles dépassent les 2000 t/km²/an dans la majorité des bassins versants de l'Atlas tellien (Rhio, Sly, Fodda, Mazafran, Isser, Soummam,...) et atteignent 4000 t/km²/an sur la chaîne des côtières Dahra et 5000 t/km²/an sur le bassin d'Ighil- Emda (Demmak, 1982).

Quant au Maroc, le taux d'érosion spécifique enregistré, est supérieur à 2000 t/km²/an au niveau des bassins du Martil, de l'Ouergha, d'Akhdar, et de la Tessaout, Il est compris entre 1000 et 2000 t/km²/an au niveau des bassins du Neckor, de M'Harhar, du Loukkos, il se situe, entre 500 et 1000 t/km²/an au niveau des bassins versants de Sebou, de l'Inanouène, de l'Oued El Abid et du Massa et il est inférieure à 500 t/km²/an au niveau du reste du pays. Concernant la Tunisie, l'érosion a gravement affecté 1,2 millions d'hectares dans le nord et le centre ; Soit 25 % de la superficie totale des terres (Remini 2006).

Dans une étude plus récente. Bouraba en 2002, a souligné encore une fois l'ampleur et la gravité de ce fléau, en avançant des chiffres faramineux du taux d'érosion. Aussi, l'érosion spécifique atteint la valeur de 5453 t/km²/an dans le bassin du Chélif, 9397 t/km²/an dans le côtier Algérois, 3990 t/km²/an dans l'Issers, 10375 t/km²/an dans le côtier Constantinois, et 5153 t/km²/an dans le Chott Hodna.

Les chiffres cités, donnent une idée sur l'ampleur du phénomène d'érosion, aux conséquences extrêmement graves sur l'économie du pays.

Les conséquences de l'érosion sont diverses et on peut citer :

- La déminéralisation des terres cultivable, leur défertilisation et leurs effets néfastes sur la production agricole.
- Les désagréments causés par la diminution des profondeurs des eaux portuaires suite aux dépôts sédimentaires et les frais engendrés par le désensablement des ports.
- Le comblement des réseaux urbains d'assainissement : En se décantant dans les conduites et surtout au niveau des singularités, les sédiments ralentissent l'eau et s'il y a obturation de la conduite, les écoulements se feront par suite sur les voies publiques.
- L'exhaussement des lits de cours d'eau, qui conduit à des inondations parfois dramatiques, lorsqu'il s'agit d'agglomérations.
- Le débordement d'eau sur les terres agricoles : Lorsque les alluvions déposées par les eaux, sont stériles, ils engendrent la perte de terres cultivables.
- L'inondation des zones habitées (cas de Bab El Oued).
- La plus dramatique sur tout les plans ; Que se soit Social, écologique ou économique, est l'envasement des barrages.

En 2003 : l'Algérie, le Maroc et la Tunisie, comptaient 230 barrages d'un volume global, estimé à 23 milliard de m^3 ; capacité très considérable. Seulement, chaque année, l'envasement les ampute de 120 millions de m^3 . Ceci, est équivalent à une perte annuelle de 0,52 %. Au delà de ce problème, qui réunit l'ensemble des barrages. Certains, sont très sérieusement menacés " il y va de leur durée vie" et peuvent être mis hors service en quelques années. Ainsi, 10 barrages sur les 230 que compte le Maghreb, à eux seuls représentent un taux de sédimentation annuel de $50 \cdot 10^6 m^3$; Ce qui représente 40 % de la sédimentation totale. Le barrage de Mohamed V, émerge du lot avec ses $11,6 \cdot 10^6 m^3$ de vases reçues annuellement. (Remini, 2003).

On estime à 32 millions de m^3 les quantités de vases, qui viennent se déposer au fond de l'ensemble des barrages Algériens. Ce qui, contribue à réduire de 0,3 % par an les capacités de stockage. (Remini 2006).

Quant à l'Algérie, en 2007 elle comptait 120 barrages de capacité totale égale à 7 milliard de m^3 , avec un volume régularisé de 3 milliards de m^3 par année. Le cumul total des vases déposées au fond de l'ensemble des barrages, est évalué à 1 milliard de m^3 . Ce qui représente, le septième du volume total. (Remini 2007).

Aussi, l'envasement des retenues à travers le monde, a réduit la capacité de stockage des réservoirs d'environ $50 \cdot 10^6 m^3$ d'eau par an.

Ce phénomène, n'épargne pas même le littoral. Ainsi, les quantités de sédiments transportées en suspension susceptibles de se déposer dans le littoral méditerranéen des côtes Algériennes, sont estimées à 47 millions tonnes par an (Probst et al.1992).

2 - ETUDE THEORIQUE DU TRANSPORT SOLIDE

2-1 Introduction

Le transport des sédiments ou graviers, est appelé transport solide ou transit sédimentaire. Il désigne le phénomène de transport par un cours d'eau, d'éléments solides plus ou moins grossiers.

Le transport solide, est un phénomène complexe, dépendant d'une multitude de facteurs géologiques, géomorphologiques, météorologiques, hydrologiques.... mais également humains.

Pour qu'il y ait transport solide dans le lit de la rivière, il faut d'abord qu'il y ait production de matériaux. Cette production de matériaux solides, est essentiellement liée au phénomène d'érosion de certaines zones, appelées zones de production. Ces matériaux, sont essentiellement :

- 1- Les particules, érodées à partir des versants.
- 2- Les particules, arrachées aux berges du cours d'eau.
- 3- Les éléments, soulevés à partir du lit du cours d'eau.

L'analyse granulométrique des particules déplacées par le cours d'eau, vise à établir l'origine des matériaux.

A un moment ou un autre, tous ces matériaux, se retrouvent dans le lit d'un cours d'eau et vont être transportés par ce dernier : On parle alors de transport solide. Le transport solide d'un cours d'eau, est l'ensemble des particules déplacées.

Le transport solide, est un phénomène étroitement lié aux pluies et à la force des crues (plus une crue est importante et plus elle aura la capacité à transporter facilement les sédiments érodés) et au faciès du lit du cours d'eau. En effet, plus la pente est importante et le lit étroit, plus la capacité de transport par charriage du cours d'eau est importante et plus la rivière aura tendance à dissiper sa capacité de charriage en érodant son fond et ses berges. A l'inverse, plus la pente est faible et le lit large, plus la rivière perdra sa capacité de transport par charriage et aura tendance à déposer

les matériaux qu'elle transporte, créant soit des zones d'atterrissements soit un exhaussement plus global du lit.

Les sédiments, sont ainsi transportés plus ou moins lentement jusqu'à l'exutoire du cours d'eau, participant du même coup à modeler le faciès du lit de ce dernier. Ce phénomène naturel, peut être et est souvent largement modifié par l'action de l'homme sur la rivière. Par exemple, les extractions de matériaux réalisées dans le lit mineur des cours d'eau en puisant les matériaux faisant partie du bilan sédimentaire, vont accentuer le déficit en un point et accroître le phénomène d'incision en amont de ce point. A l'inverse, la construction de seuils ou de barrage, vont retenir les matériaux, stopper le transport solide en un point précis, créant une accumulation de matériaux en amont de ce point et un exhaussement du lit mais également un déficit à l'aval de l'ouvrage, entraînant une incision du cours d'eau.

2-2 Les différents modes de transport solide

Il existe, différents modes de transport solide dans les cours d'eau et ils dépendent essentiellement de la morphologie de ces derniers et des terrains traversés. Sous l'effet d'un flux liquide, les éléments constitutifs du lit sont susceptibles d'être mis en mouvement dans les cours d'eau fluviaux. On définit, deux modes de transport des sédiments : La suspension et le charriage.

2-2-1 Transport en suspension

La suspension concerne des particules fines, donc légères. Elles sont maintenues dans le corps de l'écoulement, sans contact fréquent avec le lit sous l'effet des fluctuations verticales turbulentes de la vitesse du liquide.

2-2-2 Transport par charriage

Le charriage, désigne le transport sur le fond d'éléments non cohésifs. L'effet des forces hydrodynamiques exercées par l'écoulement d'eau, se traduit sur les particules par un mouvement de roulement, de glissement ou de saltation (petits sauts successifs). Le transport solide par charriage, concerne plutôt les particules grossières, typiquement de diamètre supérieur à 0,5 mm. Dans le cas de la suspension, on peut distinguer clairement le lit de l'écoulement. Pour le charriage, il y a constamment des échanges entre le lit et l'écoulement.

La distinction entre charriage et suspension pour un même écoulement liquide, dépend de la taille des particules. Mais cette distinction n'est pas toujours facile. En fonction de la nature des matériaux et de leur concentration dans l'écoulement liquide, les propriétés de l'écoulement diphasique varient sensiblement.

2-3 Origine de l'érosion

L'érosion hydrique, prend ses origines particulièrement dans ce qui suit :

- La fragilité et la faible résistance des sols, constitués généralement de marnes et d'argiles.
- L'antagonisme de deux saisons, représentant le climat de l'Algérie du nord : Une saison humide avec des pluies intenses et une saison sèche avec des températures élevées.
- Les pluies irrégulières et d'intensités très différentes
- La désagrégation des sols, due à l'importance de la différence entre les températures diurnes et nocturnes.
- La faible si non l'absence de la couverture végétale.
- La concentration des terres agricoles dans des zones à haut risque érosif.
- Le surpâturage et la surexploitation des ressources naturelles.
- La destruction des forêts lors de la période coloniale et par les feux ces dernières années.
- La mauvaise, si non la non gestion des cultures et leurs pratiques.
- Les pentes, quant elles sont raides. Surtout, si elles sont mal protégées (Roose et al. 1993).
- La longueur de la pente ; En effet plus la longueur est importante plus l'eau augmente d'accélération.
- Le facteur anthropique ; En détruisant la végétation naturelle pour cultiver le sol sur les pentes, l'homme mit à nu ce dernier qui se trouve donc exposé à l'érosion. A cela, s'ajoute l'impact défavorable des activités humaines (Laouina, 1998).

2-4 Mesure du transport solide en suspension

Les matériaux transportés en suspension par les cours d'eau, présentent des caractéristiques différentes dans la section du cours. Les principales, sont les suivantes:

- Une distribution inégale des substances solides dans une section mouillée.

- Une variation latérale et une autre verticale de la turbidité. La variation verticale, étant plus importante que la variation latérale.
- Une variation de la turbidité dans le temps, surtout au cours des crues.

2-4-1 Méthodes de mesure des matières en suspension

Pour tenir compte des caractéristiques citées ci-dessus, on opère suivant des méthodes bien définies.

L'une des méthodes, consiste à déterminer un certain nombre de verticales dans la section de mesure et à prélever des échantillons à différentes profondeurs le long de chaque verticale, grâce à un appareil perturbant le moins possible le régime d'écoulement.

Ces prélèvements peuvent être :

1. Des prélèvements instantanés.
2. Des prélèvements intégrés en profondeur.
3. Des prélèvements intégrés en un point pendant un temps court.
4. Des prélèvements intégrés pendant un temps long.

2-4-1-1 Prélèvements instantanés

Lorsque les verticales, ont été convenablement déterminées, la prise des échantillons s'effectue instantanément à plusieurs profondeurs le long de chaque verticale. Simultanément, la vitesse d'écoulement est enregistrée en chaque point de prise. Ceci, permet le calcul de la turbidité en chaque point. Les chiffres, obtenus introduisent par application de méthodes de calcul appropriées, la connaissance du débit solide en suspension de la section entière à l'instant de la mesure.

En règle générale, on opère une à deux mesures par 24 heures en période normale. La fréquence est plus grande (observation toutes les 15 ou 30 minutes par exemple) lors des crues.

2-4-1-2 Prélèvements intégrés en profondeur

Le désir d'approcher de plus près la réalité, a conduit à apprécier la turbidité moyenne le long d'une verticale, non pas à l'aide de mesures ponctuelles donc discontinues, mais à l'aide du prélèvement continu d'un échantillon pendant le temps d'une descente et d'une remontée à vitesse uniforme d'un appareil de prise le long d'une verticale.

2-4-1-3 Prélèvements intégrés en un point pendant un temps court

La turbidité, étant soumise à des variations dans le temps et à des pulsations rapides. Maintenir un appareil de prélèvement en un point avec une prise continue pendant un temps donné, permet d'obtenir un échantillon moyen du mélange eau-matières solides tenant compte de ces pulsations.

2-1-1-4 Prélèvements intégrés pendant un temps long

Le transport solide d'un cours d'eau lors d'une crue, est soumis à des variations énormes. Dans ces circonstances, les prélèvements sont effectués à des intervalles très proches. La méthode utilisée, consiste en un pompage de l'eau de façon continue en un point de la section étudiée. L'eau, est passée dans un système qui permet la prise quasi-continue d'une série de très petits échantillons, avec proportionnalité entre le débit de prélèvement et le débit liquide du cours d'eau.

Dans la mesure des turbidités des cours d'eau, on se contente souvent d'une seule prise. Soit au centre de l'oued ou sur l'une des rives à l'aide d'un flacon qui a un goulot large. Le prélèvement, est effectué en un seul passage dans l'eau. Cela, permet de ne pas concentrer les particules et de ne pas fausser la mesure de la concentration en matières en suspension. Un entonnoir, permettra de transvaser le prélèvement sans difficulté et sans engendrer de perte d'eau.

Cette méthode, est celle pratiquée par l'Agence nationale des ressources hydriques (A N R H). La prise d'eau, est faite au moyen d'un flacon de 500 cl. Les sédiments, filtrés à l'aide d'un papier filtre, sont ensuite séchés à l'étuve pendant 30 minutes à une température de 105 °C. Les sédiments, sont ensuite pesés et ramenés à l'unité de volume (1 litre). Cette charge, est attribuée à la concentration en suspension instantanée véhiculée par le cours d'eau en g /l. La cadence de prise des mesures, varie selon l'ampleur de l'événement. En période de crue, les prises sont intensifiées jusqu'à des intervalles de temps de 20 minutes en fonction de la vitesse de l'augmentation des débits liquides. En période d'écoulement normal ou en période d'étiage, on se contente d'une prise quotidienne, effectuée généralement à midi. Le débit solide en suspension, est alors calculé par la relation classique :

$$Q_S = C Q_l$$

Q_S = Débit solide instantané (kg/s).

Q_1 = Débit liquide instantané (m^3/s).

C = Concentration (g/l).

2-4-2 Appareillage de mesure du transport solide en suspension

Parmi les appareils de mesure du débit solide en suspension, on peut citer :

2-4-2-1 La sonde de Collet

La sonde, est composée d'un corps cylindrique à axe horizontal, tronqué par deux sections obliques. Sa fermeture, s'opère par le rabattement de deux opercules entraînés par un système de ressorts et son ouverture se fait par câble. Son inconvénient, réside dans les troubles de l'écoulement que provoquent les mouvements des opercules.

2-4-2-2 La sonde Britannique

L'appareil, est composé de trois cylindres rigides liés par deux manchons en caoutchouc. La fermeture du récipient central, s'obtient par une torsion des deux manchons souples.

2-4-2-3 Le Bathymètre-Tachy mètre de Glouchkoff

Appareil très perfectionné. Il est constitué d'un tube creux de 4 mm de diamètre intérieur et 20 cm de long. L'extrémité d'admission, est profilée en ogive. A l'autre extrémité, se trouve une vessie en caoutchouc de 3 litres de contenance. L'appareil, est immergé avec le côté admission à l'aval. Un retournement de 180° , est opéré au point de prélèvement et un nouveau retournement de 180° quand la vessie est pleine au $1/3$. Cet appareil, a le défaut de perturber la vitesse d'écoulement au moment des retournements.

2-4-2-4 Les turbidisondes

Ce sont des appareils de prélèvement très perfectionnés. Leurs caractéristiques générales, sont les suivantes :

La vitesse de l'eau à l'intérieur du cercle de coupure de prise, est égale à la vitesse du cours d'eau. La prise est dirigée vers le courant approchant et fait une saillie suffisante pour que son orifice, se situe en amont de la zone de perturbation due au corps de la turbidisonde. Les turbidisondes, sont conçues pour s'ouvrir sous l'eau et sont sujettes de ce fait à un afflux initial. Pour annihiler celui-ci, un équilibre est réalisé entre la pression exercée par l'air à l'intérieur de la turbidisonde et la pression de l'eau à l'extérieur. Quand un prélèvement intégré de profondeur est réalisé, la vitesse de compression de l'air due à une augmentation de la

pression hydrostatique, ne doit jamais dépasser la vitesse normale du courant d'entrée. La vitesse idéale à laquelle la turbidisonde est déplacée en profondeur, est atteinte lorsque ces deux facteurs sont égaux.

Parmi Les turbidisondes les plus usitées, on cite :

- I. La turbidisonde Neyrpic et la turbidisonde de « American Corps of Engineers ».
- II. La turbidisonde du Rijkswaterstraat (Arnhem, Pays-Bas) ou Bouteille de Delft.

Elle est fondée sur un principe différent. Un système de cloisons dans la bouteille, oblige l'eau à effectuer un circuit avant de ressortir. Au cours de ce circuit, le dépôt des sédiments est obtenu par un ralentissement de la vitesse de circulation, dû à une forte dilatation de la section transversale du filet admis.

2-4-2-5 Les appareils de prélèvements en continu

L'appareil, consiste en une pompe volumétrique qui prélève l'eau de manière continue en un point. Elle la refoule dans un bac d'où elle s'écoule par un ajutage solidaire d'un chariot, dont les mouvements sont fonction d'un limnigraphe enregistrant les variations de hauteur du cours d'eau étudié. Le chariot se déplace au-dessus d'un disque et selon le rayon de ce disque. Celui-ci, présente une fenêtre traduisant en coordonnées polaires la relation « hauteur-débit » du cours d'eau et est animé d'un mouvement de rotation. L'ensemble, permet d'obtenir une proportionnalité entre le débit des prélèvements à travers la fenêtre lorsqu'elle se présente devant l'ajutage et le débit liquide du cours d'eau.

2-5 Mesure du transport solide par charriage

La mesure de la quantité de matériaux charriés sur le fond du lit des cours d'eau, est complexe. Ce domaine, est mal développé. Comme méthodes, on peut citer.

2-5-1 Les nasses de prise en rivière

Une nasse de prise en rivière, consiste en un récipient de capture des éléments solides. L'eau, peut le traverser. Elle pénètre à l'amont et ressort à l'aval, mais rencontre dans son parcours à travers le récipient, un système de retenue des éléments solides qu'elle tracte.

2-5-2 Les méthode de la cubature des dépôts dans des retenues

La mesure du volume des matériaux déposés pendant un temps donné dans une retenue, liée à la connaissance de ce qui peut s'échapper à l'aval de celle-ci, nous donne le transport solide

total du cours d'eau. Le calcul du transport en suspension à l'amont de la retenue, permet de déduire le transport par charriage.

Pour connaître les volumes déposés au fond d'une cuvette de barrage, on peut procéder par relevés bathymétriques. L'utilisation d'un échosondeur à ultra son, rend les mesures faciles et simples.

2-5-3 Méthodes modernes

Ces nouvelles méthodes, non seulement elles permettent d'évaluer l'apport solide charrié, mais elles rendent facile l'étude du problème fondamental qui est le mouvement des matériaux eux-mêmes.

Ces méthodes, se fondent toutes sur le principe suivant : placer sur le fond du lit des cours d'eau des matériaux « marqués » dont les caractéristiques physiques sont identiques à celles des matériaux naturels transportés par l'eau. Les matériaux marqués, subiront par suite les mêmes lois physiques. La répartition dans le temps et dans l'espace des éléments marqués, permet de déterminer la vitesse et l'importance des mouvements.

Parmi les procédés de marquage, on peut citer :

- i. Le marquage par peintures ou résines.
- ii. Le marquage par matières colorantes luminescentes.
- iii. Le marquage par isotopes radioactifs.

2-5-3-1 La méthode des peintures et résines

Les matériaux, soumis à l'étude sont enduits d'une matière qui y adhère fortement, qui résiste bien à l'abrasion et présentant une grande stabilité chimique à l'eau. .

Après l'immersion des éléments marqués, leur reconnaissance au milieu des matériaux prélevés à des temps et à des distances donnés, est simplement visuelle.

Ce procédé de marquage, présente l'avantages d'être peu coûteux et permet par suite de traiter de très grosses quantités de matériaux.

2-5-3-2 La méthode des traceurs luminescents

Les matériaux soumis à l'étude, sont enduits d'un produit colorant et luminescent quand ils sont éclairés par un rayonnement ultra-violet.

Dans ce cas, les sédiments enduits, se distinguent nettement sous forme de points lumineux sur le fond sombre des sédiments non colorés. La netteté du contraste, est tellement grande que le nombre des sédiments marqués, contenus dans un prélèvement de 1 g peut être déterminé en 2 à 3 minutes pour un rapport de 1/105 entre grains marqués et non marqués.

Le mode opératoire est le suivant : Prélever une quantité de matériaux, les marquer et les replacer à l'endroit du prélèvement sous une forme (par lignes, par points etc..) qui dépend de l'étude envisagée.

Les sédiments marqués, sont déplacés à des distances et avec des vitesses qui caractérisent les mouvements de l'ensemble sédimentaire. Ces mouvements, ne peuvent être reconnus que par prélèvement d'échantillons car les matériaux doivent être séchés et placés sous une lumière ultra-violette.

2-5-3-3 La méthode des traceurs radioactifs

Cette méthode, est la plus employée pour ces grands avantages.

- Elle permet l'étude d'une gamme très étendue de matériaux, allant des vases aux gros galets.
- Elle introduit l'emploi de traceurs, qu'on peut détecter dans le cours d'eau lui-même sans prélèvement ; des mesures continues sont alors possibles.

Les matériaux à étudier, sont rendus émetteurs d'un rayonnement à l'aide d'isotopes radioactifs qui sont placés sur le fond du lit des cours d'eau et soumis à l'action de déplacement. L'étude, consiste dans le suivi de la répartition dans le temps et l'espace de l'intensité du rayonnement émis par les traceurs.

La mesure de la radioactivité, s'effectue selon un rythme et en des lieux déterminés à l'aide d'un appareillage adéquat Soit dans le cours d'eau lui-même, soit sur des prélèvements

2-6 Formulation du transport solide

2-6-1 Introduction

Si les méthodes de détermination du transport solide en suspension, sont abondantes dans la littérature (Lane et Kalinske, 1939 ; Einstein, 1942, 1950 ; Brooks, 1958 ; Bagnold, 1966 ; Yang, 1996), la quantification de la charge de fond est encore un enjeu dans les études de dynamique fluviale. Les processus physiques impliqués, sont en effet mal compris et complexes. La quantité de variables engagées dans la mécanique du transport solide, rend difficile l'établissement de critères satisfaisants dans tous les cas, de sorte qu'il n'existe pas de méthode universellement consacrée.

Plusieurs hydrauliciens et géomorphologues, ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le transport solide des cours d'eau. Parmi les nombreuses méthodes trouvées dans la littérature spécialisée, on a des méthodes purement empiriques jusqu'à des modèles théoriques complexes. Certains, estiment la quantité de sédiments transportés de façon directe, d'autres de façon indirecte en utilisant comme données les paramètres hydrauliques de la section ou du tronçon d'étude et les caractéristiques du matériel de fond.

Les équations, sont la méthode la plus utilisée par les hydrologues et les géomorphologues pour estimer le transport solide. Ces équations, sont des formules développées pour quantifier le transport solide d'un courant en fonction des caractéristiques hydrauliques et géométriques du chenal et des caractéristiques granulométriques du matériel de fond. Les équations de transport solide, sont classées en trois groupes. Le premier groupe, relevant de celles qui donnent seulement la charge en suspension. Dans ce cas, la charge de fond est inférée indirectement en fonction du matériel en suspension. Dans le deuxième groupe, on a les formules qui donnent directement le charriage. Enfin, dans le troisième groupe, les formules incorporent les deux types de transport en donnant la charge totale. En vertu de la complexité des processus impliqués et de la quantité de paramètres liés au transport mécanique des sédiments dans un écoulement, plusieurs méthodes ont été développées au long des années. La majeure partie des méthodes, a été basée sur des approches théoriques ou semi-empiriques, élaborées dans des canaux expérimentaux, où le chercheur possède le contrôle de toutes les variables impliquées dans les processus de transport solide. Dans ces cas, on cherche à estimer le transport solide à partir des interactions entre les conditions hydrauliques du flux et les caractéristiques des sédiments, lesquels sont déjà connues. Dans quelques cas, les formules ont été testées ultérieurement et améliorées avec des données prises sur le terrain

pour confirmer leur fiabilité et leur applicabilité au milieu naturel. En général, les méthodes théoriques sont obtenues à partir d'associations et de simplifications d'équations qui gouvernent le flux et les sédiments et peuvent être modifiées dans différentes conditions. Les fonctions semi-empiriques, sont données en fonction des caractéristiques d'écoulement, qui sont la pente de la ligne d'énergie, la profondeur de la colonne d'eau et la vitesse du flux et des caractéristiques des sédiments (composition du matériel et diamètre des particules).

Du Boys (1879), a présenté la première formule pour la détermination du transport solide. Jusqu'aux années 1940, les recherches développées sur ce sujet ont été spécialement influencées par l'approche de Duboys. Ensuite, plusieurs méthodes sont apparues. Les approches les plus utilisées, sont la tension de cisaillement sur le fond, le débit et la vitesse du flux, les formules obtenues par fonction stochastique du mouvement qui rapportent le transport à la puissance hydraulique (Garcia et Sala, 1998).

Parmi les formules mettant en œuvre la contrainte, on peut citer celles de Meyer-Peter et Mueller, [1948], Engelund et Hansen, [1967], Ackers et White [1973] Parker, [1979], Mizuyama, [1977], Smart et Jaeggi, [1983], Recking, et al. [2008] et Van Rijn, [1984] Etant donné la difficulté liée au calcul de la contrainte, plusieurs auteurs ont recherché une relation empirique donnant directement le débit solide Q_s en fonction du débit liquide total Q_l ou spécifique $q = Q_l / L$ où L est la largeur du cours d'eau. Parmi ces auteurs, on citera Schoklitsch, [1962], Rickenmann, [1991], Sogreah, [1991] et Lefort, [2007].

2-6-2 Formules du transport solide par charriage (Recking 2008)

Dans la suite, on donnera quelques formules de transport solide par charriage.

1- Formule d'Ackers et White [1973]

Cette formule, donne le transport solide total. Elle est exprimée comme suit :

$$q_s = 0,025 q \frac{D_{35}}{H} \left[\frac{F_{gr}}{0,17} - 1 \right]^{1,5} \quad (1.1)$$

$$F_{gr} = \frac{1}{\sqrt{g(s-1)D_{35}}} \left[\frac{U}{\sqrt{32} \log \left(10 \frac{H}{D_{35}} \right)} \right] \quad (1.2)$$

q_s : Débit solide volumique unitaire ($m^3/s/m$). q : Débit liquide unitaire ($m^3/s/m$). H : Hauteur d'eau (m), D_{35} : Diamètre de grain (m), U : Vitesse moyenne (m/s), g : Pesanteur (m^2/s),

$s = \rho_s / \rho$ avec ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3) et ρ_s : Masse volumique des sédiments (kg/m^3).

Cette formule, s'applique pour des nombre de Froude $Fr < 8$, c'est à dire plutôt pour des rivières de plaine.

2 - Formule de Bagnold [1980]

Cette formule, est donnée par :

$$q_s = \frac{q_s^*}{\omega - \omega_c} \left[\frac{\omega - \omega_c}{[\omega - \omega_c]^*} \right]^{3/2} \left[\frac{H}{H^*} \right]^{-2/3} \left[\frac{D}{D^*} \right]^{-0.5} \quad (1.3)$$

q_s : Débit solide unitaire ($m^3/s/m$), D_m : Diamètre moyen arithmétique = $\Sigma(diPi)/P$, (di diamètre, Pi poids) en (m).

Avec H la hauteur d'eau, ω et ω_c respectivement la puissance hydraulique et la puissance hydraulique critique.

L'expression de ω , est donnée par :

$$\omega = \rho R I U \quad (1.4)$$

R : Rayon hydraulique (m), I : Pente du cours d'eau, U : Vitesse moyenne (m/s), ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3).

Le terme de gravité g a été exclu de cette définition par Bagnold.

La puissance critique, est donnée par la relation :

$$\omega_c = 290 D^{3/2} \log \left[12 \frac{H}{D} \right] \quad (1.5)$$

H : Hauteur d'eau (m), D : Diamètre des grains (m).

Le signe * désigne les valeurs numériques standards issues de l'expérimentation et utilisées pour rendre adimensionnels les termes de l'équation. Les valeurs proposées par Bagnold, sont:

$$q_s^* = 0,1 \text{ kg./m s}, [\omega - \omega_c]^* = 0,5 \text{ kg /m s}, H^* = 0,1 \text{ m et } D^* = 0,0011 \text{ m.}$$

3 - Formule d'Einstein Brown [1950]

Proposée par Brown (1950) à partir d'un lissage de l'abaque d'Einstein (1950), elle est donnée par :

$$q_s = \sqrt{g(s-1)D^3} \left[\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g(s-1)D^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{g(s-1)D^3}} \right] (f(\theta)) \quad (1.6)$$

q_s : Débit solide volumique unitaire ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$).

$s = \rho_s / \rho$ avec ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3) et ρ_s : Masse volumique des sédiments (kg/m^3).

D : Diamètre des grains (m).

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

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

$$\theta = RI / (s-1) D = \tau_c / [(\rho_s - \rho) g D]$$

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

4 - Formule d'Engelund et Hansen [1967]

Equation déduite du concept de puissance de l'écoulement de Bagnold [1966] et du principe de similarité, elle est donnée par :

$$q_s = \frac{0,1}{f} \left(\sqrt{g (s - 1) D^3} \right) \theta^{5/2} \quad (1.7)$$

q_s : Débit solide volumique unitaire ($m^3/s/m$).

D : Diamètre des sédiments (m).

Avec : $0.15 \text{ mm} < D < 5 \text{ mm}$

$$\theta = R I / (s - 1) D$$

Le facteur de rugosité f étant défini par $f = 2 g R I / U^2$

R : Rayon hydraulique (m).

I : Pente du cours d'eau.

U : Vitesse moyenne (m/s).

g : Pesanteur (m^2/s).

5 - Formule de Meyer-Peter et Mueller [1948]

L'équation du débit, est donnée par :

$$q_s = 8 \left(\sqrt{g (s - 1) D_{50}^3} \right) \left[\left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \theta - 0,047 \right]^{3/2} \quad (1.8)$$

$$\theta = R I / (s - 1) D_{50} \quad (1.9)$$

q_s = Débit solide unitaire ($m^3/s /m$).

D_{50} : Diamètre médian (m). R : Rayon hydraulique (m), I : Pente du cours d'eau..

$s = \rho_s / \rho$ avec ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3) et ρ_s : Masse volumique des sédiments (kg/m^3).

Le ratio k_s / k_r entre le coefficient de Strickler de l'écoulement et le Strickler du grain k_r , permet de corriger la contrainte totale, pour ne tenir compte que de la contrainte appliquée au grain. Le terme k_s est donné par $k_s = U / I^{1/2} R^{2/3}$ et le terme k_r est calculé, avec l'équation de

$$\text{Strickler } k_r = 21 / (D_{50})^{1/6}$$

6 - Formule de Mizuyama [1977]

La formule, est donnée par :

$$q_s = \left(\sqrt{g (s - 1) D_{50}^3} \right) \left[\frac{12 - 24 \sqrt{S}}{\cos(\text{atan}(S))} \theta^{(1,5 - \sqrt{S})} \phi \right] \quad (1.10)$$

$$\phi = \left(1 - \alpha^2 \frac{\theta_c}{\theta} \right) \left(1 - \alpha \sqrt{\frac{\theta_c}{\theta}} \right) \quad (1.11)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{0,85 - 3,2 I}{1 - 1,625 I}} \quad (1.12)$$

$$\theta_c = 0,04 \cdot 10^{1,72 S} \quad (1.13)$$

$$\theta = \frac{R I}{D_{50} (s - 1)} \quad (1.14)$$

q_s : Débit solide volumique unitaire ($m^3/s/m$).

D_{50} : Diamètre médian (m).

I : Pente du cours d'eau.

$s = \rho_s / \rho$ Avec, ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3) et ρ_s : Masse volumique des sédiments (kg/m^3).

7 - Formule de Parker [1979]

La formule, est donnée par :

$$q_s = 11,2 \left(\sqrt{g (s - 1) D_{50}^3} \right) \frac{(\theta - 0,03)^{4,5}}{\theta^3} \quad (1.15)$$

q_s : Débit solide unitaire ($m^3/s/m$).

$s = \rho_s / \rho$ avec ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3) et ρ_s : Masse volumique des sédiments (kg/m^3).

D_{50} : Diamètre médian (m).

$$\theta = R I / (s - 1) D_{50}$$

D_{50} : Diamètre médian (m).

I : Pente du cours d'eau.

8 - Formule de Rickemann [1990]

La formule, est exprimée par :

$$q_s = 1,5 (q - q_c) I^{1,5} \quad \text{pour } 0,0004 < I < 0,2 \quad (1.16)$$

$$q_s = \frac{12,6}{(s - 1)^{1,6}} \left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0,2} (q - q_c) I^2 \quad \text{pour } 0,03 < I < 0,2 \quad (1.17)$$

q_s : Débit solide volumique unitaire ($m^3/s/m$).

q : Débit liquide unitaire ($m^3/s/m$).

Avec q_c donnée par

$$q_c = 0,065 (s - 1)^{1,67} g^{0,5} D_{50} I^{-1,12} \quad (1.18)$$

L'auteur propose $(D_{90}/D_{30})^{0,2}$ égale 1,05 si inconnu.

D_{30} : Diamètre des grains solides en (m). (L'indice indique « en % plus fin que »).

D_{90} : Diamètre des grains solides en (m), (l'indice indique « en % plus fin que »).

9 - Formule de Schoklitsch [1962]

La formule, est donnée par :

$$q_s = \frac{2,5}{\rho_s/\rho} I^{3/2} (q - q_c) \quad (1.19)$$

$$\text{Avec} \quad q_c = 0,26 (s - 1)^{5/3} \frac{D_{40}^{3/2}}{I^{7/6}} \quad (1.20)$$

q_s : Débit solide volumique unitaire ($m^3/s/m$).

$s = \rho_s / \rho$ avec ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3) et ρ_s : Masse volumique des sédiments (kg/m^3)

I : Pente du cours d'eau.

q : Débit liquide unitaire ($m^3/s/m$).

D_{40} : Diamètre des grains solides en (m), (l'indice indique « en % plus fin que »).

3- PRESENTATION DE QUELQUES TRAVAUX SUR LE TRANSPORT SOLIDE

1 - Travaux de G. Medinger (1960)

L'auteur, disposait de données s'étalant de l'année 1946 à l'année 1957, soit 11 années de mesures.

Dans cette étude, Medinger analyse les données mensuelles des débits solides spécifiques ainsi que les caractéristiques physico-climatiques de 30 bassins versants du Maghreb. Les résultats, sont résumés dans un tableau comportant : les précipitations, les écoulements liquides et solides, les concentrations solides moyennes et maximales. L'auteur, n'a pu corréler les apports solides et liquides en une relation.

2 - Travaux de J. Tixeront (1960)

Dans ces travaux, Tixeront présente quelques données sur le transport solide en suspension en Algérie et en Tunisie en s'appuyant sur les données publiées par les annuaires hydrologiques.

Il a retenu 32 stations Algériennes et 9 stations Tunisiennes, dont les surfaces varient entre 90 km² et 22300 km².

Avant l'étude quantitative, l'auteur commence par une étude qualitative des différents facteurs conditionnant l'érosion hydrique en donnant ses conclusions à savoir :

1- Influence de la pluie et du ruissèlement annuel :

L'érosion, croit avec l'intensité de la pluie et le ruissèlement. Il remarque, que la teneur en suspension augmente quand le ruissèlement diminue.

2- Influence des facteurs géomorphologiques :

Le substratum, est prépondérant dans l'érosion. Non seulement, les facies jouent leur rôle mais également la tectonique par les mouvements qui peuvent changer les équilibres.

3- Influence des pentes :

Sur des terrains géologiquement stables, il se crée une géologie qui fait coïncider les zones de fortes pentes avec les terrains les plus résistants.

4- Les tectoniques :

Sous l'effet de la tectonique, il se produit des disjonctions.

5- Influence de la répartition saisonnière des précipitations :

La comparaison des bassins limitrophes, fait ressortir cette influence.

6- Le climat et la végétation :

L'érosion, diminue avec la végétation. Les sols couverts de végétation, sont moins érodables.

En deuxième lieu, l'auteur s'intéresse aux réactions des divers facteurs les uns sur les autres.

Les conclusions, tirées de cette étude sont :

- 1- En général, le relief du bassin est élevé là où les précipitations sont fortes.
- 2- Les hauts reliefs, ont souvent un substratum ancien résistant à l'érosion.
- 3- Les fortes précipitations, s'accompagnent d'une bonne couverture végétale.
- 4- Les hauts reliefs très arrosés, sont difficilement cultivables.

L'auteur, arrive à la fin de son étude aux conclusions suivantes :

- 1- La teneur en suspension, décroît quand le taux de ruissèlement croît.
- 2- Le substratum, joue un rôle considérable, avec en général l'augmentation de la teneur quand on descend à l'échelle stratigraphique
- 3- Les terrains des régions récemment plissés, paraissent fournir des taux d'abrasion et des teneurs en suspension élevés.
- 4- La distribution régulière des précipitations avec maximum en pleine saison végétative, est favorable aux faibles teneurs en suspension.

A la fin de son étude, l'auteur remarque que les caractéristiques des débits solides des cours d'eau diffèrent considérablement entre les trois départements Algériens et en Tunisie. Il avance les relations suivantes, selon les différents départements.

a) Les bassins Tunisiens vitrifient :

$$E = 354 R^{0.15} \quad (1.21)$$

E = Taux d'abrasion annuel ($t/km^2/an$)

R = Ecoulement annuel (mm)

b) Les bassins du département Constantinois.

La relation, est donnée par :

$$E = 92 R^{0.21} \quad (1.22)$$

c) Les bassins du département d'Alger.

La relation, est donnée par :

$$E=2000 \quad (1.23)$$

3 - Etude de J. Capolini (1965-1969)

L'auteur, s'intéresse à l'étude de l'érosion, le transport solide et l'envasement des barrages dans la région du Chellif. Il entreprenait sa recherche par l'étude des caractéristiques géomorphologiques (physiographie, pente, lithologie, couvert végétal, ...) de la zone concernée.

Se basant sur « des techniques de géomorphologie Américaine », il arrive à une bonne corrélation entre les caractéristiques géomorphologiques et la torrencialité des bassins étudiés. (Rhiou et Fodda). Par suite, généralisant ses résultats à l'ensemble du bassin du Chélif, l'auteur propose ce qui suit ;

- 1- Une quantification des débits solides par association d'un débit solide spécifique à chaque formation lithologique.
- 2- Il avance une relation entre le débit spécifique des bassins et le coefficient de torrencialité.
- 3- Il suggère une carte cartographie des coefficients de torrencialité, donnant la susceptibilité à l'érosion des différents bassins.

4 - Etude de A. Demmak (1982)

L'objectif de l'auteur dans cette étude, est :

- 1- L'amélioration de la connaissance de l'érosion hydrique et des transports solides sous climat méditerranéen et semi-aride.
- 2- La mise au point d'outils simples, permettant le calcul des apports solides nécessaires à la planification, à l'aménagement et la gestion des ressources hydrauliques.
- 3- Meilleure compréhension du mécanisme d'érosion et des écoulements solides, afin de définir une politique rationnelle de lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages.
- 4- L'élaboration d'une relation, liant les apports solides spécifiques aux paramètres physico-climatiques des bassins versants.

Dans son étude, l'auteur s'est basé sur les données hydroclimatologiques et solides de 30 bassins situés entre 35° et 37° de latitude de l'Algérie septentrionale, s'étendant sur une surface de 300 000 km², au nord de l'Atlas saharien. Les données, représentent 207 années-stations hydrométriques et 242 années-stations pluviométriques. Les surfaces des bassins, varient entre 100 km² et 3600 km² et reçoivent des pluies moyennes entre 300 mm et 1000 mm.

L'auteur, mène son étude selon trois axes principaux.

Les conclusions auxquelles il arrive, sont :

De la première étude, il ressort ce qui suit :

- 1- Les caractéristiques physico-climatiques des 30 bassins étudiés, présentent un large spectre de variation.
- 2- Les 15 premiers bassins (régions Cheliff et côtiers Algérois), produisent des débits spécifiques TSS supérieurs à 1000 t/km²/an.
- 3- Le restant des bassins (côtiers constantinois, Hodna, Tafna), produisent des débits spécifiques TSS inférieurs à 500 t/km²/an.

Une deuxième étude est alors entreprise par l'auteur, pour faire sortir l'influence des divers paramètres morphométriques et hydroclimatologiques,

De cette dernière étude, l'auteur conclue ce qui suit :

- 1- Existence d'une corrélation entre la lithologie et les formes d'érosion.
- 2- L'association d'une concentration moyenne des matières en suspension à chaque forme d'érosion.
- 3- L'essentiel des apports solides, se fait lors de crues généralisées au printemps
- 4- L'apport solide de la période automnale, est négligeable.

Dans une étude isolée d'un basant versant de 300 Km², l'auteur analyse les crues. Il arrive aux conclusions suivantes :

- a- 25 % des sédiments transportés durant les 8 années d'observation, sont dus à la contribution des trois plus fortes crues de la série (mars 74, février74 et mars 79).
- b- 90 % des apports solides, sont dus aux crues de débit supérieur à 20 m³/s.
- c- 80 % des apports solides, se passent au printemps.

d- La répartition des érosions sur la carte des formes d'érosion, est la suivante :

- | | |
|-------------------------|--|
| ➤ Mouvement de masse | 118 km ² , 43 %, (concentration = 70 g/l) |
| ➤ Bad –Lands et ravines | 29 km ² , 10 %, (concentration = 150 g/l) |
| ➤ Ravines localisées | 35 km ² , 13 %, (concentration = 30 g/l) |

Pour terminer, l'auteur s'intéresse à la recherche d'une relation liant les apports solides spécifiques moyens annuels et les paramètres physico-climatiques du bassin.

Après une étude approfondie des paramètres physico-climatiques des bassins, il conclue que la lithologie, la fréquence et le pourcentage des précipitations journalières à un seuil donné, la densité de drainage sont les principaux facteurs de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant. Il propose alors la relation suivante :

$$\text{TSS} = 26,62 \text{ IL} + 5,07 \text{ IP} + 9,77 \text{ CT} - 593,56 \quad (1.24)$$

TSS = transport solide spécifique moyen annuel (t/km²/an).

IL = indice lithologique.

IP= indice de précipitation érosive.

CT = coefficient de torrentialité.

5 - Travaux de J. Colombani et C. Olivry (1984)

Les auteurs, s'intéressent à l'étude du transport solide des cours d'eau des régions arides et semi-arides. Ils arrivent à ce que :

Les régions arides et semi-arides, sont caractérisées notamment par une très grande irrégularité dans leur climat. Cette irrégularité, se traduit par des averses rares mais parfois très importantes. Elles peuvent alors être à l'origine de phénomènes d'érosion et de transport solide exceptionnels. L'intensité de ces phénomènes, est amplifiée par rapport à celles des averses qui leur donne naissance du fait que dans les régions considérées d'une part, un petit accroissement des hauteurs de pluie au-delà de la médiane, se traduit par un accroissement généralement important des écoulements et d'autre part, que les écoulements ainsi générés, dont la période de récurrence est grande, prennent en charge les matériaux arrachés au bassin versant depuis quelques années et qui n'étaient pas véhiculés par le cours à cause du faible écoulement.

Ils ont montré, que c'est l'antagonisme de deux facteurs prépondérant dans le transport solide, en l'occurrence la pluie et le couvert végétal, associés à l'irrégularité du climat (qui réduit la croissance de la végétation d'une part et qui d'autre part est à l'origine d'un phénomène d'accumulation des sédiments dans le réseau de drainage) qui sont la raison de ces phénomènes exceptionnels. Pour illustrer ces conclusions, les auteurs citent les crues du 2 et du 13 septembre 1981 du bassin versant Rebeira Brava à Vila (Cap-Vert) et la crue de Medjerba de 1973 (Tunisie).

6 - Etude de A. Ghorbel et J. Claude (1997)

Dans cette étude, les auteurs se sont intéressés à la mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie et à l'estimation des transports solides.

Le principe de la méthode utilisée, est le relevé des fonds le long de profils préalablement repérés.

Le matériel qu'ils utilisent comprend :

- 1) Un canot pneumatique gonflable 'Zodiac Mark IF'.
- 2) Un moteur hors bord de 20 CV.

3) Un échosondeur à ultra-sons SIMRAD 160. Cet appareil, se compose :

a- D'un nez de sonde, monté sur un saumon métallique et suspendu dans l'eau sur le côté du canot par un porte à faux.

b- D'un enregistreur sur papier thermosensible, d'une bande de mesure de 40 m de profondeur que l'on peut décaler par pas de 10 m pour atteindre 200 m. La largeur du papier, est de 5 pouces soit 2,7 cm. On peut facilement, apprécier le demi-millimètre, la précision sur les profondeurs est donc de 20 cm environ. La vitesse de défilement du papier est de 1/2 pouce/min, ce qui correspond à 1 mm pour 5 m pour une vitesse du canot de 1 m/s. L'alimentation électrique, se fait à partir d'une batterie 12 V- 40 AH.

A partir des surfaces envasées, par profil, plusieurs méthodes sont possibles pour calculer les volumes déposés dans la retenue ; parmi :

- i- Méthode de Kolmogorov.
- ii- Méthode générale.
- iii- Méthode dérivée de la méthode générale.

Par cette étude, les auteurs ont établi les faits suivants :

1- Influence de la taille du bassin versant :

Les plus petits bassins versants, produisent proportionnellement le plus de dépôts. En effet, sur de courtes distances, les matériaux érodés peuvent être entraînés et déposés dans la retenue au cours d'un même épisode de crue, alors que pour un grand bassin versant, il peut exister des zones de dépôt et le transport de sédiments se fait sur plusieurs épisodes.

2- Influence de la pente : les apports solides augmente avec la pente :

L'oued Masri, est formé de deux branches confluant dans la retenue du barrage. La pente moyenne des lits de ces deux oueds, est de 7 % pour l'un et de 4 % pour l'autre ; le barrage de l'Oued Masri, reçoit plus de sédiments eu égard à sa taille.

3- Influence du couvert végétal et de la nature des sols :

L'oued Bezirk et l'Oued Chiba, sont géographiquement voisins, mais très différents sous ces deux aspects. Le barrage de l'Oued Chiba, a connu un envasement plus grave que celui de l'Oued Bezirk.

4- Influence du mode d'exploitation :

Au barrage du Mellègue, grâce aux ouvertures judicieuses des vannes de chasse, il a été évacué plus de 50 % des matières solides entrant dans la retenue, moyennant une perte sensible du volume. Par contre, pour les petits barrages dont les eaux sont utilisées pour l'irrigation et pour lesquels les opérations de vidange ne sont pas permises car la perte d'eau est trop importante, la presque totalité des matériaux a été arrêtée et déposée dans la retenue.

Les auteurs, font remarquer que des valeurs inquiétantes sont atteintes pour certains ouvrages dont la durée de vie sera limitée à moins de 40 ans si le nécessaire n'est pas entrepris.

Concernant l'érosion, les résultats trouvés par les auteurs peuvent être résumés dans ce qui suit :

- 1- Les taux d'érosion, ont été estimés en $m^3/km^2/an$.
- 2- Pour l'ensemble des barrages, les valeurs de transport solide trouvées sont très importantes. Dépassant mêmes les valeurs avancées par Tixeront avant la construction de l'ouvrage. Ils font remarquer, que les petits bassins versants produisent en proportion le maximum de transports solides sans pour autant qu'une corrélation surface de bassin versant-érosion spécifique se dégage nettement.
- 3- Les charges moyennes en suspension calculées des eaux entrant dans les barrages, dépassent de loin les concentrations de matières en suspensions habituellement mesurées dans les prélèvements d'eau faits en rivières.
- 4- Les plus importants apports solides, sont générés par les crues (80 % pour le Mellègue, 98 % pour le Masri).
- 5- Les prélèvements d'eau en rivière, faits généralement avec une bouteille sur le bord de l'eau représentent très mal le transport solide dans toute une section et sous-estiment fortement les concentrations de matières en suspension ou en saltation dont la granulométrie est plus grossière.
- 6- Le charriage, n'est presque jamais pris en compte. Malgré son importance, il a été estimé dans le cas du barrage Mellègue qui est le seul à disposer d'une station de contrôle à l'amont et où les matières en suspension ne représentent que 112 millions de tonnes sur les 152 millions de tonnes entrées dans la retenue. En tenant compte du bassin versant intermédiaire, la différence attribuée au charriage représenterait 23 % du transport total.

- 7- Ils soulignent, que tous les barrages étudiés sont concernés par les épisodes pluvieux exceptionnels qu'a subi la Tunisie ces dernières années (septembre-octobre 1969, mars 1973, décembre 1973). Evidement, les apports liquides et solides dus à ces épisodes sont énormes et contribuent dans l'augmentation des moyennes calculées sur des périodes de fonctionnement excédant rarement 10 ans.

7 - Etude de M. Kassoul, A. Abdelkader et M. Belorgey (1997)
--

L'étude, est faite dans le but de quantifier l'apport solide. Les auteurs, disposent pour cela d'un échantillon de 19 barrages Algériens couvrant tout le territoire.

En premier lieu, les auteurs se sont intéressés aux caractéristiques hydromorphométriques (Pente, indice d'altitude, densité de drainage, coefficient d'écoulement...) et aux facteurs climatiques (aride, semi-aride, humide...).

Les levés bathymétriques réalisés par l'agence nationale des barrages (ANB), ont fait ressortir une perte en volume égale à 44 %. Ce résultat, a été exploité par les auteurs afin de mettre au point un outil qui permet de calculer les quantités de matériaux solides déposés dans les barrages Algériens.

Par suite, ils ont cherché des relations entre les différentes caractéristiques des barrages. De cette dernière, il ressortit que les facteurs les plus prépondérants sont la superficie, l'indice d'altitude et le coefficient d'écoulement. Pour terminer l'étude, les auteurs ont mis au point un abaque de classification des barrages en fonction de sa continentalité et de sa situation géographique.

A la fin de l'étude, les auteurs proposent de classer les barrages en trois groupes (classe 1a, classe 1b et classe 2) comme suit :

i- Première catégorie, classe 1a :

$$S \text{ inférieure à } 1000 \text{ km}^2. \quad T_a = 1433 (S)^*(-0.45)-15.24 \quad (1.25)$$

ii- Deuxième catégorie, classe 1b :

$$S \text{ supérieure à } 1000 \text{ km}^2. \quad T_a = 1846*(S)*(-0.15)-36 \quad (1.26)$$

- iii- Troisième catégorie, classe 2 :
 S supérieure à 1000 km^2 . $T_a = 0.463 S + 2026$ (1.27)

T_a = Taux d'abrasion ($\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$).

S = Surface du bassin versant (km^2).

8 - Etude de B. Remini (1998)

L'intérêt de l'étude, est porté sur le problème de la réduction de la capacité de stockage de l'eau des barrages suite à leur envasement. L'auteur, cite quatre barrages pour exemple.

a- Barrage de Fegoug.

L'envasement de la retenue du barrage de Fergoug I (ancien barrage: 1885-1926), a réduit sa capacité utile de $27,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à $14 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ durant les 31 ans d'exploitation ; soit un volume de vase égal à $13,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, équivalent à un apport annuel de $0.42 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

b- L'actuel barrage de Fergoug.

Concernant la retenue du barrage de Fergoug actuel, la capacité utile se trouve ainsi réduite de $17 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1970 à $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1973 et à $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1985, ce qui représente un volume de vase égal à $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, équivalent à un taux de comblement de 80 %. Les services concernés, n'avaient autre solution que de procéder au dragage de la retenue en 1986.

c- Barrage de Foum El Gherza.

La sédimentation accélérée de la retenue, a été évidente dès le début de la réalisation du barrage. En deux ans seulement (1948-1950), le batardeau amont a été complètement comblé, Par la suite, la sédimentation a engendré une montée rapide du toit de vase, soit plus de 35 mètres en 40 années d'exploitation ce qui représente un volume de vase égal à $18,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. L'acteur, estime que la capacité de la retenue en 1995 est de $24 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit un comblement de plus de 50 %.

d- Barrage de Oued El Fodda.

L'envasement intensif et actif que connaît la retenue de Oued El Fodda, a réduit sa capacité initiale évaluée à $228 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1932 à $130 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1986 et à $112 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

en 1994. Le toit de la vase près des vannettes, est à environ 36 mètres du fond, soit un taux de comblement évalué à 50 % en 1994.

e- Barrage de Bouhnifia.

Ce barrage, a été réalisé dans le but de réduire la vitesse de comblement et ainsi prolonger la durée de vie du barrage de Fergoug. Malheureusement, ce barrage s'est retrouvé face à une sédimentation accélérée, qui a réduit sa capacité de $73 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à $47 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ durant la période 1940-1986, soit une vitesse moyenne de sédimentation égale à $0,56 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. L'auteur, estime le dépôt des sédiments à $31 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1995, soit un volume d'eau restant de $42 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et un taux d'envasement de 42 %.

Après avoir cité les exemples de barrages, l'auteur énuméra les conséquences de l'envasement des barrages en citant :

- i- L'obturation des organes de vidanges.
- ii- La sécurité de l'ouvrage.
- iii- Le comblement des canaux d'irrigation.

L'auteur, proposa les solutions pour lutter contre l'envasement des barrages, parmi :

- a- Le reboisement, la restauration des sols, la formation de banquettes, la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds. Il propose comme végétation, les tamaris suite aux résultats qu'ils ont donnés du côté des barrages de Bouhnifia, de Fergoug, de Cheurfas.

Dans le cadre de la protection des bassins, un programme spécial a été lancé par les services des forêts. Il s'agirait de traiter une superficie de 1,5 millions d'hectare. Les coûts sont évalués à environ 16 milliards de DA.

- b- Réalisation de barrage de décantation.

Un barrage de décantation, est un barrage construit à l'amont d'un autre barrage dans le rôle est de réduire sa sédimentation. L'auteur, cite pour exemple le cas du barrage de Boughezoul qui est exploité partiellement comme bassin de décantation du barrage de Ghrib. Ce barrage, a permis de retenir depuis sa création environ $35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase. Il réduit l'envasement de Ghrib de près de 24 %.

c- Surélévation des barrages.

Cette technique, a été réalisée sur cinq barrages: Fergoug, Mefiouch, Bakhada, K'sob, Zardézas. La surélévation des barrages, permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser le volume envasé.

d- Chasses dites à l'Espagnole.

Méthode utilisée pendant les premières crues pour les barrages de moindre importance (barrage Hamiz, Beni Amrane, K'sob, ...).

Cette méthode, est efficace quand elle est possible. Elle consiste à vider complètement le barrage au début de l'automne et à le laisser vide, toutes vannes ouvertes, jusqu'aux premières pluies. La première crue, enlève sans difficulté les vases de l'année non encore consolidées.

e- Soutirage par courants de densité.

L'auteur, propose la technique de soutirage qui consiste en l'ouverture des vannes lorsqu'il y a formation de courant de densité. Il ajoute, que cette technique a donné des résultats spectaculaires en Algérie et qu'elle est utilisée aux barrages d'Ighil Emda, d'Oued El Fodda, de Foum El Gherza et d'Ighil Emda,

i- Pour ce barrage de capacité 156 H m^3 , (mis en eau en 1953). Grâce à cette technique, sur les $88,8 \text{ Hm}^3$ d'apports solides jusqu'à l'année 1984, $43,1 \text{ m}^3$ ont été soutirés, soit pratiquement la moitié. ($45,7 \text{ Hm}^3$ ont réussi à se décanter et se consolider).

ii- Barrage de l'oued El Fodda.

Ce barrage de capacité initiale égale à 28 millions de m^3 , a été mis en service en 1932. Suite au blocage de la vanne de fond par les vases, le barrage a été percé de 4 vannettes de dévasement (opérationnelles en 1981). Grâce à ce système, environ 12 millions de m^3 de vase ont été évacuées entre 1981 et 1993.

iii- Barrage de Foum El Gherza.

La vanne de fond, a permis l'évacuation de $0,6 \text{ Hm}^3$ de vase entre 1989 et 1993. Par la suite et malheureusement, la vanne a été bloquée par la vase.

f- Dragage des barrages

Le dragage, consiste à retirer la vase du barrage par des pompes. Mais à part les coûts de revient, ce dernier est très performant comme système et donne de très bons résultats. A travers l'expérience Algérienne, le dragage s'est avéré une solution sûre.

L'Algérie, a procédé au dragage de quatre barrages, à savoir :

Le barrage des Cheurfas, le barrage de Sig, le barrage de Fergoug et Celui du Hamiz.

Pour illustrer l'importance du matériel l'auteur cite le matériel acquis par l'Algérie en 1989. Ce matériel très complexe, est une drague suceuse refouleuse baptisée (Rezoug Youcef). Cette drague, d'un poids total de 300 tonnes est conçue pour refouler à une hauteur de 28 m dans une conduite de 700 mm avec un débit maximum de mixture (vase - eau) de 1600 l/s et pour draguer à une profondeur de 3 à 16 m.

9 - Etude de M. Bouraba (2002)

Dans une étude de synthèse, l'auteur a montré l'ampleur de ce fléau, tout en justifiant par la présentation de chiffres alarmants de dégradation spécifiques dans le nord de l'Algérie. L'étude, a porté sur plus de 35 bassins versants ; le calcul est établi sur des cycles hydrologiques différents, généralement sur un cycle moyen. Les résultats de l'étude, sont résumés dans ce qui suit.

L'érosion spécifique, varie annuellement de 307 à 5453 t/km²/an dans le bassin de Cheliff, de 1557 à 9397 t/km²/an dans le côtiers Algérois, de 252 à 10375 t/km²/an dans le côtiers Constantinois, de 164 à 5153 t/km²/an dans le Chott Hodna, de 794 à 2621 t/km²/an dans le haut Constantinois, de 838 à 1260 t/km²/an dans le Chott Melrhir, et de 301 à 406 t/km²/an dans la Tafna, elle est de 3990 t/km²/an dans l'Isser, de 248 t/km²/an dans la Soummam, de 742 t/km²/an dans le Seybouse, de 782 t/km²/an/an dans Kebir Rhumel et de 938 t/km²/an dans les Côtiers Oranais

10 - Etude de W Remini et B. Remini (2003)

Dans cette étude axée sur l'envasement des barrages, les auteurs mettent l'accent sur les graves conséquences de l'érosion et de l'envasement des barrages en citant :

1- La réduction de la capacité par des volumes très importants de vases arrivant à la retenue.

1- La sécurité de l'ouvrage qui est menacée ;

Le barrage, est mis en danger par la diminution de sa stabilité, du fait de l'augmentation de la force hydrostatique produite par le remplacement accéléré du volume d'eau par la vase. En effet, la masse spécifique de la vase avoisine $1,8 \text{ t/m}^3$, celle de l'eau n'étant que de 1 t/m^3 . Cette différence, engendre des forces supplémentaires (pratiquement le double de celle de l'eau). Ce cas, a été signalé aux barrages des Zardézas, et K'sob. Au delà d'un comblement de retenue dépassant 50 % de sa capacité initiale, le barrage est en danger.

2- Blocage des vannes :

L'une des conséquences de l'envasement, est l'obturation des vannes de fond. Ce qui entrave les vidanges des barrages au moment opportun et ce qui entraîne l'augmentation du volume des vases de la retenue dans le temps.

Comme exemple, l'auteur cite :

i - Le cas du barrage de l'oued El Fodda, dont la vanne de fond a été bloquée depuis 1948 suite à la consolidation rapide de la vase. Actuellement, elle se trouve sous 40 m de hauteur de vase.

ii - La vanne du barrage de Foum El Gherza, s'est obturée durant la période 1981-1989.

iii - La vanne du barrage des Zardézas, bloquée durant les années 90.

4- Accélération de l'eutrophisation :

Une fois déposées, les particules solides se tassent et se consolident suivant leur nature et les conditions physico-chimiques du milieu. Du fait de l'eutrophisation qui en résulte, la qualité de l'eau se dégrade très sérieusement. Par manque d'oxygène, une activité de biodégradation s'installe dans les fonds de la retenue.

5 Sédimentation dans les canaux d'irrigation :

Les sédiments des eaux d'irrigation, se déposant dans les canaux entraînent la diminution de leur section mouillée. Par suite, les besoins en eau se trouvent non satisfaits car le débit d'eau véhiculé par le canal décroît lui aussi. Avec le temps sans nettoyage, le canal s'obture et devient hors service. Pour illustrer ce constat, l'auteur cite quelques exemples.

- i- Le cas du canal de rocade, qui alimente les périmètres du Haouz central et la ville de Marrakech à partir du complexe Hassan 1er Sidi Driss.
- ii- Les canaux d'irrigation des périmètres de Habra dans l'ouest Algérien, qui s'ensavent à chaque opération d'irrigation.

11 - Tavaux de M. Meddi (2005)

Dans cette étude, l'objectif de l'auteur est le développement d'un outil qui explique le transport solide par le débit liquide. L'auteur, est intéressé par l'abondance de l'information sur le débit liquide, laquelle lui servira pour quantifier le transport solide. En deuxième étape, l'auteur s'intéresse à la relation entre le débit solide et le coefficient de ruissèlement.

L'étude, est menée au bassin versant de l'oued Mina, au climat semi aride.

Pour les débits solides, l'auteur a utilisé la régression linéaire, afin de les estimer à partir des valeurs du débit liquide observées. Après plusieurs essais, l'auteur retient le modèle puissance.

Dans une étude spatiotemporelle, il conclue que pour le bassin concerné, l'automne est la saison la plus productive en érosion.

Pour terminer, l'auteur donne les taux d'érosion calculés :

1- Le taux d'érosion calculé pour le bassin de l'oued Mina au barrage Sidi Benaouda, est de $187 \text{ t/km}^2/\text{an}$.

2- Il est de $212 \text{ t/km}^2/\text{an}$ pour le bassin de l'oued Haddad à Sidi Abdelkader El Djilali.

3- Pour le bassin versant de l'oued Tahtil, il est égal à $191 \text{ t/km}^2/\text{an}$.

4- Pour le bassin de l'oued El Abd à Ain El Hamra, le taux d'érosion est de $117 \text{ t/km}^2/\text{an}$.

5 - Pour le bassin de Takhmaret, il est égal à $65 \text{ t/km}^2/\text{an}$.

Dans une deuxième étape, l'auteur cherche une corrélation entre le débit solide spécifique A_s et le coefficient de ruissèlement C_e . Ce dernier est dépendant de la pluviométrie, de la nature du sol, du relief, de la lithologie et du couvert végétal.

A partir des données disponibles, l'auteur développe pour chaque sous bassin versant un modèle de type :

$$A_s = A (C_e)^b \quad (1.28)$$

Les résultats auxquels il arrive, sont les suivants :

i- Oued El Abtal $A_s = 0,0453 C_e^{1,311}$ (1.29)

ii- Sidi AEk Djilali $A_s = 0,0132 C_e^{1,867}$ (1.30)

iii- Ain ElHamr $A_s = 0,0203 C_e^{1,15}$ (1.31)

iv- KefMehboula $A_s = 0,0064 C_e^{1,725}$ (1.32)

v- Takhmaret $A_s = 0,0038 C_e^{2,082}$ (1.33)

12 - Etude de A. Bouanani (2004)

Dans cette étude, l'auteur s'intéresse à la quantification du transport solide et du taux d'érosion et à la recherche d'un modèle reliant les débits solides aux débits liquides au niveau de l'oued Sikkak, sous bassin de la Tafna.

En se basant sur les débits liquides instantanés et les concentrations de matières en suspension mesurées à la station d'AinYoucef, l'auteur calcule le débit solide en suspension par la relation :

$$Q_{ss} = C Q_l \quad (1.34)$$

Q_{ss} = Débit solide en suspension (kg /s).

Q_l = Débit liquide (m^3/s).

C = Concentration en matière solide (g/l).

Il calcule les apports solides et les apports spécifiques par les relations suivantes :

$$A_s = Q_s.N.10^9 \quad (1.35)$$

$$Ass = (As \cdot 10^6) / S \quad (1.36)$$

As = Apport solide annuel, mensuel ou saisonnier (10^6 tonnes).

Qs = Débit solide annuel, mensuel ou saisonnier (Kg/s),

N = Temps en secondes.

Ass = Apport solide spécifique ($t/km^2/an$).

Pour le flux annuel des matières solides en suspension, l'auteur utilise la relation :

$$As = \sum_{j=1}^N (t_{j+1} - t_j) Q_j C_j \quad (1.37)$$

Cj = Concentration, mesurée à l'instant tj correspondant au débit liquide Qj.

N = le nombre de prélèvement effectués sur l'année considérée.

$t_{j+1} - t_j$ = Pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs.

Qj = Débit liquide Qj.

Pour le calcul de l'apport liquide annuel Al engendrant le flux As, il utilise la relation :

$$Al = \sum_{j=1}^N (t_{j+1} - t_j) Q_j \quad (1.38)$$

Une fois la première partie de l'étude terminée, l'auteur tire les conclusions suivantes :

- 1- Les apports solides annuels, sont très irréguliers.
- 2- Importance des apports solides occasionnés par les crues.
- 3- Lors des crues, les taux d'érosion peuvent atteindre plusieurs fois la moyenne annuelle.
- 4- Les plus gros apports saisonniers, ont lieu en hiver et au printemps.

Dans une deuxième étape, l'auteur passe à la recherche d'un modèle liant le débit solide au débit liquide. Pour cela, il utilise la méthode des régressions linéaires.

La relation trouvée est donnée par :

$$Q_s = 0,29 Q^{1,47} \quad (1.39)$$

Pour terminer son étude, l'auteur énumère les principales conclusions comme suit :

- 1- L'apport moyen annuel en sédiment pour le bassin de l'oued Sikkak, est de $0,037 \cdot 10^6$ tonnes. Ce qui donne un débit solide moyen annuel de 2 kg/s.
- 2- La grande variabilité du débit spécifique d'érosion. Ce dernier passe de 4 à 745 $t/km^2/an$.

Il fait remarquer que ces taux de dégradation, se situent en dessous de la fourchette de 1000 à 5000 $t/km^2/an$; Valeurs proposées par Walling (1984) pour le Maghreb.

13 - Etude de M. Achite, B. Touaibia et S. Ouillon (2006)

Dans cette étude, les auteurs se sont fixé pour but la présentation de l'érosion et de son ampleur en Algérie du Nord, ainsi que l'analyse des conséquences qui en dérivent. Les résultats trouvés, leurs ont servi au classement des régions en zones par priorité de lutte antiérosive.

Pour mener à terme cette étude, les auteurs ont fait appel aux données fournies par l'Agence Nationale des Barrages (A.N.B) concernant 50 barrages en exploitation. Ces barrages, sont répartis sur tout le territoire.

Les données, comprenaient la capacité initiale du barrage, son taux d'envasement, son volume régularisé, son dernier levé bathymétrique et sa destination.

Ces cinquante barrages en exploitation, totalisent une capacité de 5,09 milliards de m^3 pour un volume régularisé garanti de 2,08 milliards de m^3 . Selon les derniers levés bathymétriques effectués par l'Agence Nationale des Barrages en 2003, les capacités de stockage ne sont plus que de 4.26 milliards m^3 . Les valeurs sont distribuées suivant le tableau 1-1

Tableau 1-1 : Capacités des barrages Algériens

Region	Est	Centre	Ouest	Total
Avant 2003	1,37	1,72	1,99	5,09
Après 2003	1,21	1,44	1,61	4,26
Perte	0,16	0,28	0,38	0,83
Perte en %	12,21 %	16,47 %	19,08 %	16,3 %

Capacité en 10^6 m^3 .

Dans cette étude, les auteurs concluent ce qui suit :

- 1- Le taux d'envasement moyen, est de 16,33 % pour l'ensemble des barrages ; soit 12,21 % pour les barrages de la région est, 16,47 % pour les barrages de la région centre et 19,08 % pour ceux de la région ouest du pays.
- 2- Le taux d'envasement des barrages, suit la logique de taux d'affectation des sols par l'érosion hydrique (47 % pour les régions ouest, 27 % et 26% pour le centre et l'est).
- 3- L'ampleur de ce phénomène, varie selon les régions et les barrages. Ainsi, pour la région de l'est, l'envasement dépasse les 50 % pour les barrages Ksob (Msila), Foum El Gherza (Biskra) et Foum El Gueiss (Khenchela). Dans le centre, l'envasement dépasse les 40 % pour le barrage de Ghrib (Ain Defla) et le barrage de l'oued Fodda (Chlef). Ce taux, dépasse aussi les 40 % pour les barrages de Bouhnifia et Fergoug à Mascara.

14 - Etude de A .Ghenim, A. Seddini et A. Terfous (2007)

L'étude, est menée dans le but de comprendre le comportement des bassins versants semi arides lors d'évènements de crue et le rôle de ceux-ci dans la genèse et le cheminement des particules fines. Leur choix, est porté sur l'étude des crues survenues dans le plus important sous bassin de la Tafna. A savoir Oued Mouilah, régularisé depuis 1998 par le barrage Hammam Boughrara, d'une capacité de 177 millions Hm^3 .

Le bassin versant de l'Oued Mouilah, couvre une superficie de 2650 km². Son périmètre, est de 230 km. La plus grande partie de cette surface, se trouve dans le territoire Marocain. Son cours d'eau, long de 124 km, prend naissance dans la région d'El Abed en Algérie à 1250 m d'altitude. Il pénètre au Maroc, puis revient en Algérie aux environs de Maghnia. Il draine un bassin constitué de zones très hétérogènes, formées de montagnes, de plaines et de vallées. Les sols calcaireux, longent son thalweg principal et se prolonge au nord-est des monts des Traras et aux piémonts des monts de Tlemcen. On rencontre aussi des formations calciques peu profondes et des terrains alluviaux surtout dans la partie nord de la plaine de Maghnia. La partie sud de la plaine, comprend des sols rouges à encroûtement formés de marnes salifères du Miocène. Ce bassin, est caractérisé par un régime semi-aride.

De leurs travaux, les auteurs ont tiré les conclusions suivantes :

- 1- Au cours d'un cycle hydrologique, les périodes de crues jouent un rôle prédominant dans l'exportation des matières en suspension. C'est lors de ces événements qu'il y a les plus importants transports solides et en dehors de ces événements, les concentrations enregistrées sont très faibles en raison de l'absence de turbulence et de l'incapacité de l'écoulement à mobiliser le transport des sédiments.
- 2- La disproportionnalité entre le débit liquide et le débit solide.
- 3- Les événements les plus agressifs, tant en apport liquide que solide, sont ceux de courte durée.
- 4- Les crues d'été et d'automne, mobilisent de fortes quantités solides pour de faibles quantités liquides.
- 5- Les crues printanières, ne mobilisent que de faibles quantités solides pour de forts débits liquides.

15 - Travaux de B. Touaibia (2009)

L'auteur, s'intéresse à l'étude de l'envasement de 15 barrages du nord Algérien.

Il énumère les causes de l'érosion et les classes en deux ensembles.

Le premier ensemble, lie aux facteurs naturels : l'intensité de la pluie, l'action du gel et du dégel, le pouvoir évaporant du sirocco, la pente et la forme du bassin.

Le deuxième ensemble, lie aux facteurs anthropiques : colonisation, guerre, incendie, morcèlement des terres, défrichage, pratiques culturales, surpâturage, non maintenance des travaux de DRS.

L'auteur, énumère ensuite les conséquences de l'érosion : pertes des sols, colmatage des sols, exhaussement de lit d'oued, détartrages des stations hydrométriques, dépôts des sédiments sur les routes, les plages et les ports, formation intensive des réseaux d'écoulement, envasement et sédimentation des barrages.

Dans ces travaux, l'auteur aboutit à ce que sur les 15 barrages concernés par l'étude :

- 7 sur les 15 barrages, ont vu leur volume dépassé, alors qu'ils n'ont pas 25 années d'exploitation. Il s'agit des barrages de l'oued El Fodda, Ghrib, Chiffa, Sidi. M. Benaouda, Deurder, Bouroumi, Sidi Belabbas.

L'auteur, aboutit à ce que la plus importante forme d'érosion est l'érosion par ravinement du réseau d'écoulement et qu'à elle seule, elle peut représenter 50 % de l'apport solide total. L'auteur, entreprend une étude à l'échelle spatiale et qui donna des résultats concluants.

Conclusion

L'érosion hydrique, est un phénomène qui sévit à l'échelle universelle. Son ampleur et ses conséquences, sont spectaculaires et ne sont pas à démontrer. La région du Maghreb, est sérieusement touchée et particulièrement l'Algérie. En effet, les dispositions géographique, socioéconomique, les conditions hydro-climatiques et hydro-géomorphologiques (lithologie, pentes, pluie, couvert végétal), sont naturellement réunies et lui sont très favorables. Ses manifestations, sont très remarquables surtout lors des événements exceptionnels que sont les crues. Des valeurs de concentration en matières solides manifestement élevées, ont été observées (200 g/l en Tunisie, 100 g/l au Maroc, 600 g/l en Algérie).

Quant aux valeurs des taux d'érosion enregistrées, elles ne peuvent être qualifiées que d'exorbitantes, (jusqu'à 2000 t/km²/an au Maroc et 5000 t/km²/an en Algérie), (Demmak. 1982)

Ce phénomène "rongeur de sols", est doublement néfaste. Non seulement, il dénude les sols de leur couverture et les rend incultes, mais aussi d'autre côté, il occasionne des dommages socioéconomiques remarquables. Le plus dramatique, étant le comblement des réservoirs des barrages. En effet, ce monument (le barrage) dont les coups ont été lourdement sentis par l'économie du pays, se trouve sérieusement menacé par les caprices de ce "fléau" qu'est l'érosion hydrique. Faire face à ce phénomène, demande la conjugaison de tous les efforts sur tous les plans et ce à coup de bagatelles qui se chiffrent en milliards.

Dans le cadre de lutte contre l'érosion et la protection des sols. L'Algérie, dans un programme baptisé 'DRS' (Défense et Restauration de Sols), avait déployé dans les années soixante et soixante dix, de très importants moyens pour rafraichir et mettre en valeur les sols, protéger les bassins versants, stabiliser les ravines, restaurer la productivité des terres et surtout protéger les barrages de l'envasement. Le programme concernait 5 millions d'hectares. Le coup de l'opération, est faramineux. En effet, les frais d'aménagement et restauration d'un hectare, coutait entre 1300 et 2200 Euro en 1973. (Arabi 2004). Après quarante années de lutte antiérosive, un programme de recherche est lancé pour évaluer l'opération. Par rapport au cout colossal déboursé et à ce qu'on escompter de cette opération, les résultats ne furent que médiocres et décevants.

Dans le cadre d'un "nettoyage" et de restauration du barrage de Fergoug. Les services concernés, ont lancé une opération de dragage par rejet des sédiments décantés dans le réservoir du barrage. Les quantités de vases, sont alors déposées dans des aires de stockages

pas loin de la retenue. L'érosion, en a fait une proie facile. Aujourd'hui, les terres fertiles de la grande plaine de l'Habra sont entraînées de se transformer irréversiblement en un terrain "vaseux" et inculte.

L'exceptionnalité et la difficulté de ce phénomène, ne se limitent pas au terrain. Elles sont encore d'ordre scientifique et de recherche. Sa complexité, réside dans le nombre de variables mises en jeu ; Variables, souvent difficilement estimables les une que les autres et parfois intimement liées. En pratique, mesurer exactement la valeur de la charge en suspension est du domaine de l'impossible, quant à la charge charriée, sa mesure est encore plus difficile. Même si les chercheurs, se sont penchés depuis longtemps (Du Boys 1879), la recherche dans le domaine du transport solide est à ce jour à l'état embryonnaire ; En témoignent le nombre d'hypothèses proposées à chaque fois et le grand nombre d'équations empiriques, imprécises et qui ne couvrent chacune que des domaines d'application limités.

CHAPITRE 2
Caractéristiques
physico-climatiques &
géologie du bassin versant

1 - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT

Dans un bassin versant, le transport solide et le taux d'érosion sont étroitement liés aux caractéristiques hydrologiques, géomorphologiques, physiques....

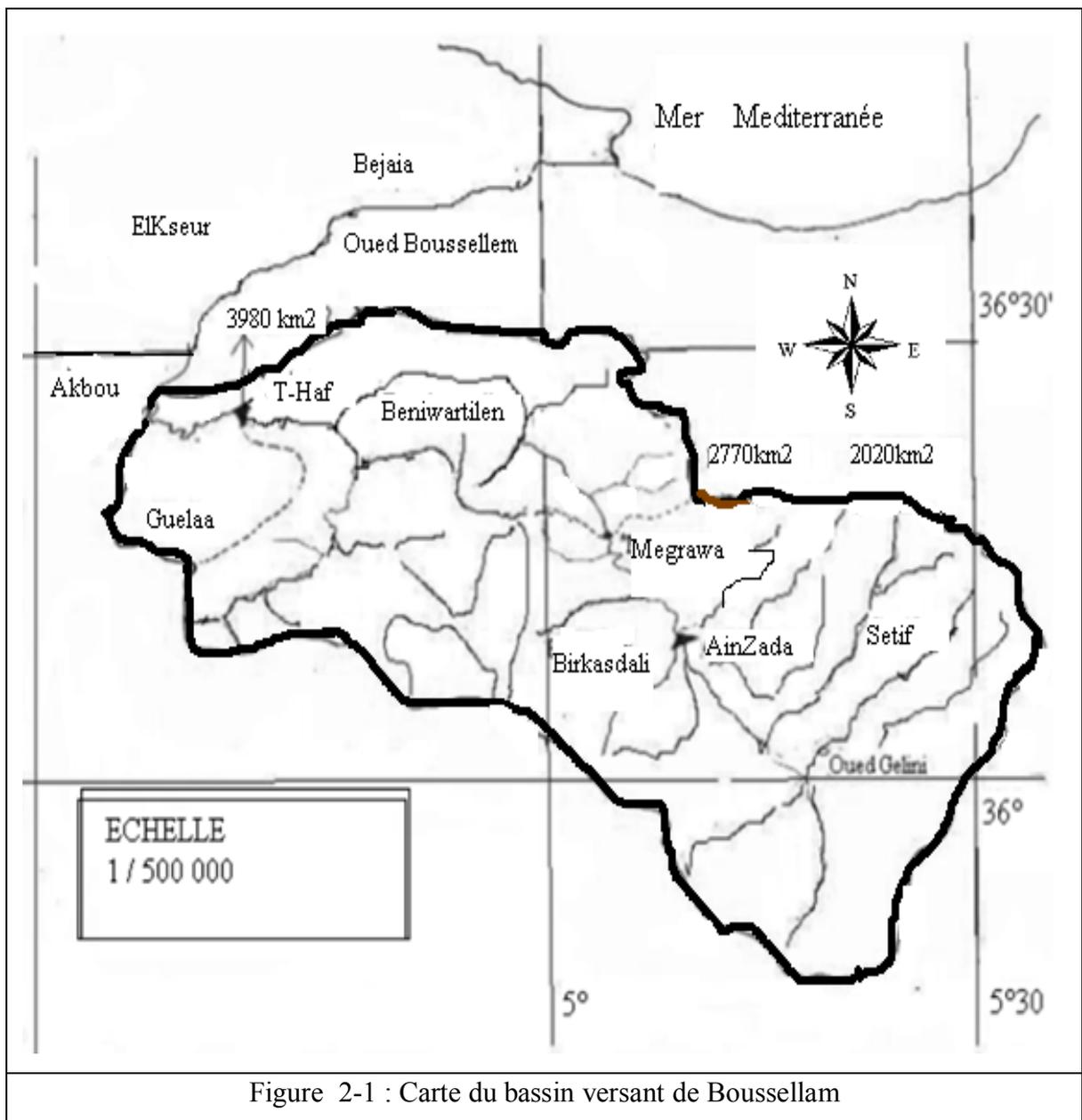
Les caractéristiques physiques d'un bassin versant, sont le relief, le sol et sa nature géologique, la végétation, la pente, l'occupation des terres et la morphologie du réseau de drainage.

1-1 Situation géographique du bassin versant

Le bassin versant du Boussellam à Sidi Yahia (figure 2-1), fait partie du bassin versant de la Soummam, dont il représente pratiquement 45 % de surface. Il est situé au Nord-est Algérien, entre 4°^{40'} et 5°^{45'} de longitude et 35°^{44'} et 36°^{45'} de latitude. Il est limité au nord, par la vallée de la Soummam, à l'est par la chaîne du Babor de Sétif, à l'Ouest par les montagnes des Bibans du côté sud par les montagnes du Hodna et du Djebel Boutaleb. Le climat est de type méditerranéen caractérisé par une saison humide et une autre sèche. Le régime hydrologique du cours d'eau, dépend essentiellement de la pluviométrie. Il se caractérise par une grande variabilité spatiotemporelle, avec une succession de périodes de hautes et basses eaux. Il peut être décomposé du point de vue géomorphologique et climatique, en deux sous bassins très différents. En effet, le cours d'eau né sur le versant méridional de l'Atlas Tellien. Se dirige d'abord vers le sud, parcourant les hautes plaines de Sétif, peu accidentées au climat sec. Il change ensuite d'orientation et se met à couler vers le nord-ouest, entaillant une vallée encaissée, coupée de gorges dans les Bibans avant de confluer avec l'oued Sahel.

Le haut bassin en amont de Megrawa, d'une superficie de 2380 km² est profondément différent du reste du bassin de la Soummam, tant par ses caractéristiques géomorphologiques que par ses traits climatiques. Il fait partie des hautes plaines de Sétif, au relief assez plat et caractérisé par un climat semi-aride, avec une végétation importante et par conséquent d'un coefficient d'écoulement, relativement faible. La pluie moyenne annuelle sur cette zone, est de 400 à 500 mm.

Le bassin versant en aval de Megrawa, d'une superficie de 1600 km² est caractérisé par un relief accidenté avec des pentes raides. La couverture végétale, est constituée essentiellement de forêts. Le climat est relativement humide, avec une pluie moyenne annuelle de 600 à 700 mm. Les coefficients d'écoulements dans cette région, sont plus élevés que dans la région supérieure. Ceci, est dû aussi à une plus grande imperméabilité du sol. Dans la partie supérieure, il existe déjà un petit ouvrage de retenue (retenue de Fermatou) près de Sétif et un autre ouvrage plus à l'aval à Ain-Zada. Ce dernier, a des répercussions sur les apports à la station de Sidi-Yahia.



1-2 Caractéristiques de forme

La quantification des facteurs caractéristiques du milieu physique, présente un intérêt dans la recherche et la connaissance des régimes hydrologiques et leur variation dans un bassin versant.

1-2-1 Surface du bassin versant

La surface du bassin versant, est la première et la plus importante des caractéristiques. Elle s'obtient, par planimétrie sur une carte topographique après que l'on y ait tracé les limites topographiques et éventuellement hydrogéologiques. La surface S d'un bassin, s'exprime généralement en km^2 .

1-2-2 Les Longueurs du bassin versant

On utilise, différentes caractéristiques de longueur. La première et l'une des plus utilisées est le périmètre P du bassin versant. Le périmètre, est curvimétré sur une carte cartographique à l'échelle 1/50 000. Ce dernier, n'est généralement pas utilisé directement, mais le plus souvent à travers des valeurs qui en dérivent ; Comme la longueur L_c du rectangle équivalent. On définit, le rectangle équivalent comme étant le rectangle de longueur L_c et de largeur l_c , qui a même surface et même périmètre que le bassin versant, à l'aide des équations suivantes :

$$P_c = 2 (L_c + l_c) \quad (2-1)$$

$$S = L_c l_c \quad (2-2)$$

P_c = périmètre du bassin versant.

S = surface du bassin versant.

L_c = longueur du rectangle équivalent.

l_c = largeur du rectangle équivalent.

1-2-3 Indice de compacité

La caractéristique de forme la plus utilisée, est l'indice de compacité, appelé aussi le "coefficient K_c de Gravelius". Il se définit, comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle ayant même surface. L'indice de compacité, traduit la forme du bassin versant. Il indique, un allongement ou un ramassage du bassin. S'il est proche de 1, il aura une forme ramassée, ce qui implique un temps de concentration court. Plus, il est plus grand que 1, plus le bassin aura une forme allongée et le temps de concentration sera plus grand. L'indice de compacité est donné par :

$$K_c = 0,28 P_c / (S)^{0.5} \quad (2-3)$$

S = surface du bassin versant (km^2).

P_c = périmètre du bassin versant (km).

L'indice de compacité calculé, est $K_c = 1,13$. Donc le bassin versant du Boussellam, a une forme plutôt ramassée.

Les caractéristiques morphologiques du bassin versant à Sidi-Yahia, sont récapitulées dans le tableau 2-1.

Tableau 2-1 : Caractéristiques morphologiques du bassin versant de Boussellam

Superficie du bassin versant	$S = 3980 \text{ km}^2$
Périmètre du rectangle équivalent	$P_c = 300 \text{ km}$
longueur du rectangle équivalent	$L_c = 115 \text{ km}$
Indice de compacité	$K_c = 1,3$
Altitude maximale	$HM = 1737 \text{ m}$
Altitude minimale	$Hm = 210 \text{ m}$
Altitude moyenne	$H = 960 \text{ m}$
Longueur du thalweg principal	$L_t = 172 \text{ km}$

1-3 Etude du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique, est l'ensemble des cours d'eau et des affluents, permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent toutes les eaux de ruissellement et convergent vers un seul point de vidange du bassin versant, appelé exutoire.

La (Figure 2-2), montre la situation des rivières dans l'ensemble du bassin versant. On remarque, une densité plus importante dans la partie inférieure, ce qui reflète une participation plus active à l'écoulement de cette région.

Le profil en long (figure 2-3) des principaux cours d'eau, montre aussi la raideur de la région inférieure. Signe évident, de son importante influence dans la formation des crues. Les principaux oueds du bassin versant, sont l'oued Boussellam, l'oued El-Main et l'oued Sahel.

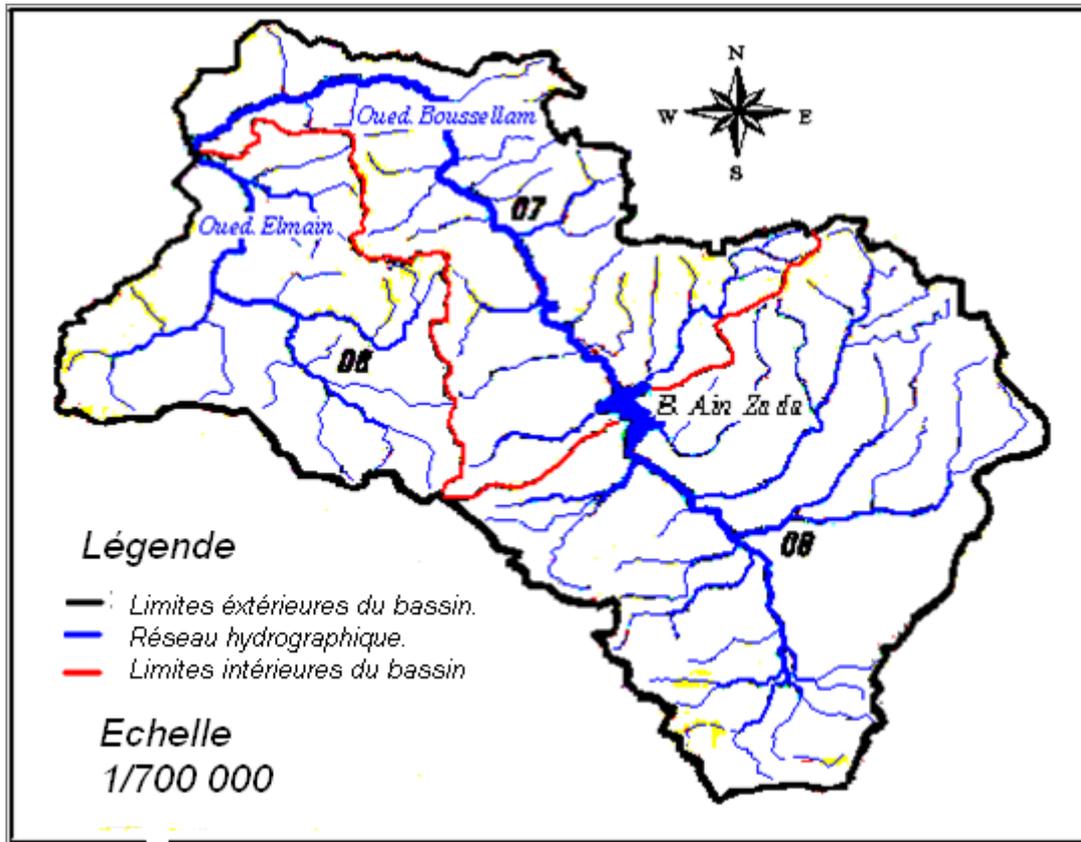


Figure 2-2 : Réseaux hydrographiques du bassin versant de Boussellam

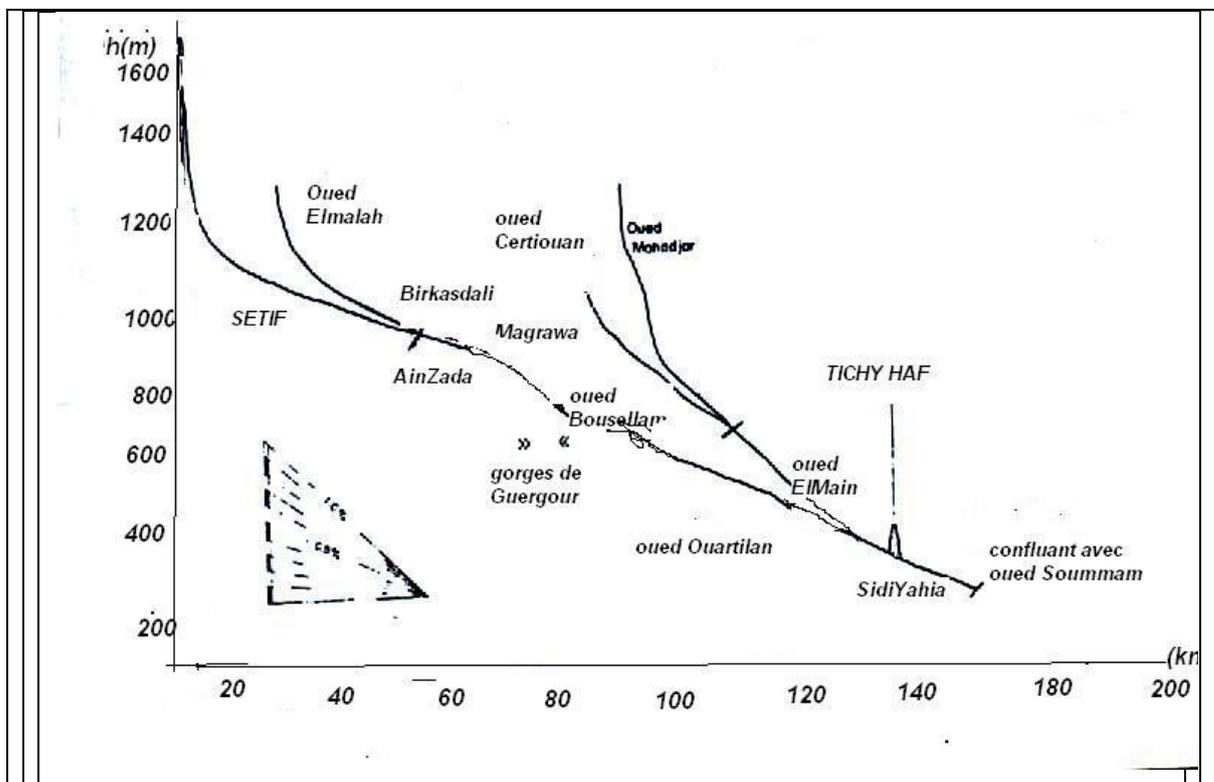


Figure 2-3 : Profil en long des principaux cours d'eau

2 - ETUDE GEOLOGIQUE

La géologie d'un bassin versant, est un facteur très important du régime des cours d'eau qui drainent ce bassin. En période de crue, les volumes écoulés seront d'autant plus grands que le bassin sera plus imperméable. En période de basses eaux, les débits seront d'autant plus forts que les nappes sont plus nombreuses et importantes. Aussi, la géologie influe indirectement sur l'évapotranspiration par l'effet thermique, dû à la couleur des sols et par le développement de la végétation en fonction des sols.

On se contente généralement, de caractériser la géologie d'après le comportement hydrogéologique du bassin. L'O.R.S.T.O.M. a proposé une classification en cinq groupes, ainsi définis (tableau 2-2)

Tableau 2-2 : Classification hydrologique des sols

Classe	Intitulé	Exemple
P1	Perméable, à aquifère drainant ou non drainé	Formation gréseuse, dont les exutoires sont à l'extérieur du bassin
P2	Perméable à aquifère drainé	Formation gréseuse, dont les sources alimentent le réseau
P3	Perméabilité moyenne ou faible	Alternance de marnes et calcaires
P4	Karstique	Formation calcaire, perméabilité de fissures et développement d'un réseau souterrain
P5	Imperméable	Terrain marneux, cristallin, etc.

2-1 Géologie régionale

La lithologie, explique en grande partie la différence observée entre les deux parties du bassin versant, quant à la structure morphologique et à l'occupation du sol.

Sur la figure (2-4), sont illustrées les différentes formations géologiques du bassin de la Soummam. (Charifi. S. 2006).

Les alluvions le long des Oueds et au niveau des hautes plaines, représentent le quaternaire.

Le Pliocène continental, est représenté par le coteau du Sahel, couronné par des graviers siliceux et fluviaux ; ailleurs, il est conglomératique, sinon caillouteux.

De l'ouest de Bejaia, jusqu'aux environs de Sidi-Aich. On retrouve, le miocène et c'est essentiellement le miocène inférieur. Il est, présent aussi du côté du djebel Mansourah sous forme de grés.

L'Oligocène. : On le retrouve, sous forme d'argile-gréseux. Affleurant et en abondance de Tazmalt en allant vers l'ouest de part et d'autre de toute la vallée de la Soummam. Il fait aussi, irruption dans la région de Beni Mansour et les montagnes de Yema Gouraya.

C'est au niveau des hautes plaines de la Soummam, qu'affleure l'éocène sous forme marneuse ou calcareux-marneuse.

Des Bibans jusqu'aux montagnes de la petite Kabylie, on retrouve le crétacé Il se présente, en général sous forme de flysch. Il est étendu en continu, depuis la chaîne des Bibans jusqu'aux montagnes de la petite Kabylie. Le faciès, est marneux au Crétacé supérieur (Sénonien). Il est schisteux, sous forme de bancs de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur, avec quelques intercalations de grés, au Crétacé moyen (Albien) et apparaît dans la région de Béni-Mansour et la chaîne des Bibans. Il est gréseux, parfois carbonaté-gréseux au Crétacé inférieur.

Le jurassique : Il affleure, surtout au niveau de la chaîne calcaire et le long de sa continuité vers l'est. Il est, principalement calcaro-dolomitique.

De faciès gypso-salin. On retrouve, le trias dans le tell méridional, sous forme de conglomérats et des grés rougeâtres dans le Tell septentrional.

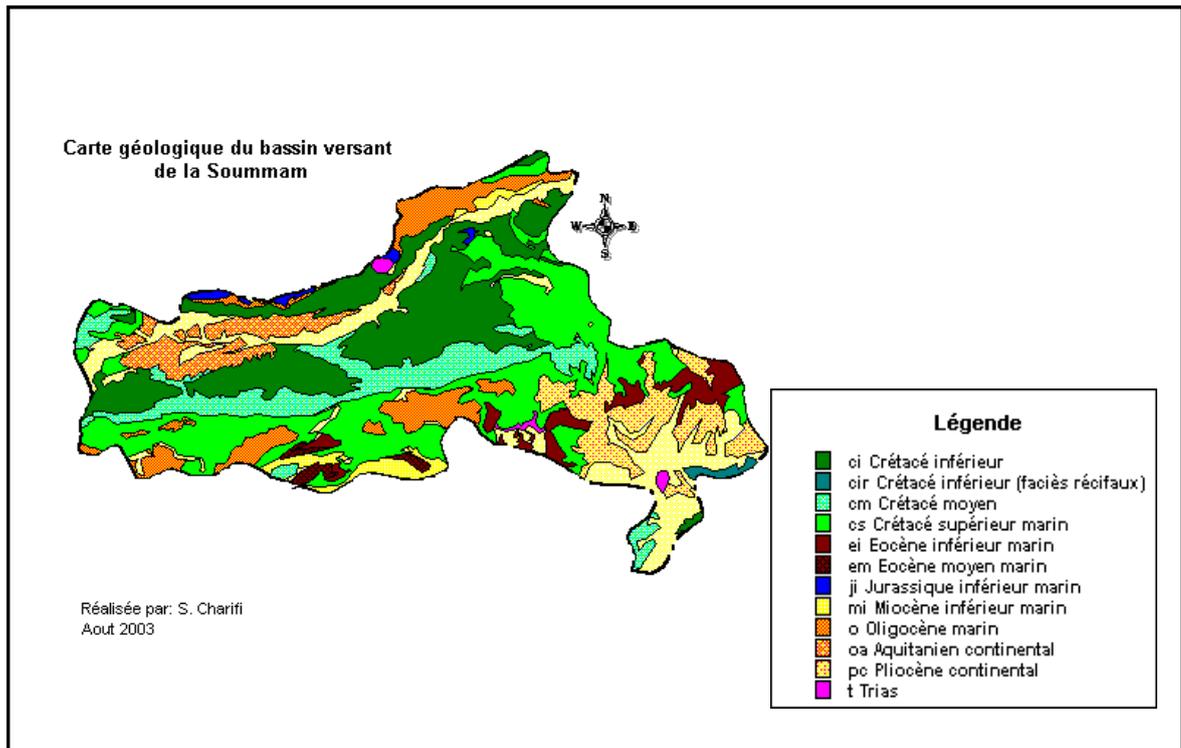


Figure 2-4 : Formations géologiques du bassin versant de la Soummam (Charifi, 2006)

2-2 Géologie du bassin versant

Concernant le bassin versant à Sidi-Yahia, l'étude géologique montre, que la partie supérieure du bassin versant est à prédominance argileuse et marneuse. Sur le versant méridional de l'Atlas Tellien, existe des alternances de couches minces de calcaire dans les marnes; Avec des accumulations, plus étendues de colluvions sur le bas versant.

La partie inférieure, est constituée de roches dures, en général calcareuses et marnocalcareuses (Coyne et Bellier, 1973).

L'une des propriétés essentielles, conditionnant l'érodabilité du sol, est la teneur en argile et limon ; c'est ainsi que la partie supérieure du bassin versant est plus érodable que la partie inférieure.

3- ETUDE DES SOLS

Les sols constituant le bassin versant du Boussellam (figure 2-5), sont à pas moins de 70 % calcaireux. L'eau, peut modifier ce complexe absorbant, de façon que l'hydrogène atteigne 20 % de sa capacité totale. Leur texture légère, les classe parmi les sols perméables.

On retrouve Aussi des sols dits humifères, de texture lourde. Cette dernière, peut être

allégée par la présence de 25 % de matières organiques.

Au Nord-est du bassin versant, le calcaire laisse place à l'argile. Ce dernier, est très abondant en surface qu'en profondeur où les roches mères sont très imperméables.

Le long des Oueds, on retrouve des sols représentés par des dépôts alluviaux.

Dans la région sud, se présentent en petites quantités, des sols calciques ainsi que des sols salins des sebkhas.

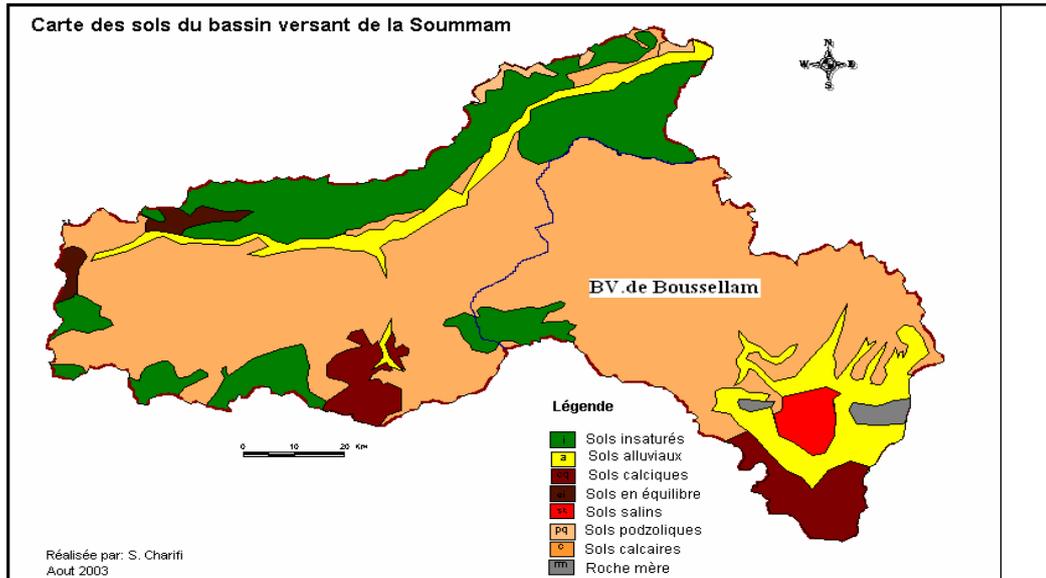


Figure 2-5 : Carte des sols du Bassin versant de la Soummam (Charifi, 2006)

4- LE COUVERT VEGETAL

Le couvert végétal, influe beaucoup sur les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement de surface. En effet, l'évapotranspiration par les végétaux est très importante et elle varie selon la nature des végétaux (forêts, cultures, prairies,...).

Par ailleurs, la végétation joue également un rôle atténuateur important en période de crue. En effet, lorsque la végétation est développée, le ruissellement est retardé et la pointe de crue est atténuée. Par ailleurs, l'écoulement étant plus long, la part d'eau reprise par l'évapotranspiration augmente et le volume de la crue diminue.

Dans le nord du bassin versant, la couverture végétale est généralement une steppe de graminées. L'agriculture est fondée sur les céréales. La partie sud, est constituée essentiellement par des forêts denses.

5 - ETUDE DU CLIMAT

5-1 Aperçu sur le climat de l'Algérie

C'est Seltzer, qui en 1946 étudia le climat de l'Algérie. Ce dernier, est de type méditerranéen. Caractérisé par une période pluvieuse, allant en moyenne du mois de septembre au mois de mai et une autre sèche 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. Le climat de l'Atlas Tellien, présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec, relativement chaud et à forts écarts thermiques

5-2 Climat du bassin versant

La partie supérieure du bassin versant, est caractérisée par un climat sec, avec une pluviométrie de l'ordre de 400 à 500 mm. Les chutes de neiges hivernales, sont peu abondantes. Les sécheresses estivales, sont beaucoup plus fortes que dans l'Atlas Tellien. Le règne thermique, du fait de la sécheresse de l'air, est caractérisé par une forte amplitude tant diurne que saisonnière. Ces conditions climatiques, se répercutent sur le régime hydrologique, aussi bien de manière directe qu'indirecte. Nous sortons du domaine de la forêt climatique, pour entrer dans les steppes.

La partie inférieure du bassin, diffère considérablement de celui des hautes plaines de Sétif. Elle appartient, aux régions montagneuses méditerranéennes, plus arrosées, au régime pluviométrique original. Les sécheresses estivales, sont un peu atténuées. Par contre, les pluies automnales, sont importantes. Elles prennent la forme d'averses courtes et très violentes, donnant un régime torrentiel à l'écoulement. En hiver, les chutes de neiges, sont fréquentes au dessus de 700-800 m. Mais cette neige, fond en grande partie au cours même de l'hiver. Seuls les sommets, dépassant 1100-1200 m conservent une couverture neigeuse, pendant la plus grande partie de l'hiver. Principalement vers le bord septentrional du bassin, plus arrosé. La fonte de la neige, est favorable à l'infiltration. Celle-ci, alimente des acquièrès profondes dans les massifs calcaires, plus abondantes sur le bord septentrional du bassin. Sur les marnes et les marnocalcaires, la neige détrempe le sol et favorise le déclenchement de mouvements de solifluxion. Elle alimente en fondant, un écoulement hypodermique dont les modalités varient en fonction de la lithologie. Au printemps, la fin de la saison pluvieuse se caractérise par des précipitations moins

intenses qu'à l'automne, mais plus longues. Les sols étant souvent saturés, elles alimentent un écoulement qui revêt généralement la forme de hautes eaux assez soutenues. La composante hypodermique, continue à l'expliquer.

6 - PLUVIOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT

6-1 Introduction

Plus encore, que les facteurs morphologiques, lithologiques et biogéographiques. Les conditions et les facteurs climatiques, jouent un rôle déterminant dans le régime des cours d'eau et dans le comportement hydrologique (Roche 1963, Cosande 2001). Ce sont les précipitations, surtout liquides qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- La hauteur totale annuelle, qui détermine l'abondance fluviale.
- La répartition mensuelle et saisonnière, qui influence directement le régime hydrologique.
- Les totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

6-2 Pluviométrie de l'Algérie

La pluviométrie en Algérie, a été étudiée par plusieurs auteurs (P.Setzer 1913-1938, H.Gaussen 1918-1947, G.Medinger 1913-1953, M.Chaumont et C.Poquin 1913-1963).

La plupart des stations du bassin, ont été arrêtées pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962.

La restructuration du réseau pluviométrique Algérien, a permis d'installer d'autres stations. Leurs données, sont très utiles pour l'établissement de séries pluviométriques récentes. Néanmoins, elles présentent souvent des lacunes.

6-3 pluviométries du bassin versant

Les données pluviométriques, sont fournies par l'A.N.R.H (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). L'extrait de la carte pluviométrique de Chaumont (figure 2-6) représentant la moyenne pluriannuelle, montre comme déjà signalé, une concentration plus importante des précipitations dans le nord du bassin versant, c'est à dire la partie inférieure, que dans le sud. La pluie moyenne annuelle sur le bassin, calculée d'après ce document, est de 565 mm. Cette valeur, correspond à la moyenne pondérée entre les valeurs relatives au bassin supérieur (484 mm) et du bassin inférieur (692 mm).

Conclusion : Le bassin versant de l'oued Boussellam, peut être subdivisé en deux sous bassins, présentant des caractéristiques climatiques et géomorphologiques très différentes ; Donc par suite, ils présenteront par rapport aux écoulements, des comportements différents.

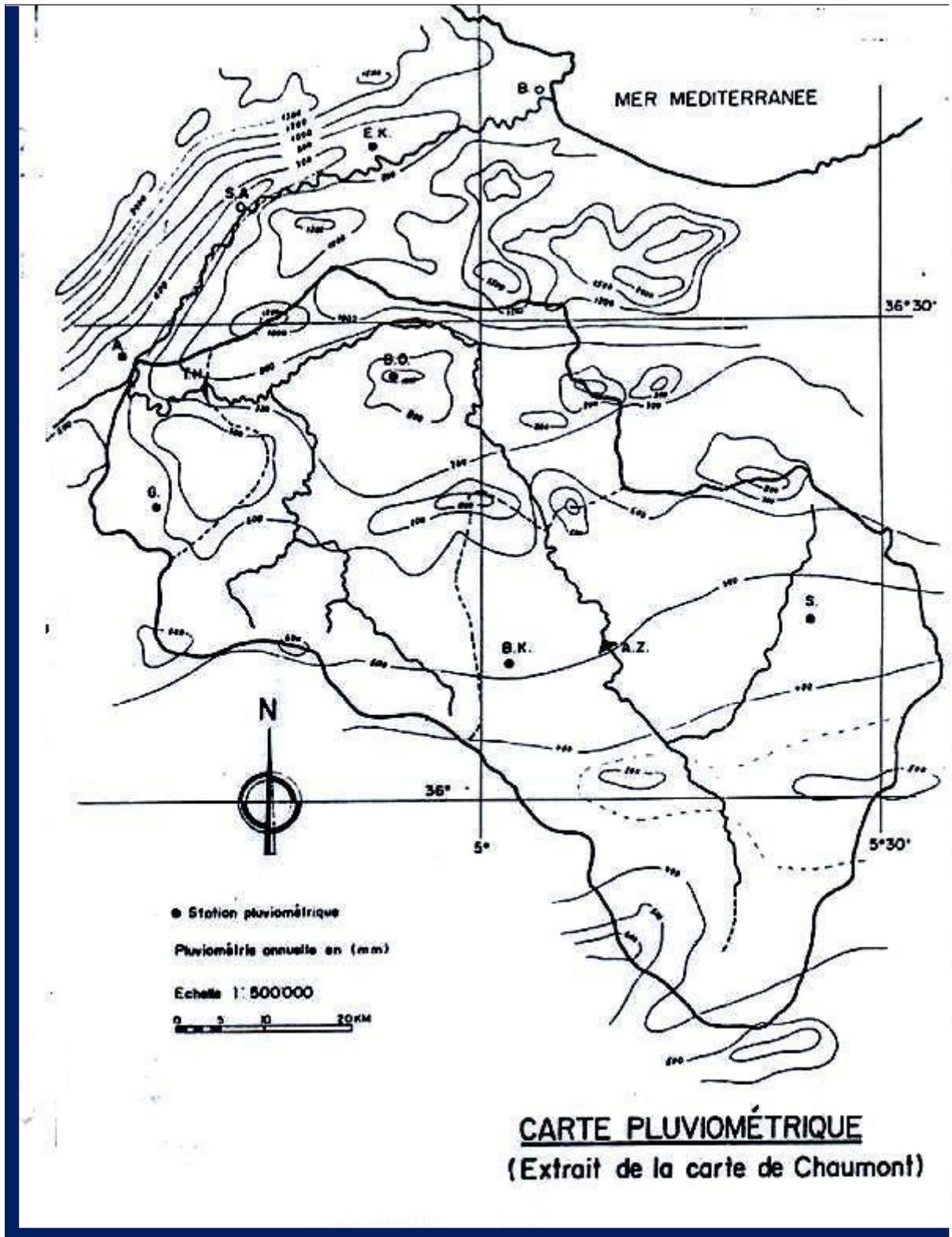


Figure 2-6 : carte pluviométrique du bassin versant de Boussellam

Chapitre 3

Etude des débits et des apports liquides

La station concernée par la présente étude, est la station de Sidi-Yahia ;

- Code de la station : 15-09-01.
- Surface du bassin versant, égale à 3980 km².
- Longueur du principal thalweg (Le Boussellam), égal à 172 km.
- Les données hydrométriques, couvrent la période allant de l'année 1971 à l'année 1995.

Remarque préliminaire

Cette station, a une particularité très importante qui réside dans la construction à l'amont de cette dernière d'une retenue au site appelé Ain Zada (la retenue portant le même nom).

Après la mise en eau de la retenue d'Ain-Zada, la surface contrôlée par la station de Sidi-Yahia, est passée de 3980 km² à 2100 km² ; Soit une perte pratiquement de la moitié de sa surface (47 %). Son thalweg principal, est passé de 172 km à 107 km, ce qui donne une diminution de 65 km ; Equivalent à une perte de 38 %.

Aussi dans toute l'étude, on parlera de deux périodes :

- i- La première période, correspondant à l'avant construction de la retenue d'Ain-Zada. Elle s'étale de l'année 1971 à l'année 1988.
- ii- la deuxième période, correspondant à l'après construction de la retenue. Elle s'étale de l'année 1988 à l'année 1995.

Introduction

L'étude hydrologique, est d'un intérêt considérable en hydraulique. Elle permet le calcul des différents débits ; le débit minimal, le débit moyen et le débit maximal et leurs changements sur différentes échelles ; mensuelle, saisonnière et annuelle Ceci, permet de connaître le régime du cours d'eau. Elle permet aussi de connaître les différents apports liquides et leurs fluctuations à différentes échelles. Ceci permet un bon dimensionnement des ouvrages hydrauliques. La connaissance des débits de crue, permet le dimensionnement des ouvrages d'évacuation des barrages

1 - ETUDE DES DIFFERENTS DEBITS LIQUIDES

1-1 Etude du débit liquide à l'échelle annuelle

1-1-1 Etude du débit liquide maximal annuel

La visualisation du débit liquide maximal annuel en fonction du temps (figure 3-1), fait ressortir sa nette diminution à partir de l'année 1988.

En effet, sa moyenne était de 314,7 m³/s pour la période 1971-1988 et passe à 152,5 m³/s pour la période 1988-1995. Les débits maximaux, ont été enregistrés en 1972 pour Q_{max} = 902 m³/s. et en 1973 pour Q_{max} = 862 m³/s. Ces débits, étant les débits des crues des années citées. Le cours d'eau, a connu une autre crue en 1982 pour Q_{max} = 525 m³/s, ensuite on remarque la succession de plusieurs crues entre 1979 et 1985. A partir de 1988, le débit maximal devient sensiblement faible. En effet, ce dernier n'a pas dépassé la valeur de 330 m³/s.

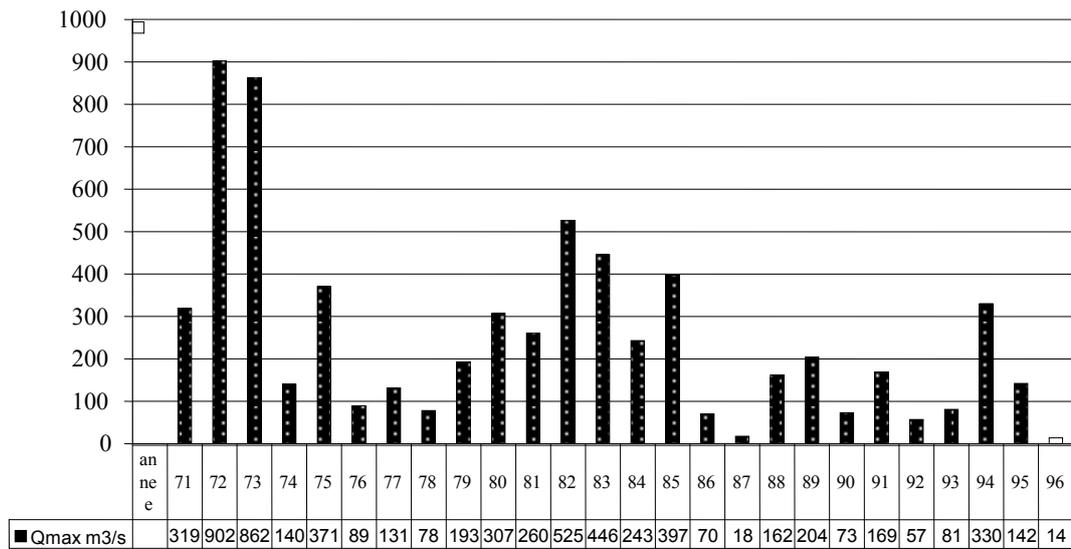


Figure 3-1 : Evolution du débit liquide maximal annuel Q_{max}

1-1-2 Etude du débit liquide minimal annuel

1-1-2-1 Etude générale

La visualisation du débit liquide minimal annuel en fonction du temps (figure 3-2), permet d'observer sa nette diminution à partir de l'année 1988.

Pour la période 1971-1988, le débit minimal moyen Q_{min} était de 0,34 m³/s et passe à 0,16 m³/s pour la période 1988-1995. Les trois plus importants débits minimaux, ont été enregistrés en 1971, 1972 et 1973, pour respectivement 0,8 m³/s, 0,8 m³/s et 0,85 m³/s. On remarque, que le débit minimal Q_{min} a connu la valeur nulle sur plusieurs

années à partir de 1988. Ce qui reflète le tarissement de l'oued durant ces années, chose non connue avant cette date.

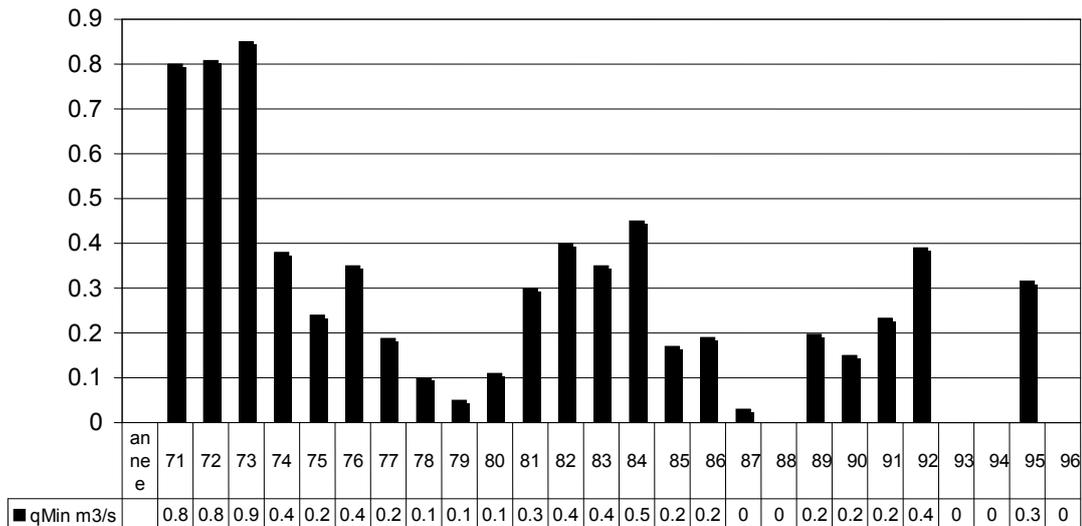


Figure 3-2 : Evolution du débit liquide minimal annuel Q_{min}

1-1-2-2 Etude de l'irrégularité interannuelle du débit minimal annuel

i- Période 1971-1988.

La courbe de variation interannuelle des débits minimaux annuels (figure. 3-2), montre une importante fluctuation du débit d'une année à l'autre. L'irrégularité interannuelle de l'écoulement minimal, peut être vérifiée par la variation du coefficient de variation C_v . Ce dernier, est donné par le rapport du débit d'une année particulière Q_{min} au débit minimal moyen annuel $(Q_{min})_{moy}$.

Le tableau 3-1, fait ressortir le déficit en écoulement minimal de pratiquement 9 années sur une période de 17 années (valeurs du rapport des débits inférieur à 1, c'est-à-dire débit minimal inférieur au débit minimal moyen annuel). Les valeurs élevées du coefficient (années 71, 72, 73 et 84), correspondent aux années assez pluvieuses puisque même en saison sèche le débit du cours, est resté supérieur au minimum annuel.

ii- Période 1988-1996

De même l'irrégularité du débit minimal annuel pour cette période, est évidente (figure 3-2). Quant au déficit de certaines années, le tableau 3-1 l'illustre. En effet, sur une période de 8 années, le cours d'eau a connu trois tarissements (années 90, 92 et 93) (débit nul).

Trois années (89, 91 et 94), présentent des valeurs élevées du coefficient C_v ; Preuve de leur pluviosité importante.

1-1-3 Etude du débit liquide moyen annuel

1-1-3-1 Etude générale

De même, la représentation du débit liquide moyen annuel Q_{moy} (figure 3-3), fait ressortir sa nette variation à partir de l'année 1988. Pour un débit $Q_{moy} = 6,54 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la période 1971- 1988, il passe pour la période 1988-1995 à $Q_{moy} = 3,17 \text{ m}^3/\text{s}$. La valeur la plus importante, a été enregistrée en 1972, avec $Q_{moy} = 14,76 \text{ m}^3/\text{s}$. Du même graphe, ressort l'irrégularité interannuelle du débit et la succession de plusieurs années humides et plusieurs années sèches ; Ce qui permis la compensation interannuelle.

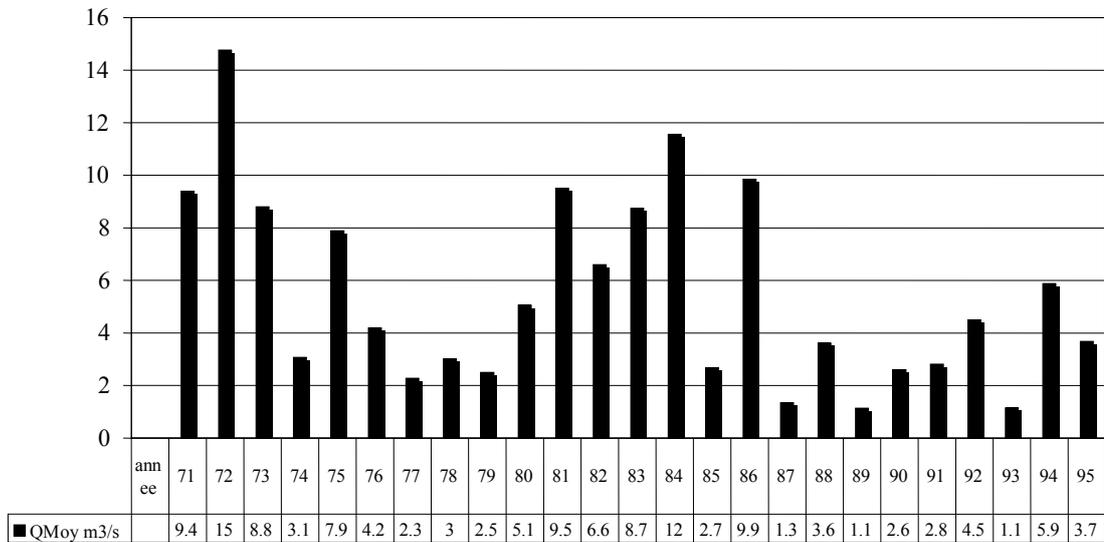


Figure 3-3 : Evolution du débit liquide moyen annuel Q_{moy}

1-1-3-2 Etude de l'irrégularité interannuelle du débit moyen annuel

i- Période 1971-1988.

La courbe de variation interannuelle du débit moyen annuel (fig. 3-3), montre une importante fluctuation du débit d'une année à l'autre.

L'irrégularité interannuelle de l'écoulement, peut être vérifiée par la variation de l'hydraulicité C_h . Ce dernier, est le rapport du débit moyen d'une année particulière $(Q_{moy})_i$ au débit moyen annuel Q_{moy} d'une période donnée.

Le tableau 3-1, fait ressortir le déficit d'écoulement de pratiquement 8 années sur une période de 17 années ; En témoignent les valeurs du coefficient de l'hydraulicité C_h inférieur à 1, (c'est-à-dire que le débit moyen de l'année, est inférieur au débit moyen annuel de la période). Les valeurs élevées du coefficient C_h pour les (années 71, 72, 81, 84 et 86), correspondent aux années qui ont connu des crues de saison froides.

ii- Période 1988-1955

De même l'irrégularité du débit moyen annuel Q_{moy} pour cette période, est évidente (figure 3-3). Quant au déficit de certaines années, le tableau 3-1 l'illustre. En effet, sur une période de 8 années, la moitié est déficitaire (coefficient de l'hydraulicité inférieur à 1). Par contre, deux années (1989 et 1994) sont des années qui ont connu des crues ; En témoignent les valeurs élevées du coefficient de l'hydraulicité (C_h supérieur à 1).

Tableau 3-1 : Coefficients de l'hydraulicité C_h et de variation C_v

année	Q_{max} (m^3/s)	C_v	année	Q_{min} (m^3/s)	C_v	année	Q_{moy} (m^3/s)	C_h
71	318,5	1,01	83	0,35	1,03	83	8,747	1,34
72	902	2,87	73	0,85	2,5	72	14,76	2,26
73	862	2,74	72	0,808	2,38	84	11,56	1,77
74	140	0,44	77	0,188	0,55	74	3,072	0,47
75	370,6	1,18	74	0,38	1,12	73	8,8	1,35
76	89,4	0,28	80	0,11	0,32	85	2,68	0,41
77	131,2	0,42	85	0,17	0,5	78	3,015	0,46
78	78	0,25	78	0,1	0,29	79	2,498	0,38
79	192,6	0,61	86	0,19	0,56	76	4,19	0,64
80	307	0,98	76	0,35	1,03	75	7,89	1,21
81	260,1	0,83	81	0,3	0,88	82	6,6	1,01
82	525,2	1,67	71	0,8	2,35	86	9,85	1,51
83	445,8	1,42	84	0,45	1,32	81	9,504	1,45
84	243	0,77	75	0,24	0,71	80	5,055	0,77
85	397,2	1,26	82	0,4	1,18	71	9,39	1,44
86	69,8	0,22	79	0,05	0,15	77	2,274	0,35
87	17,72	0,06	87	0,03	0,09	87	1,344	0,21
88	162,1	1,07	89	0,197	1,23	88	3,613	1,14
89	204	1,34	95	0,316	2	92	4,5	1,42
90	73,12	0,48	93	0	0	93	1,147	0,36
91	168,9	1,11	91	0,233	1,46	95	3,68	1,16
92	56,88	0,37	88	0	0	89	1,137	0,36
93	81,01	0,53	94	0	0	90	2,607	0,82
94	330	2,17	92	0,39	2,44	94	5,88	1,85
95	142	0,93	90	0,15	0,94	91	2,81	0,89

Conclusion : Les différents débits moyens annuels Q_{\min} , Q_{moy} et Q_{\max} , sont très irréguliers et ont sensiblement diminué à partir de l'année 1988. En moyenne, chacun des trois débits a été pratiquement divisé par 2 (rapport des 2 débits égal à 0,48). Dans le tableau 3-2, on résume les différents résultats.

Période	Q_{\min} (m ³ /s)	Q_{moy} (m ³ /s)	Q_{\max} (m ³ /s)
71-88	0,34	6,54	314,7
88-95	0,16	3,17	152,5
Q88-95 / Q71-88	0,47	0,48	0,48

On remarque, que le cours d'eau n'a jamais tari durant la période 1971-1988 et qu'il a connu à partir de 1988 trois tarissements, en l'occurrence les années 1988, 1993 et 1994. Toutes ces variations, sont évidemment la répercussion de la retenue d'Ain-Zada.

1-2 Etude du débit liquide à l'échelle mensuelle

L'étude, est menée afin de faire ressortir l'influence du mois sur le débit liquide. Les résultats, sont résumés dans le tableau 3-3.

mois	Q_{lm} (71/88)	CMD	Q_{lm} (88/95)	CMD	ΔQ_{lm} (m ³ /s)	ΔQ_{lm} %	$\Delta Q_{\text{lm}}/Q_{\text{lm}}$ (%)
12	6,7	1,03	3,8	1,31	2,9	7	43
1	11,48	1,77	6,1	2,11	5,38	12	47
2	17,7	2,72	5,2	1,80	12,5	29	71
3	16,4	2,52	5,9	2,04	10,5	24	64
4	11	1,69	4,4	1,52	6,6	15	60
5	5,06	0,78	2,35	0,81	2,71	6	54
6	2,3	0,35	1,56	0,54	0,74	2	32
7	0,94	0,14	0,7	0,24	0,24	1	26
8	0,64	0,10	0,6	0,21	0,04	0	6
9	2,1	0,32	1,61	0,56	0,49	1	23
10	1,77	0,27	1,28	0,44	0,49	1	28
11	2,2	0,34	1,21	0,42	0,99	2	45

Q_{lm} = débit liquide mensuel (m^3/s).

ΔQ_{lm} = perte en débit liquide mensuel (m^3/s).

1-2-1 Etude de la variation du débit liquide mensuel

La visualisation, du débit liquide mensuel Q_{lm} , en fonction du temps (figure 3-4), fait ressortir la variation interannuelle ainsi que les différences entre les différents débits pour les deux périodes 1971-1988 et 1988-1995. On remarque, que les maxima de débits ont lieu entre le mois de décembre et le mois de mai, alors que les minima, ont lieu entre le mois de juin et le mois d'octobre et ce pour les deux périodes concernées.

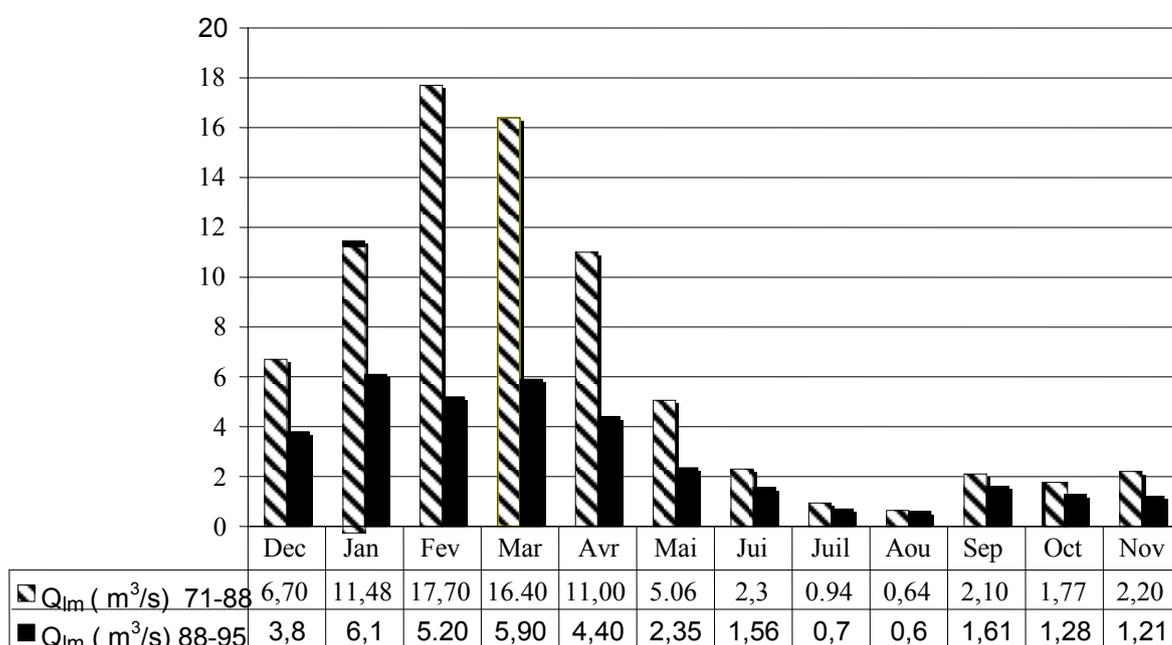


Figure 3-4 : Evolution du débit liquide mensuel Q_{lm}

L'étude du coefficient mensuel de débit CMD (Rapport du débit mensuel au module de la période) (tableau 3-3), illustrée par la figure (3-5), fait ressortir l'importance de l'irrégularité mensuelle. En effet, pour la période 71-88, ce dernier fluctue entre 0,1 et 2,72. Pour la période 88-95, il passe de 0,21 à 2,11.

1-2-2 Etude des pertes en débit liquide mensuel

Sur la figure (3-6), on peut lire que la diminution du débit liquide mensuel, connue par le cours d'eau à partir de 1988, est très importante. Elle est en moyenne égale à 42 %. Exception du mois d'août (pour lequel elle est égale à 6 %), pour les autres mois, elle est remarquable. En effet, elle passe de 23 % (mois de septembre) et atteint son

maximum égal à 71 % au mois de février, en passant par des chutes de 64 % et 60 %. Tous ces résultats, sont le signe évident de la répercussion de la retenue d'Ain-Zada.

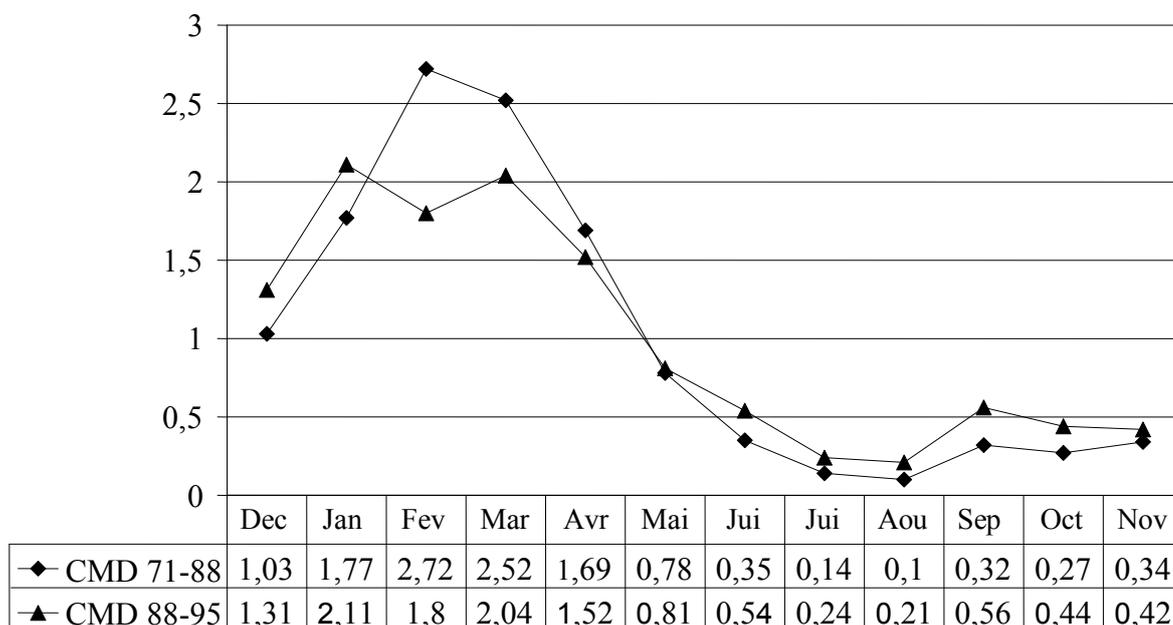


Figure 3-5 : Variation du coefficient mensuel de débit C M D

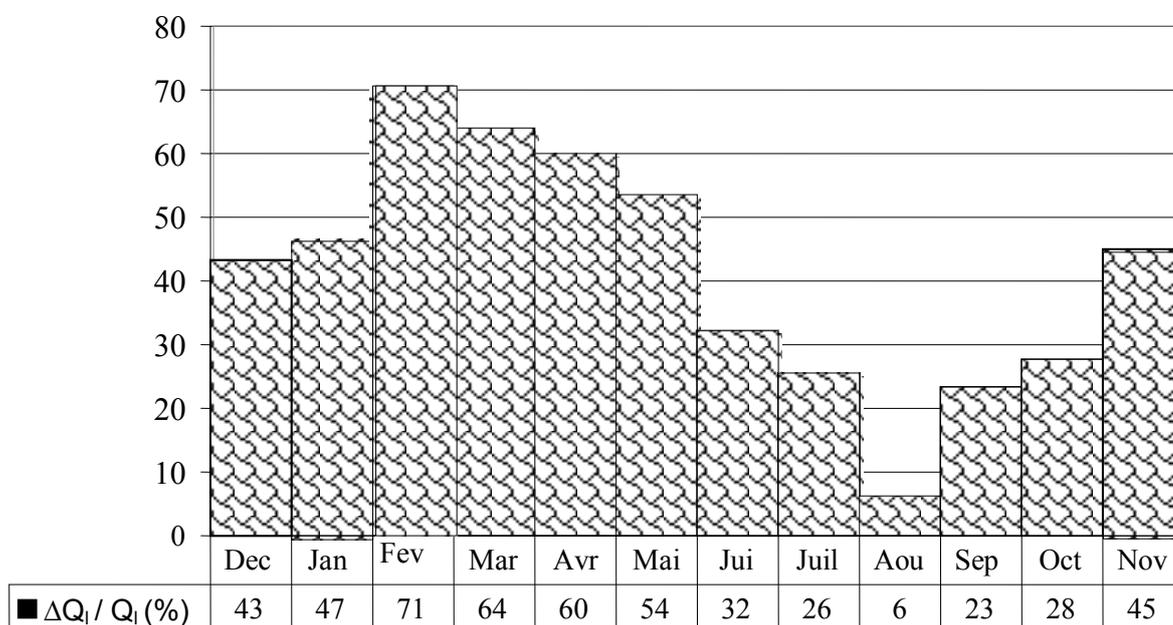


Figure 3-6 : Pourcentage de perte en débit liquide mensuel

1-3 Etude du débit liquide à l'échelle saisonnière

1-3-1 Etude de la variation du débit saisonnier

Les débits liquides, étant générés par la pluie. Connaissant les variations saisonnières, que connaissent ces dernières. Il serait intéressant, de faire ressortir l'influence de la saison sur le débit liquide. Pour cela, on dresse le tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Perte en débit liquide saisonnier ΔQ_{ls} entre les deux périodes

SAISON	Q_{ls} (m ³ /s) 71-87	Q_{ls} (m ³ /s) 88-95	ΔQ_{ls} (m ³ /s)	ΔQ_{ls} %
AUTOMNE	2,93	1,6	1,33	9
HIVER	11,96	5,03	6,93	45
PRINTEMPS	10,82	4,21	6,61	44
ETE	1,29	0,99	0,30	2

Q_{ls} = Débit liquide saisonnier (m³/s)

ΔQ_{ls} = Perte en débit liquide saisonnier (m³/s).

La figure (3-7), illustre les différents débits liquides saisonniers. On remarque que, les plus gros débits ont lieu en hiver et au printemps puis en automne et diminue en été.

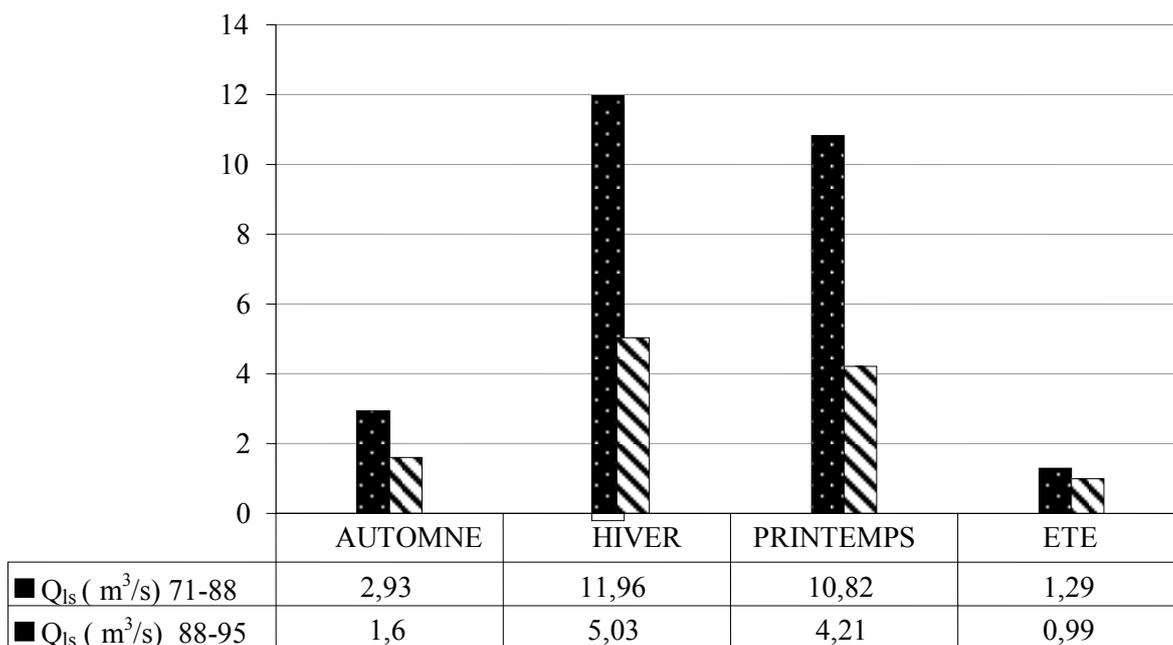


Figure 3-7 : Débit liquide saisonnier Q_{ls}

Au début de l'automne, une partie des eaux est infiltrée étant donné que le sol est sec à la suite d'une saison estivale sèche. Par la suite, le débit augmente considérablement en hiver. Au printemps, le débit reste important sous l'effet des crues. A partir du mois d'avril, il commence à diminuer, pour atteindre le minimum en aout.

La figure (3-8), fait ressortir la différence entre les débits pour les deux périodes étudiées. On remarque que, comme pour le débit mensuel, les grosses pertes en débit saisonnier se font durant l'hiver et le printemps.

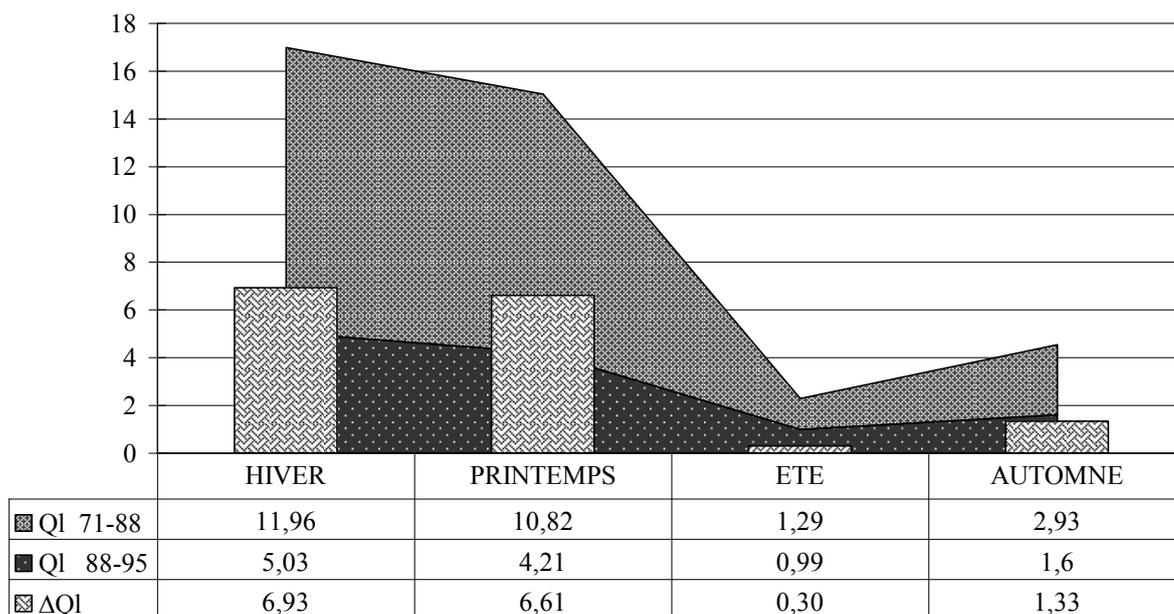
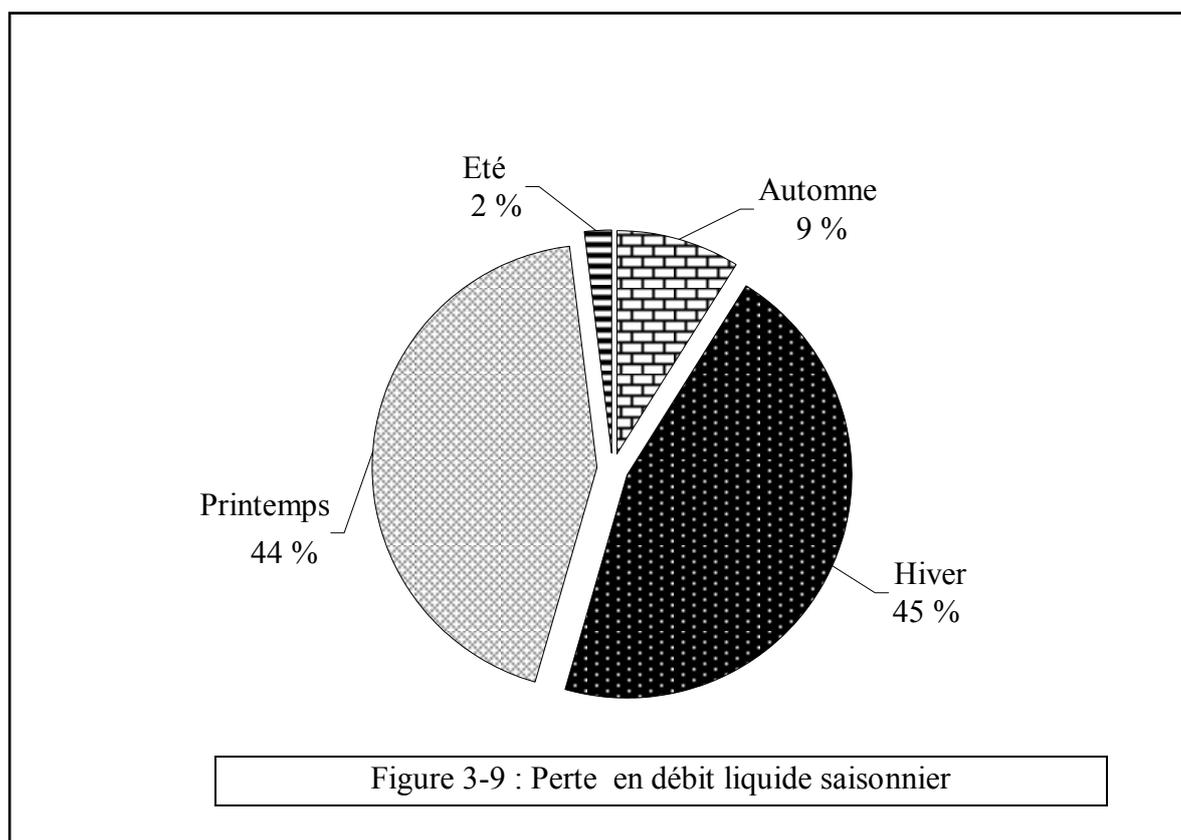


Figure 3-8 : Variation du debit liquide saisonnier Qls

1-3-2 Etude de la perte en débit liquide saisonnier

La représentation des pertes en débit liquide saisonnier (figure 3-9), fait ressortir la diminution de ce dernier en hiver et au printemps, respectivement de 45 % et de 44 % , puis de 9 % en automne et de 2 % seulement en été. On remarque que, l'hiver et le printemps à eux seuls, représentent 89 % des pertes en débit liquide saisonnier.



2 - ETUDE DES DIFFERENTS APPORTS LIQUIDES

2-1 Etude de l'apport liquide annuel

2-1-1 Etude globale de l'apport liquide annuel

La représentation de l'apport liquide annuel A_{pp} en fonction du temps (figure 3-10), fait ressortir encore une fois, la nette variation de ce dernier à partir de l'année 1988. En effet, l'apport moyen annuel, était de $204,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ durant la période 1971-1988, il est passé à $103 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ durant la période 1988-1995 ; Soit une perte moyenne annuelle de $101,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Pour la période 1988-1995, l'apport moyen annuel est réduit pratiquement de 50 %. De la même figure, ressort l'irrégularité de l'apport annuel. On remarque que, les années humides et les années sèches se suivent, donc il y a compensation interannuelle.

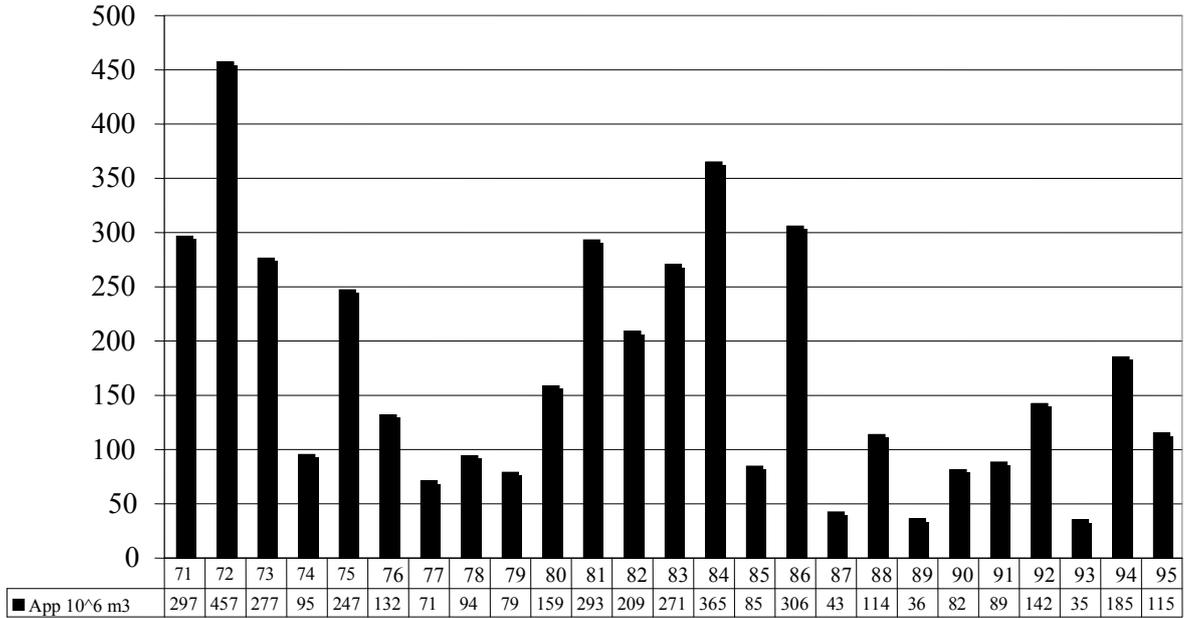


Figure 3-10 : Evolution de l'apport liquide annuel A_{pp}

2-1-2 Etude de l'irrégularité de l'apport annuel

Afin de faire ressortir l'irrégularité de l'apport liquide annuel. On dresse le tableau 3-5. Dans ce tableau, on donne le coefficient d'hydraulicité C_h . Ce dernier, est égal au rapport du débit annuel d'une année donné, au débit moyen annuel de toute la période. Dans ce même tableau, on peut lire que ; Pour la période 71-88, le coefficient de variation C_h , fluctue entre 0,35 et 2,12, pour la période 88-95, il passe de 0,36 à 1,85. Ces grandes différences entre les différentes valeurs, illustrent la grande disparité de l'apport liquide.

2-1-3 Etude de la variabilité de l'apport annuel

Afin, d'étudier la variabilité de l'apport liquide annuel. On calcule le coefficient de variabilité C_{va} (tableau 3-5). Ce dernier, est égal à la différence du débit d'une année donné et le débit moyen annuel de toute la période, sur ce dernier. Ce coefficient, représente la position de l'apport de l'année considérée, par rapport à l'apport moyen annuel. Si ce dernier, est inférieur à l'unité, l'année est donc déficitaire par rapport à la moyenne. C'est au contraire, il est supérieur à l'unité, cette année est donc plus que normale.

Année	A_{pp} ($10^6 m^3$)	C_h	C_{va}
71	296,7	1,45	0,45
72	457,1	2,23	1,23
73	276,5	1,35	0,35
74	95,49	0,47	- 0,53
75	247,2	1,21	0,21
76	132	0,64	- 0,36
77	71,21	0,35	- 0,65
78	94,26	0,46	- 0,54
79	79,06	0,39	- 0,61
80	158,7	0,77	- 0,23
81	293,2	1,43	0,43
82	209	1,02	0,02
83	270,7	1,32	0,32
84	365,1	1,78	0,78
85	84,71	0,41	- 0,59
86	306,6	1,50	0,50
87	42,57	0,21	- 0,79
88	113,9	1,14	0,14
89	36,1	0,36	- 0,64
90	81,9	0,82	-0,18
91	88,5	0,89	- 0,11
92	142,4	1,43	0,43
93	35,4	0,35	- 0,65
94	185,4	1,86	0,86
95	115,3	1,15	0,15

i- Période 71-88

Sur la (figure 3-11), on peut lire que l'année 72 est une très bonne année. Son apport, est plus que le double de la moyenne annuelle ($C_{va} = 1,23$). Les années 71, 73 et 75 ($C_{va} = 0,45, 0,35, 0,21$) sont aussi des années plus que normales. Ensuite, à partir de l'année 75 jusqu'à l'année 80, c'est-à-dire cinq années successives, on assiste à un déficit par rapport à la normale (C_{va} négatif) ; Viennent ensuite, quatre bonnes années 81, 82, 83, 84 (C_{va} positif). A partir de l'année 85, les bonnes années et moins bonnes, se succèdent. Toutes ces interprétations, illustrent l'irrégularité du régime d'écoulement pour cette période.

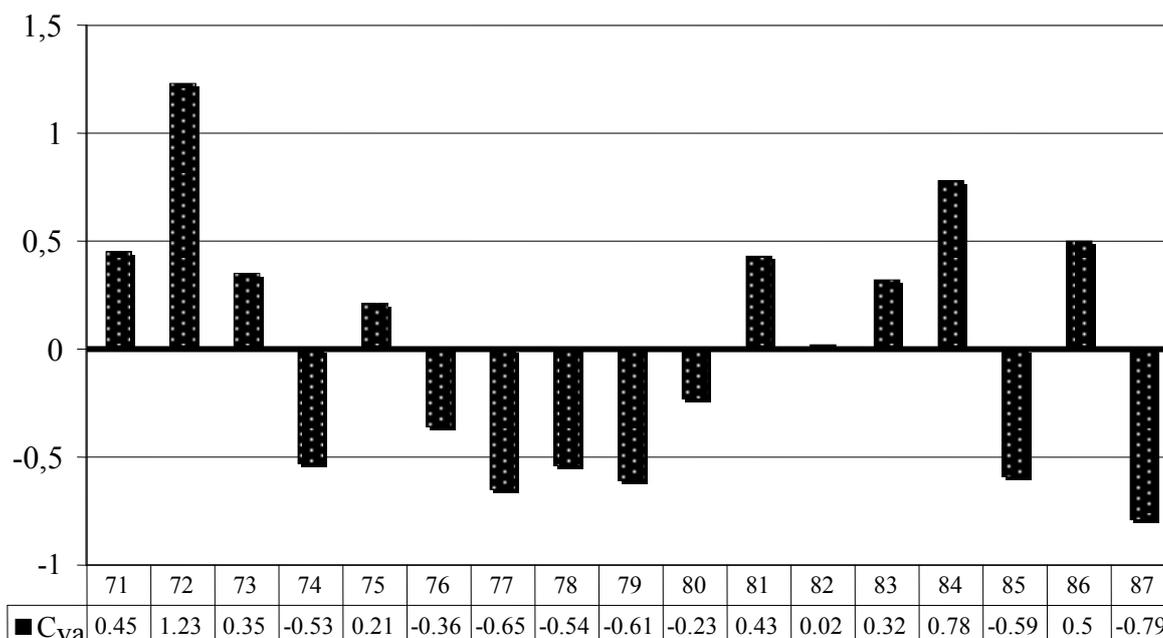


Figure 3-11 : Variation de l'apport liquide annuel par rapport à l'apport moyen annuel 71-88

ii- Période 88-95

Concernant la deuxième période (figure 3-12). L'année 88, est plutôt normale ($C_{va} = 0,14$), viennent ensuite, trois années déficitaires (89, 90, 91) (C_{va} négatif). Puis, à partir de 92, les bonnes et les mauvaises années se succèdent. Toutes ces considérations, évoquent plutôt un régime aussi irrégulier que celui de la première période.

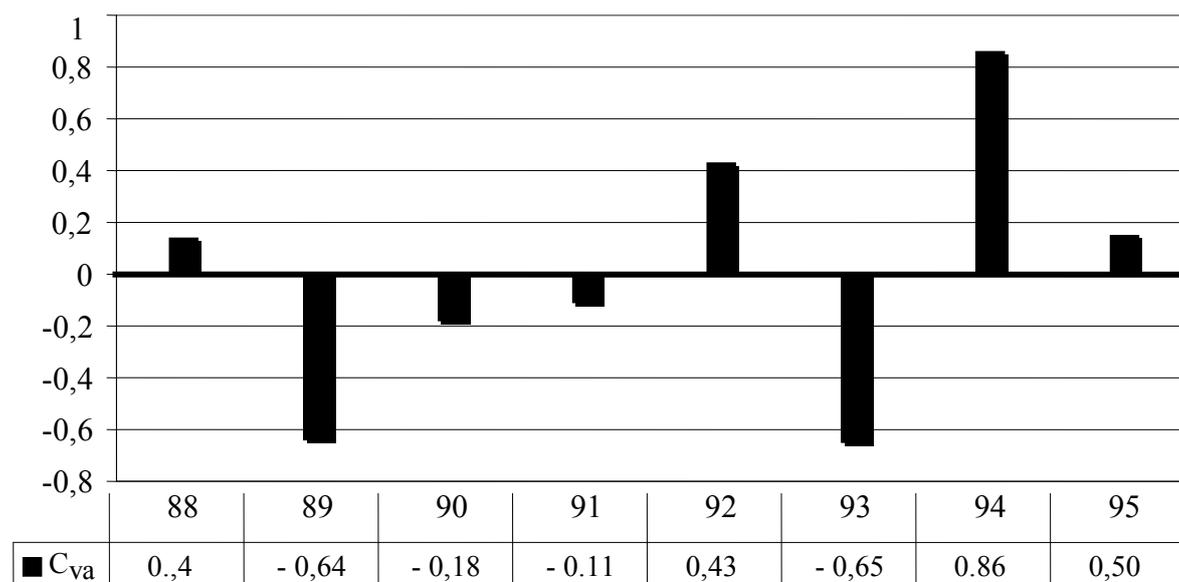


Figure 3-12 : Variation de l'apport liquide annuel par rapport à l'apport moyen annuel 88-95

2-1-4 Etude de l'apport liquide annuel cumulé

Afin d'étudier l'apport liquide cumulé, on dresse le tableau 3-6.

A_{pp} = Apport liquide annuel (10^6 m^3).

App_{cum} = Apport liquide cumulé (10^6 m^3).

Tableau 3-6 : Apport cumulé calculé

ANNEE	A_{pp} (10^6 m^3)	App_{cum} (10^6 m^3)
71	296,7	296,7
72	457,1	753,8
73	276,5	1030,3
74	95,49	1125,8
75	247,2	1373,0
76	132	1505,0
77	71,21	1576,2
78	94,26	1670,5
79	79,06	1749,5
80	158,7	1908,2
81	293,2	2201,4
82	209	2410,4
83	270,7	2681,1
84	365,1	3046,2
85	84,71	3130,9
86	306,6	3437,5
87	42,57	3480,1
88	113,9	3594,0
89	36,1	36301
90	81,88	3712,0
91	88,5	3800,5
92	142,4	3942,9
93	35,35	3978,2
94	185,4	4163,6
95	115,3	4278,9

La visualisation de la courbe apport cumulé- temps, permet d'identifier l'allure du graphe.

i- Période 1971-1988.

Pour une corrélation $R^2 = 0,97$. L'apport liquide cumulé, est donné (figure 3-13) par l'équation :

$$App_{cum} = 186,02 t - 12732 \quad (3.1)$$

App_{cum} = Apport cumulé (10^6 m^3)

t = Temps (année)

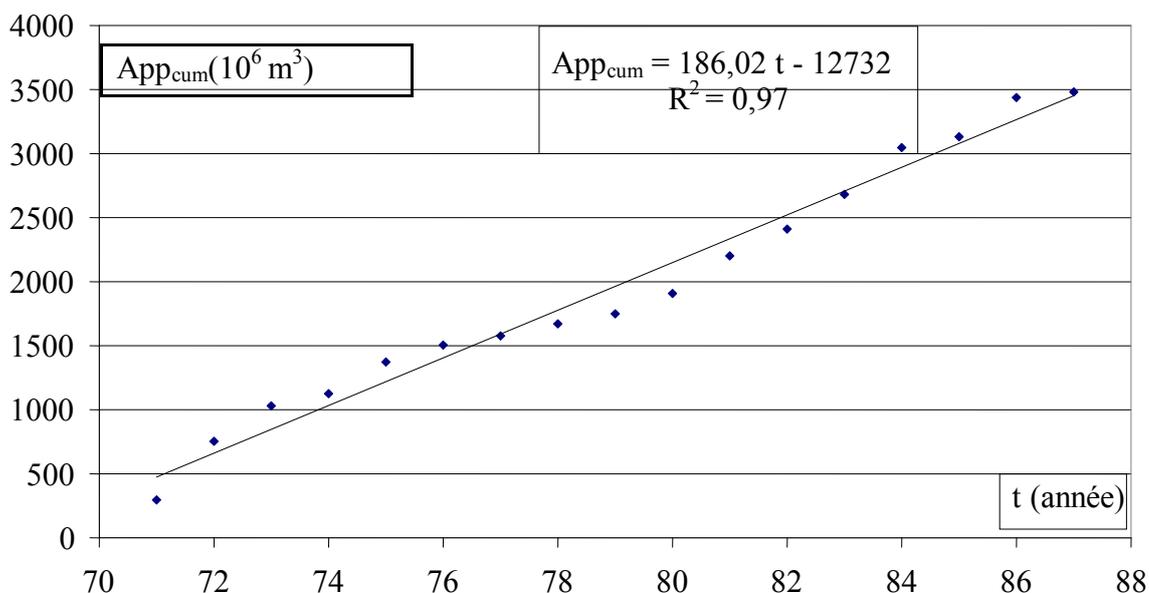


Figure 3-13 : Evolution de l'apport liquide annuel cumulé en fonction du temps / 71-88

ii- Période 1988-1995

Pour une corrélation $R^2 = 0,97$. L'apport liquide cumulé, est donné (figure 3-14) par l'équation :

$$App_{cum} = 100,04 t - 8746,2 \quad (3.2)$$

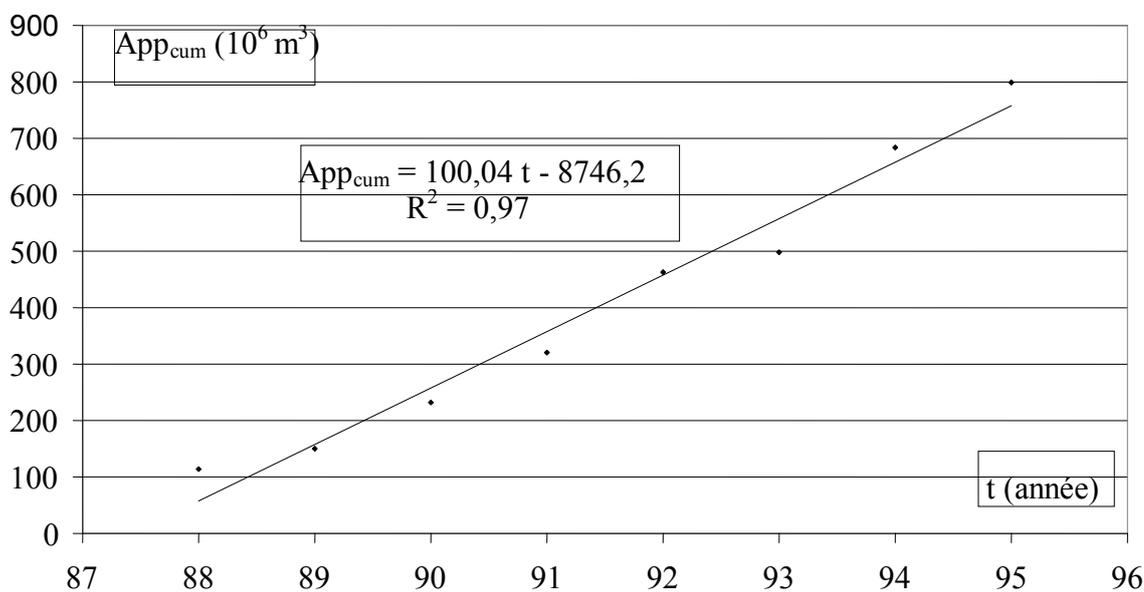


Figure 3-14 : Evolution de l'apport liquide annuel cumulé en fonction du temps / 88-95

A partir de 1988, on remarque (figure 3-15), que la courbe donnant l'apport liquide cumulé change de direction. Son coefficient directeur, diminue et passe de 186,02 à 100,04 ; Signe évident, de la diminution de l'apport liquide à partir de l'année 1988.

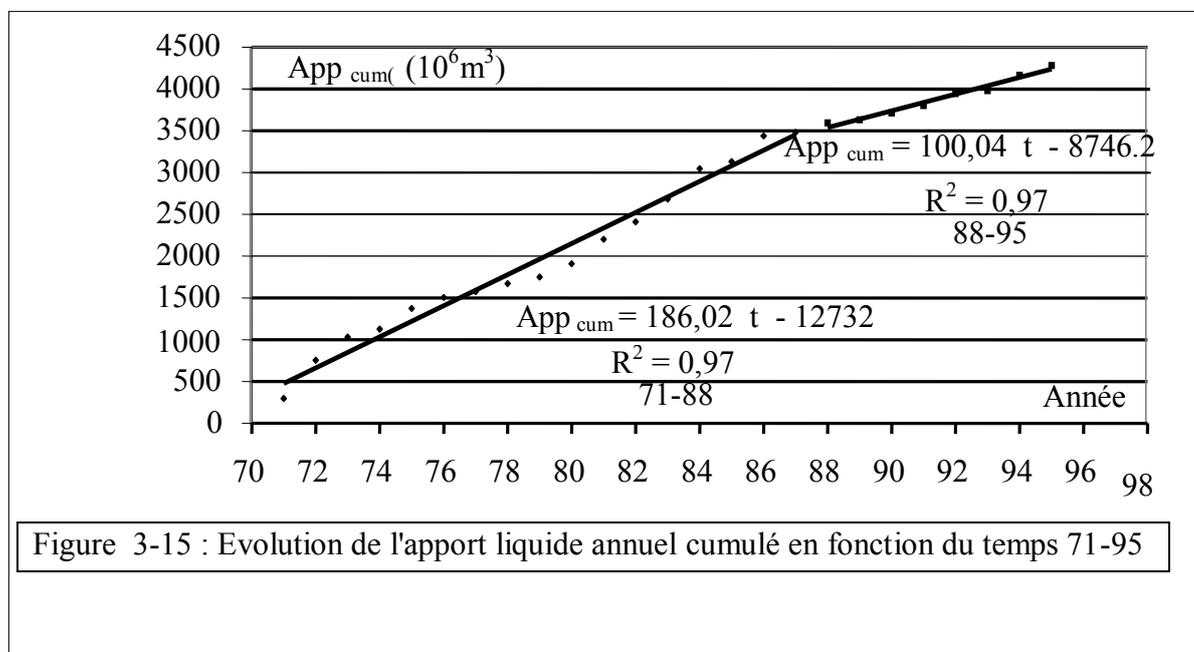


Figure 3-15 : Evolution de l'apport liquide annuel cumulé en fonction du temps 71-95

2-2 Etude de l'apport liquide saisonnier

2-2-1 Etude de la variation de l'apport liquide saisonnier

L'étude, est faite pour faire ressortir l'influence de la saison sur l'apport liquide. Pour cela, on dresse le tableau 3-7.

Période	71-88	71-88	88-95	88-95	71-95	71-95
Saison	App _s	App _s (%)	App _s	App _s (%)	ΔApp _s	ΔApp _s (%)
Automne	15,9	8	12,3	12	3,6	3
Hiver	91,3	45	43,9	43	48,4	48
Printemps	86,3	42	38,5	37	47,8	47
Eté	10,6	5	8,5	8	2,1	2

App_s = Apport liquide saisonnier ($10^6 m^3$)

ΔApp_s = Perte en apport liquide saisonnier ($10^6 m^3$)

La figure (3-16), montre les différents apports saisonniers ainsi que les nettes différences relatives aux deux périodes. Aussi, les plus gros apports saisonniers se font en hiver et au printemps ; Avec respectivement $91,3 \cdot 10^6 m^3$ et $43,9 \cdot 10^6 m^3$ en hiver pour les deux périodes 71-88 et 88-95, $86,3 \cdot 10^6 m^3$ et $38,5 \cdot 10^6 m^3$ pour le printemps, $15,9 \cdot 10^6 m^3$ et $12,3 \cdot 10^6 m^3$ en automne et $10,6 \cdot 10^6 m^3$ et $8,5 \cdot 10^6 m^3$ en été.

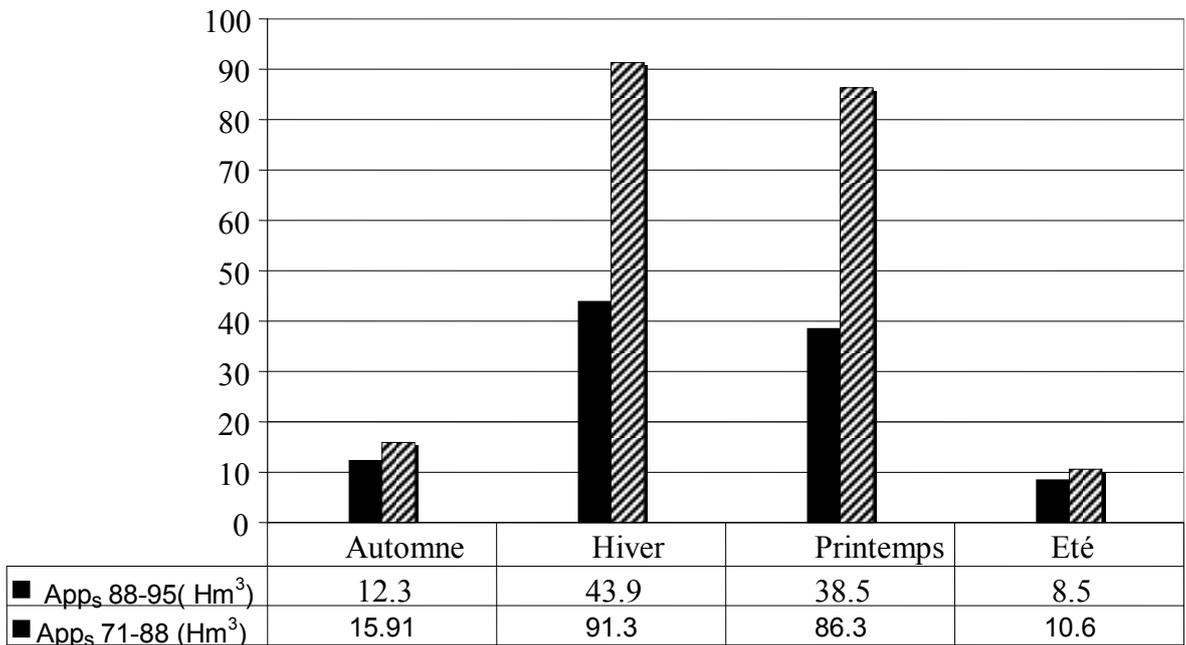


Figure 3- 16 : Evolution de l'apport liquide saisonnier App_s

Les figures (3-17) et (3-18), illustrent l'apport liquide saisonnier en pourcentage pour chacune des 2 périodes 71/88 et 88/95. On remarque, que les pourcentages par saison sont pratiquement égaux pour les 2 périodes ; Avec 45 % et 43 % en hiver, respectivement pour la première période et la deuxième période, 42 % et 37 % au printemps, 8 % et 12 % en automne et enfin 5 % et 8 % en été. L'hiver et le printemps à eux seuls, représentent 87 % des apports saisonniers pour la période 71/88 et 80 % pour la période 88-95 ; C'est dire que, ces deux saisons, représentent la presque totalité de l'apport liquide saisonnier pour ce bassin versant.

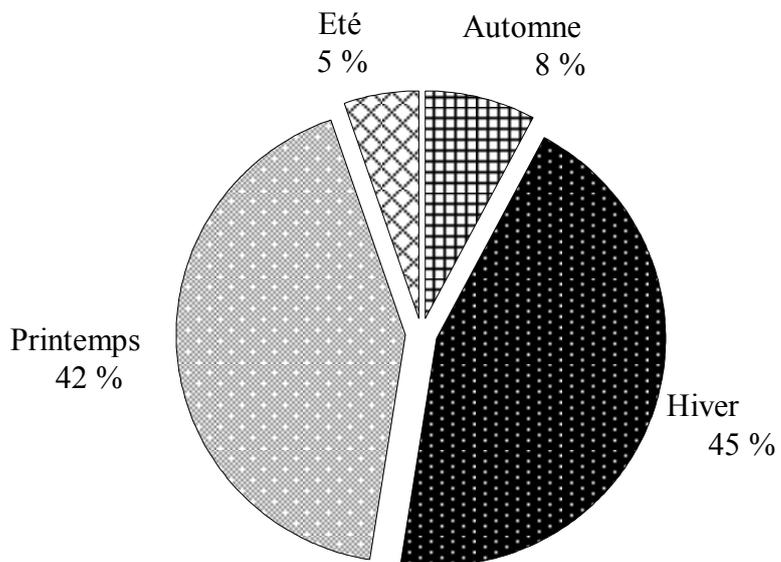


Figure 3-17 : Apport liquide saisonnier App_s en pourcentage / 71-88

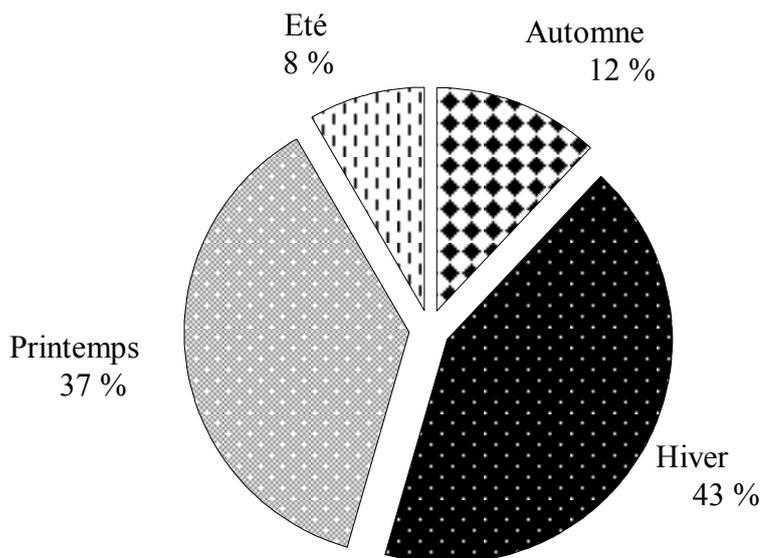


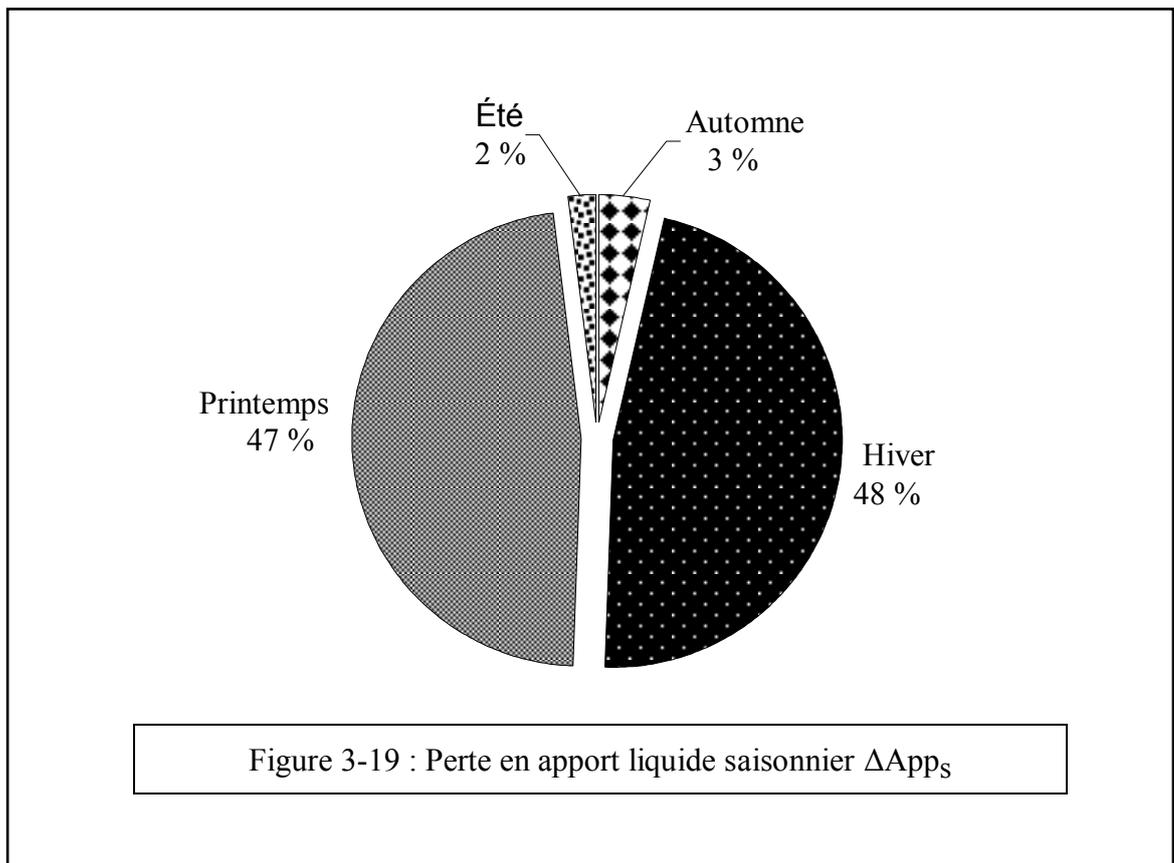
Figure 3-18 : Apport liquide saisonnier App_s en pourcentage / 88-95

2-2-2 Etude des pertes en apport liquide saisonnier

Pour étudier les pertes en apport liquide saisonnier. On représente le graphe (figure 3-19).

L'apport liquide saisonnier total de la période 1971-1988, est de 204,8 Hm³. Celui de la période 1988-1995, est de 103 Hm³. La perte totale, est donc égale à 101,8 Hm³.

En hiver, la perte est de 48,4 Hm³, soit un pourcentage égal à 48 %, au printemps la perte est de 47,8 Hm³, soit 47 %, en automne la perte est de 3,6 Hm³, soit 3 % et enfin 2,1 Hm³ de pertes ont lieu en été c'est-à-dire 2 % seulement. Il ressort donc, que pratiquement 95 % des pertes ont lieu en hiver et au printemps et seulement 5 % ont lieu en automne et en été.



2-3 Étude de l'apport liquide mensuel

2-3-1 Etude de la variabilité de l'apport liquide mensuel

Afin, d'étudier la variabilité de l'apport liquide mensuel. On calcule le coefficient de variabilité Cv (tableau 3-8). Ce dernier, est égal à la différence du débit d'un mois

donné et le débit moyen mensuel de toute la période sur ce dernier. Ce coefficient, représente la position de l'apport du mois considéré, par rapport à l'apport moyen mensuel de toute la période. Si ce dernier, est inférieur à l'unité, le mois est donc déficitaire. C'est au contraire, il est supérieur à l'unité, ce mois est donc plus que normal.

Tableau 3-8 : Apport liquide mensuel et Coefficient Cv

mois	App _m (88-95)	App _m (%)	App _m (71-88)	App _m (%)	Δapp _m	Δapp _m (%)	Cv (88-95)	Cv (71-88)
12	11,4	11	18,1	9	6,8	6,6	0,3	0,1
1	18,3	18	30,6	15	12,3	12,1	1,1	0,8
2	14,2	14	43,5	21	29,3	28,7	0,7	1,5
3	17,7	17	43,6	21	26,0	25,4	1,1	1,6
4	12,7	12	28,7	14	16,0	15,7	0,5	0,7
5	8,1	8	14,0	7	5,9	5,7	0,0	0,0
6	4,6	4	6,3	3	1,7	1,6	- 0,5	- 0,6
7	2,1	2	2,6	1	0,5	0,5	- 0,8	- 0,8
8	1,6	2	1,7	1	0,1	0,1	- 0,8	- 0,9
9	4,7	5	5,5	3	0,7	0,7	- 0,5	- 0,7
10	4,1	4	4,8	2	0,7	0,7	- 0,5	- 0,7
11	3,5	3	5,7	3	2,1	2,1	- 0,6	- 0,7

App_m = Apport liquide mensuel (10⁶ m³).

ΔApp_m = Perte en apport liquide mensuel (10⁶ m³).

i- Période 71-88

Sur la (figure 3-20), on peut lire que le mois de décembre et le mois de mai sont des mois normaux (C_v = 0.06 et C_v=0.01, proches de l'unité), viennent ensuite quatre mois (janvier, février, mars, avril), avec des apports plus que normaux (C_v supérieur à 1, ils dépassent la moyenne mensuelle). Le restant des mois (de mai jusqu'à novembre), sont déficitaires (C_v inférieur à 1).

Il ressort de cette étude, que l'essentiel des apports liquide se fait entre le mois de décembre et le mois de mai, avec une meilleure participation des quatre premiers mois de l'année.

ii- Période 88-95

Sur la (figure 3-21), on peut lire que pour la période 88-95, l'essentiel des apports se fait entre le mois de décembre et le mois de mai (Cv supérieur à 1). Le restant des mois (de mai à novembre), sont plutôt des mois déficitaires (Cv inférieur à 1). Les mois de janvier, février, mars et avril sont très pluvieux (Cv largement supérieur à 1).

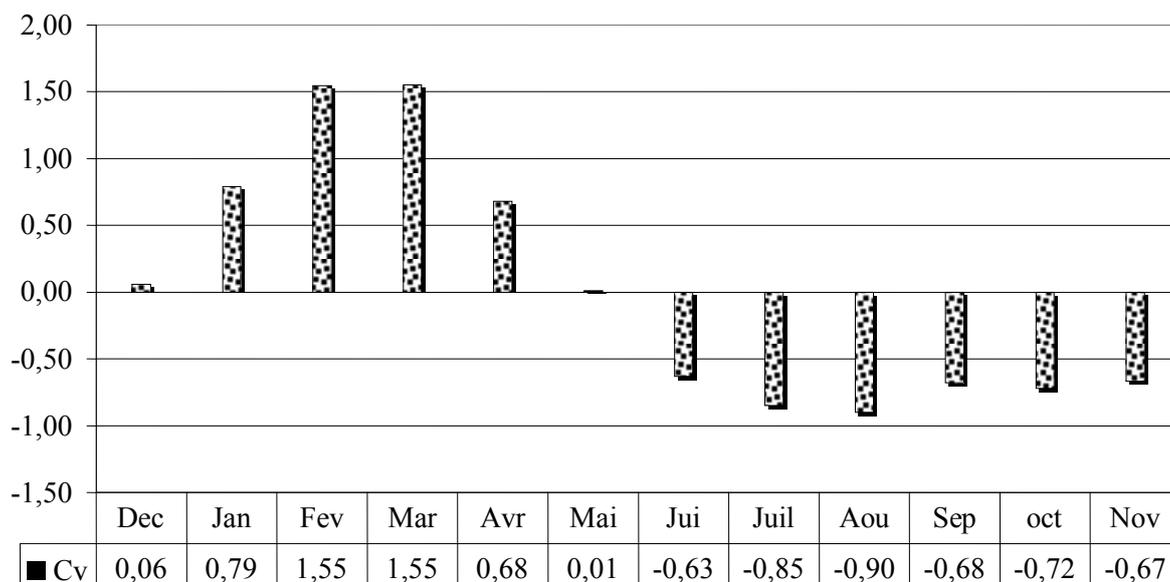


Figure 3-20 : Variation de l'apport mensuel par rapport à la moyenne mensuelle 71-88

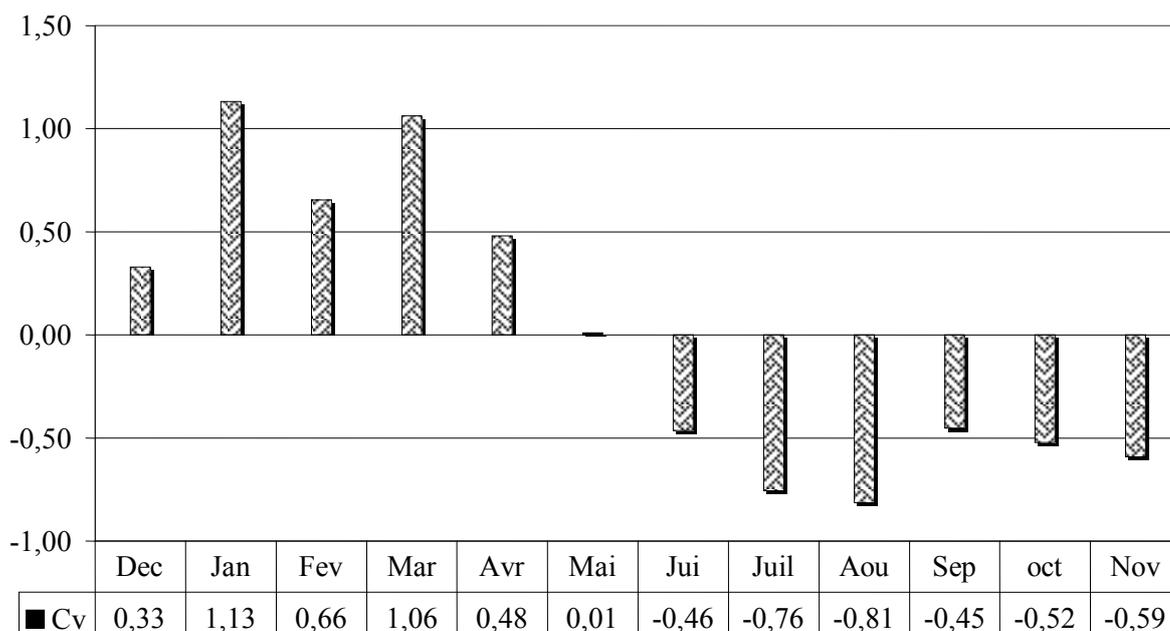


Figure 3-21 : Variation de l'apport mensuel par rapport à la moyenne mensuelle / 88-95

2-3-2 Etude de la variation de l'apport liquide mensuel

La figure (3-22), montre que les plus gros apports liquides mensuels App_m et ce pour les deux périodes 1971-1988 et 1988-1995, ont lieu entre le mois de décembre et le mois de mai ; Ce qui correspond à la saison humide et qu'ils diminuent considérablement, entre le mois de juin et le mois de novembre ; Ce qui représente la saison chaude.

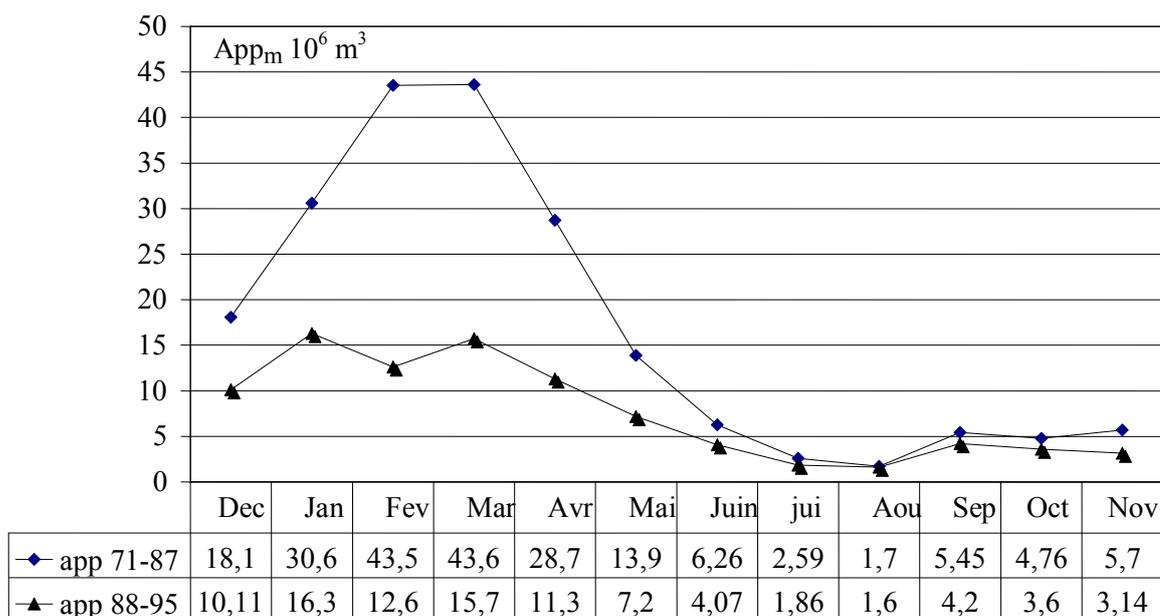


Figure 3-22 : Evolution de l'apport liquide mensuel App_m

Pour la période 71-88 (figure 3-23), sur les apports mensuels reçus, représentant une valeur totale de $204,8 \text{ Hm}^3$, $178,4 \text{ Hm}^3$ sont reçus entre le mois de décembre et le mois de mai soit un pourcentage égal à 87 % (tableau 3-8). Le restant, c'est-à-dire $26,4 \text{ Hm}^3$ sont reçus entre le mois de mai et le mois d'octobre, soit un pourcentage égal à 13 %. Un fait, est à remarqué (Figure 3-24), c'est que les deux mois de février et mars à eux seuls, représentent 42 % des apports.

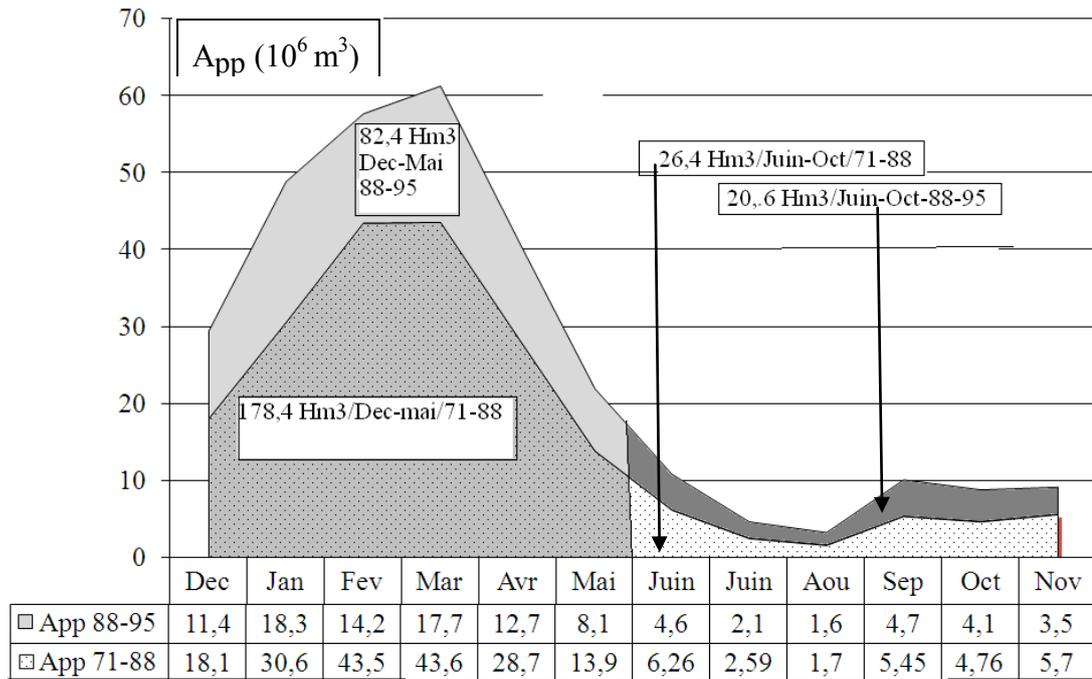


Figure 3-23 : Variation de l'apport liquide mensuel App_m

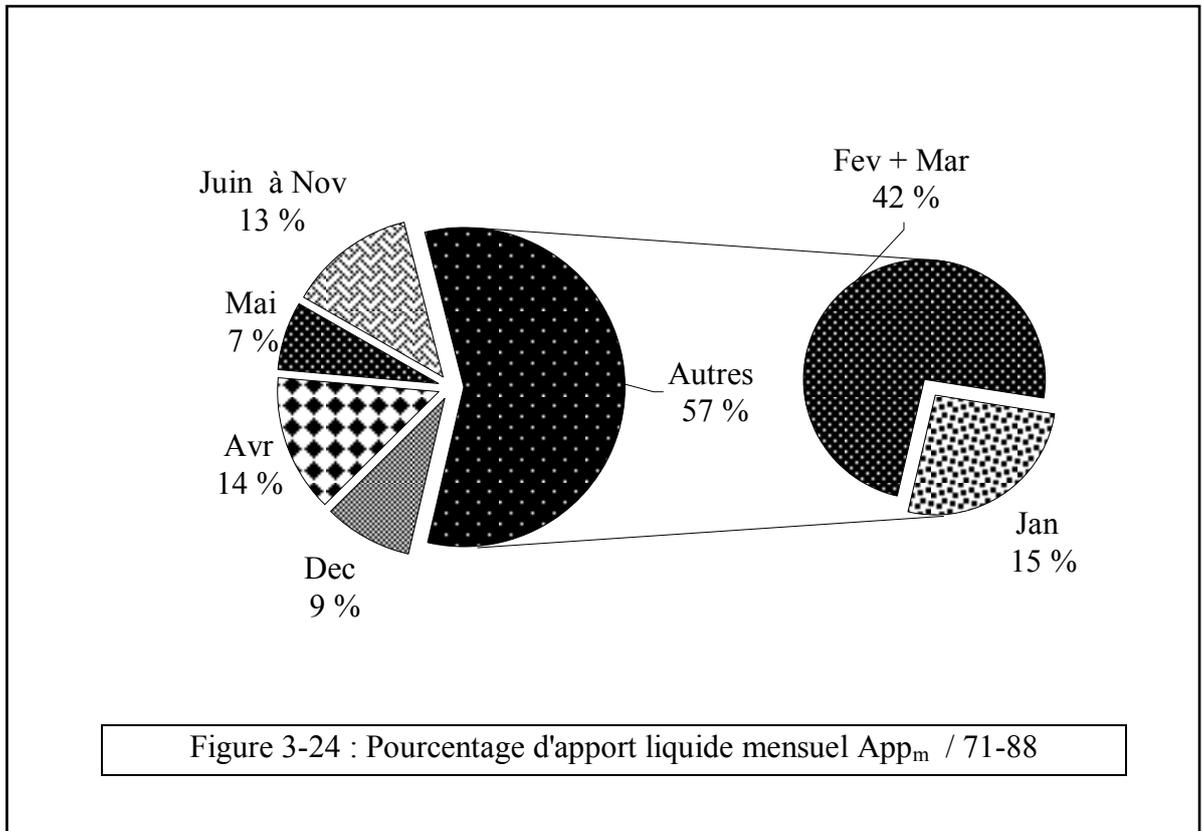


Figure 3-24 : Pourcentage d'apport liquide mensuel App_m / 71-88

Pour la période 1988-1995 (figure 3-23), sur les apports mensuels reçus, représentant une valeur totale de 103 Hm³, 82.4 Hm³ sont reçus entre le mois de décembre et le mois de mai, soit un pourcentage égal à 80 % (tableau 3-8) et seulement 20.6 Hm³

sont reçus entre le mois de mai et le mois d'octobre, soit un pourcentage égal à 20 %. On remarque (figure 3-25), que les trois mois de janvier, février et mars à eux seuls, représentent 49 % des apports.

En conclusion ; On dira que, pour les deux périodes, plus de 80 % des apports mensuels se font entre le mois décembre et le mois de mai et essentiellement durant les trois premiers mois de l'année (janvier, février et mars).

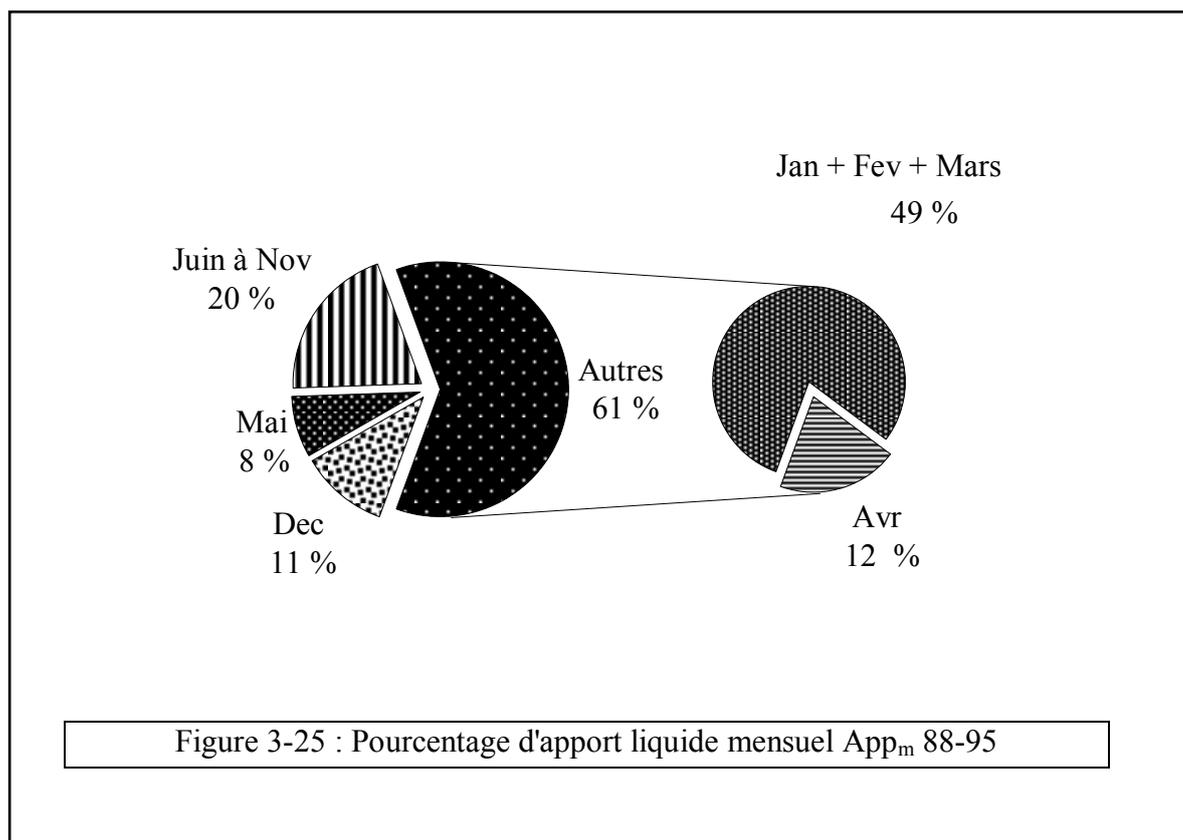


Figure 3-25 : Pourcentage d'apport liquide mensuel App_m 88-95

2-3-3 Etude de la perte en apport liquide mensuel

Le tableau (3-8), donne les pertes en apport liquide mensuel Δapp_m pour chaque mois. On remarque (figure 3-26), que les grosses pertes ont lieu entre le mois de décembre et le mois de mai. En effet, sur les 101,8 Hm³ représentant la perte totale en apport mensuel, 96 Hm³, soit 94 % ont lieu durant la période suscitée et 5,8 Hm³ seulement, soit 6 % sont perdues entre le mois de juin et le mois d'octobre. Concernant les mois de février et mars (figure 3-27), la même remarque peut être émise. On remarque qu'à eux seuls, ils représentent une perte de 55,3 Hm³, soit un pourcentage égal à 54 %.

La figure (3-26), montre que le pic de la perte en apport liquide mensuel, est atteint au mois de février, avec une perte de 29,3 Hm³.

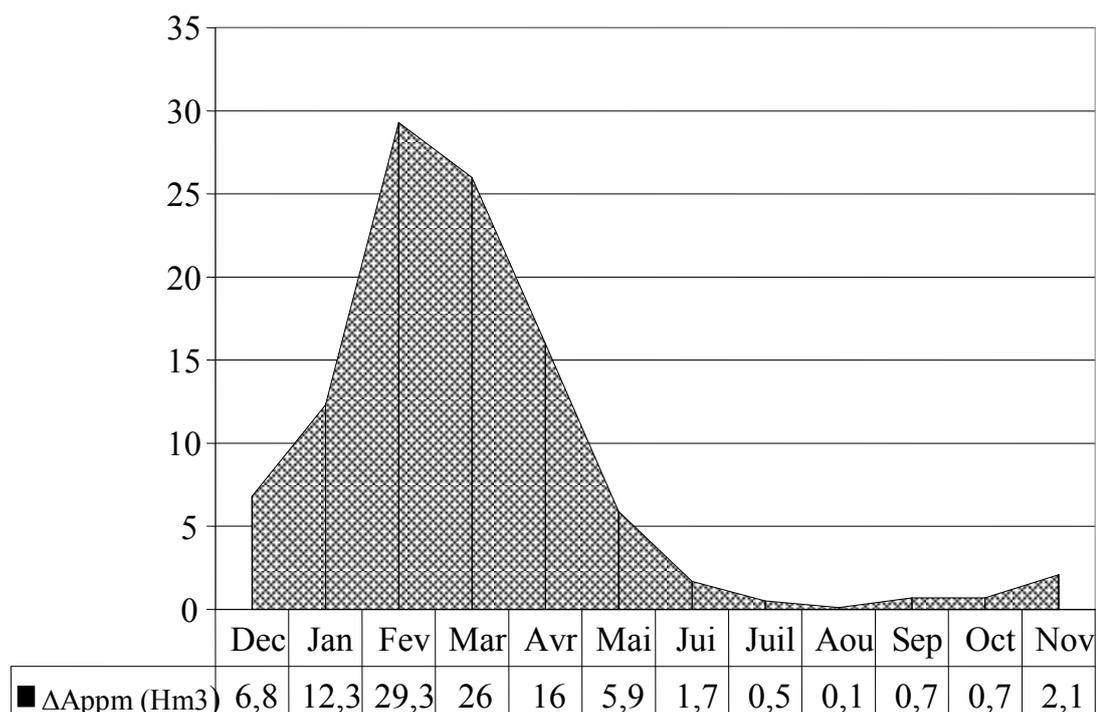


Figure 3-26 : Perte en apport liquide mensuel ΔApp_m

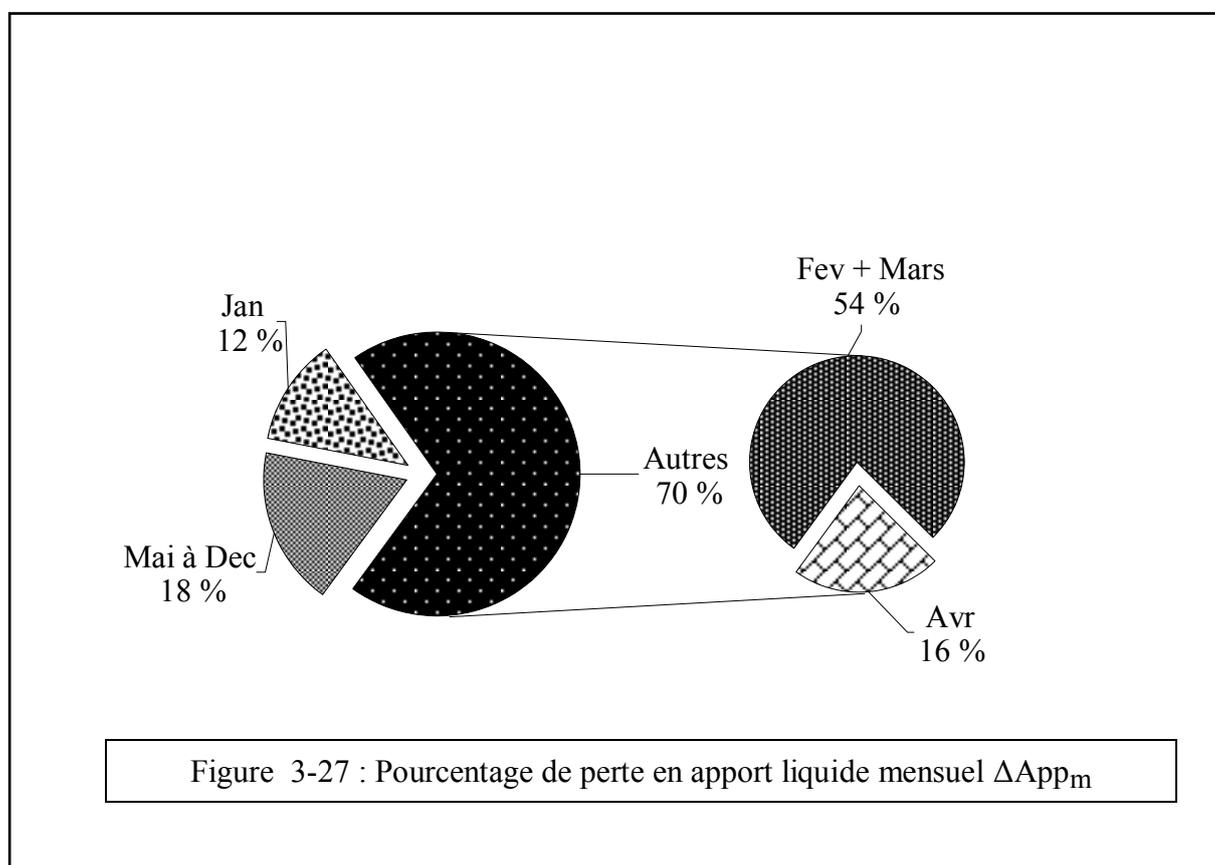


Figure 3-27 : Pourcentage de perte en apport liquide mensuel ΔApp_m

Conclusion :

A la suite de cette étude, on peut conclure ce qui suit :

- Le régime du cours d'eau, est irrégulier.
- Les débits liquides, sont très variables.
- Les maxima de débit, ont lieux durant les premiers mois de l'année (janvier, février et mars)
- Les apports liquides, sont irréguliers. L'essentiel de ces derniers, se fait durant l'hiver et le printemps et surtout entre le mois de Janvier et le mois d'avril.
- Les débits et les apports liquides, ont connu une diminution à partir de l'année 1988.
- Les grosses pertes en débits liquides et en apports liquides, se font essentiellement dans les mois de janvier, février et mars.

CHAPITRE 4

Etude du transport solide

1 - INTRODUCTION

L'étude est menée, dans le but d'élaborer une méthodologie d'évaluation du débit solide globale et du taux d'érosion, du bassin versant de l'oued Boussellam à Sidi-Yahia. Pour cela, on dispose des données hydrométriques fournies par l'agence nationale des ressources hydrauliques (A N R H), à la station de Sidi-Yahia (W ; Bejaia).

2 - PRESENTATION ET MISE EN FORME DES DONNEES

La concentration en éléments fins en suspension, est déterminée à chaque variation du niveau du cours d'eau, par échantillonnage à la bouteille, filtration, passage à l'étuve puis pesée.

A partir des hauteurs d'eau et des courbes de tarage, ont été établies des fiches, comportant les données suivantes : date, heure, hauteur d'eau, concentration, débit liquide et débit solide en suspension. Les données couvrent la période s'étalant entre 1971 et 1995. Aussi, au droit de la station hydrométrique, on dispose des différents débits liquides à savoir :

- Débit liquide moyen annuel.
- Débit liquide minimal annuel.
- Débit liquide maximal annuel.
- Apports liquides.

3 - ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE

3-1 Introduction

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, gravier, galets et blocs), de diamètre supérieur à 1 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace.

Les mesures sur terrain du transport solide par charriage, sont très onéreuses et très difficiles, à cause des perturbations de l'écoulement.

Le débit solide par charriage, peut être calculé suivant plusieurs formulations (Kalinski, Einstein, Shields, Meyer Petter et Muller ...). Le choix est porté sur celle de Meyer Petter et Muller, car c'est à cette dernière que répondent les caractéristiques hydrauliques du cours d'eau intéressé. En effet, ses dernières s'inscrivent dans le domaine de validité de la formule à savoir :

- i- Pente de l'oued I : $(0,4 \% \leq I \leq 20 \%)$.
- ii- Diamètre moyen des grains solides : $D_{50} : (0,4 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 30 \text{ mm})$.

3-2 Formulation du débit solide par charriage

Le débit solide charrié par unité de largeur g_s , est donné par :

$$g_s = 8 \rho_s \left(\sqrt{g(s-1)} D_{50}^3 \right) \left[\left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \theta - 0,047 \right]^{3/2} \quad (4.1)$$

θ est le paramètre de Shields. Il est donné par l'équation :

$$\theta = R I / (s - 1) D_{50}$$

g_s : Débit solide charrié par unité de largeur (kg/s/m).

$$s = \rho_s / \rho$$

ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m³).

ρ_s : Masse volumique des sédiments (kg/m³).

I : Pente du cours d'eau (m).

D_{50} : Diamètre médian des grains solides (m).

R : Rayon hydraulique (m).

Suite à l'importance de la largeur de l'oued devant celle du tirant d'eau (régime uniforme), on estime R par la hauteur d'eau H .

a : Coefficient correctif compris entre 0,35 et 1 donné par :

$$a = (k_s / k_r)^{3/2} \quad (4.2)$$

k_s : Coefficient de Strickler de l'écoulement.

k_r : Coefficient de rugosité des grains solides.

Le coefficient de Strickler de l'écoulement est donné par :

$$k_s = U / I^{1/2} R^{2/3}$$

U : Vitesse moyenne de l'eau (m).

Le coefficient de rugosité des fonds (granulométrie uniforme) est donné par :

$$k_r = 21 / (D_{50})^{1/6} \quad (4.3)$$

Dans notre cas, les calculs ont donné :

i- $a = 0,38$. pour la période 1971-1988.

ii- $a = 0,76$ pour la période 1988-1995.

Connaissant le débit solide charrié unitaire, on déduit le débit solide charrié total par le produit de ce dernier et la largeur du cours d'eau :

$$G_S = g_S L \quad (4.4)$$

G_S : Débit solide charrié total (kg/s).

g_S : Débit solide charrié unitaire (kg/s//m).

L : Largeur du cours d'eau (m) (égale 8m).

3-3 Recherche d'une relation entre le débit charrié G_S et le débit liquide Q_1 .

Disposant des hauteurs d'eau, on peut calculer le débit solide charrié. Connaissant le débit liquide instantané, on dresse un tableau comprenant le débit liquide instantané Q_1 et le débit solide charrié correspondant G_S .

La visualisation de l'ensemble des données observées, dans un diagramme débit liquide Q_1 et débit solide charrié G_S , permet d'observer deux nuages de points bien distincts (Figure 4-1).

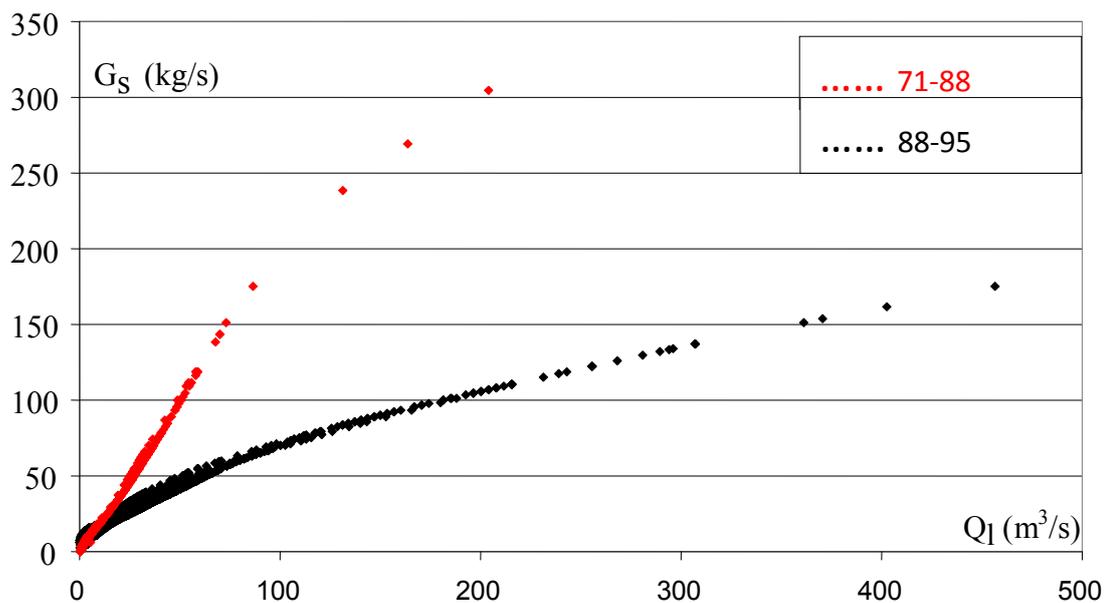


Figure 4-1 : Nuage de points - débit solide charrié G_S en fonction du débit liquide Q_1 / 71/95

Après plusieurs tentatives de représentation du nuage de points, en scindant les données en deux sous groupes. On arrive à mettre en évidence, que le premier nuage de points (figure 4-2) correspond à la période 1971-1988 et que le deuxième nuage (figure 4-3) correspond à la période 1988-1995. Aussi, dans la suite de l'étude, on considérera deux périodes à savoir la période s'étalant de 1971 à 1988 et celle s'étalant de 1988 à 1995.

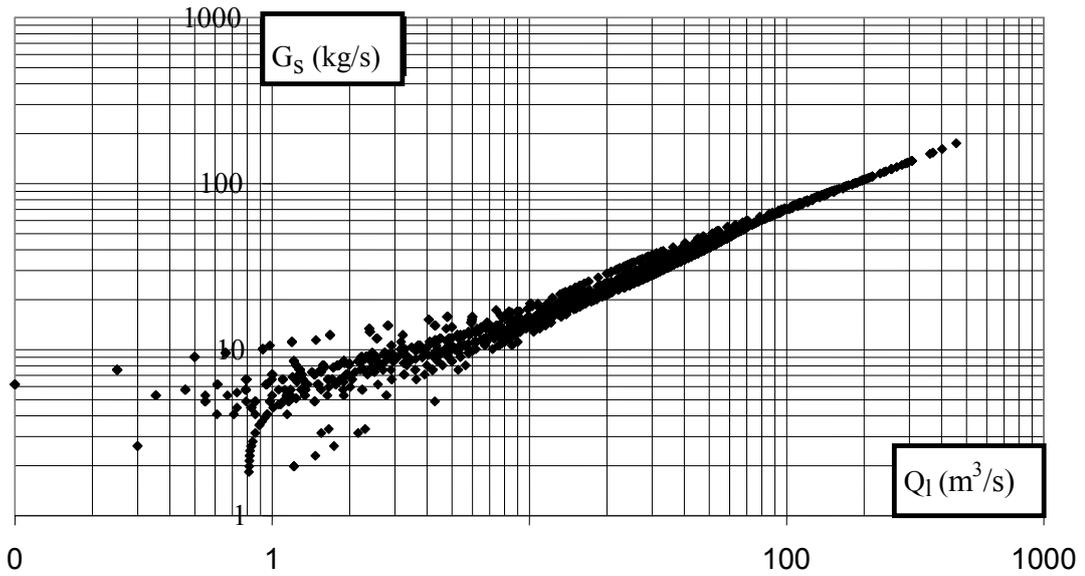


Figure 4-2 : Nuage de points - débit solide charrié G_S -débit liquide Q_l / 71-88

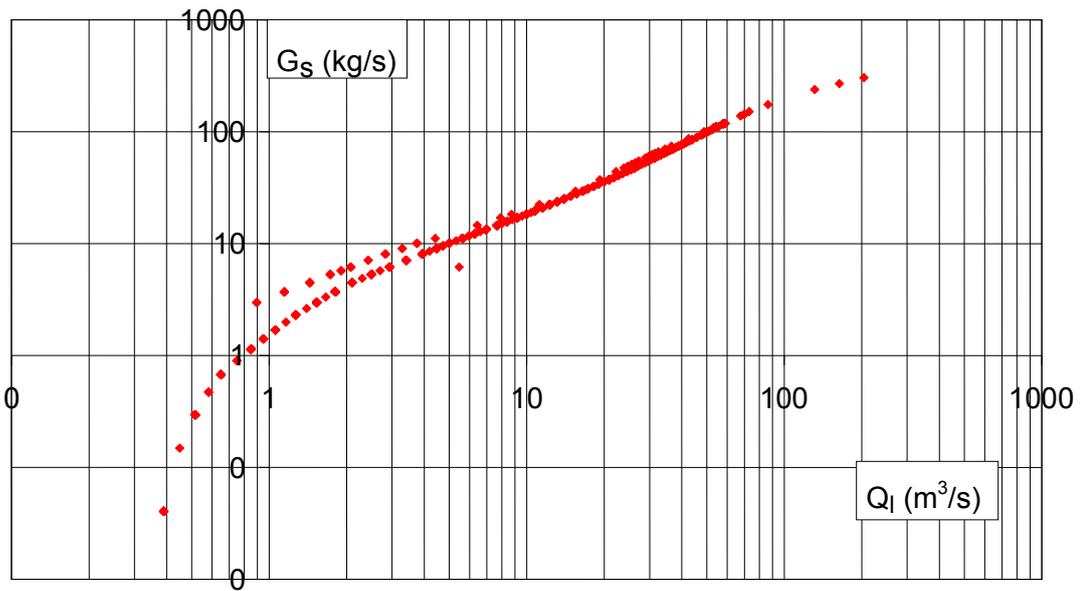


Figure 4-3 : Nuage de points - débit solide charrié G_S -débit liquide Q_l / 88-95

L'identification de l'allure des graphes, donne les équations suivantes :

i- Période : 1971-1995

Pour un coefficient de corrélation $R^2 = 0,80$, l'équation de la courbe (figure 4-4) est donnée par :

$$G_S = 3.23 Q_l^{0.70} \tag{4.5}$$

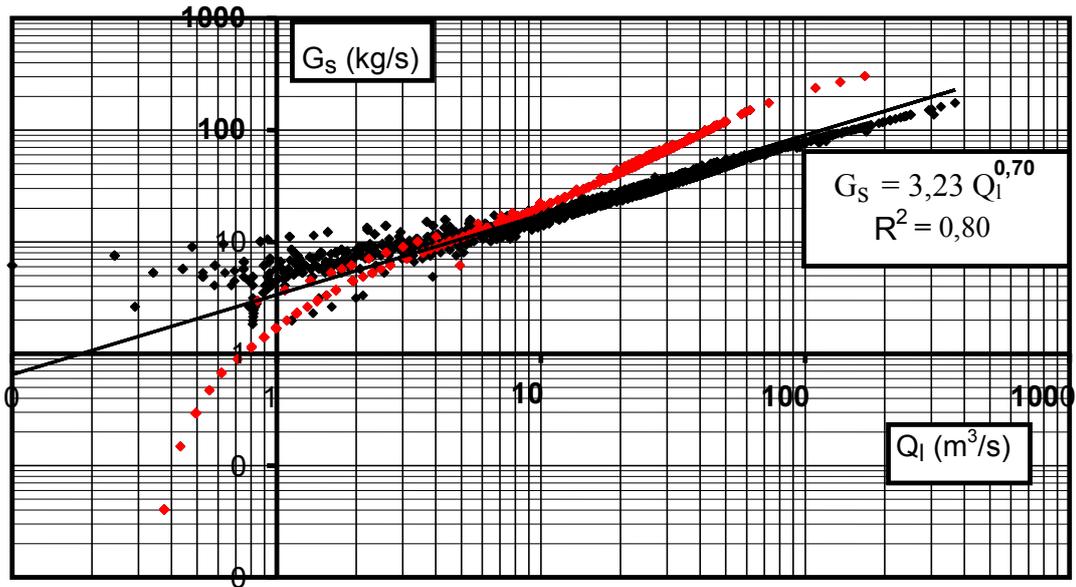


Figure 4- 4 : Débit solide charrié G_s en fonction du débit liquide Q_l / 71-95

ii- Période : 1971-1988

Pour un coefficient de corrélation $R^2 = 0,92$, l'équation de la courbe (figure 4- 5) est donnée par :

$$G_s = 5.26 Q_l^{0.52} \tag{4.6}$$

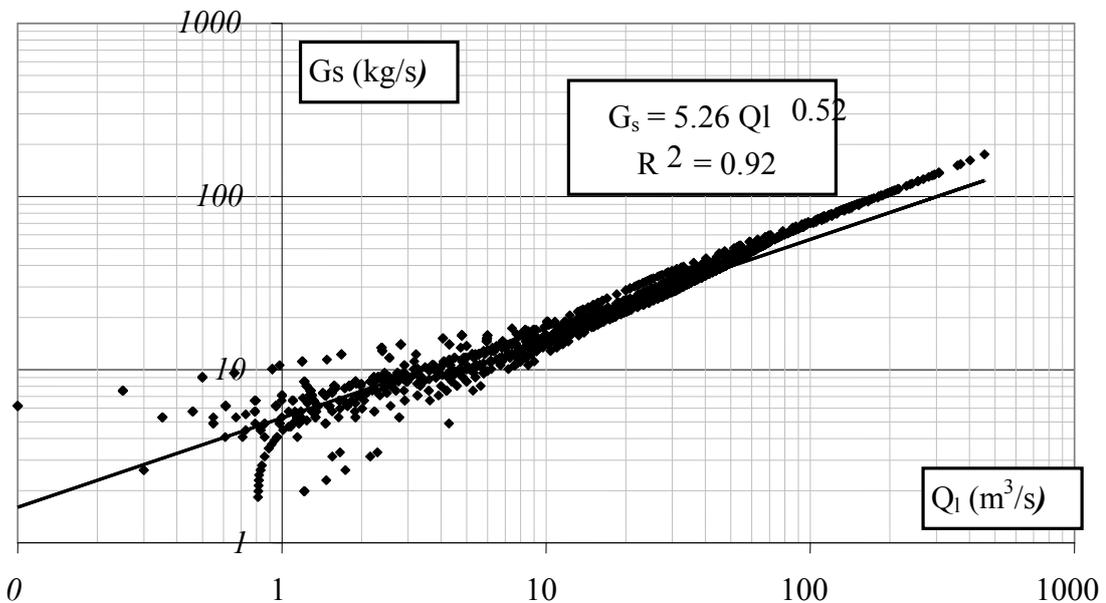


Figure 4-5 : Débit solide charrié G_s en fonction du débit liquide / 71-88

ii- Période : 1988-1995

Pour un coefficient de corrélation $R^2 = 0,93$, l'équation de la courbe (figure 4- 6) est donnée par :

$$G_s = 1,35 Q_l^{1,15} \tag{4.7}$$

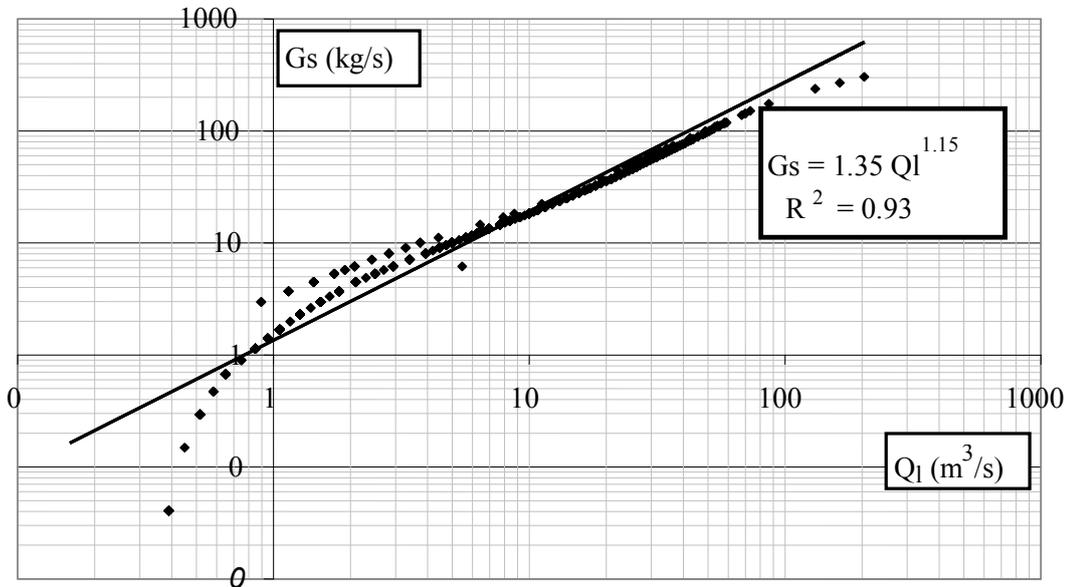


Figure 4-6 : Débit solide charrié G_s en fonction du débit liquide / 88-95

Conclusion : Pour une représentation globale (période 1971-1995), le coefficient de corrélation a pour valeur $R^2 = 0,80$. Par contre après séparation des données en deux sous groupes, on retrouve une meilleure corrélation, avec $R^2 = 0,92$ pour la période 1971-1988 et $R^2 = 0,93$ pour la période 1988-1995.

3-4 Etude du transport solide par charriage à l'échelle saisonnière

L'étude, est menée dans le but de retrouver l'influence de la saison sur le transport solide par charriage. Les résultats sont résumés dans les tableaux 4-1 et 4-2.

1- période : 1971-1988.

Tableau 4-1 : Valeurs de a b et R^2 (charriage à l'échelle saisonnière 71-88)				
Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
a	2,58	3,15	2,68	2,56
b	0,76	0,78	0,77	0,78
R^2	0,87	0,88	0,96	0,93

A l'échelle saisonnière, on remarque que la plus grande valeur du facteur a correspond à l'hiver ($a = 3,15$). En effet, aux gros débits liquides d'hiver, correspondront les gros débits solides. L'hiver, est la saison la plus érosive. En été, la valeur du facteur a ($a = 2,56$), est importante. En effet, à de faibles débits liquides d'été, peuvent correspondre de forts débits solides et ce suite à de violents orages d'été. Pour le printemps et l'automne, les valeurs de a ($2,58$ et $2,68$) sont intermédiaires entre celles de l'hiver et celles de l'été ; signe évident de leur représentativité de l'année.

2 - période : 1988-1995

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
a	0,86	1,08	1,03	0,83
b	1,33	1,26	1,26	1,2
R^2	0,98	0,98	0,98	0,95

Pour la période 1988-1995. On remarque, qu'à l'échelle de la saison, le facteur (a) a considérablement diminué, par contre le facteur (b) a augmenté ; Signe évident de l'influence des changements connus par les caractéristiques physiques et hydrauliques du bassin versant à partir de 1986. L'hiver, reste la saison la plus érosive ($a = 1,08$ $b = 1,26$). L'été est la saison la moins productive ($a = 0,83$ et $b = 1,2$). Au printemps et à l'automne, correspondent les valeurs intermédiaires des facteurs a et b .

4 - ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

4-1 Etude globale

Le transport solide en suspension, représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), de petites tailles, maintenus en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau. Sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement, les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide, croît de l'amont vers l'aval.

Disposant des débits liquides instantanés Q_l et des débits solides en suspension Q_s , on cherchera des relations, reliant les deux paramètres sur deux échelles ; A savoir l'échelle annuelle et l'échelle saisonnière.

Pour identifier l'allure du graphe, cinq modèles ont été essayés ; A savoir :

- Premier. - Le modèle linéaire.
- Deuxième. - Le modèle logarithmique.
- Troisième. - Le modèle puissance
- Quatrième. - Le modèle parabolique.
- Cinquième. - Le modèle exponentiel.

Le coefficient de correction R^2 de première espèce ($\alpha = 5\%$), oriente le choix du modèle [Dagnellie, R. 1992]. Les résultats, sont reportés dans les tableaux (4- 3), (4- 4) et (4- 5).

1- Période 1971-1995

Tableau 4-3 : Coefficient de corrélation de $Q_s = f(Q_l)$ période / 71-95

Modèle	Linéaire	Puissance	Polynomial	Log	Expo
R^2	0,57	0,63	0,57	0,21	0,40

2- Période 1971-1988

Tableau 4-4 : Coefficient de corrélation de $Q_s = f(Q_l)$, période / 71-88

Modèle	Linéaire	Puissance	Polynomial	Log	Expo
R^2	0,57	0,68	0,57	0,22	0,41

3- Période 1988-1995

Tableau 4-5 : Coefficient de corrélation de $Q_s = f(Q_l)$ période / 88-95

Modèle	Linéaire	Puissance	Polynomial	Log	Expo
R^2	0,58	0,73	0,58	0,22	0,40

De tous les modèles étudiés, le modèle puissance offre la meilleure corrélation et ce comme il se fait généralement depuis les travaux de Berzencovitch (1952).

Pour une représentation globale, du débit solide en suspension en fonction du débit liquide pour toute la période 1971-1995. Q_s est donné avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,63$ par :

$$Q_s = 5,87 \cdot Q_l^{1,16} \tag{4.8}$$

Par contre pour une représentation séparée, le coefficient R^2 passe pour la période 1971-1988, à $R^2 = 0,68$. L'équation liant les deux paramètres, est donnée (figure 4-7) par :

$$Q_s = 3,75 Q_l^{1,28} \tag{4.9}$$

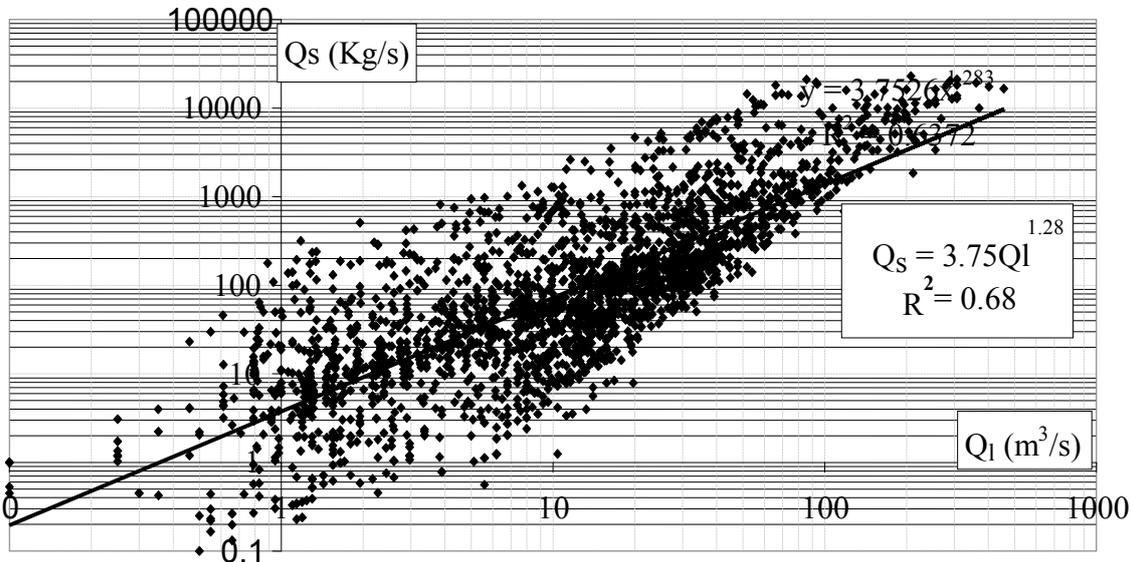


Figure 4-7 : Débit solide en suspension Q_s en fonction du débit liquide / 71-88

Pour la période 1988-1995, le coefficient de corrélation passe à $R^2 = 0,73$. L'équation liant les deux paramètres, est donnée (figure 4-8) par :

$$Q_s = 9,39 Q_l^{1,20} \tag{4.10}$$

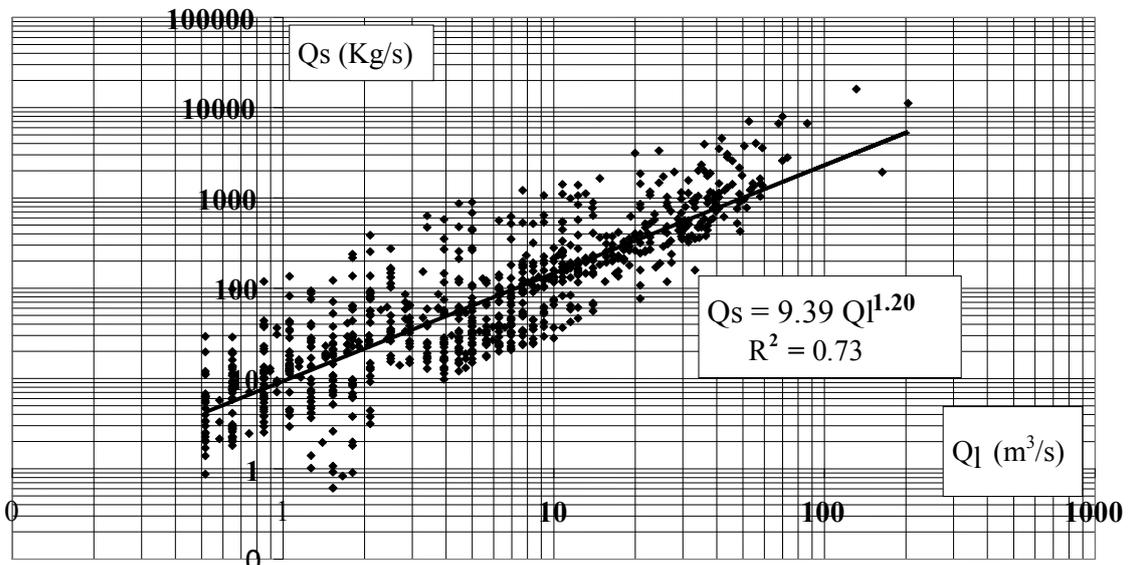


Figure 4-8 : Débit solide en suspension Q_s en fonction du débit liquide / 88-95

4-2 Etude du transport solide en suspension à l'échelle saisonnière

Le climat étant de type méditerranéen, caractérisé par une saison humide et une autre sèche. La pluviométrie annuelle, étant irrégulière. Le régime hydrologique du cours d'eau dépend essentiellement de la pluviométrie. Il se caractérise par une grande variabilité spatiotemporelle avec une succession de périodes de hautes et basses eaux. Toutes ces considérations, nous orientent sur une étude des réponses du bassin versant aux débits liquides et matières en suspension à l'échelle saisonnière, afin de faire ressortir l'influence de la saison sur le transport solide à l'échelle étudiée. Les résultats obtenus, sont résumés dans les tableaux (4-6) et (4-7).

1 - période : 1971-1988

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
A	7,64	1,85	0,75	3,53
b	1,56	1,42	1,67	1,77
R ²	0,76	0,83	0,65	0,66

A l'échelle de la saison, l'automne est la saison la plus productive (a = 7,64 et b = 1,56). Pour l'été, on remarque l'importance de la valeur de (a) (a = 3,53), c'est dû certainement aux orages d'été ; En effet, de faibles débits liquides estivaux peuvent engendrer de forts débits solides. Pour l'hiver et le printemps, les valeurs sont intermédiaire entre celle l'automne et de l'été.

2 - période : 1988-1995

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
A	12,38	6,44	7,36	16,1
B	1,53	1,22	1,32	1,39
R ²	0,67	0,83	0,73	0,87

Pour des corrélations assez significatives, on remarque que pour la période 1988-1995, la valeur du facteur (a) a diminué, par contre celle du facteur (b) a connu une augmentation. Ceci, est dû évidemment au changement des caractéristiques physiques et hydrauliques connu par le bassin versant à partir de 1988. En effet, l'exposant b est fonction des caractéristiques

climatiques et hydrologiques du bassin versant (Probst et Bazerbaché, 1986) ; (Vivian, 1980), ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans le cours d'eau (Kattane. Z, al, 1987).

5 - ETUDE DES DEBITS SOLIDES ANNUELS EN SUSPENSION PAR CHARRIAGE ET TOTAL

Connaissant le débit liquide moyen annuel Q_l , on peut calculer les trois débits solides annuels, en suspension Q_s , par charriage G_s et total G_t .

a) Le débit solide en suspension, est donné par :

$$\text{i. Période 1971-1988} \quad Q_s = 3,75 Q_l^{1,28} \quad (4.11)$$

$$\text{ii. Période 1988-1995} \quad Q_s = 9,39 Q_l^{1,2} \quad (4.12)$$

b) Le débit solide par charriage, est donné par :

$$\text{i. Période 1971-1988} \quad G_s = 5,26 Q_l^{0,52} \quad (4.13)$$

$$\text{ii. Période 1988-1995} \quad G_s = 1,35 Q_l^{1,15} \quad (4.14)$$

Connaissant le débit solide en suspension et le débit solide par charriage, on peut calculer le débit solide total G_t par :

$$G_t = Q_s + G_s \quad (4.15)$$

Q_l = Débit liquide moyen annuel (m^3/s).

Q_s = Débit solide en suspension moyen annuel (kg/s).

G_s = Débit solide charrié moyen annuel (kg/s).

G_t = Débit solide total moyen annuel (kg/s)

Les résultats sont résumés dans le tableau (4-8).

Tableau 4-8 : Débits solides Q_s , G_s , G_t et apport solide W

ANNEE	Q_l (m ³ /s)	Q_s (kg/s)	C_v	G_s (kg/s)	C_v	G_t (kg/s)	W (10 ⁶ t)	W_{cum} (10 ⁶ t)
71	9,39	65,9	1,50	16,3	1,26	82,2	2,59	2,59
72	14,76	117,6	2,67	20,5	1,59	138,1	4,36	6,95
73	8,8	60,7	1,38	15,8	1,22	76,4	2,41	9,36
74	3,072	15,8	0,36	9,2	0,71	25	0,79	10,15
75	7,89	52,8	1,20	14,9	1,16	67,7	2,13	12,28
76	4,19	23,5	0,53	10,8	0,84	34,3	1,08	13,36
77	2,274	10,7	0,24	7,9	0,61	18,6	0,59	13,95
78	3,015	15,4	0,35	9,1	0,71	24,5	0,77	14,72
79	2,498	12,1	0,28	8,3	0,64	20,4	0,64	15,37
80	5,055	29,8	0,68	11,9	0,92	41,7	1,32	16,68
81	9,504	67	1,52	16,4	1,27	83,3	2,63	19,31
82	6,6	42	0,95	13,6	1,05	55,6	1,75	21,06
83	8,747	60,2	1,37	15,7	1,22	75,9	2,39	23,46
84	11,56	86	1,95	18,1	1,40	104,1	3,28	26,74
85	2,68	13,2	0,30	8,6	0,67	21,8	0,69	27,43
86	9,85	70,1	1,59	16,7	1,29	86,8	2,74	30,17
87	1,344	5,5	0,13	6	0,47	11,5	0,36	30,53
88	3,613	43,9	1,14	5,9	1,13	49,8	1,57	32,1
89	1,137	11	0,28	1,6	0,31	12,5	0,39	32,5
90	2,607	29,7	0,77	4,1	0,79	33,7	1,06	33,56
91	2,81	32,4	0,84	4,4	0,85	36,9	1,16	34,72
92	4,5	57,1	1,48	7,6	1,46	64,7	2,04	36,76
93	1,147	11,1	0,29	1,6	0,31	12,7	0,4	37,16
94	5,88	78,7	2,04	10,4	2,00	89	2,81	39,97
95	3,68	44,8	1,16	6	1,15	50,9	1,6	41,57

5-1 Etude du débit solide moyen annuel en suspension

La visualisation du débit solide moyen annuel en suspension Q_s en fonction du temps sur toute la période 1971-1995 (figure 4-9), montre une irrégularité de ce dernier. En effet, pour la période 71-88, le débit maximal annuel est de 117,6 kg/s, le débit minimal annuel est de 5,5 kg/s ; Leur rapport est égal à 21,3. Pour la période 88-95, le maximum est de 78,7 kg/s, le

minimum est de 11 kg/s ; Leur rapport est 7,1. Ces chiffres, reflètent la grande variabilité annuelle du débit solide en suspension. Ces résultats, sont confirmés par l'étude du coefficient de variabilité. En effet, ce dernier varie entre 0,1 et 2,7 durant la période 71-88 et entre 0,36 et 1,80 durant la période 88-95. Concernant la variation moyenne annuelle ; Pour la période 1971-1988, $Q_S \text{ moy} = 44 \text{ Kg/s}$, pour la période 1988-1995 $Q_S \text{ moy} = 38,6 \text{ Kg/s}$, donc en moyenne le débit solide moyen en suspension diminue de 12%. Le débit solide maximal a été atteint en 1972, pour $Q_S = 117,6 \text{ kg/s}$. et ce suite à la crue connue par l'oued.

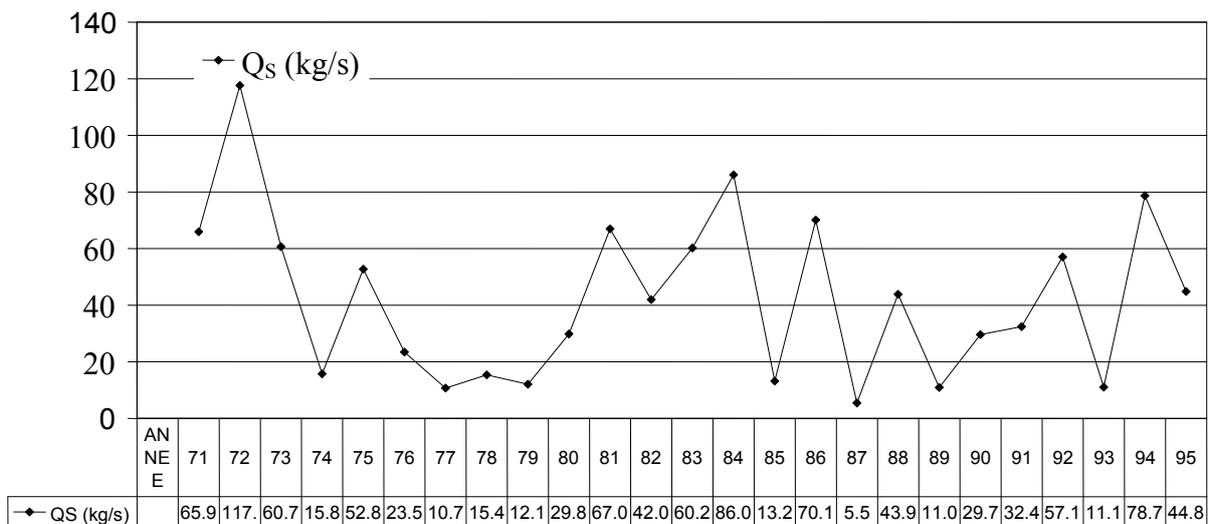


Figure 4-9 : Evolution du débit solide en suspension Q_S dans le temps

5-2 Étude du débit solide par charriage moyen annuel G_S

La visualisation du débit solide par charriage moyen annuel en fonction du temps (figure 4-10), permet de remarquer une forte irrégularité du débit charrié. En effet, pour la période 71-88, le maximum est de 20,5 kg/s, alors que le minimum est de 6 kg/s. Leur rapport, est donc égal 3.5. Pour la période 88-95, le maximum est de 10,4 kg/s, alors que le minimum est de 1,6 kg/s. Leur rapport, est donc égal à 6,5. La lecture de ces chiffres, fait ressortir la grande disparité du débit solide par charriage. L'étude du coefficient de variation C_V , montre que pour la période 71-88, C_V fluctue entre 0,47 et 1,59. Pour la période 88-95, il varie entre 0,3 et 2,81. Ces variations, confirment donc la très grande variation du débit charrié. On remarque, qu'au contraire du débit solide en suspension, le débit solide par charriage, a nettement diminué. La moyenne pour la période 1971-1988 est $G_S = 12,9 \text{ Kg/s}$, elle est passé pour la période 1988-1995 à $G_S = 5,2 \text{ Kg/s}$; Soit une diminution moyenne de 60%.

5-3 Etude du débit solide total G_t

La représentation du débit solide total G_t en fonction du temps (figure 4-11), montre comme pour les débits solides en suspension et par charriage, que le débit solide total est irrégulier et présente une diminution sur la période 88/95. En effet, la moyenne pour la période 71-88 est $G_t = 57 \text{ Kg/s}$, pour la période 88-95 $G_t = 43,8 \text{ Kg/s}$. En moyenne, le débit solide diminue de 23 %. Le débit solide maximal a été atteint en 1972, pour $G_t = 138,1 \text{ kg/s}$.

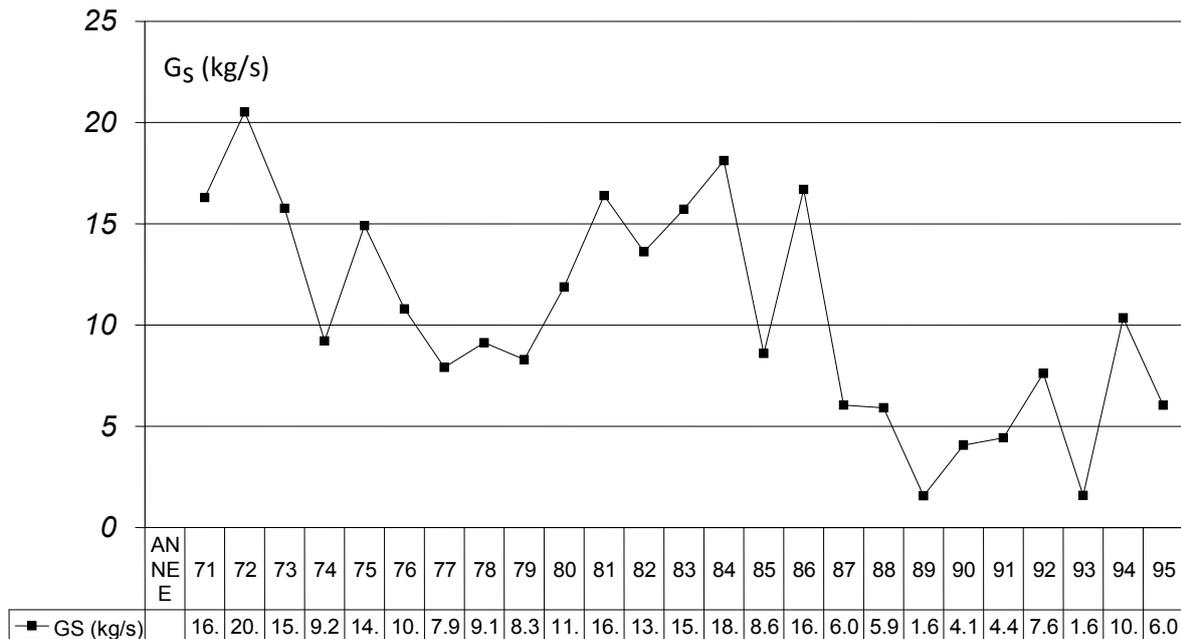


Figure 4-10 : Evolution du débit charrié G_s en fonction du temps

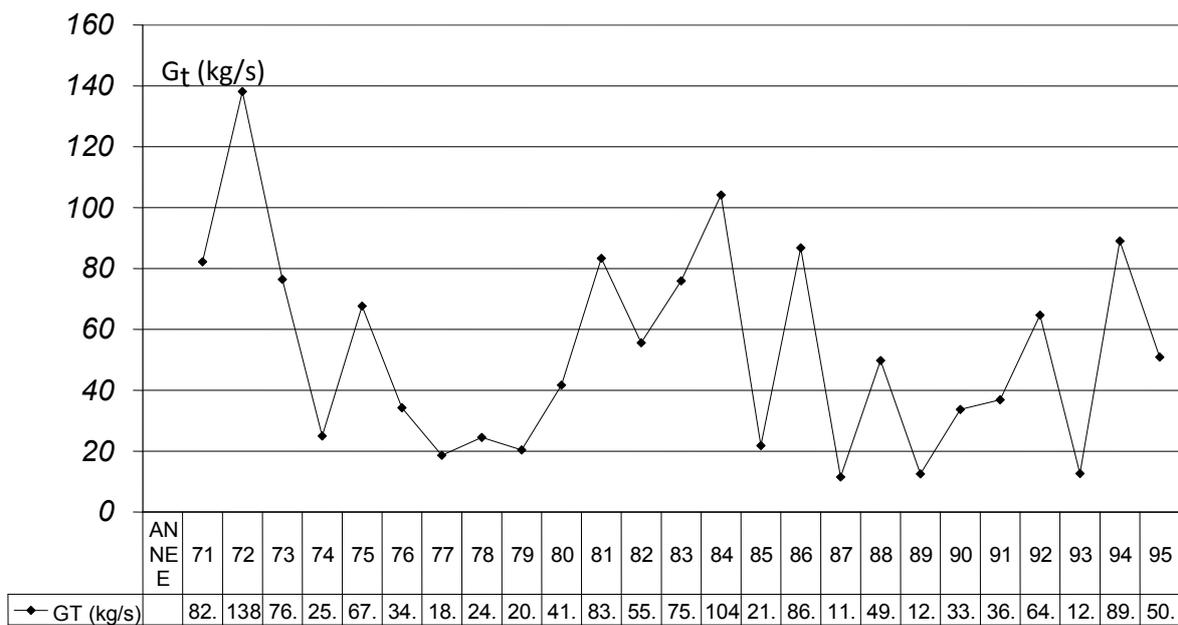


Figure 4-11 : Evolution du débit solide total G_t en fonction du temps

5-4 Etude comparative du débit solide annuel en suspension Q_s et du débit solide annuel par charriage G_s

La représentation du rapport du débit solide par charriage G_s au débit solide par suspension Q_s (tableau 4-9), illustrée par la (figure 4-12), permet de remarquer que ; Le rapport en pourcentage des deux débits, a considérablement diminué à partir de l'année 1988. Ce dernier, passe en moyenne de 40 % pour la période 1971-1988 à 14 % pour la période 1988-1995 ; Signe très évident de la répercussion de la retenue d'Ain-Zada sur la station hydrométrique de Sidi-Yahia. Il ressort de ces résultats, que le rapport G_s/Q_s , a diminué de 65 %.

Tableau 4-9 : Rapport débit charrié G_s au débit en suspension Q_s

ANNEE	Q_s (kg/s)	G_s (kg/s)	G_s/Q_s
71	65,92	16,3	0,25
72	117,61	20,52	0,17
73	60,67	15,76	0,26
74	15,77	9,22	0,58
75	52,76	14,91	0,28
76	23,47	10,8	0,46
77	10,73	7,91	0,74
78	15,4	9,13	0,59
79	12,1	8,29	0,69
80	29,84	11,88	0,4
81	66,95	16,4	0,24
82	41,98	13,61	0,32
83	60,2	15,72	0,26
84	86,02	18,12	0,21
85	13,24	8,6	0,65
86	70,09	16,7	0,24
87	24,58	11	0,45
88	43,86	5,91	0,13
89	10,95	1,56	0,14
90	29,65	4,06	0,14
91	32,44	4,43	0,14
92	57,08	7,61	0,13
93	11,07	1,58	0,14
94	78,69	10,35	0,13
95	44,84	6,04	0,13

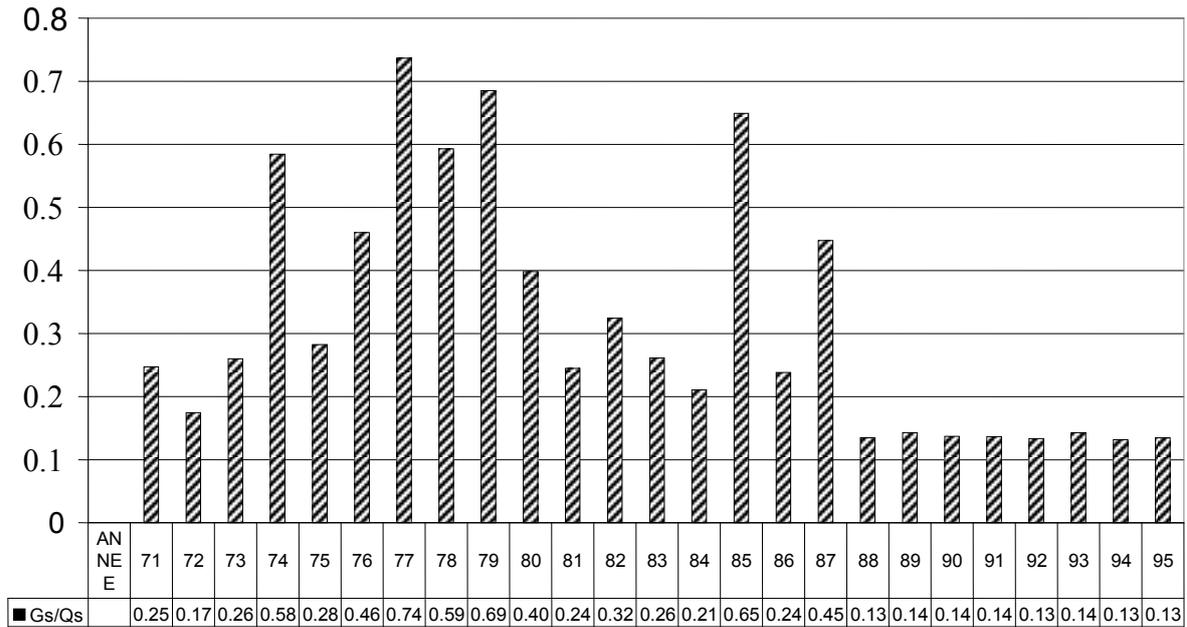


Figure 4-12 : Evolution du rapport Gs / Qs en fonction du temps

Conclusion :

La présence de la retenue d’Ain Zada, a affecté les débits solides au niveau de Sidi-Yahia. Selon les résultats, on peut conclure que pour Sidi-Yahia la zone d’emprunt pour la suspension est en aval de la retenue d’Ain Zada puisque la diminution du transport en suspension n’est que de 12 % et que la zone d’emprunt pour le charriage, est en amont de la même retenue, car le charriage a considérablement chuté (60 %).

6 - ETUDE DE L’APPORT SOLIDE A L’ECHELLE ANNUELLE

Connaissant le débit solide total G_t , on peut calculer l’apport solide annuel W . On dresse alors le tableau (4-8).

L’apport solide total, est donné par :

$$W = G_t \cdot t \tag{4.16}$$

W = Apport solide annuel (10^6 t/an).

t = Temps (s).

G_t = Débit solide total annuel (kg/s).

6-1 Etude de la variation de l'apport solide annuel

La courbe représentant la variation de l'apport solide annuel W en fonction du temps, est donnée par la (figure 4-13).

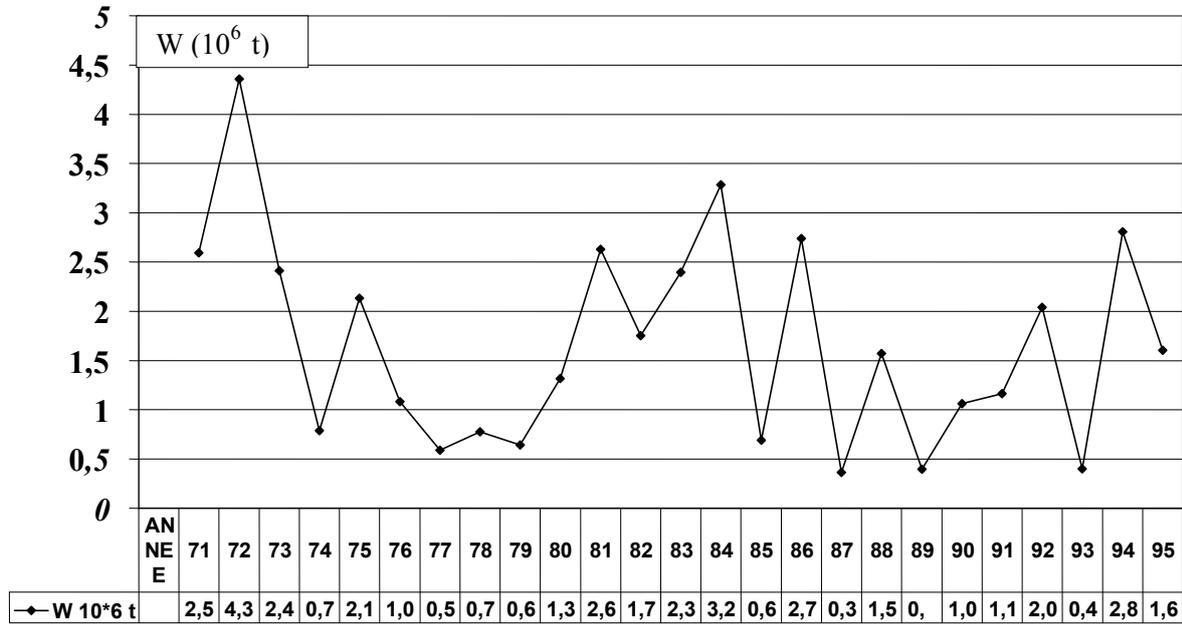


Figure 4-13 : Evolution de l'apport solide annuel W dans le temps

On remarque, que l'apport solide maximal a été enregistré en 1972, pour une valeur considérable égale à $W = 4,36 \cdot 10^6$ tonnes. En effet, c'est à cette année que correspond le plus gros débit solide total. Comme pour l'apport liquide, l'apport solide connaît une nette diminution sur la période 1988-1995. L'apport solide moyen annuel était de $1,81 \cdot 10^6$ t/an pour la période 71-88, il est passé à $1,38 \cdot 10^6$ t/an pour la période 88-95 ; Soit une chute de $0,43 \cdot 10^6$ t/an, ce qui représente un pourcentage de 24 %.

Du même graphe, ressort l'irrégularité de l'apport solide annuel

6-2 Etude de l'irrégularité de l'apport solide annuel

Afin d'étudier l'irrégularité annuelle du débit solide, on dresse le tableau (4-10). Dans ce dernier, on calcule le coefficient de variation C_V , donné par le rapport de l'apport solide d'une année à l'apport solide moyen annuel.

Tableau 4-10 : Coefficient de variation C_v de l'apport solide annuel

ANNEE	W (10^6 t)	C_v	ANNEE	W (10^6 t)	C_v
71	2,59	1,43	88	1,57	1,14
72	4,36	2,41	89	0,39	0,29
73	2,41	1,33	90	1,06	0,77
74	0,79	0,44	91	1,16	0,84
75	2,13	1,18	92	2,04	1,48
76	1,08	0,6	93	0,4	0,29
77	0,59	0,32	94	2,81	2,03
78	0,77	0,43	95	1,6	1,16
79	0,64	0,36	Moyenne	1,38	1
80	1,32	0,73			
81	2,63	1,45			
82	1,75	0,97			
83	2,39	1,32			
84	3,28	1,81			
85	0,69	0,38			
86	2,74	1,51			
87	0,36	0,2			
Moyenne	1,81	1.00			

Pour la période 71-88. On remarque que, l'apport solide maximal est de $4,36 \cdot 10^6$ t/an, alors que le minimal est de $0,37 \cdot 10^6$ t/an, leur rapport est donc égal 14. Pour la période 88-95, le maximum est de $2,81 \cdot 10^6$ t/an, le minimum est de $0,35 \cdot 10^6$ t/an, leur rapport est donc égal à 7,2. Ces chiffres, illustrent la grande variation de l'apport solide annuel.

Pour confirmer ces résultats, une étude du coefficient de variation C_v a été menée (tableau 4-10). Cette dernière révèle que, pour la période 71-88, le coefficient de variation fluctue entre 0,20 et 2,41 et que pour la période 88-95, le même coefficient varie entre 0,28 et 2,03. Ces résultats, corroborent les conclusions suscitées et révèlent la très grande disparité de l'apport solide annuel.

6-3 Etude de l'apport solide annuel cumulé

6-3-1 Etude globale de l'apport solide annuel Cumulé

La visualisation de l'apport solide cumulé en fonction du temps, permet d'identifier l'allure du graphe et donne les résultats suivants :

i- Période 1971-1988

Pour une corrélation $R^2 = 0,97$. L'équation, est donnée (figure 4-14) par :

$$W_{cum} = 0,62 t - 1220,79 \quad (4.17)$$

W_{cum} = Apport solide annuel cumulé ($10^6 m^3$).

t = Temps (année), avec $1971 \leq t \leq 1988$.

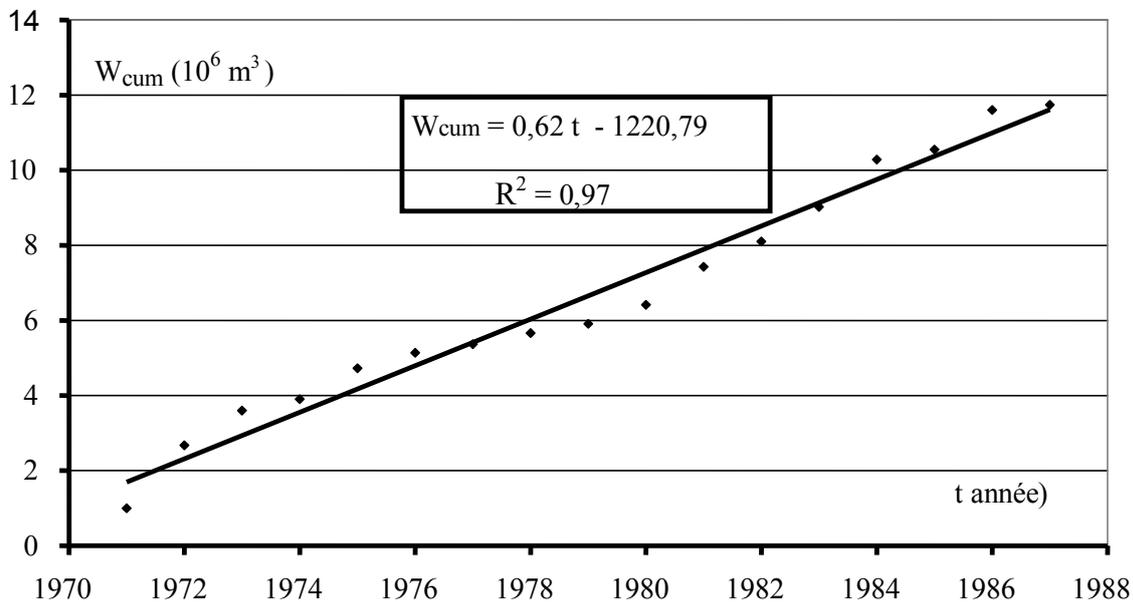


Figure 4-14 : Variation de l'apport solide cumulé W_{cum} en fonction du temps /71-88

ii- Période 1988-1995

Pour une corrélation $R^2 = 0,96$. L'équation, est donnée (figure 4-15) par :

$$W_{cum} = 0,53 t - 1048,66 \quad (4.18)$$

W_{cum} = Apport solide annuel cumulé ($10^6 m^3$).

t = Temps (année), avec $t > 1988$

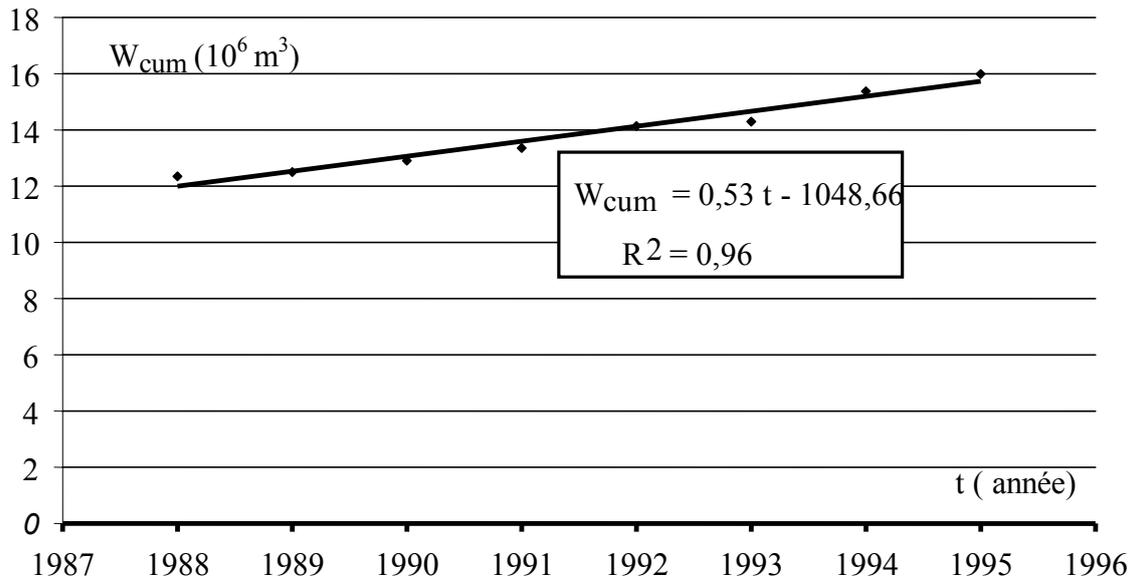


Figure 4-15 : Variation de l'apport solide cumulé W_{cum} en fonction du temps / 88-95

6-3-2 Etude de la variation de l'apport solide annuel cumulé

Pour la période 1988-1995, on remarque que la droite a changé de direction. En effet, le coefficient directeur, est passé de 0,62 pour la période 71-88 à 0,53 pour la période 88-95 (figure 4-16) ; Ce qui illustre la diminution de l'apport solide annuel cumulé, à partir de l'année 1988.

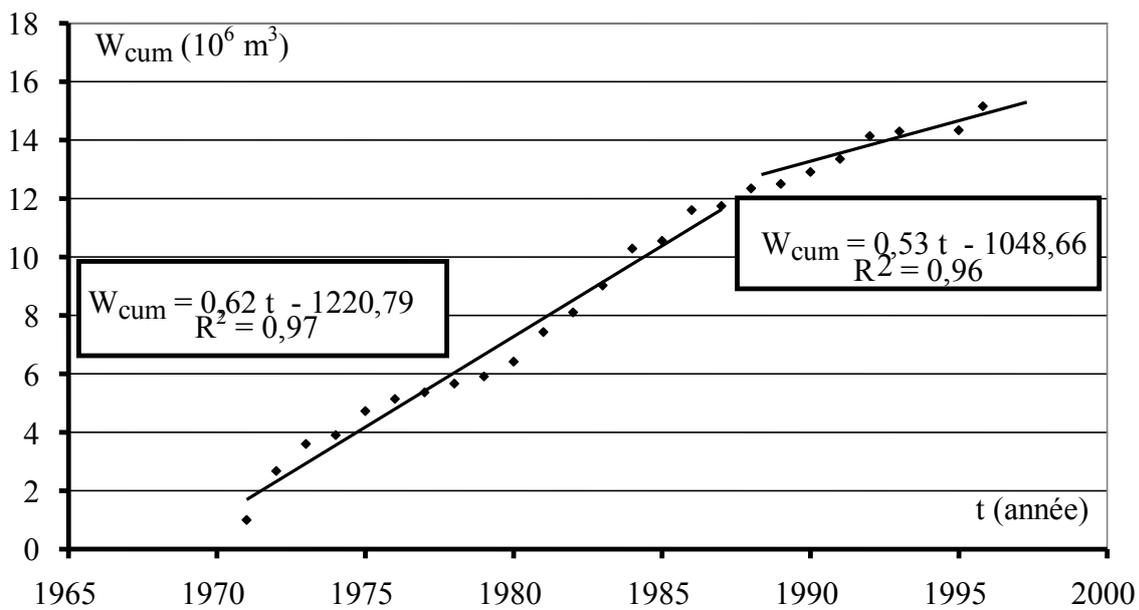


Figure 4-16 : Variation de l'apport solide cumulé W_{cum} en fonction du temps /71-95

7 - ETUDE DE L'APPORT SOLIDE SAISONNIER

7-1 Etude globale

L'apport solide, étant conditionné par l'apport liquide et connaissant les fluctuations que subit ce dernier au cours des différentes saisons, nous oriente sur une étude à l'échelle saisonnière, afin de faire ressortir l'influence de la saison sur le transport solide. Les résultats, sont récapitulés dans le tableau 4-11.

Tableau 4-11 : Apport solide saisonnier W_s

Période	71-88	88-95	71-95
Apport solide	$W_s (10^6 \text{ t})$	$W_s (10^6 \text{ t})$	$\Delta W_s (10^6 \text{ t})$
Saison			
Automne	0,44	0,33	0,12
Hiver	0,84	0,64	0,20
Printemps	0,55	0,43	0,12
Eté	0,08	0,06	0,02

W_s = Apport solide saisonnier (10^6 t).

ΔW_s = Chute en apport solide saisonnier (10^6 t).

Les résultats du tableau 4-10, illustrés par la (figure 4-17), montrent que pour les 2 périodes concernées ; L'apport solide saisonnier le plus important, a lieu en hiver pour $0,84 \cdot 10^6 \text{ t}$ et $0,64 \cdot 10^6 \text{ t}$ pour les périodes 1971-1988 et 1988-1995 respectivement, puis $0,55 \cdot 10^6 \text{ t}$ et $0,43 \cdot 10^6 \text{ t}$ au printemps, vient ensuite l'automne pour $0,44 \cdot 10^6 \text{ t}$ et $0,33 \cdot 10^6 \text{ t}$ et enfin l'été pour $0,08 \cdot 10^6 \text{ t}$ et $0,06 \cdot 10^6 \text{ t}$.

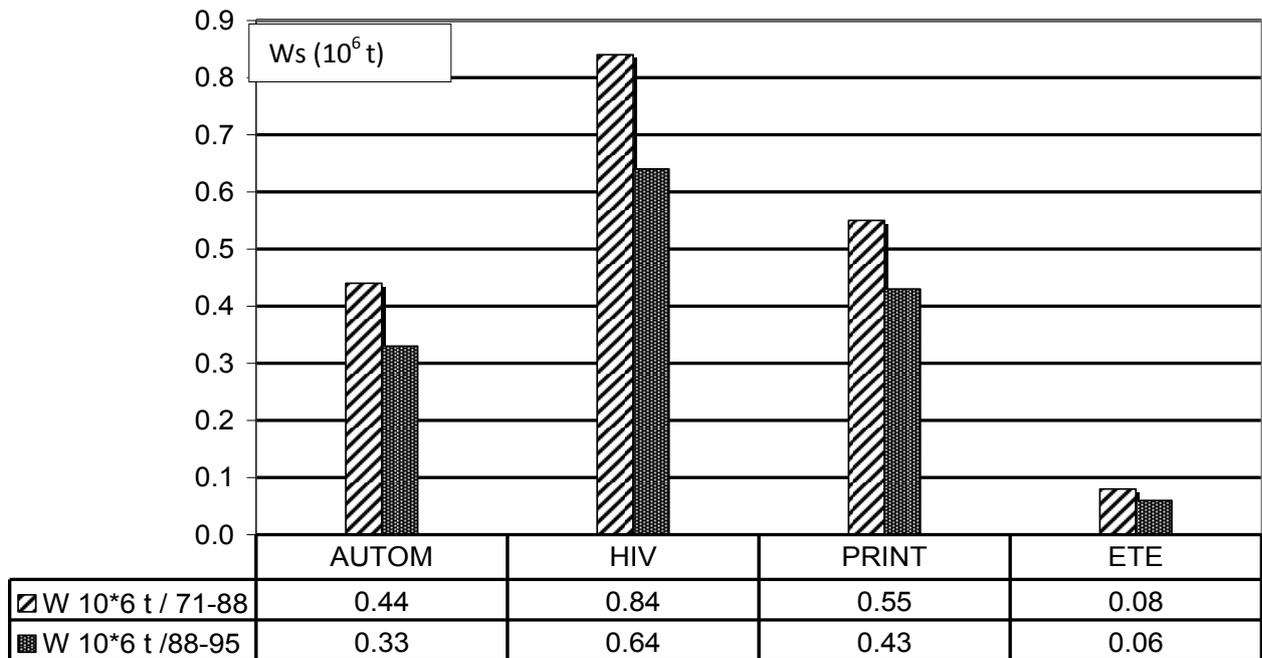


Figure 4-17 : Apport solide saisonnier W_s

En termes de quantité d’apport solide par saison. Le pourcentage est pratiquement le même pour les deux périodes (voir tableau 4-12) ; Avec 44 % et 45 % en hiver respectivement pour les périodes 1971-1988 et 1988-1995, 28 % et 29 % au printemps, 23 % et 21 % en automne et 4 % et 5 % en été. En termes de pourcentage, on remarque qu’à 1 % près, les quantités d’apport solide saisonnier sont conservées pour les deux périodes. Les résultats, sont illustrés par la (figure 4-18) et la (figure 4-19).

On remarque, que pour les deux périodes ; Plus de 70 % du transport solide saisonnier W_s , se fait en hiver et au printemps.

Tableau 4-12 : Pourcentage d’apport solide saisonnier W_s

	Apport solide W_s (%)	Apport solide W_s (%)	ΔW_s (%)
période	71/88	88/95	
Saison			
Automne	23	22	25
Hiver	45	44	44
Printemps	28	29	27
Eté	4	5	4

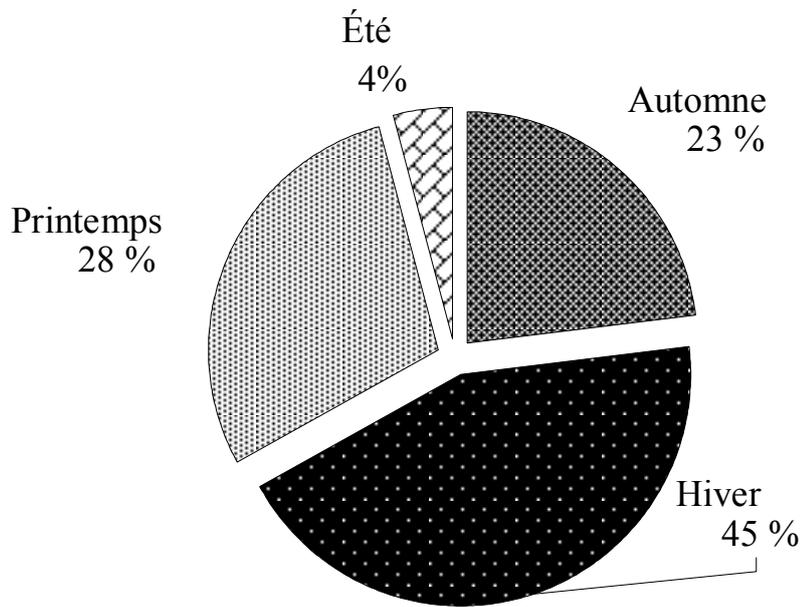


Figure 4-18 : Apport solide saisonnier Ws en pourcentages 71-88

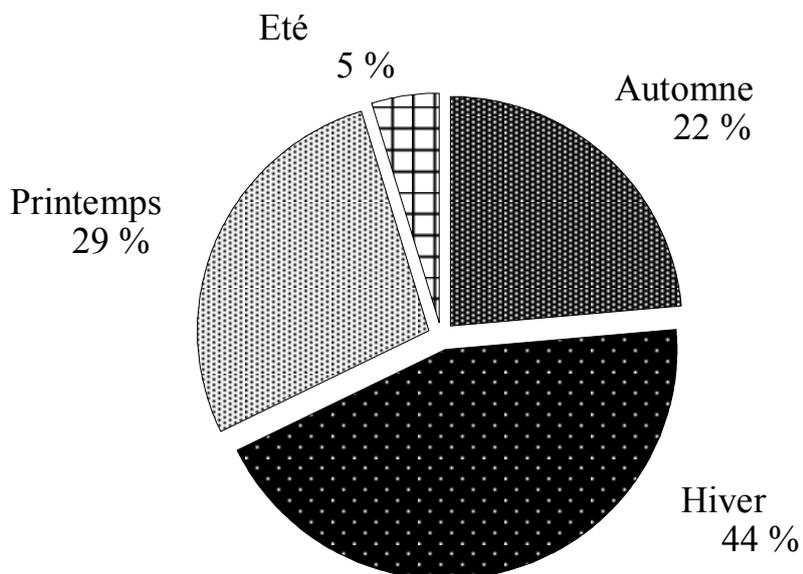


Figure 4-19 : Apport solide saisonnier Ws en pourcentages / 88-95

Un fait important, est à souligner : C'est que la variation des quantités solides transportées, n'a pas affecté les taux correspondants à chaque saison. En effet, à 1 % près les pourcentages sont conservés.

7-2 Etude des chutes en apport solide saisonnier

Comme il a été déjà souligné, la répercussion de la retenue d'Ain-Zada sur la station de Sidi-Yahia est toujours sensible. La (figure 4-20), révèle la différence des apports solides pour les 2 périodes. On remarque, que le pic des chutes est atteint en hiver, alors que le minimum correspond à l'été.

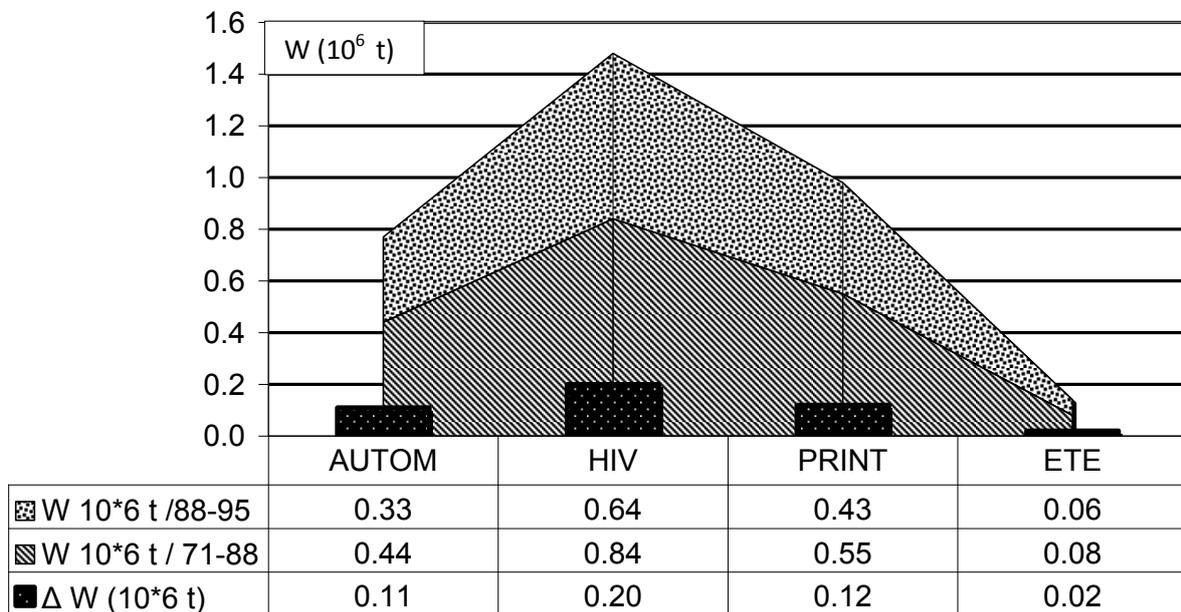


Figure 4-20 : Chute en apport solide saisonnier ΔWs

En termes de pourcentage. Sur les 0,43 10⁶ t perdues annuellement à partir de 1988, la (figure 4-21) montre que 44 % des chutes en apport solide saisonnier, se font en hiver, 27 % au printemps, 25% en automne et seulement 4% en été. Il ressort, que la retenue en amont de la station hydrométrique de Sidi-Yahia, n'a pas une grande influence sur cette dernière en été.

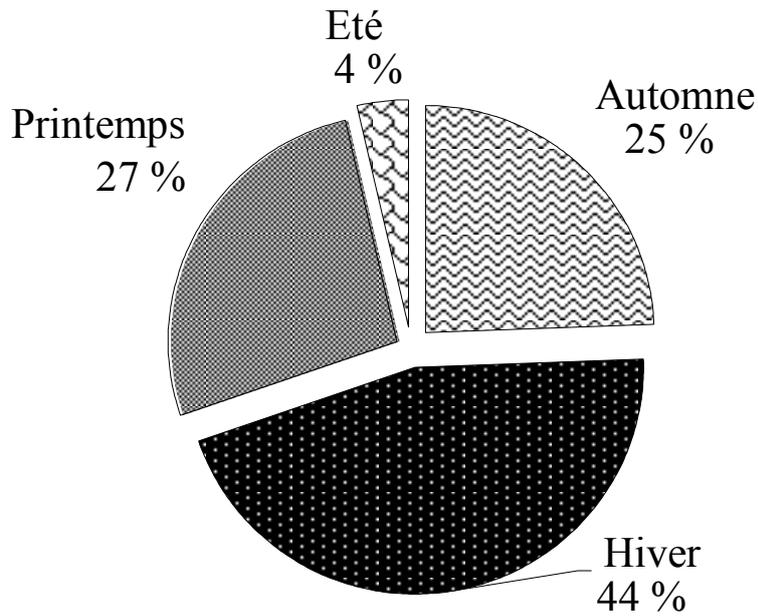


Figure 4-21 : Pourcentage de chute en apport solide saisonnier W_s

8 - ETUDE DE L'APPORT SOLIDE ANNUEL EN FONCTION DU DEBIT LIQUIDE ANNUEL

L'apport solide, étant généré par le débit liquide. Il est intéressant, de faire ressortir la relation reliant les deux paramètres.

1- Période 1971-1988

Pour une corrélation, très significative $R^2 = 0,98$ (figure 4-22). L'équation, liant les deux paramètres, est donnée par :

$$W = 0,11 Q_1 - 0,046 \quad (4.19)$$

W = Apport solide annuel (10^6 m^3).

Q_1 = Débit liquide annuel (m^3/s)

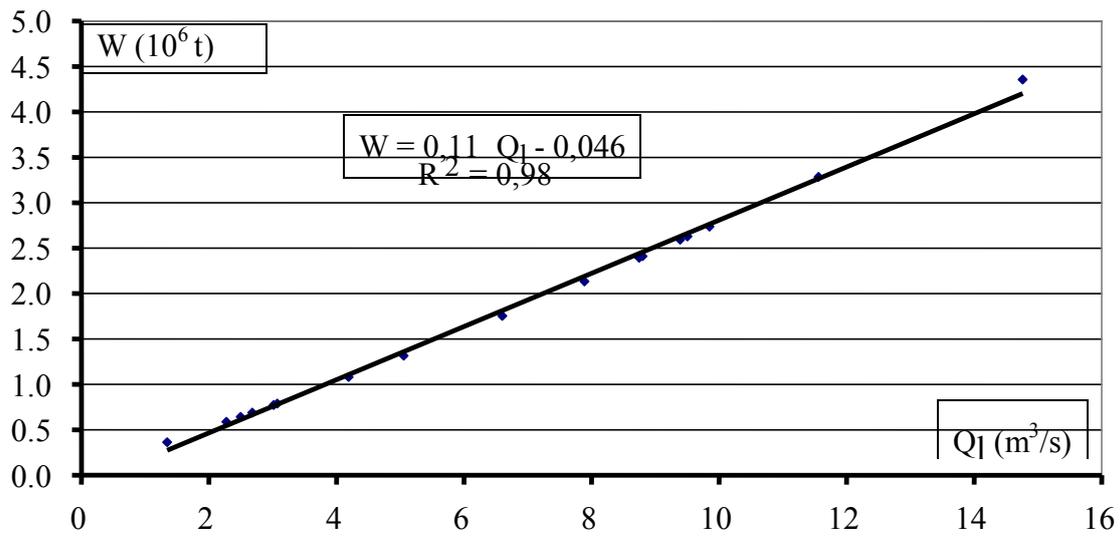


Figure 4-22 : Apport solide annuel W en fonction du débit liquide annuel Q₁ / 71-88

2- Période 1988-1995

Pour une corrélation, très significative $R^2 = 0,98$ (figure 4- 22). L'équation, liant les deux paramètres est donnée par :

$$W = 0,19 Q_1 - 0,084 \tag{4.20}$$

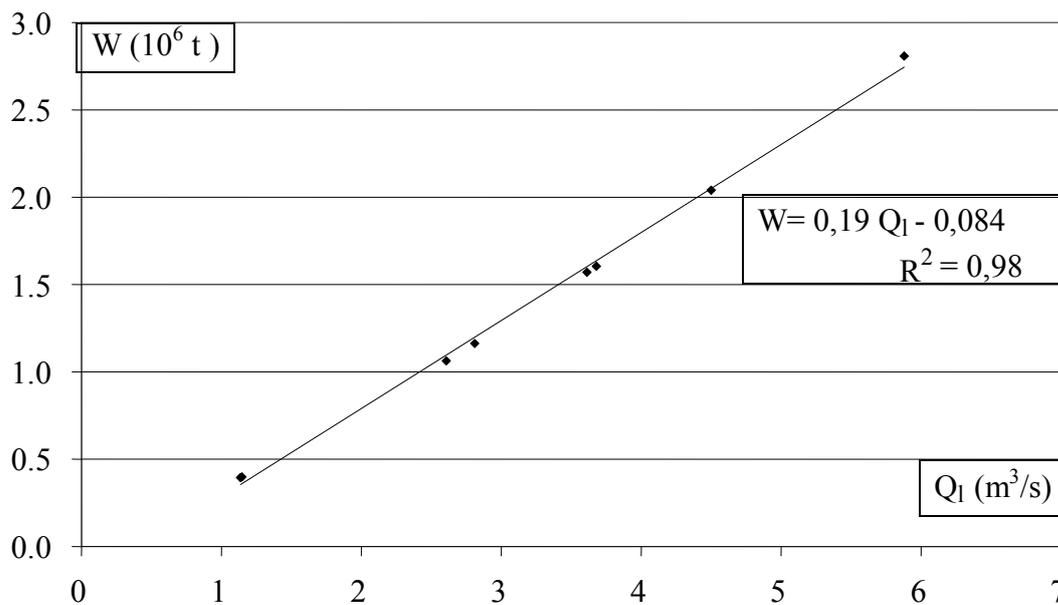


Figure 4-23 : Apport solide annuel W en fonction du débit liquide annuel Q₁ / 88-95

9 - ETUDE DE L'APPORT SOLIDE ANNUEL EN FONCTION DE L'APPORT LIQUIDE ANNUEL

Les deux paramètres, les plus intéressants lors du dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, étant l'apport liquide et l'apport solide. Il est intéressant, de retrouver une relation liant ces deux derniers. L'étude donne les résultats suivants :

1- Période 1971-1988

Pour une corrélation, très significative, $R^2 = 0,99$ (figure 4-24). L'équation liant les deux paramètres, est donnée par :

$$W = 0,0036 A_{pp} - 0,0498 \quad (4.21)$$

W = Apport solide annuel (10^6 m^3).

A_{pp} = Apport liquide annuel (10^6 m^3).

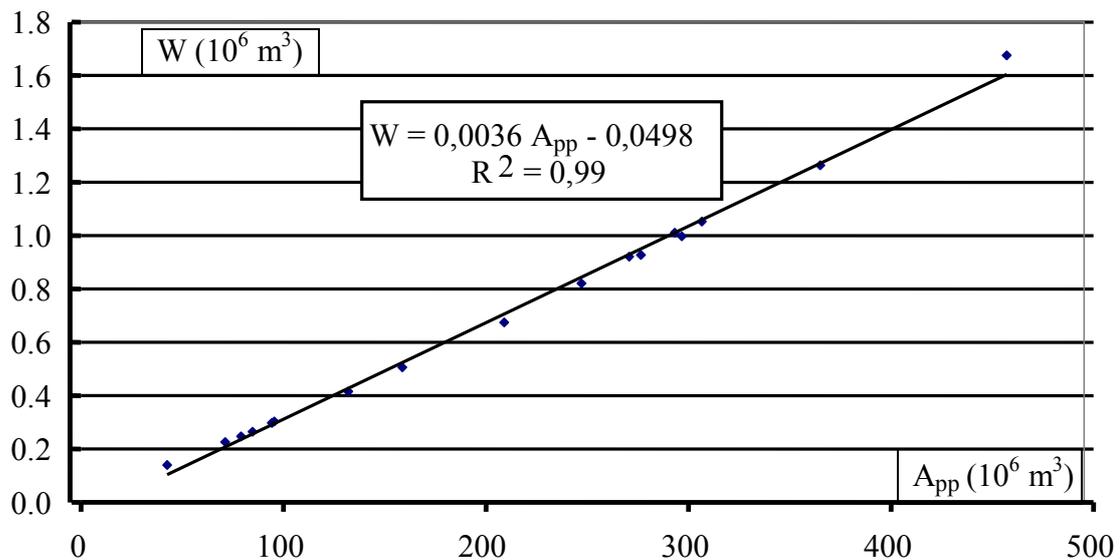


Figure 4-24 : Apport solide annuel W en fonction de l'apport liquide annuel A_{pp} / 71-88

2- Période -1988-1995

Pour une corrélation très significative, $R^2 = 0,99$ (figure 4-25). L'équation liant les deux paramètres, est donnée par :

$$W = 0,0061 A_{pp} - 0,081 \quad (4.22)$$

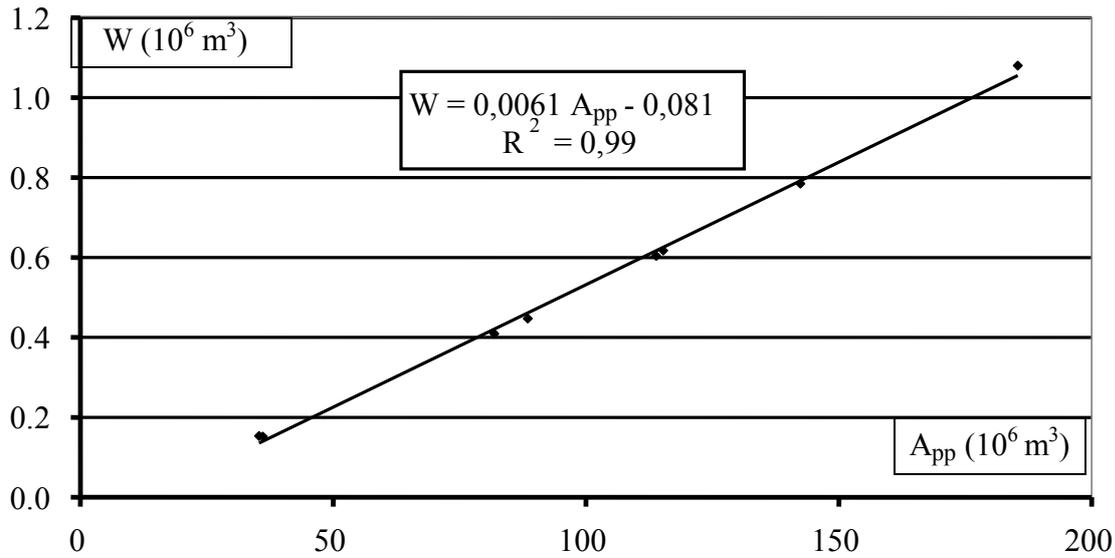


Figure 4-25 : Apport solide annuel W en fonction de l'apport liquide annuel A_{pp} / 88-95

10 - ETUDE DES DEBITS SPECIFIQUES D'EROSION

10-1 Débit spécifique d'érosion calculé E_s

10-1-1 Calcul du débit spécifique d'érosion.

Selon Remini [2005], on ne commettra pas de grande erreur, en calculant l'envasement à partir de l'érosion spécifique.

Donc on peut écrire

$$E_s = W / S \quad (4.23)$$

$$W = G_t t \quad (4.24)$$

W = Apport solide annuel (10⁶ t).

S = Surface du bassin versant (km²).

E_s = Débit spécifique d'érosion (t / km² / an).

G_t = Apport solide total (kg/s)

Dans le tableau 4-13, sont résumés les résultats.

Tableau 4-13 : Débit spécifique calculé E_S

ANNEE	Q_l (m ³ /s)	E_S (t/km ² /an)
71	9,39	648,2
72	14,76	1089,1
73	8,8	602,6
74	3,072	197,0
75	7,89	533,5
76	4,19	270,1
77	2,274	147,0
78	3,015	193,4
79	2,498	160,8
80	5,055	328,9
81	9,504	657,1
82	6,6	438,3
83	8,747	598,5
84	11,56	821,1
85	2,68	172,2
86	9,85	684,2
87	1,344	90,8
88	3,613	784,9
89	1,137	197,4
90	2,607	531,6
91	2,81	581,4
92	4,5	1020,1
93	1,147	199,5
94	5,88	1404,0
95	3,68	802,3

10-1-2 Etude du débit spécifique d'érosion en fonction du temps

La représentation du débit spécifique E_S , en fonction du temps (figure 4-26), fait ressortir sa grande irrégularité. On remarque, sa nette augmentation à partir de 1988. Malgré cette augmentation, les quantités de solides qui arriveront à Sidi-Yahia, seront plus petites pour la période 1988-1995 que pour la période 1971-1988, car la surface du bassin versant a diminué. En effet, elle est passée de 3980 km² pour la période 71-88, à 2100 km² pour la période 88-95.

L'augmentation de E_s , n'est pas due à une augmentation de production des matériaux solides, mais plutôt au changement des caractéristiques hydrologiques et physiques du bassin versant, à partir de 1986, date de mise en eau de la retenue d'Ain-Zada.

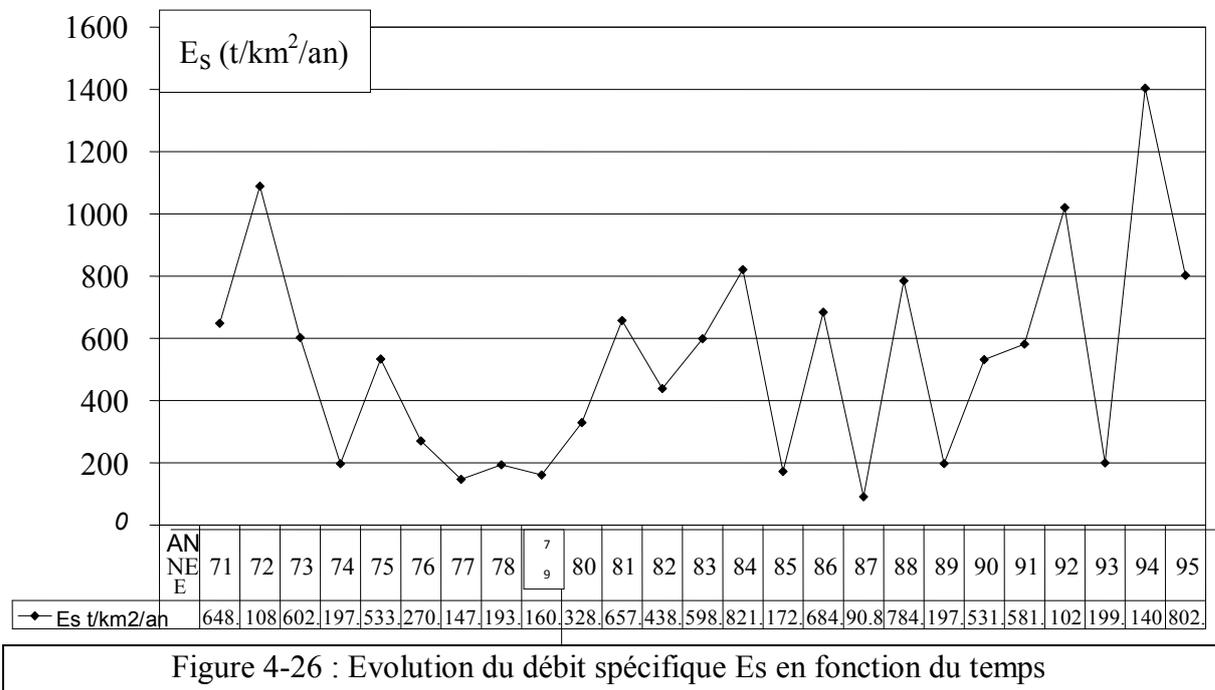
Le débit spécifique moyen annuel calculé est égal à :

- i- période 1971-1988.

$$E_s = 449 \text{ t/km}^2/\text{an}$$

- ii- période 1988-1995.

$$E_s = 690 \text{ t/km}^2/\text{an}$$



10-2 Calcul du débit spécifique d'érosion par la méthode de Tixeront

La méthode de Tixeront, est basée sur les données recueillies dans 32 bassins versants d'Algérie et 9 bassins Tunisien. Les superficies, varient de 90 à 22300 Km² et les observations, portent sur une durée variant, de 2 à 22 années.

Le débit spécifique, est donné par :

- i- Bassin versant appartenant à l'Est Algérien.

$$E_{Tix} = 92 E_c^{0,21} \tag{4.25}$$

- ii- Bassin versant appartenant au centre Algérien

$$E_{Tix} = 2000 \tag{4.26}$$

E_{Tix} = Débit spécifique d'érosion moyen annuel (t/km²/an).

E_c = Ecoulement annuel (mm).

Les résultats, sont résumés dans le tableau 4-14.

ANNEE	Q_1 (m ³ /s)	E_{Tix} (t/km ² /an)
71	9.39	667.7
72	14.76	712.5
73	8.8	660.7
74	3.072	563.3
75	7.89	649.7
76	4.19	591.4
77	2.274	539.1
78	3.015	562.2
79	2.498	547.6
80	5.055	607.9
81	9.504	666.6
82	6.6	633.6
83	8.747	658.6
84	11.56	688.8
85	2.68	553.3
86	9.85	671.0
87	1.344	499.0
88	3.613	578.4
89	1.137	486.8
90	2.607	550.5
91	2.81	556.9
92	4.5	598.1
93	1.147	485.3
94	5.88	622.3
95	3.68	579.5

La figure (4-27), représente l'évolution du débit spécifique « Tixeront », en fonction du temps. On remarque, que les variations interannuelles, sont faibles.

Le débit spécifique d'érosion moyen annuel, selon la relation de Tixeront est égal à :

i- pour la période 1971-1988.

$$E_{Tix} = 616 \text{ t/km}^2/\text{an}$$

ii- pour la période 1988-1995

$$E_{Tix} = 557,3 \text{ t/km}^2/\text{an}$$

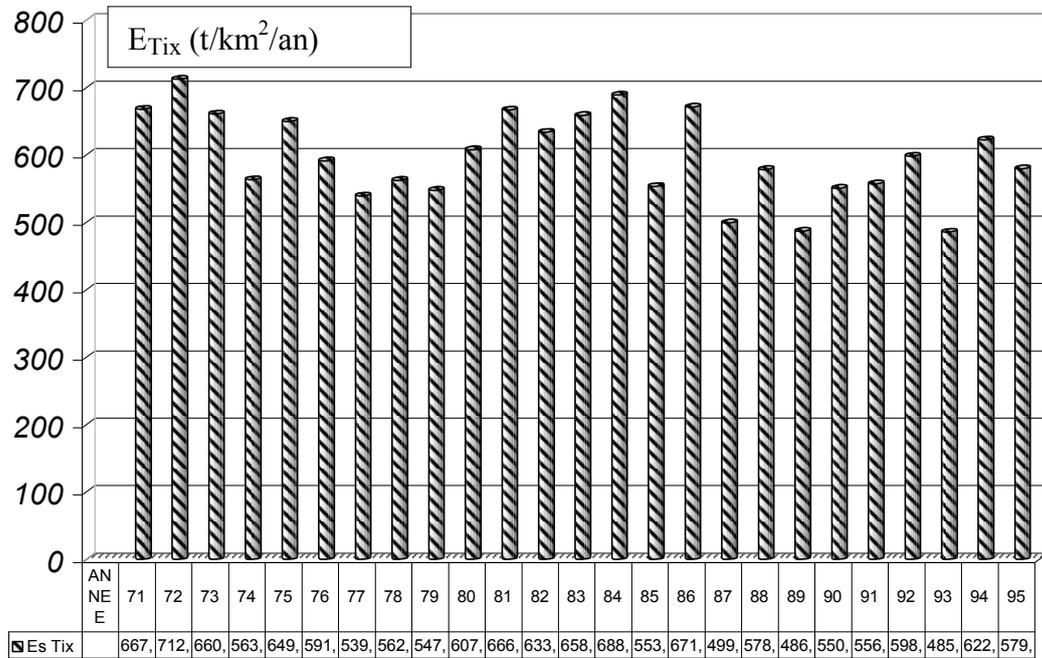


Figure 4-27 : Evolution du débit spécifique E_{Tix} en fonction du temps

10-3 Calcul du débit spécifique d'érosion par la méthode de Fournier

Le débit spécifique d'érosion, est donné par :

i- Cas d'un relief peu accidenté.

$$E_{Four} = 6,14 (P_J)^2 / P - 49,78 \quad 8,1 < (P_J)^2 / P < 20 \quad (4.27)$$

$$E_{Four} = 27,12 (P_J)^2 / P - 475,4 \quad (P_J)^2 / P > 20 \quad (4.28)$$

ii- Cas d'un relief accidenté.

$$E_{Four} = 52,49 (P_J)^2 / P - 513,21 \quad (P_J)^2 / P > 9,7 \quad (4.29)$$

$$E_{Four} = 91,78 - (P_J)^2 / P - 737,62 \quad (P_J)^2 / P < 8 \quad (4.30)$$

P = Pluie moyenne annuel (mm).

P_J = Pluie journalière maximale (mm).

E_{Four} = Débit spécifique d'érosion (t/km²/an).

Les résultats, sont résumés dans le tableau 4-15.

Tableau 4-15 : Débit spécifique Fournier E_{Four}		
ANNEE	Q_I (m ³ /s)	E_{Four} (t /km ² /an)
71	9.39	1575.5
72	14.76	1137.0
73	8.8	638.4
74	3.072	168.6
75	7.89	366.7
76	4.19	526.3
77	2.274	196.5
78	3.015	226.8
79	2.498	508.3
80	5.055	2234.2
81	9.504	1087.7
82	6.6	554.1
83	8.747	624.5
84	11.56	840.3
85	2.68	462.9
86	9.85	1611.2
87	1.344	409.8
88	3.613	386.8
89	1.137	209.3
90	2.607	551.3
91	2.81	337.0
92	4.5	892.1
93	1.147	138.4
94	5.88	648.1
95	3.68	864.7

La figure (4-28), illustre l'évolution du débit spécifique d'érosion E_{Four} , en fonction du temps. On remarque, que le débit spécifique maximal, atteint ses valeurs maximales 1575,2 t/km²/an en 1971, 2234,2 t/km²/an en 1980 et 1611,2 t/km²/an en 1986. En effet, à ces

années correspondent les plus importantes pluies journalières maximales. Ces dernières, étant très influentes dans la formule de Fournier.

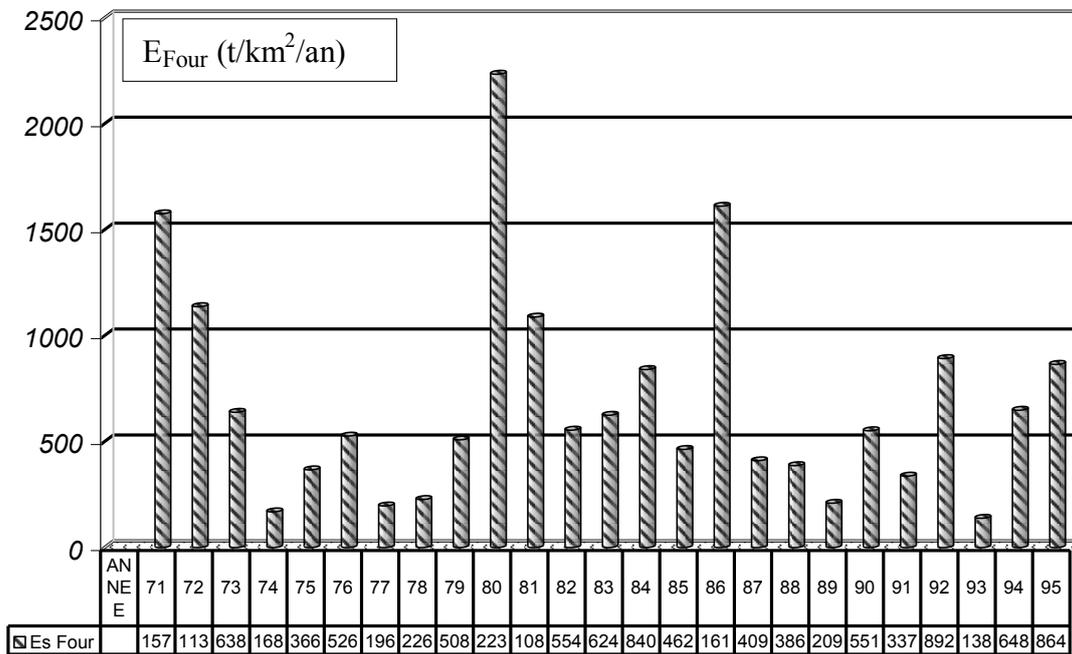


Figure 4-28 : Evolution du débit spécifique E_{Four} en fonction du temps

Le débit spécifique d'érosion moyen annuel, selon la relation de Fournier est égal à :

i- pour la période 1971-1988.

$$E_{Four} = 774,6 \text{ t/km}^2/\text{an}$$

ii- pour la période 1988-1995

$$E_{Four} = 503,4 \text{ t/km}^2/\text{an}$$

10-4 Comparaison des différents débits spécifiques d'érosion

Dans le tableau (4-16), sont récapitulés les trois débits spécifiques.

période	Es (t/km ² /an)	E _{Tix} (t/km ² /an)	E _{Four} (t/km ² /an)
71-87	449	616	714,3
88-95	690	557,3	503,4

Les débits spécifiques d'érosion, présentent quelques différences, dues certainement au fait, qu'ils sont calculés à partir de l'apport solide total.

10-5 Etude du débit spécifique d'érosion à l'échelle saisonnière

10-5-1 Etude globale

Afin, de faire ressortir la saison la plus productive, en matériaux solides. On mène, une étude du débit spécifique d'érosion, à l'échelle saisonnière. Les résultats, sont récapitulés dans le tableau 4-17.

Tableau 4-17 : Débit spécifique d'érosion saisonnier Ess

Période	1971-1988	1988-1995
Saison	Ess (10^6 t/km ²)	Ess (10^6 t/km ²)
Automne	92,1	106,5
Hiver	178,8	214,8
Printemps	111,9	139,5
Eté	17,1	22,7

La représentation, du débit spécifique d'érosion saisonnier (figure 4-29), fait ressortir les faits suivants :

L'année la plus érosive, pour les deux périodes 1971-1988 et 1988-1995, est l'hiver ; Avec respectivement, 178,8 t/km² et 214,8 t/km², pour les deux périodes ; Suivie, par la saison du printemps, avec 111,9 t/km² et 139,5 t/km², puis vient l'automne, avec 92,1 t/km² et 106,5 t/km² et enfin l'été, avec 17,1 t/km² et 22,7 t/km². En effet, en automne une partie des débits est infiltré, étant donné que le sol est sec après une longue période estivale sèche ; Puis le débit liquide, augmente en hiver et avec lui le débit solide.

10-5-2 Etude de la variation du débit spécifique d'érosion saisonnier

On remarque. Comme à l'échelle annuelle, pour la période 1988-1995, l'augmentation des taux d'érosion saisonnier Ess, En termes de pourcentage (figure 4-30), la plus grande variation du débit spécifique, correspond à l'hiver, avec 43 %, vient l'automne, avec 17%, puis le printemps, avec 33 % et l'été, avec une augmentation de 7 %.

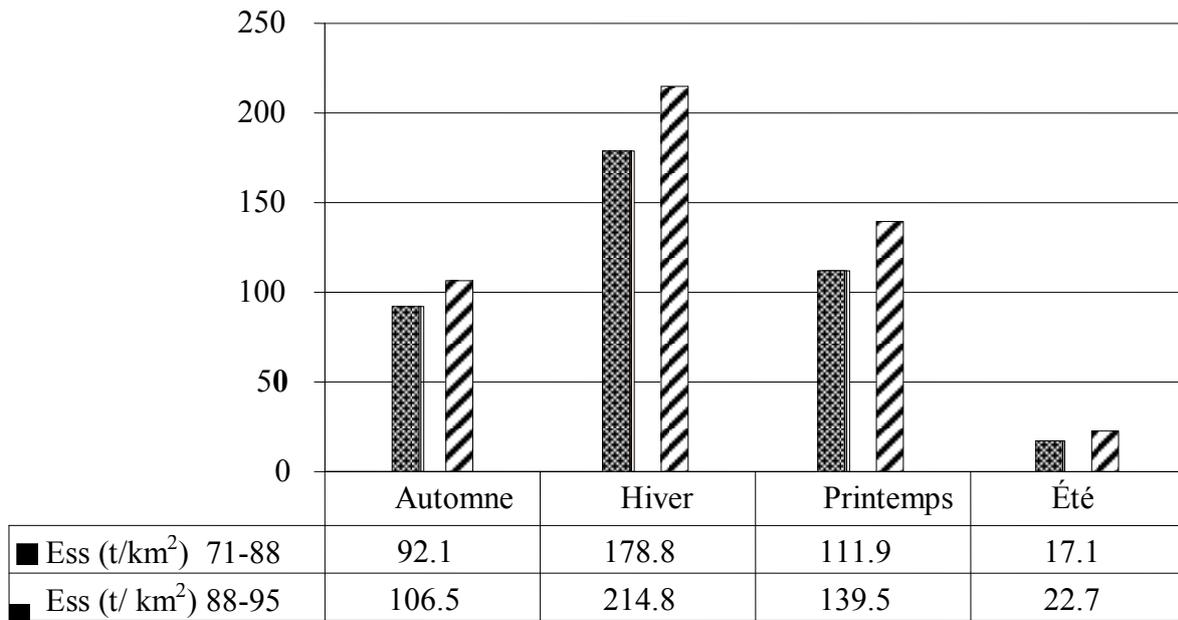


Figure 4-29 : Variation du débit spécifique d'érosion saisonnier Ess

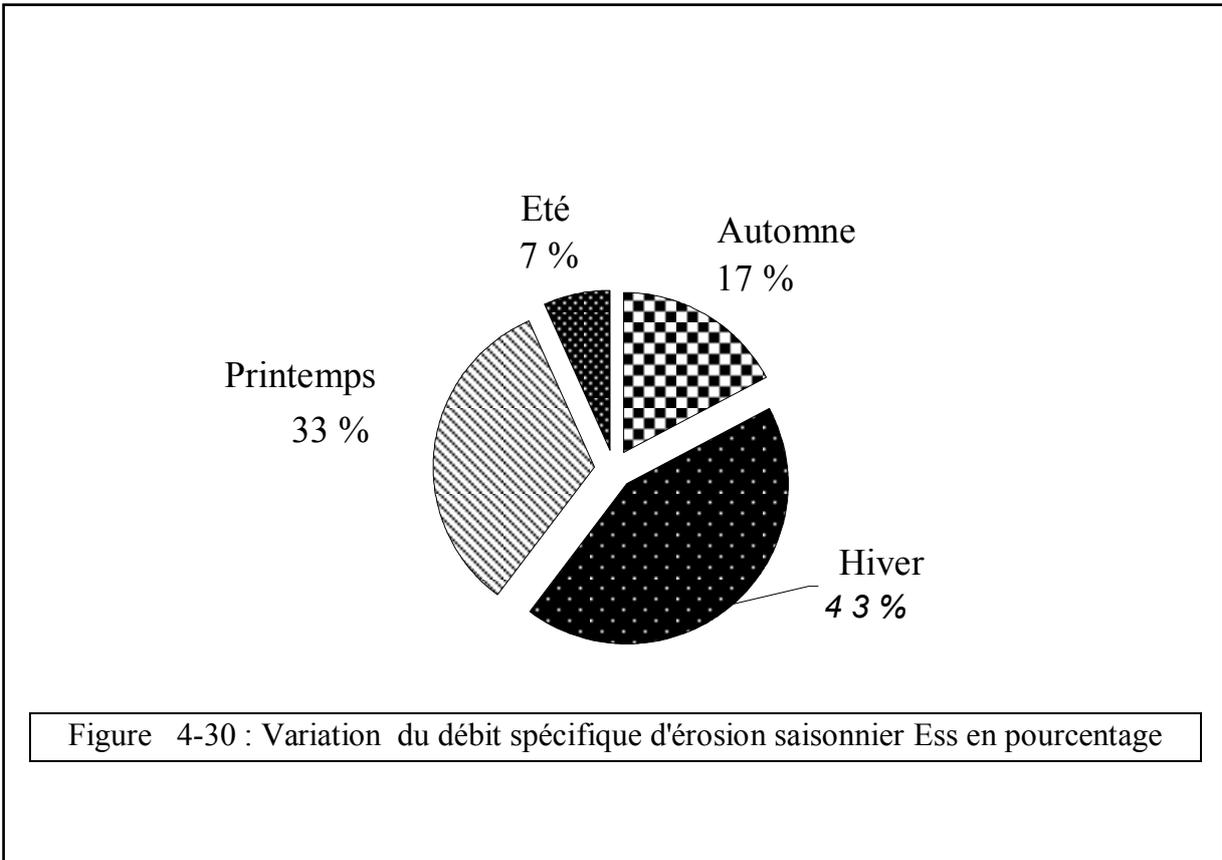


Figure 4-30 : Variation du débit spécifique d'érosion saisonnier Ess en pourcentage

11 - RELATIONS ENTRE LE DEBIT SPECIFIQUE D'EROSION ET DIFFERENTS PARAMETRES

11-1 Relation entre le débit spécifique d'érosion et la pluie annuelle

Il est intéressant, d'observer l'effet de la pluviométrie sur le taux d'érosion. On représente pour cela, la courbe reliant les deux paramètres. L'équation obtenue, est de type linéaire.

i- Période 1971-1988 :

Pour une corrélation $R^2 = 0,74$, l'équation est donnée (figure (4-31)) par :

$$E_s = 2,91 P - 854,62 \quad (4.31)$$

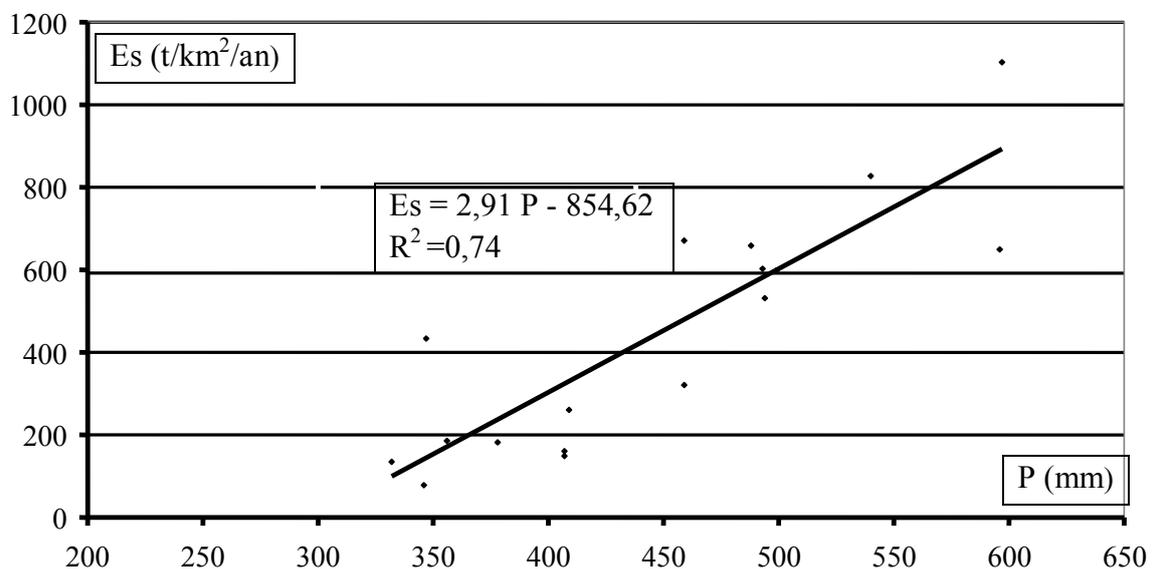


Figure 4-31 : Variation du débit spécifique E_s en fonction de la pluie annuelle P / 71-88

ii- Période 1988-1995 :

Pour une corrélation $R^2 = 0,66$, l'équation est donnée (figure (4-32)) par :

$$E_s = 1,55 P - 219,28 \quad (4.32)$$

E_s = Débit spécifique d'érosion ($t/km^2/an$).

P = Pluie moyenne annuel (mm).

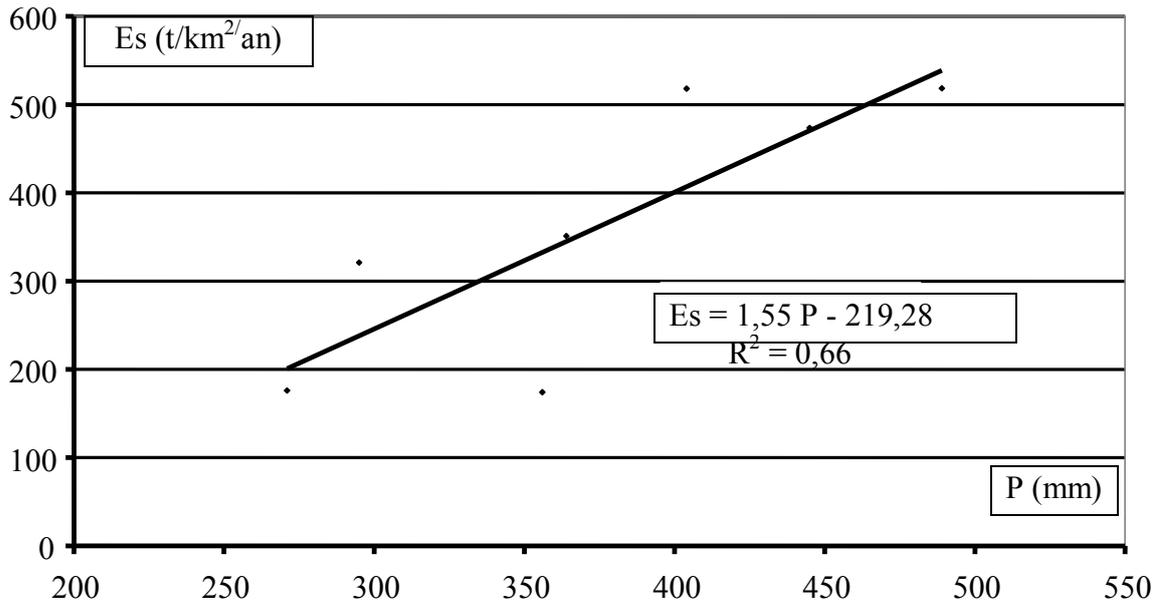


Figure 4-32 : Variation du débit spécifique E_s en fonction de la pluie annuelle / 88-95

11-2 Relation entre le débit spécifique d'érosion E_s et l'indice climatique de Fournier

En essayant, de traduire l'abondance pluviométrique et l'inégalité de la répartition des pluies dans l'année. On représente, le débit spécifique E_s en fonction du coefficient climatique $(P_j)^2 / P$; Défini, comme étant, le rapport du carré de la pluviométrie du mois le plus humide et la pluviométrie moyenne annuelle.

i- Période 1971-1988 :

La relation est donnée (figure (4-33), pour une corrélation $R^2 = 0,65$ par :

$$E_s = 24,16 (P_j)^2 / P - 118,35 \quad (4.33)$$

E_s = Débit spécifique d'érosion (t/km²/an).

P = Pluie moyenne annuelle (mm).

P_j = Pluie journalière maximale (mm).

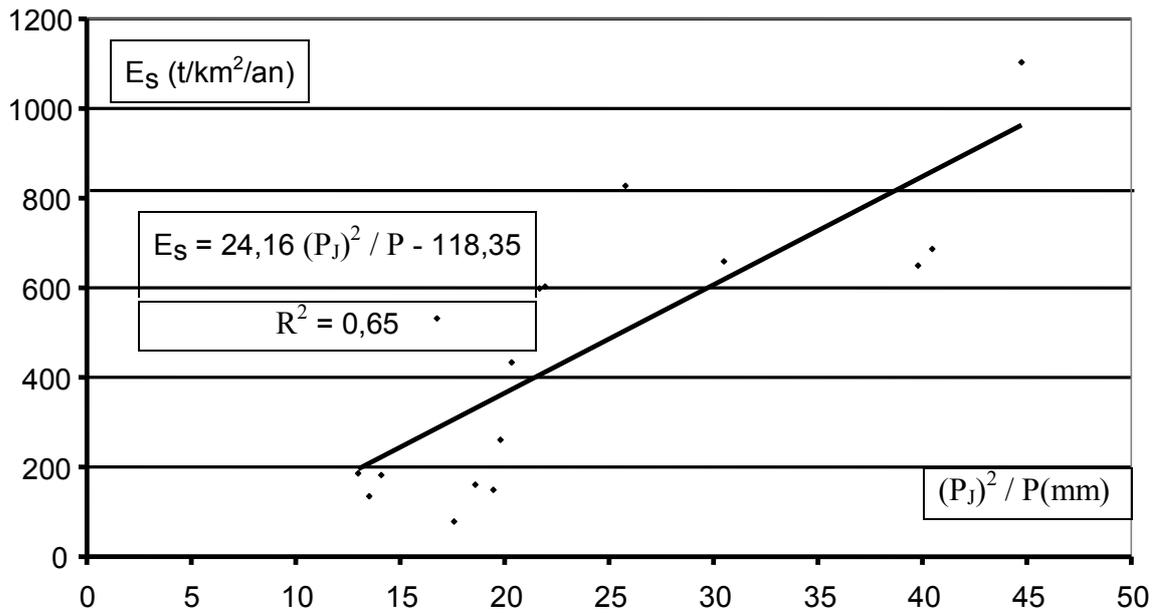


Figure 4-33 : Variation du débit spécifique E_S en fonction de l'indice climatique / 71-88

ii- Période 1988-1995 :

La relation est donnée (figure (4-34), pour une corrélation $R^2 = 0,87$ par :

$$E_S = 55,4 (P_j)^2 / P - 546,82 \tag{4.34}$$

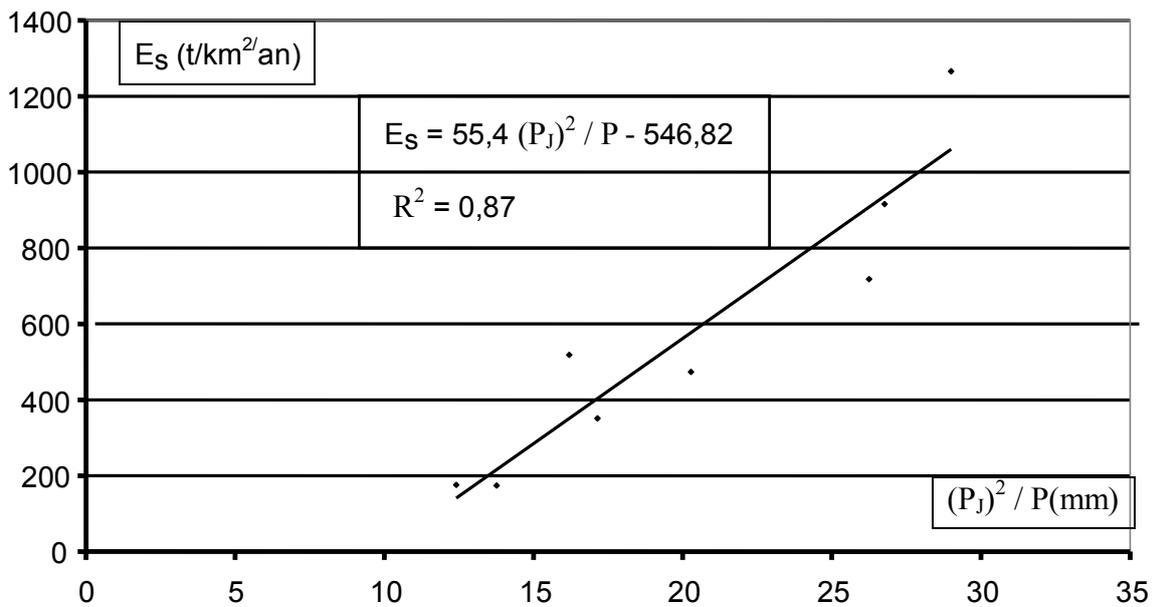


Figure 4-34 : Variation du débit spécifique E_S en fonction de l'indice climatique / 88-95

11-3 Etude de l'érosion spécifique en fonction de la lame ruisselée

Cette étude, est menée dans le but, de rechercher un modèle explicatif du transport solide en fonction et de l'un des paramètres le conditionnant, à savoir la lame ruisselée ; Qui elle même, est conditionnée par la pluviométrie, la nature du sol et le couvert végétal.

i- Période 1971-1988 :

Pour une très bonne corrélation $R^2 = 0,98$. L'équation liant les deux paramètres, est donnée (figure (4-35)) par :

$$E_s = 9,40 L_r - 32,34 \quad (4.35)$$

E_s = Débit spécifique d'érosion ($t/km^2/an$).

L_r = Lame ruisselée (mm).

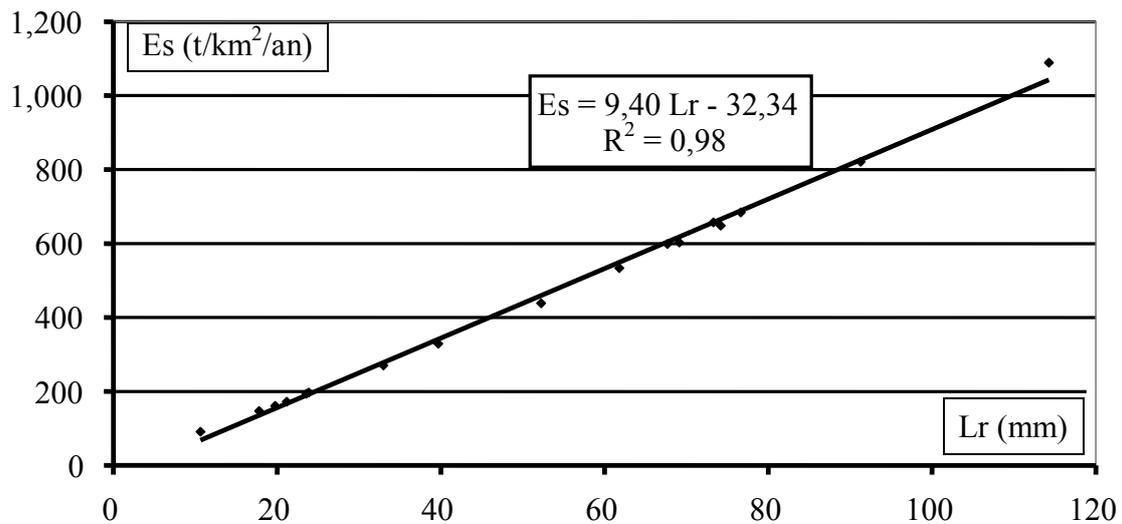


Figure 4-35 : Variation du débit spécifique E_s en fonction de la lame ruisselée L_r / 71-88

ii- Période 1988-1995 :

Pour une très bonne corrélation $R^2 = 0,97$. L'équation liant les deux paramètres, est donnée (figure (4-36)) par :

$$E_s = 15,93 L_r - 105,35 \quad (4.36)$$

E_s = Débit spécifique d'érosion ($t/km^2/an$).

L_r = Lame ruisselée (mm).

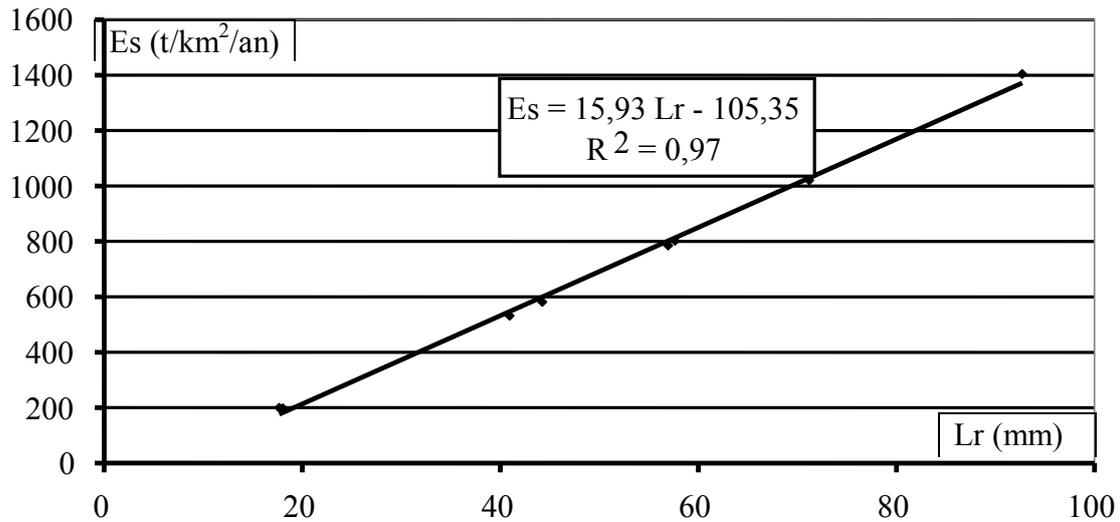


Figure 4-36 : Variation du débit spécifique Es en fonction de la lame ruisselée Lr / 88-95

Conclusion

A la fin de cette étude, on peut conclure ce qui suit ;

- Le débit et l'apport solides, sont très irréguliers.
- L'apport solide, se fait essentiellement en hiver et au printemps.
- Le débit et l'apport solide, ont connu une diminution, à cause de la retenue d'Ain-Zada.
- Le bassin versant de Boussellam, fait parti des bassins les moins érodables.
- L'essentiel des chutes en apport solide, se fait aux mois de janvier, février et mars.
- Le débit spécifique a augmenté, suite au changement des caractéristiques du bassin versant.
- La surface du bassin versant, n'influence pas le débit spécifique, mais intervient dans les quantités des sédiments transportés.

Chapitre 5

EXPLOITATION DES

RESULTATS

1 - INTRODUCTION

Le barrage de Tichy-Haf, est situé sur l'oued Boussellam, à 7 Km à l'amont de la station hydrométrique de Sidi-Yahia. La surface du bassin versant au site du barrage, est de 3890 Km². La surface intermédiaire, entre Tichy-Haf et Sidi-Yahia, étant très petite par rapport à cette valeur. Il est possible de reprendre pour Tichy-Haf, les données de la station hydrométrique de Sidi-Yahia.

2 - ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA RETENUE D'AIN-ZADA SUR LES APPORTS LIQUIDES DE LA RETENUE DE TICHY-HAF

Afin, de pouvoir étudier la variation de l'apport liquide sur une période de 10 années, au niveau du barrage de Tichy-Haf. On dresse le tableau 5-1.

Année	App _{cum1}	App _{cum2}	Δ App _{cum}	Δ App _{cum} /App _{cum2} (%)
88	158,66	55,56	103,1	65
89	344,68	155,58	189,1	55
90	530,7	255,6	275,1	52
91	716,72	355,62	361,1	50
92	902,74	455,64	447,1	50
93	1088,76	555,66	533,1	49
94	1274,78	655,68	619,1	49
95	1460,8	755,7	705,1	48
96	1646,82	855,72	791,1	48
97	1832,84	955,74	877,1	48
98	2018,86	1055,76	963,1	48

L'apport liquide cumulé App_{cum1} pour la période 1971-1988, est donné par l'équation (3-1).

$$\text{App}_{\text{cum1}} = 186,02 t - 12732$$

App_{cum1} = Apport liquide cumulé ($10^6 m^3$).

App_{cum1} = Apport calculé, en l'absence de la retenue d'Ain-Zada.

L'apport liquide cumulé App_{cum2} pour la période 1988-1995, est donné par l'équation (3.2).

$$App_{cum2} = 100,04 t - 8746,2$$

App_{cum2} = Apport cumulé ($10^6 m^3$).

App_{cum2} = Apport calculé en la présence de la retenue d'Ain-Zada.

ΔApp_{cum} = $App_{cum1} - App_{cum2}$

ΔApp_{cum} = Perte annuelle en apport liquide cumulé. ($10^6 m^3$).

$\Delta App_{cum1}/App_{cum2}$ = Pourcentage de perte en apport liquide cumulé.

La visualisation, de l'ensemble des points ΔApp_{cum} en fonction du temps (figure5-1), permet d'identifier l'allure du graphe. Pour une corrélation $R^2 = 0,97$, la perte annuelle en apport liquide cumulé, est donnée par l'équation :

$$\Delta App_{cum} = 86 t - 7464,9 \quad (5.1)$$

t = Temps en année ($t \geq 88$)

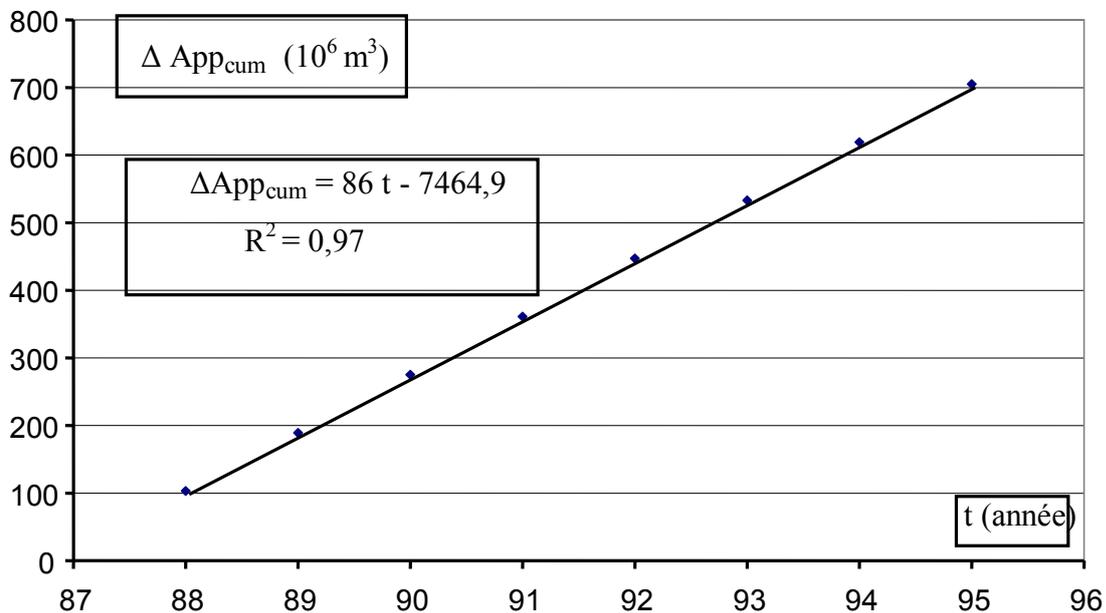


Figure 5-1 : Evolution de la perte en apport liquide annuel cumulé ΔApp_{cum} en fonction du temps

L'équation (5.1), permet de calculer la perte en apport liquide cumulé, au niveau du barrage de Tichy-Haf, pour une année donné.

Conclusion :

Sur une période de 10 ans, la perte en apport liquide cumulé au niveau de Tichy-Haf, est estimée à $963,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Ceci, est équivalent à une perte moyenne annuelle, de $96,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$; Soit un pourcentage moyen annuel, égal à 51 %.

3 - ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA RETENUE D'AIN-ZADA SUR LES APPORTS SOLIDES DU BARRAGE DE TICHY-HAF

Afin, de pouvoir étudier la variation de l'apport solide, au niveau du barrage de Tichy-Haf, sur une période de 10 années. On dresse le tableau 5-2.

Année	W_{cum1}	W_{cum2}	ΔW_{cum}
1988	5,84	4,98	0,86
1989	6,46	5,51	0,95
1990	7,08	6,04	1,04
1991	7,7	6,57	1,13
1992	8,32	7,1	1,22
1993	8,94	7,63	1,31
1994	9,56	8,16	1,4
1995	10,18	8,69	1,49
1996	10,8	9,22	1,58
1997	11,42	9,75	1,67
1998	12,04	10,28	1,76

L'apport solide cumulé W_{cum1} pour la période 1971-1988, est donné par l'équation (4.17) :

$$W_{\text{cum1}} = 0,62 t - 1220,79$$

W_{cum1} = Apport solide cumulé (10^6 m^3).

W_{cum1} = Apport solide cumulé, calculé en l'absence de la retenue d'Ain-Zada.

L'apport solide cumulé W_{cum2} pour la période 1988-1995, est donné par l'équation (4.18) :

$$W_{cum2} = 0,53 t - 1048,66$$

W_{cum2} = Apport solide cumulé ($10^6 m^3$).

W_{cum2} = Apport solide cumulé, calculé en la présence de la retenue d'Ain-Zada.

$$\Delta W_{cum} = W_{cum1} - W_{cum2}$$

ΔW_{cum} = Chute en apport solide cumulé annuel ($10^6 m^3$).

Le tracé de la courbe, représentant la variation de l'apport solide cumulé ΔW_{cum} , en fonction du temps (figure 5-2), permet de donner pour une corrélation $R^2 = 0,98$, l'équation :

$$\Delta W_{cum} = 0,09 t - 178,06 \quad (5.2)$$

t = Temps en année ($t \geq 1988$)

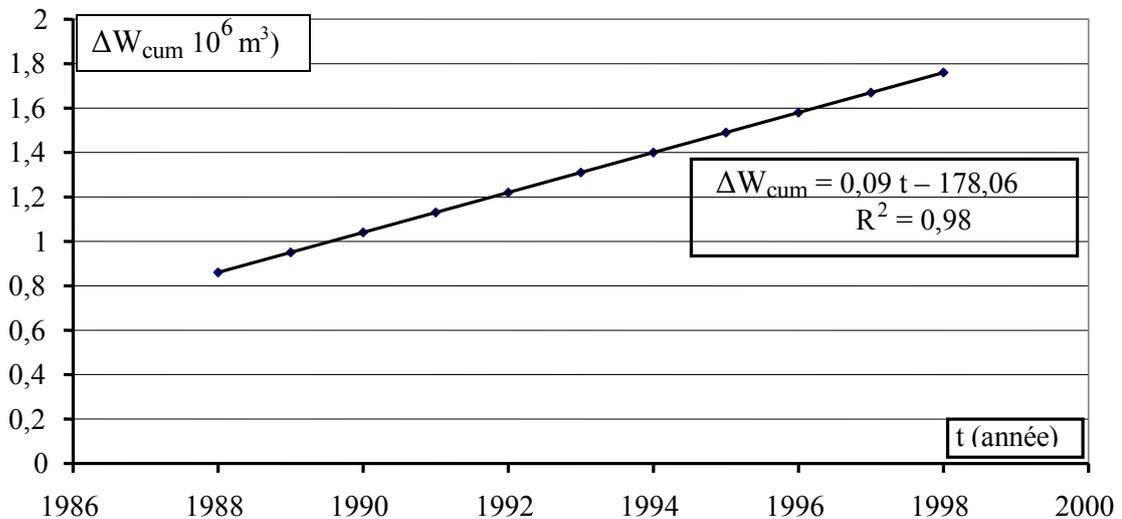


Figure 5-1 : Evolution de la chute en apport solide annuel cumulé ΔW_{cum} en fonction du temps

L'équation (5-1), permet de calculer la chute en apport solide, au niveau du barrage de Tichy-Haf, sur une période donnée.

Sur une période de 10 ans. La chute en apport solide au niveau de la station de Sidi-Yahia, est $\Delta W_{cum} = 1,76 10^6 m^3$, c'est-à-dire une chute moyenne annuelle de $0,176 10^6 m^3/an$.

4 - DETERMINATION DU GAIN EN DUREE DE VIE DU BARRAGE DE TICHY-HAF

Si l'on considère que la durée de vie d'un barrage, est la période pour laquelle sa capacité est supérieure à 50 % de sa capacité initiale. On peut écrire :

En l'absence de la retenue d'Ain-Zada, l'apport solide annuel cumulé est donné par l'équation (4.17) :

$$W_{cum} = 0,62 t - 1220,79$$

En présence de la même retenue, il est donné par l'équation (4.18) :

$$W_{cum} = 0,53 t - 1048,66$$

t = Temps en année.

Considérant, qu'une retenue est complètement envasée pour un comblement de 50 % de son volume. On déduit des 2 équations précédentes que, pour un volume de $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ la durée de vie du barrage de Tichy -Haf est :

En l'absence de retenue d'Ain-Zada : t = 62 ans.

En présence de la même retenue : t = 85 ans.

Soit, un gain en durée de vie égal à 23 ans.

La présence, de la retenue d'Ain-Zada, permet de prolonger la vie du barrage de Tichy – Haf, d'une durée de 23 ans.

CONCLUSION

L'étude, a fait ressortir la grande variabilité annuelle et saisonnière, des écoulements liquides et solides et ce pour les débits et pour les apports.

Dans la première partie de l'étude, l'analyse des écoulements extrêmes, axée sur le débit liquide maximal et le débit liquide minimal, a mis en évidence les faits suivants :

- Le caractère torrentiel des crues, dû principalement aux fortes précipitations durant la période 1971-1988.
- La nette diminution du débit liquide maximal à partir de 1988. Ceci, est dû à la mise en eau de la retenue d'Ain-Zada, qui joue le rôle d'atténuateur de crue. En effet, la valeur maximale pour la période 1971-1988, est de $902 \text{ m}^3/\text{s}$, elle n'est que de $330 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la période 1988-1995 ; C'est-à-dire que les deux débits liquides extrêmes, sont dans un rapport égal à 2,73. Cette valeur, révèle l'effet très bénéfique de la retenue d'Ain-zada sur celle de Tichy-Haf.
- A partir de 1988, les étiages ont nettement diminué. Le Boussellam, qui n'a jamais connu de tarissement durant la période 1971-1988, connaît durant la période 1988-1995, plusieurs tarissements.
- La moyenne de chacun des deux débits liquides maximal et minimal pour la période 88-95, est égal pratiquement à la moitié de ceux de la première période (71-88).

La grande variabilité interannuelle du débit liquide moyen annuel, reflète le régime irrégulier du cours d'eau. En effet, pour la période 1971-1988, le maximum moyen annuel ($14,76 \text{ m}^3/\text{s}$) et le minimum moyen annuel ($1,39 \text{ m}^3/\text{s}$), sont dans un rapport égal à 11 ; Pour la période 1988-1995, le maximum moyen annuel ($5,88 \text{ m}^3/\text{s}$) et le minimum moyen annuel ($1,14 \text{ m}^3/\text{s}$), sont dans un rapport égal à 5. Cette grande irrégularité, est confirmée par la grande disparité du coefficient de variation. Ce dernier, passe de 0,22 à 2,46 durant la période 71-88 et de 0,36 à 1,85 durant la période 88-95.

La moyenne du débit liquide annuel pour la période 71-88, est de $6,54 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour la période 88-95, elle tombe pratiquement de moitié et passe à $3,17 \text{ m}^3/\text{s}$.

Quant aux apports liquides. L'étude, fait émerger leur grande variabilité annuelle et saisonnière. Pour la période 71-88, l'apport liquide annuel maximal enregistré est de $457,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, le minimum connu, est de $42,54 \cdot 10^6 \text{ m}^3$; Leur rapport est égal à 11. Pour la période 88-95, l'apport liquide maximal enregistré est de $185,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, le minimum connu, est de

$35,35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$; Le rapport entre les deux apports liquides, est égal à 5. Ces chiffres, reflètent la forte irrégularité des apports liquides. Cette irrégularité, est confirmée par l'étude du coefficient de l'hydraulicité En effet, ce dernier fluctue entre 0,35 et 2,12, pour la période 71-88 et entre 0,36 et 1,85, pour la période 88-95.

Concernant, le déficit en apport liquide annuel. Ce dernier, était de $204,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour la période 71-88, il est passé à $103 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour la période 88-95, soit une perte annuelle de $101,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ce qui représente 50 % de l'apport liquide total.

A l'échelle saisonnière. L'essentiel des apports liquides et ce pour les deux périodes, se fait en saisons hivernale et printanière ; Avec respectivement 87 % pour la période 71-88 et 80 % pour la période 88-95.

Concernant les apports liquides mensuels. L'étude, révèle que les gros apports se font essentiellement, durant les mois de février et mars. En effet, sur les $204,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'apports liquides reçus annuellement pour la période 71-88, $86 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sont reçus durant les deux mois suscités, ce qui représente 42 %, et sur les $103,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ reçus annuellement pour la période 88-95, $51 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sont reçus, durant les mois de janvier, février et mars ; soit un pourcentage égal à 49 %.

Aussi, l'étude a révélé que, sur les $101,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ représentant le déficit moyen annuel en apport liquide, connu par la station de Sidi-Yahia ; C'est essentiellement, entre le mois de décembre et le mois de mai, qu'il se fait. Il est égal à $79,96 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ce qui représente 80 % de la perte totale. On remarque, que les deux mois de février et mars à eux seuls, représentent une perte de $55,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit un pourcentage, égal à 54 %.

Dans sa deuxième partie. L'étude, s'intéresse au transport solide. En premier lieu, le constat est que, comme pour les écoulements liquides, les écoulements solides connaissent une très forte variabilité interannuelle et saisonnière.

Concernant le débit solide en suspension. Pour la période 71-88, le débit maximal de l'année, est de 117,6 kg/s, le débit minimal, est de 5,5 kg/s ; Leur rapport, est égal à 21,3. Pour la période 88-95, le maximum, est de 78,7 kg/s, le minimum est de 11 kg/s ; Leur rapport est 7,1. Ces chiffres, reflètent la grande variabilité annuelle, du débit solide en suspension. Ces résultats, sont confirmés par le coefficient de variabilité. En effet, ce dernier varie entre 0,1 et 2,7, durant la période 71-88 et entre 0,36 et 1,80, durant la période 88-95.

Le débit solide en suspension, a connu une diminution nette. De 44 kg/s, pour la période 71-88, il est passé à 38,6 kg/s, pour la période 88-95 ; Soit une chute de 12 %.

La grande disparité du débit solide par charriage, est illustrée par le rapport des débits extrêmes. En effet, pour la période 71-88, le maximum est de 205 kg/s, le minimum est de 6 kg/s ; Leur rapport est égal 3,5. Pour la période 88-95, le maximum est de 10,4 kg/s, le minimum est de 1,6 kg/s ; Leur rapport est donc égal à 8,5.

Le débit solide par charriage, a connu une grande chute. En effet, d'une moyenne annuelle de 12,9 kg/s, pour la période 71-88, il est passé à 52 kg/s, pour la période 88-95 ; Soit une diminution de 60 %.

Quant aux apports solides. L'étude a révélé, qu'il a connu de très grandes variations annuelles. Pour la période 71-88, l'apport solide maximal est de $4,36 \cdot 10^6$ t/an, alors que le minimal est de $0,37 \cdot 10^6$ t/an ; Leur rapport, est donc égal à 14. Pour la période 88-95, le maximum est de $2,53 \cdot 10^6$ t/an, le minimum est de $0,35 \cdot 10^6$ t/an ; Leur rapport, est donc égal à 7,2. Ces chiffres, illustrent la grande disparité, de l'apport solide annuel.

L'étude du coefficient de variation, a confirmé ces résultats. En effet, cette dernière révèle, que pour la période 71-88, le coefficient de variation fluctue entre 2,6 et 0,18. Pour la période 88-95, le même coefficient, varie entre 2,06 et 0,28.

Concernant, la chute en apport solide annuel entre les deux périodes. L'apport solide moyen annuel pour la période 71-88, est égal à $1,81 \cdot 10^6$ t/an. Pour la période 88-95, il est égal à $1,38 \cdot 10^6$ t/an. La chute moyenne annuelle, est donc égale à $0,43 \cdot 10^6$ t/an : Ce qui représente 24 % par an.

A l'échelle saisonnière. L'étude, fait ressortir que, les gros apports solides saisonniers ont lieu en hiver, avec 44 % et ce pour les deux périodes 71-88 et 88-95. Pour l'automne et le printemps avec pratiquement le même pourcentage (28 %), vient ensuite l'été avec 4 % seulement.

S'intéressant, au débit spécifique annuel. L'étude, a relevé sa très grande variation interannuelle et saisonnière. En effet, pour la période 71-88, le maximum enregistré est de $1089 \text{ t/km}^2/\text{an}$, le minimum est de $90,8 \text{ t/km}^2/\text{an}$; Leur rapport est donc égal à 12. Pour la période 88-95, le maximum enregistré est de $1404 \text{ t/km}^2/\text{an}$, le minimum est de $197 \text{ t/km}^2/\text{an}$; leur rapport est égal à 7. De ces résultats, ressort la grande variation du taux d'érosion.

Le débit spécifique moyen annuel, est de $449 \text{ t/km}^2/\text{an}$ pour la période 71-88. Il est de $690 \text{ t/km}^2/\text{an}$ pour la période 88-95. On peut donc facilement conclure, que le bassin versant de Boussellam, fait parti des bassins versant les moins érodables.

Un fait important, est à souligner. C'est que, malgré la diminution de la surface du bassin versant, à partir de 1988 et malgré la répercussion de la retenue d'Ain-zada sur l'apport solide ; Au contraire, le débit spécifique d'érosion, a connu une nette augmentation durant la période 88-95. Ceci, ne peut s'expliquer que par le changement des caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant. On conclue que, le bassin versant en aval de Megrawa produit plus de matériaux solides que le bassin versant en amont.

A l'échelle saisonnière. Le taux d'érosion le plus élevé, a lieu en hiver, puis vient le printemps, ensuite l'automne et enfin l'été et ce pour les deux périodes.

Le débit spécifique d'érosion saisonnier, a connu une augmentation durant la période 88-95 et ce pour les quatre saisons. Les variations les plus importantes étant celles de l'hiver et du printemps.

Dans sa phase finale. En exploitant les résultats, l'étude a révélé que la perte en apport liquide annuelle au niveau du barrage de Tichy-Haf, est estimée à $96 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et la chute en apport solide est de $0,176 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ par an.

Les répercussions de la retenue d'Ain-Zada sur le barrage de Tichy-Haf, sont très sensibles et très bénéfiques pour ce dernier. Sa durée de vie a été allongée de 23 ans,

Il ressort donc que, l'une des meilleures solutions de préservation des barrages, est la construction de retenues de décantation à l'amont de celui-ci.

Références bibliographiques

- **Arabi, M., Kedaid, O., Bourougaa, L., Asla, T., Roos, E.,** (2004). « Bilan de l'enquête sur la restauration des sols en Algérie ». Revue sécheresse, N°=1, vol 15, janvier 2004, pp 87-95.
- **Achite, M., Touaibia, B., Ouillon, S.,** (2006). « Erosion hydrique en Algérie du Nord, Ampleur, Conséquences et Perspectives ». 14th International Soil Conservation Organization Conférence. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments. Marrakech, Morocco, May 14-19.
- **Achite, M., Meddi, M.,** (2005). « Variabilité spatio-temporelle des apports liquides et solides en zone semi-aride. Cas du bassin de l'oued Mina (nord ouest Algérien) ». Revue. Scientifique, Eau, N°18, pp 37-56.
- **Berzencovitch, E.,** (1952). « Nouvelle méthode de calcul du débit solide des cours d'eau ». Österreichische Wasser-Wirtschaft 1952, pp 59-66.
- **Bouanani, A., Mania, J., Baba Hamed, K., Bensalah, M.,** (2004). « Diagnosis of the pollution and sediment transport in the Sikkak river (Tafna –NW Algeria). Conférence. Internationale, USTRON, Pologne 15-18 juin.
- **Bouraba, M.,** (2002). « Comparaison de la charge solide en suspension dans les oueds Algériens : Essai de synthèse ». Bulletin Réseau Erosion 21, IRD Montpellier (France).
- **Capolini, J.,** (1969). « Bassin versant du Chellif, Oued Rhiou, Sli, Fodda, Deurdeur ; Prévision des apports, des crues et des débits solides ». Etude S-E-S, N° 2, Alger, 41 pages.
- **Colombani, J., Olivry, J.C.,** (1984). « Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide en Afrique aride et semi-aride ». Proceedings of the Harare, Symposium, July 1984 IAHS 144.
- **Charifi, S.,** (2006), « Application du modèle hydrologique GR2M sur les bassins versants de la Soummam et de l'Isser ». Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 132 pages.
- **Coyne, Bellier.,** (1973). « Etude géomorphologique du bassin versant de la Soummam ». Université Louis Pasteur centre de géographie appliquée, Strasbourg, 124 pages.
- **Dagnellie. R.,** (1992). « Théorie et méthodes statistiques, Applications agronomiques ». Gembloux (Belgique) les presses agronomiques de Gembloux, 443 pages.

- **Demmak, A.**, (1982). «Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale ». Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Paris, France, 218 pages.
- **Ghenim, A., Seddini, A., Terfous, A.**, (2007). «Production et exportation des sédiments en suspension lors des événements de crue. Cas du bassin versant de l'oued Mouillah ». Larhyss Journal n° 06, Décembre 2007, pp 35-44.
- **Ghorbel, A., Claude, J.**, (1977). «Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie ; Estimation des transports solides ». Proceeding of the Paris Symposium, Actes du Colloque de Paris : IAHS. AISH Pub N°122, pp 219-232.
- **Kassoul, M., Abdelgader, A., Belorgey, M.**, (1997). «Caractérisation de la sédimentation en Algérie ». Revue Sciences de l'Eau 10/03, pp 39-58.
- **Kattan, Z., Probst, J L.**, (1987). «Transport en solution et en suspension par la Moselle en période de crues » », Actes journées d'hydrologie « crues et inondations », Strasbourg 16-18 octobre, pp 143-167.
- **Laouina, A.**, (1998). «Dégradations des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb ». Bulletin de l'ORSTOM, 18, pp 33-53.
- **Lahlou, A.**, (1994). «Envasement des barrages au Maroc ». Casablanca (Maroc). Editions Wallada, 277 pages.
- **Meddi, M.**, (2005). Variabilité spatio-temporelle des apports liquides et solides en zones semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (Nord-Ouest-Algérien) », Revue des sciences de l'eau, 18/spécial(2005), pp 37-56.
- **Meddi, M.**, (1992). «Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina ; (Algérie) ». thèse de doctorat, université Louis Pasteur, Strasbourg, 285 pages.
- **Medinger, G.**, (1960). «Transport solide des oueds Algériens ». Annuaire hydrologique de l'Algérie N° 50/59 mars 1940.
- **Probst, J.L., Bazerbachi, A.**, (1986). «Transport en solution et en suspension par la Garonne Supérieure ». Sciences Géologiques. Bulletin, N° 39, pp 79-98.
- **Probst, J, A., Suchet, A.**, (1992). «Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa) ». Hydrological Sciences Journal, N° 37, pp 621- 637.
- **Recking, A.**, (2010). «Evaluation des formules de transport solide dans les rivières avec prise en compte de l'échelle temporelle ». Rapport final, 41 pages.

- **Remini, B., Kettab A., Hmat H.,** (1995). «Envasement du barrage d'Ighil Emda (Algérie) ». Revue La Houille Blanche no 2/3, pp 23-28.
- **Remini, B.,** (1997). « Envasement des retenues de barrages en Algérie : importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique du soutirage ». Thèse de Doctorat d'état, Ecole nationale Polytechnique d'Alger, 342 pages.
- **Remini, B.,** (1999). « Les conséquences de l'envasement des barrages ; quelques exemples Algériens ». Revue Techniques sciences méthodes, N°4, pp. 55-62.
- **Remini, B., Halouche, W.,** (2005). «Prévision de l'envasement dans les barrages du Maghreb ». Larhyss Journal, N° 04, pp.69-80.
- **Remini, B.,** (2006). « La problématique de l'eau en Algérie ». Edition O.P.U. Alger, 182 pages.
- **Remini, B.,** (2010). «La problématique de l'eau en Algérie, Larhyss Journal, n° 08, Juin 2010, pp. 27-46.
- **Roose, E., Arabi, M., Brahmia, K., Chebbani, R., Mazour, M., Morsli, B.,** (1993). «Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne Algérienne ». Bulletin de l'ORSTOM, 28(2), pp 289-308.
- **Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani, A.,** (2003). «Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes » Revue. IAHS N° 278, pp 366-372.
- **Tixeront, J.,** (1960). « Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie ». Revue IAHS N° 53, pp 26-42.
- **Touaibia, B.,** (2009). « Erosion et transport solide en Algérie septentrionale ». Med Friend 108 11, 2009, Rabat, Maroc. 31 pages.
- **Touabia, B., Aidaoui, A., Gomer D., Achite M.,** (2001). « Quantification et variabilité de l'écoulement solide en zone semi aride de l'Algérie du Nord ». Revue des sciences hydrologiques, N° 46(1), pp 41-53.
- **Vivian, H.,** (1980). « Erosion et Transport solide dans le bassin du Drac au Sautet ». CNRS, Equipe de recherche 30 C/O biologie végétale Grenoble, pp 349- 358.