

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد-تلمسان-

Université Abou bakrBelkaid –Tlemcen-



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique

Mémoire pour l'obtention du diplôme

de magister en hydraulique

Option : écoulement et transport solide

Thème

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'ENVASEMENT DE BARRAGE
BOUGHRARA

Soutenu le :

Présenté par :

M^{ELLE}. BENSABER KHEIRA

DEVANT LES MEMBRES DE JURY :

Mme ABDELBAKI CHERIFA	MCA	UNIV.TLEMCEN	PRESIDENTE
MR SEDDINI ABDELALI	PROF	UNIV.TLEMCEN	ENCADREUR
MR BOUCHELKIA HAMID	MCA	UNIV.TLEMCEN	EXAMINATEUR
MR BESSEDIK MADANI	MCB	UNIV.TLEMCEN	INVITE

Année universitaire : 2018/2019

دعاء

بسم الله والصلاة والسلام على رسول الله " اللهم
إنني أسألك يا مؤنس كل وحيد، يا قريبا خير
بعيد ، يا شاهدا خيرا غائبا ، يا خالبا خيرا
مغلوبا ، يا حيي يا قيوم ، يا بديع السماوات
والأرض يا ذا الجلال والإكرام ، أسألك باسمك
بسم الله الرحمن الرحيم الذي عنده له الوجوه ،
و خضعت له الأصوات ووجلته له القلوب أن
تخلي علي محمد وعلى آله و أن تعطينا النجاح
و الفلاح "




Remerciements

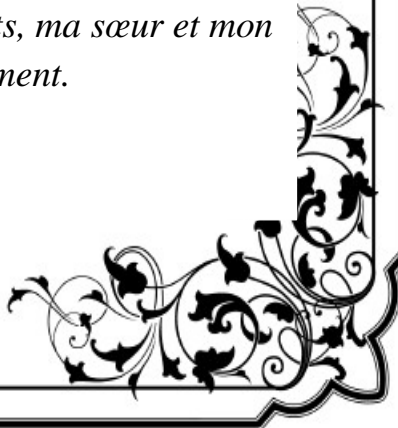
Je remercie tout d'abord le bon dieu de m'avoir donné la force et la patience pour accomplir ce travail

Je dois remercier vivement de près et de loin, tous ceux qui m'ont soutenu pour la réussite de mon projet de Magister d'état, je remercie d'abord mon enseignant encadreur en l'occurrence Mr Seddini Abdelali, qui m'a suivi tout au long de mon parcours en me conseillant, mes enseignants Madame Abdelbaki Cherifa comme présidente, Mr Bouchelkia .H comme examinateur et Mr Bessedik.M comme invité pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce modeste travail.

Je tiens à remercier également, les responsables de barrage Boughrara : Mr Merabet Chef de service et la secrétaire de direction, ainsi que les responsables de l'ANRH d'Alger de BirMorad Rais : Mme SIRAJDI et Mr BAY Houcine et les responsables de l'ANBT d'ALGER à Kobba, pour leur soutien qu'ils ont apportés sur les différentes sollicitations des données.



Un grand merci est adressé à mes parents, ma sœur et mon frère, pour leur encouragement.



DÉDICACE

Avec pleine de simplicité et de modestie et avec la volonté que m'a donné grand dieu pour terminer ma thèse, je tiens à dédicacer ce travail à :

- ✓ *Ma chère mère qui m'a donné tout l'amour et le soutien durant toute la vie de mémoire.*
- ✓ *Mon cher père qui m'a encouragé et m'a soutenu le long de mon projet.*
- ✓ *Ma chère sœur : Amel et mon cher frère : Djamel.*
- ✓ *Toute la famille Bensaber spécifiant mon oncle Abdelkader et ma tante Houria, sans oublier mes cousins : Mohamed Fateh, Khaled, Belkacem, Badredine et leur épouses, Fadéla et son mari.*
- ✓ *Toute la famille Méziane et Habbar sans exception.*
- ✓ *La mémoire de mes chers grands parents paternelle et maternelle.*
- ✓ *Mes collègues de travail sans exception.*
- ✓ *Enfin, tout qui me connaît de près et de loin.*

Résumé

Le phénomène de l'envasement des barrages, de par la situation géographique du pays (zone semi-aride), constitue un enjeu d'envergure nationale.

L'agressivité des pluies et leur forte variabilité contribuent à l'érosion des sols qui alimente la charge solide des oueds, facteur d'envasement rapide des barrages hydrauliques qui atteignent 45 à 50 millions de m³ chaque année en Algérie et se transforment de plus en plus en réceptacles de vase que d'eau ce thème est privilégié dans notre travail et qui consiste un des barrages de bassin Tafna – mouilah, barrage boughrara d'une capacité de 177 km³ et drainé en grande partie par l'oued mouilah qui a une superficie de 2650 km², et une partie de la Tafna d'environ 4000 km². On s'est basé sur l'oued mouilah et ses caractéristiques physiques, géologiques, climatiques et hydrologiques.

Dans la partie climatique, on a étudié la variation des précipitations et le régime thermique et en hydrologie, l'étude des modules et crues en fait partie

A l'aide d'une fonction de type puissance on a fait la relation entre les débits solides instantanés et les débits liquides instantanés au droits des deux stations hydrométriques proche du barrage (station sidi belkhir et mouilah RN7), la station du barrage a connu une absence de données.

L'apport solide spécifique est de 370 t/km²/an (1974/1999) et 418t/km²/an (1985/2001) respectivement dans les deux stations.

Après, on a estimé le volume d'envasement et son taux moyen annuel à l'aide des levés bathymétriques (juin 2004) (0,78%), la charge solide apportée par le cours d'eau pendant les événement de crues contribue de façon considérable aux totaux annuels et mensuels de la dégradation spécifique calculée à l'échelle du bassin, pour connaître la variation de la charge solide en fonction des débits liquides, on a fait une étude des courbes d'hystérésis qui clarifie le phénomène durant les crues.

Mots clé :

Erosion, Transport solide, Barrage Boughrara, Envasement, Modélisation.

ABSTRACT

The phenomenon of the silting up of dams, due to the geographical situation of the country (semi-arid zone), is an issue of national scope.

The aggressiveness of the rains and their high variability contribute to the soil erosion which feeds the solid load of the wadis, a factor of rapid siltation of the hydraulic dams which reach 45 to 50 million m³ each year in Algeria and are transforming more and more. More in receptacles of mud than water this theme is privileged in our work and which consists of one of the dams of basin Tafna - mouilah, barrage boughrara with a capacity of 177 km³ and drained in large part by the wadimouilah which has a Area of 2650 km², and part of the Tafna of about 4000 km². It was based on the wadimouilah and its physical, geological, climatic and hydrological characteristics.

In the climatic part, we studied the variation of precipitation and the thermal regime and hydrology, the study of the modules and floods is part of it

Using a power-type function, the relationship between the instantaneous solid flows and the instantaneous liquid flows at the two hydrometric stations close to the dam (station sidibelkhir and mouilah RN7) was compared; the dam station experienced A lack of data.

The specific solid input was 370 t / km² / year (1974/1999) and 418 t / km² / year (1985/2001) respectively in the two stations.

Afterwards, the volume of siltation and its annual average rate were estimated using bathymetric surveys (June 2004) (0.78%), the solid load contributed by the river during the flood events contributes To the annual and monthly totals of the specific degradation calculated at the basin scale, to know the variation of the solid charge as a function of the liquid flows, a study of the hysteresis curves was made which clarifies the phenomenon during the floods.

Key words:

Erosion, solid transport, Boughrara dam, siltation, modeling.

الملخص

ظاهرة ترسيب السدود، بسبب الموقع الجغرافي للبلد (المنطقة شبه القاحلة)، هي قضية وطنية تساهم محدودية الأمطار وتقلباتها العالية في تآكل التربة أي التصحر التي تغذي الحمولة الصلبة للأودية، هذا عامل أساسي للترسيب السريع للسدود والتي تصل إلى 45 حتى 50 مليون م³ سنويا في الجزائر وهذا يؤدي إلى تغلب ترسيب الطمي أكثر من المياه. هذا موضوع دراستنا الذي يتضمن أحد سدود حوض تافنة - مويلح، سد بونحرارة بسعة 177 كلم مربعة، استنزفت إلى حد كبير وادي مويلح بمساحة 2650 كيلومتر مربع، وجزء من واد التافنة يبلغ حوالي 4000 كيلومتر مربع

وقد اعتمدنا في دراستنا على وادي مويلح وخصائصه الفيزيائية والجيولوجية والمناخية والبيدرولوجية في الجزء المناخي، درسنا تباين الترسيبات والنظام الحراري والبيدرولوجيا، ودراسة التدفقات والفيضان جزء منه. باستخدام وظيفة من نوع الطاقة، تمت مقارنة التدفقات الصلبة اللعظية مع تدفق السائل اللعظي في المحطتين البيدرومتريتين (محطة سيدي بلخير و محطة مويلح - الطريق الوطني 7) قريبتان من السد بينما محطة سد بونحرارة لم تكن لديها بيانات كافية.

والحمولة الصلبة النوعية تقدر بـ 370 طن / كم² / سنة (1999/1974) و 418 طن / كم مربع / سنة (2001/1985) على التوالي في المحطتين.

بعد ذلك، تم تقدير حجم الطمي ومعدل المتوسط السنوي باستخدام المسوحات الباثيمترية (يونيو 2004) (0.78 %)، والعمل الصلب الذي جلبه النهر خلال أحداث الفيضانات يساهم إلى حد كبير في المجاميع السنوية والشهرية للتحلل المحدد المحسوب على نطاق الحوض، لمعرفة اختلافات الشحنة الصلبة كدالة لمعدلات تدفق السائل، تم إجراء دراسة لمنحنيات التباطؤ التي توضع هذه الظاهرة خلال الفيضانات.

كلمات البحث:

التصحر، النقل الخشن للتربة، سد بونحرارة، الترسيب، النمذجة

Table des matières

Titres		page
<i>Introduction générale</i>		01
<i>Problématique de l'érosion et du transport solide présentation et objectifs de l'étude</i>		02
Chapitre I	<i>Caractéristiques physiques du bassin versant de l'oued mouilah</i>	05
	<i>I.1 Situation géographique du bassin Tafna</i>	06
	<i>I.2 Situation géographique du barrage boughrara</i>	07
	<i>I.3 Caractéristiques morphométriques</i>	11
	<i>I.3.1 Caractéristiques de la disposition dans le plan</i>	11
	<i>I.3.1.1 Surface A et périmètre P</i>	11
	<i>I.3.1.2 Caractéristiques de forme</i>	11
	<i>I.3.2 Caractéristiques des altitudes (hypsométrie)</i>	13
	<i>I.3.3 Le réseau hydrographique</i>	20
	<i>I.3.4 Le couvert végétal</i>	22
	<i>I.3.5 Conclusion</i>	23
	<i>I.4 La géologie du bassin versant</i>	23
	<i>I.4.1 Introduction</i>	23
	<i>I.4.2 Cadre géologique général de la Tafna</i>	24
	<i>I.4.3 Série stratigraphique du bassin de mouilah</i>	24
Chapitre II	<i>Climat du bassin versant de l'oued mouilah</i>	26
	<i>II.1 Introduction</i>	26
	<i>II.2 Aperçu sur le climat de l'Afrique du nord</i>	26
	<i>II.3 Aperçu sur le climat de l'Algérie</i>	28
	<i>II.4 Climat de la Tafna</i>	28
	<i>II.5 Etude des précipitations</i>	29
	<i>II.5.1 Caractéristiques pluviométriques du bassin versant</i>	29
	<i>II.5.2 Homogénéisation des séries pluviométriques</i>	33
	<i>II.5.3 Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles</i>	37
	<i>II.5.4 Variabilité mensuelle et saisonnière des précipitations</i>	38
	<i>II.5.5 Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité</i>	40
	<i>II.6 Étude du régime thermique</i>	42
	<i>II.7 Evaporation</i>	43
	<i>II.8 Evapotranspiration et déficit d'écoulement</i>	44
	<i>II.9 Conclusion</i>	46
Chapitre III	<i>Fonctionnement hydrologique du bassin versant</i>	47
	<i>III.1 Introduction</i>	47
	<i>III.2 Débits moyens annuels</i>	48
	<i>III.2.1 Variations des débits annuels moyens bruts (m³/s) et l'irrégularité inter annuelle des modules</i>	49
	<i>III.2.2 Variations des débits annuels moyens spécifiques (t/km²/an)</i>	54
	<i>III.2.3 Etude statistique des modules</i>	55
	<i>III.2.4 Bilan moyen annuel de l'écoulement</i>	58
	<i>III.2.5 Ressources annuelles en eau de surface disponible</i>	59
	<i>III.3 Débits moyens mensuels et saisonniers</i>	59
	<i>III.3.1 Coefficient mensuel de débits</i>	59
	<i>III.3.2 Coefficient de variation</i>	62
	<i>III.3.3 Modifications interannuelle du régime saisonnier</i>	62

	<i>III.4 Distribution des débits moyens journaliers</i>	64
	<i>III.5 Courbe des débits classés</i>	64
	<i>III.6 Étude des crues</i>	65
	<i>III.6.1 Genèse des crues</i>	66
	<i>III.6.2 Débits extrême</i>	66
	<i>III.6.3 Puissance des crues</i>	69
	<i>III.6.4 Rapport débits de pointe/ débits moyen journalier maximal</i>	70
	<i>III.6.5 Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles</i>	70
	<i>III.6.6 Résultats et interprétations</i>	71
	<i>III 6.7 Apport des crues</i>	74
	<i>III.7 Evolution de la concentration des sédiments en suspension et des débits liquides durant les crues</i>	76
	<i>III.7.1 Méthodologie</i>	76
	<i>III.7.2 Application au bassin d'oued Mouillah</i>	82
	<i>III.8 Conclusion</i>	90
<i>Chapitre IV</i>	<i>Érosion et transport solide en suspension</i>	92
	<i>IV.1 Introduction</i>	92
	<i>IV.2 Généralité</i>	92
	<i>IV.2.1 Conséquences de l'érosion : les nuisances</i>	94
	<i>IV.2.2 Types d'érosion</i>	95
	<i>IV.2.2.1 L'érosion éolienne</i>	95
	<i>IV.2.2.2 L'érosion aratoire ou mécanique sèche</i>	95
	<i>IV.2.2.3 L'érosion hydrique</i>	96
	<i>IV.2.3 Facteurs de l'érosion hydrique</i>	99
	<i>IV.2.4 L'impact de l'érosion dans différentes régions</i>	100
	<i>IV.3 Quantification de l'érosion hydrique</i>	101
	<i>IV.4 Le transport solide</i>	103
	<i>IV.4.1 Transport solide par charriage</i>	104
	<i>IV.4.2 Transport solide en suspension</i>	105
	<i>IV.5 Etude du transport solide en suspension</i>	105
	<i>IV.5.1 Présentation des données</i>	105
	<i>IV.5.2 Apport solide annuel</i>	106
	<i>IV.5.3 Estimation du transport solide en suspension dans le bassin de mouillah</i>	107
	<i>IV.5.3.1 Bilan annuel des apports</i>	107
	<i>IV.5.3.2 Variabilité interannuelle des apports solides et liquides</i>	110
	<i>IV.5.3.3 Variation mensuelle des apports solides</i>	112
	<i>IV.5.3.4 Variation saisonnière des apports solides</i>	115
	<i>IV.6 Bathymétrie</i>	117
	<i>IV.6.1 Généralité</i>	117
	<i>IV.6.2 Taux d'envasement et estimation de la dégradation du bassin versant de barrage boughrara</i>	118
	<i>IV.7 Conclusion</i>	119
<i>Chapitre V</i>	<i>Modélisation du transport solide en suspension</i>	120
	<i>V.1 Introduction</i>	120
	<i>V.2 Evolution des débits solides en fonction des débits liquides</i>	121
	<i>V.3 Données et méthodologie</i>	121
	<i>V.4 Relation entre le débit solide (Qs) et le débit liquide (Ql) de l'oued</i>	122

	<i>mouilah</i>	
	<i>V.4.1 Echelle interannuelle</i>	123
	<i>V.5 Analyse á l'échelle annuelle</i>	124
	<i>V.6 Analyse saisonnière</i>	126
	<i>V.7 Analyse á l'échelle mensuelle</i>	129
	<i>V.7.1 Estimation de l'apport solide á la station de Barrage</i>	129
	<i>bouhrara</i>	
	<i>V.9 Conclusion</i>	130
	<i>Conclusion générale.</i>	131
	<i>Références bibliographiques</i>	135

Table des figures :

N°	titre	page
Fig .1.1	Modes de transport solide	04
Fig .1.2	Bassin versant topographique et bassin versant hydrogéologique	05
Fig .1.3	Réseau hydrographique de la Tafna	06
Fig .1.4	Situation du bassin versant barrage de Hammam Boughrara (Tlemcen)	08
Fig .1.5	Bassin et sous bassins de Tafna	08
Fig .1.6	Réseau hydrographique du bassin versant barrage h.bougrara	09
Fig .1.7	Situation géographique du bassin versant mouilah	10
Fig .1.8	Courbe hydrométrique et histogrammes des fréquences altimétriques du bassin de l'oued mouilah	14
Fig .1.9	Courbe hydrométrique et histogrammes des fréquences altimétriques du bassin barrage h.bougrara	14
Fig .1.10	Courbe hydrométrique et histogrammes des fréquences altimétriques du bassin de l'oued Tafna	15
Fig .1.11	Carte lithologique du bassin versant de l'oued mouilah	25
Fig .1.12	Couvert végétal du bassin versant de l'oued Mouillah	25
Fig .2.1	Position des stations pluviométriques	31
Fig .2.2	Caractéristique pluviométriques des stations de mesure	32
Fig .2.3	La méthode des doubles cumuls entre les stations et la station de barrage bougrara comme station de référence	37
Fig .2.4	Variabilité inter annuelle de la pluviométrie annuelle moyenne dans le bassin versant (98/12)	37
Fig .2.5	Variations des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin de l'oued mouilah	38
Fig .2.6	Variation saisonnière des précipitations	39
Fig .2.7	Variations mensuelles du coefficient de variation	39
Fig .2.8	Ajustement à une loi normale pour les stations d'étude	41
Fig .2.9	Variation mensuelle des températures à la station de barrage bougrara	43
Fig .2.10	Variation mensuelle de l'évaporation à la station de bougrara	44
Fig .3.1	Variation inter annuelle des modules de l'oued mouilah-station mouilah RN7-	53
Fig .3.2	Variation inter annuelle des modules de l'oued mouilah-station bougrara-	53
Fig .3.3	Variation inter annuelle des modules de l'oued mouilah – station sidi belkhir-	54
Fig .3.4	Ajustement des débits moyens annuels à une loi log normale – station mouillah RN7-	56
Fig .3.5	Ajustement des débits moyens annuels à une loi log normale – station h.bougrara-	57
Fig .3.6	Ajustement des débits moyens annuels à une loi log normale – station sidi belkhir-	57
Fig .3.7	Variations des débits moyens mensuels de l'oued mouilah-station mouilah RN7-	61
Fig .3.8	Variations des débits moyens mensuels de l'oued mouilah -station bougrara-	61

Fig .3.9	Variations des débits moyens mensuels de l'oued mouilah– station sidi belkhir-	62
Fig .3.10	Variations interannuelles des débits mensuels de l'oued mouilah aval –station mouilah RN7-	62
Fig .3.11	Variations interannuelles des débits mensuels de l'oued mouilah- station barrage boughrara-	63
Fig .3.12	Variations des débits moyens journaliers de l'oued mouilah, cas de la station de hammam boughrara	64
Fig .3.13	Courbe des débits classés de l'oued mouilah- station barrage boughrara-	65
Fig .3.14	Ajustement graphique de la série des débits maximums instantanés de l'oued mouilah	72
Fig .3.15	Modèles des relations concentration débit liquide	81
Fig .3.16	Evolution des concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides en fonction du temps des crues d'oued Mouillah (1985/2001) relation concentration –débits liquides et classification (station Mouillah RN7)	88
Fig .3.17	Evolution des concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides en fonction du temps des crues d'oued Mouillah (1974/1999) relation concentration –débits liquides et classification (station sidi belkhir)	90
Fig .4.1	Etapas du transport solide	94
Fig .4.2	L'érosion en nappe ou aréolaire ou laminaire	97
Fig .4.3	L'érosion linéaire	98
Fig .4.4	Apports liquides et solides annuels de l'oued mouilah(station sidi belkhir)	110
Fig .4.5	Apports liquides et solides annuels de l'oued mouilah(station Mouilah RN7)	111
Fig .4.6	Apports liquides et solides mensuels de l'oued mouilah (station sidi belkhir)	113
Fig .4.7	Apports liquides et solides mensuels de l'oued mouilah (station Mouilah RN7)	114
Fig .4.8	Répartition saisonnière des apports liquides et solides de l'oued mouilah (station sidi belkhir)	115
Fig .4.9	Répartition saisonnière des apports liquides et solides de l'oued mouilah (station Mouilah RN7)	117
Fig .5.1	Relations débits solides en fonction des débits liquides dans le sous bassin de l'oued mouilah	123
Fig .5.2	Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides (station sidi belkhir)	128
Fig .5.3	Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides (station Mouilah RN7)	128

Liste des tableaux :

N°	titre	page
Tab 1.1	Surfaces et périmètres de bassin barrage h.bouhrara, Mouillah et Tafna	11
Tab 1.2	Indices de compacité de bassin barrage h.bouhrara, Mouillah et Tafna	12
Tab 1.3	Longueurs et largeurs du rectangle équivalent des bassins	12
Tab 1.4	Répartition hypsométrique du bassin versant de l'oued mouilah	13
Tab 1.5	Répartition hypsométrique du bassin versant barrage h.bouhrara	14
Tab 1.6	Répartition hypsométrique du bassin versant de l'oued Tafna	15
Tab 1.7	Valeurs de l'indice de pente global et de roche	17
Tab 1.8	Classification du relief selon Ig par l'orstom	17
Tab 1.9	Classification du relief selon Ds	18
Tab 1.10	Valeurs des coefficients de torrentialité et le temps de concentration des eaux de l'oued mouilah	19
Tab 1.11	Paramètres morphométriques du réseau hydrographique de l'oued mouilah	20
Tab 1.12	Distribution du couvert végétal dans le bassin de l'oued mouilah	22
Tab 2.1	Caractéristiques des stations de Mesure du bassin d'étude	30
Tab 2.2	Caractéristiques des pluies annuelles des stations pluviométriques du bassin versant	32
Tab 2.3	Moyenne, écart type, coefficient de variation de la série pluviométrique	40
Tab 2.4	Précipitation pour les périodes de récurrence dans les stations du bassin versant	42
Tab 2.5	Températures moyennes mensuelles à la station de barrage bouhrara	42
Tab 2.6	Evaporations moyens mensuels à la station de bouhrara	44
Tab 3.1	Caractéristiques hydrométriques de la station	48
Tab 3.2	Débits moyens annuels de l'oued mouilah	50
Tab 3.3	Valeurs caractéristiques des modules au niveau du bassin versant	52
Tab 3.4	Débits spécifiques et lame d'eau écoulée	54
Tab 3.5	Ajustement à une loi log normale des modules annuels	55
Tab 3.6	Modules caractéristiques en m ³ /s pour des périodes de récurrences données	56
Tab 3.7	Bilan moyen annuel de l'écoulement aux différentes stations	58
Tab 3.8	Evaluation de l'apport total moyen annuel écoulé et ses extrêmes	59
Tab 3.9	Répartition des débits mensuels de l'oued mouilah	60
Tab 3.10	Crues de l'oued mouilah (74/75 – 99/00) –station sidi belkhir-	67
Tab 3.11	Crues de l'oued mouilah (85/86 – 01/02) – station mouilah RN7	68
Tab 3.12	Crues de l'oued mouilah (74/75 – 86/87) – station Barrage bouhrara	68
Tab 3.13	Ajustement de la série des débits maximums instantanés	71
Tab 3.14	Estimation des quantiles de crue	73
Tab 3.15	Volumes totaux écoulés à l'oued mouilah –station mouilah RN7-	74
Tab 3.16	Volumes totaux écoulés à l'oued mouilah- station sidi belkhir-	75
Tab 3.17	Volumes totaux écoulés à l'oued mouilah-station bouhrara-	76
Tab 3.18	Types de boucles d'hystérésis	78
Tab 3.19	Fréquence de différentes classes d'évolution de la relation C-QI des crues au niveau de bassin de Mouillah	82
Tab 4.1	Les formes d'incision dues à l'érosion linéaire	98
Tab 4.2	Formes d'érosion	99

Tab 4.3	Valeur de α pour différentes perméabilités	103
Tab 4.4	Stations hydrométriques et périodes de mesure	106
Tab 4.5	Valeurs des apports liquides, solides et les dégradations spécifiques au niveau du bassin de l'oued mouilah	108
Tab 4.6	Apports liquides et solides moyens mensuels á oued mouilah période (74/99) : station Sidi belkhir	112
Tab 4.7	Apports liquides et solides moyens mensuels á oued mouilah période (85/01) : station Mouilah RN7	114
Tab 4.8	Apports liquides et solides moyens saisonniers á oued mouilah (période 74/99) : station sidi belkhir	115
Tab 4.9	Apports liquides et solides moyens saisonniers á oued mouilah (période 85/01) : station Mouilah RN7	116
Tab 4.10	Résultats des données de bathymétrie	118
Tab 5.1	Paramètres de la relation débit solide – débit liquide	123
Tab 5.2	Paramètres du modèle annuels (74 / 99) : station sidi belkhir	124
Tab 5.3	Paramètres du modèle annuels (85 / 01) : station mouilah RN7	125
Tab 5.4	Paramètres du modèle saisonnièr (Qs-Ql) au niveau du bassin oued mouilah	126
Tab 5.5	Paramètres du modèle mensuel	129
Tab 5.6	Apport solide et dégradation spécifique dans le bassin versant de tafna-mouilah- station barrage boughrara-	130

Introduction générale :

L'importance de l'eau en tant que support de vie et de facteur régulateur du développement d'un pays est universellement reconnue. Aussi est – il nécessaire de la quantifier et de la gérer aussi rigoureusement que possible.

Si les ressources en eau de surface doivent être mobilisées pour les différents besoins (agriculture, implantations de barrages et de retenues collinaires) en revanche et en raison des méthodes inadaptées actuellement utilisées, elles posent un problème majeur lorsqu'il s'agit de quantifier rigoureusement les éléments du bilan hydrique (Amil, 1992). L'érosion hydrique des sols et l'envasement conséquent des retenues de barrages représentent un aspect de la désertification. Cette désertification qui est, en fait, le stade ultime de la dégradation du milieu naturel est une conséquence de la sécheresse. Cette dernière implication pourrait néanmoins être contestée par ceux qui prônent l'implication inverse, à savoir que la dégradation de l'environnement causée par l'homme (déboisements, surpâturages, défrichements abusifs...) rompt l'équilibre du système et aboutit à la perturbation du climat.

Le phénomène de l'envasement des barrages, de par la situation géographique du pays (zone semi-aride), constitue un enjeu d'envergure nationale.

Selon une récente étude basée sur des séries statistiques comportant les données de 57 grands barrages, l'Algérie perd par envasement 45 à 50 millions de m³ chaque année. Nos barrages se transforment de plus en plus en réceptacles de vase que d'eau. Du coup, la défektivité des réseaux d'alimentation en eau potable (AEP), ne constitue plus la principale cause de déperdition des eaux de consommation. Au-delà de ce taux de fuite des eaux, dû à la mauvaise étanchéité des réseaux, la déperdition à la suite de l'envasement se situe dans une tout autre «méga échelle» de considération.

En effet, le phénomène de l'envasement touche les pays du Maghreb, mais plus particulièrement l'Algérie et s'est accéléré à partir des années 2000 (particulièrement à partir de 2003). Les retombées sont directes et graves et sur l'économie nationale et sur le développement de la société tout entière.

Actuellement, le bassin versant de la Tafna comprend quatre barrages fonctionnels (BéniBahdel, Meffrouche, El Izdihar à Sidi Abdelli et

Hammam Boughrara) et un barrage en cours de réalisation (Sikkak). Cependant, on a toujours du mal à quantifier avec précision les apports aussi bien liquide que solide à ses barrages ; ce qui rend assez difficile la gestion de leurs stocks.

En ce sens, nous allons traiter dans ce travail le problème du transport solide et d'envasement du barrage boughrara suivant plusieurs facteurs hydro-climatiques qui gèrent le phénomène.

Notre étude s'articulera en plusieurs parties :

- première étape de la connaissance du bassin versant et du sous bassin, permettra de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans l'alimentation en eau et dans l'écoulement.
- l'étude hydrologique, portera sur le sous-bassin Mouilah où est érigé le barrage de boughrara (177hm³).
- L'étude des transports solides en suspension et modélisation, permettra d'évaluer les quantités des sédiments transportés par l'oued Mouilah et de préciser la dynamique érosive dans notre bassin et par conséquent d'en tirer des conclusions quant à l'envasement des ouvrages et la perte en sol dans l'écosystème.
- nous tenterons d'établir quelques modèles analytiques et descriptifs débits liquides - débits solides, basés sur une approche statistique d'analyse des chroniques de données et de corrélations simples. Ces modèles préciseront l'interrelation entre les différents paramètres hydrologiques.

Problématique de l'érosion et du transport solide :

- **Ampleur de l'envasement des retenues de barrages :**

1/Introduction :

Dans de nombreux pays du monde, le transport de sédiments dans les réseaux hydrographiques des bassins versants et leurs dépôts dans les retenues pose aux exploitants de barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse, non seulement la capacité utile est progressivement réduite, mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile

Le problème d'envasement des barrages n'est pas un problème propre à

L'Algérie, beaucoup de pays dans le monde souffrent du problème surtout dans les zones arides et semi-arides, où le manque de ressources hydrique est accentué par l'érosion des sols qui peut atteindre les 5000 t/km²/an contre 30 à 50 t/km²/an en Europe (Ammari., 2012).

Le phénomène de l'envasement en Algérie change considérablement d'une région à une autre. Ceci est dû à la variation des facteurs conditionnant l'érosion et le transport solide (BENAICHA amarcherif, 2010)

2/ Facteurs induisant l'envasement des barrages :

2-1- Processus naturels

L'envasement des retenues est le résultat d'un processus complexe qui se caractérise par trois étapes successives : érosion, transport et sédimentation.

✓ Erosion des sols :

L'érosion hydrique est une problématique particulièrement importante, notamment dans la zone méditerranéenne et semi-aride. Cette zone est caractérisée par des régimes pluviométriques irréguliers qui ont une influence considérable sur les pertes en sol.

Les barrages alimentés par ces zones subissent un envasement lié à une érosion importante.

Le calcul du transport solide et la prévision du volume d'envasement nécessitent une bonne compréhension des phénomènes de leur genèse, et plus particulièrement celui de l'érosion des sols.

✓ Transports solides :

Ce phénomène est le principal élément moteur après l'érosion, conduisant au processus d'envasement des barrages. Ce processus fait le lien entre les sols du bassin versant et la retenue du barrage. Il est défini par un écoulement biphasique caractérisé d'une phase liquide (eau) et d'un autre solide (granulats, sol).

Dans les cours d'eau naturels, les particules solides vont être transportées en suspension ou en charriage (fig 1.1).

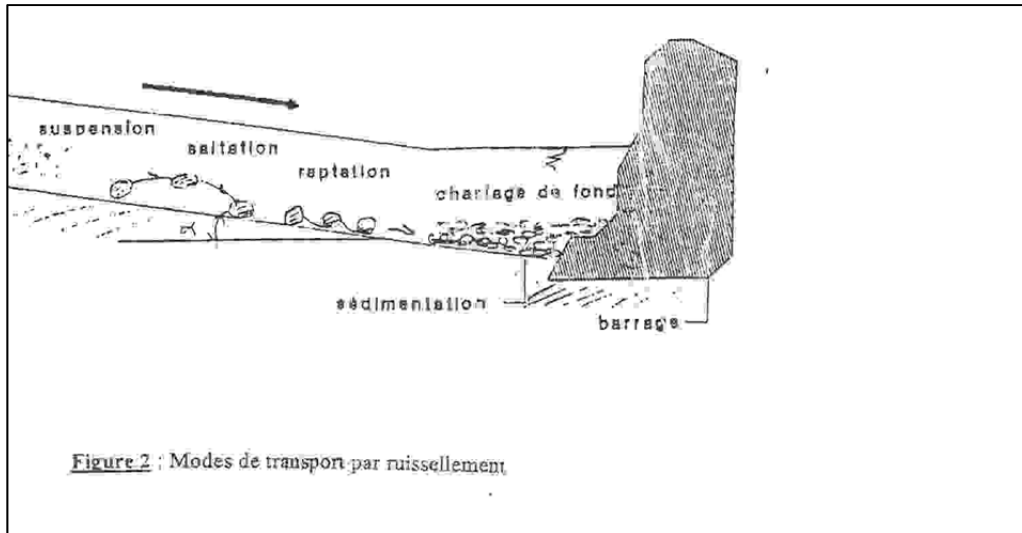


Fig 1.1: Modes de transport solide

✓ **Sédimentation et envasement :**

C'est l'étape finale de l'envasement des retenues. A l'état naturel les oueds transportent progressivement des quantités importantes de sédiments, soit par charriage soit par suspension. Les eaux chargées de matériaux fins forment un courant de densité qui s'écoule sur le long de la retenue et transportent ainsi la vase jusqu'au pied du barrage.

3/ Objectifs :

A la lumière des problématiques et des conditions multiformes du processus complexe : érosion – transport solide – envasement, il convient de souligner l'importance dans la quantification de l'envasement des retenues de barrage, des études de modélisation de l'envasement tenant compte des mécanismes et du mode de déposition des vases. Cette approche présente un intérêt économique important permettant de prévoir les mesures nécessaires au cours de l'exploitation dans le but d'augmenter la durée de vie des ouvrages hydrauliques concernés.

On procède dans ce travail à une étude de transport solides et leur impact sur l'alluvionnement des barrages et ce pour les objectifs essentiels suivants :

- l'estimation de la durée de vie du barrage en tant qu'ouvrage de régularisation des apports;
- l'estimation de l'envasement après une durée d'exploitation donnée.

Chapitre I :

Caractéristiques physiques du bassin versant de h.boughrara

Généralité :

Les caractères physiques d'un bassin sont très nombreux .On s'est attaché à ne retenir que ceux qui pouvaient s'exprimer par un nombre ; ainsi les courbes hypsométriques et les graphiques de profil en long ont-ils été écartés, certains caractères numériques choisis pouvant prétendre apporter une information équivalente (Dubreuil, 1966)

Le bassin versant est un objet complexe dont l'ensemble des caractéristiques (géométriques, géologiques, physiographiques, humaines, etc.) joueront un rôle non seulement dans la réponse hydrologique du bassin à une sollicitation des précipitations (régime des écoulements) mais aussi, en amont et pour certaines d'entre elles (altitude, exposition...), directement dans le processus de formation de la pluie.

Il faut noter l'existence, à la surface du bassin versant, d'un système longitudinal, le réseau de drainage ou réseau hydrographique, défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Ce réseau est plus ou moins développé selon différents facteurs (géologie, climat, pente du terrain, etc.)

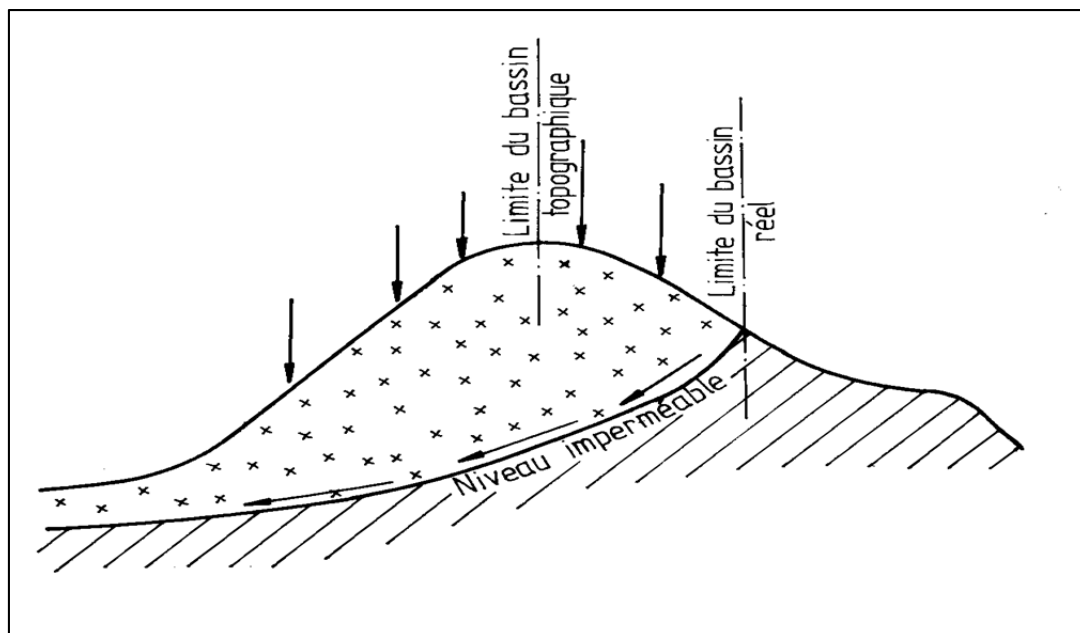


Fig. 1.2/ Bassin versant topographique et bassin versant hydrogéologique (Dubreuil, 1966)

I.1- SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN TAFNA

Le bassin versant de la Tafna, situé au Nord-Ouest du territoire algérien, s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km². Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie.

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties:

- partie orientale avec comme principaux affluents l'oued Isser et l'oued Sikkak),
- partie occidentale comprenant la Haute Tafna (oued Sebdu et oued Khemis) et l'oued Mouilah
- partie septentrionale : qui débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à la plage de Rachgoune, embouchure de la Tafna sur la mer. Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie.

L'oued Tafna est un cours d'eau de 170 Km de long, il prend sa source dans les Monts de Tlemcen. Le cours de cet oued peut se subdiviser en trois parties : la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna.

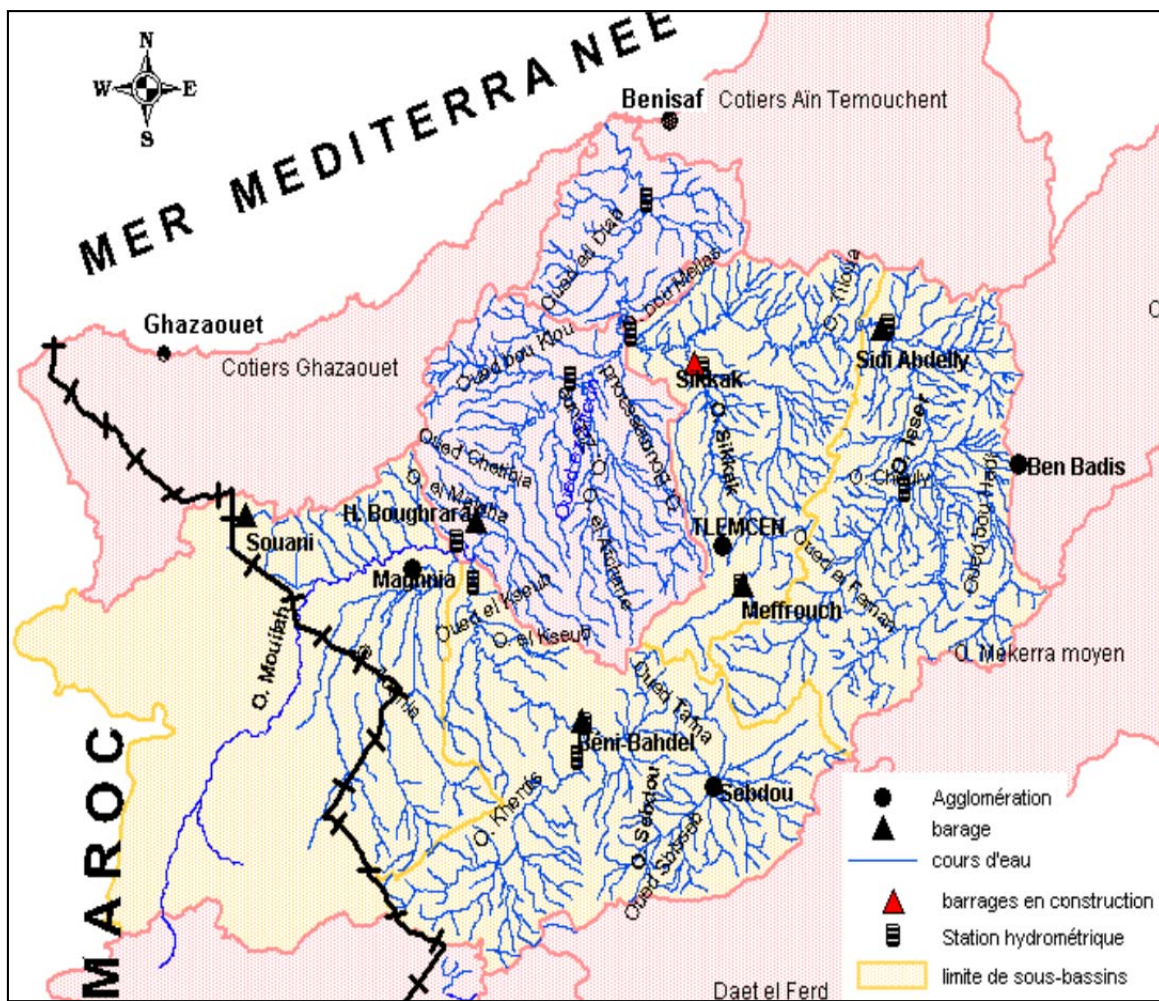


Fig .1.3 / Réseau hydrographique de la Tafna (Bouanani, 2004)

On s'intéresse à la moyenne Tafna car cette partie du bassin tertiaire est sillonnée par de nombreux affluents parmi lesquels certains sont importants :

- Sur la rive gauche: seul l'oued Mouillah qui prend naissance au Maroc est remarquable par son parcours et son débit. L'oued Boukiou, moins important, prend naissance dans les monts des Traras pour rejoindre le cours de la Tafna dans la plaine des Ghossel.

I.2 Situation géographique du barrage Bouhrara :

Le barrage de Hammam Bouhrara (mise en eau en 1999) est situé sur la confluence d'oued Mouillah avec oued Tafna à 10 km en aval de la ville de Maghnia et à l'extrême Nord-Ouest de la Wilaya de Tlemcen (Nord-Ouest Algérien). Il appartient au bassin versant de l'oued Mouillah, dont la superficie (largement partagée avec le Maroc) est de 2000 km² (Fig.01). Ce bassin est limité par un périmètre de 241 km et composé dans sa majorité par les plaines d'Angad (située à Oujda en territoire Marocain) et celle de Zrigua (située à Maghnia en territoire Algérien).

Ce réservoir est destiné à satisfaire les besoins en eau potable des villes d'Oran (33hm³) et de Maghnia (17 Hm³). Par ailleurs, 09 Hm³ sont prévus pour l'irrigation de la moyenne Tafna. Il est caractérisé par une capacité totale de 177 Hm³, un volume régularisé de 59 Hm³ et une superficie de 984 ha (A.N.B.T, 2012).

Le bassin versant du barrage Hammam Bouhrara occupe la partie Ouest du grand bassin de la Tafna, qui est subdivisé en huit (8) sous bassins (Voir figure II.1 ci-dessous).

Notre zone d'étude occupe les sous bassins 01, 02 et 03 et une partie du sous bassin 04.

Les coordonnées LAMBERT X=102920, Y=185900 désignent à peu près le centre du chantier du barrage où le lit mineur de l'Oued est à la cote Z=250.0m. L'environnement du barrage est constitué par l'ensemble des éléments de son bassin versant. (BAHLOUL A., 2013)

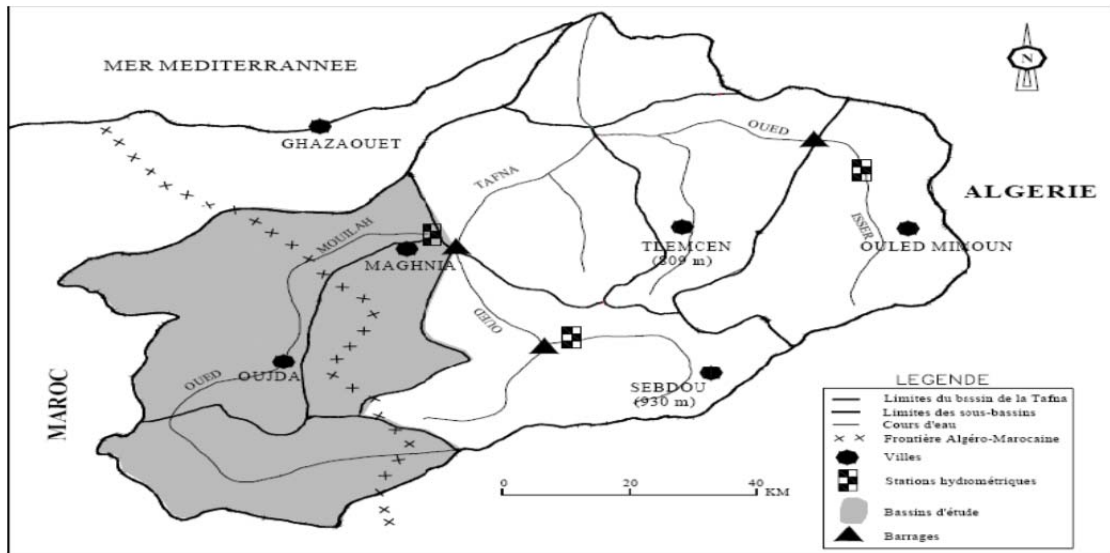


Fig 1.4/ Situation du bassin versant barrage de Hammam Boughrara (Tlemcen)

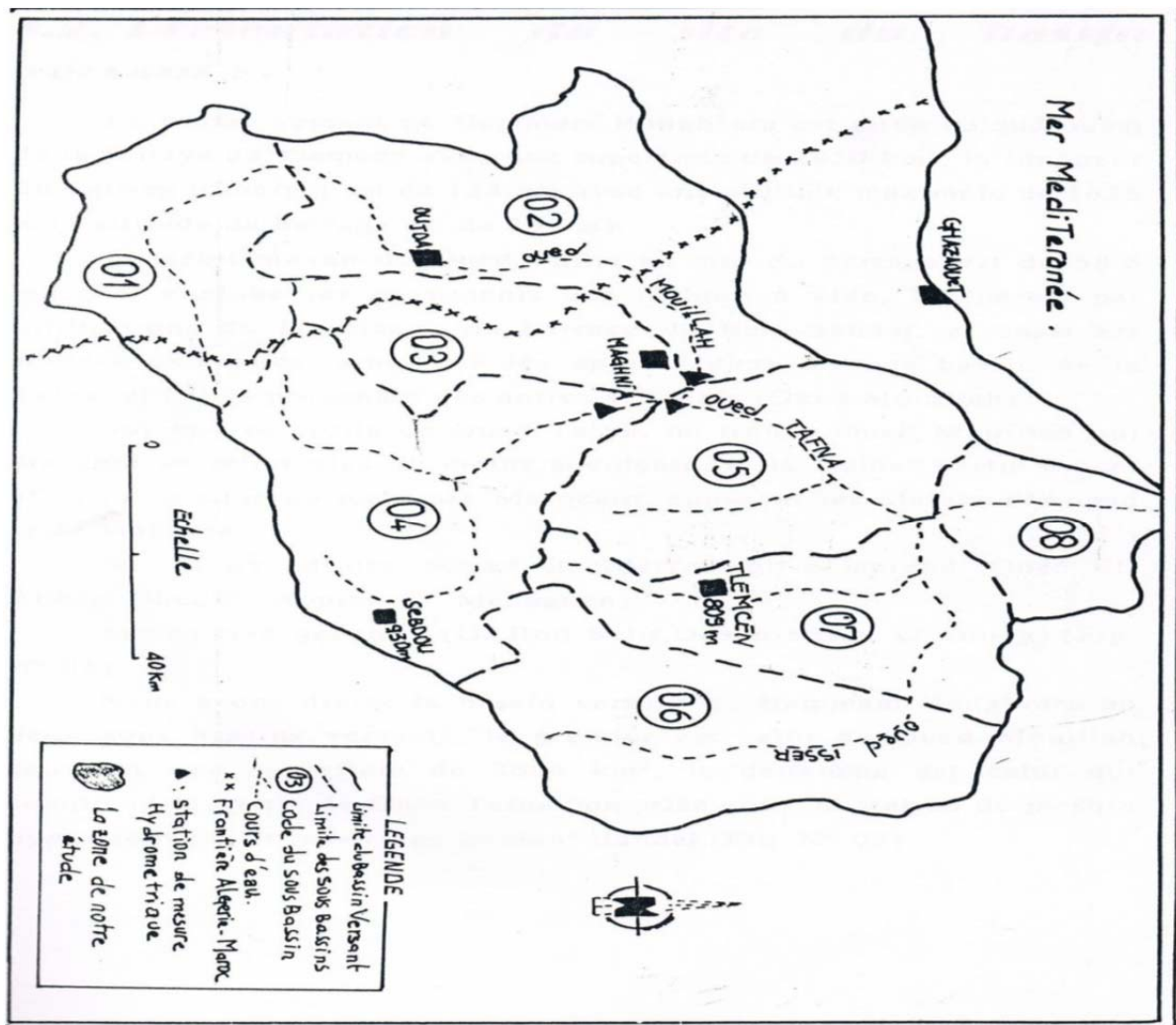


Fig 1.5 / Bassin et sous bassin de Tafna. (Achatichabia, 1998)

Le phénomène érosif dans cette zone résulte de la conjonction de plusieurs facteurs : agressivité des pluies, érodibilité des sols, raideur du relief, faiblesse du couvert végétal, pratiques agricoles inappropriées sur des versants abrupts.

(MahiTani.w, 2011)

Le bassin versant de Hammam Boughrara est situé au sud-ouest de la Wilaya de Tlemcen avec une superficie de 2950 km², la longueur du Talweg principal est de 124 km avec une altitude maximale de 1625 m (l'altitude du barrage est de 251 m).

Nous avons divisé le bassin versant de Hammam Boughrara en deux sous bassins versants, le premier est celui d'Oued Mouillah couvrant une superficie de 2664 km², le deuxième est celui qui comprend la partie d'Oued Tafna comprise entre la station de mesure hydrométrique et le barrage de Beni Bahdel (Fig 1.2), (BAHLOUL A., 2013)

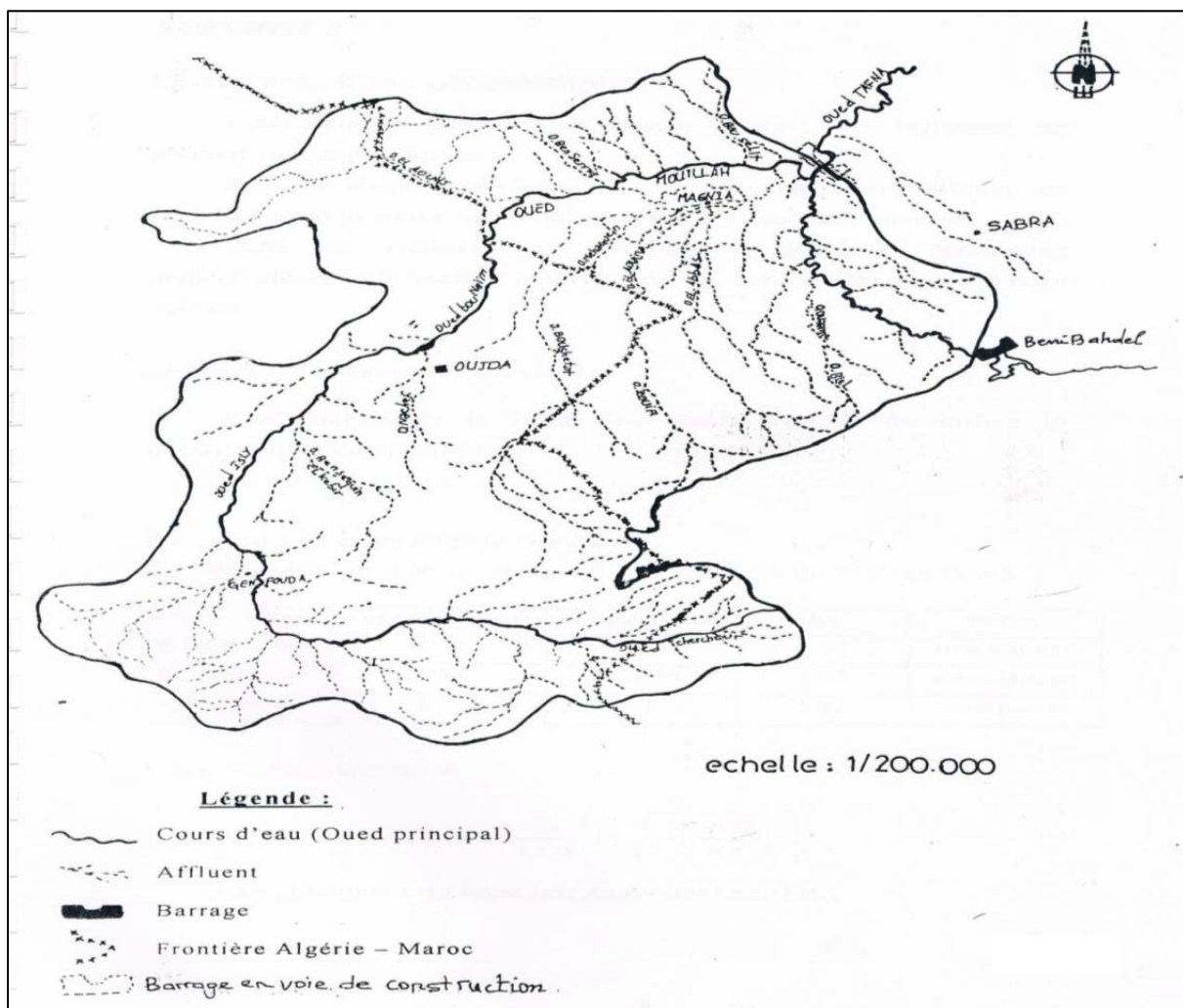


Fig 1.6 /Réseau hydrographique du bassin versant de H.BOUGHRARA.
(BAHLOUL A., 2013)

Le bassin barrage bougrara est subdivisé en :

- Une zone montagneuse avec ses piémonts qui occupe environ 30% du territoire communal. Les altitudes culminent à 1112 m.
- Des plateaux qui occupent environ 60% du territoire.
- Des dépressions et vallées constituant environ 10% ; la vallée la plus importante est celle de la Tafna d'une largeur de 200 à 1000 m, se prolongeant d'une distance d'environ 8 Km. (MahiTani.w, 2011)

➤ L'Oued Mouilah :

Le bassin versant de l'Oued Mouilah (**fig 1.7**) s'étale sur une superficie de 2650km² pour un périmètre de 230 km. Une bonne 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 pour s'appeler tantôt Oued Sly tantôt Oued Bounaïm puis revient en Algérie aux environs de Maghnia sous l'appellation d'Oued Mouilah. Il draine un bassin constitué de zones très hétérogènes formées de montagnes (les monts des Trarasau nord-ouest et ceux de Tlemcen au sud), de plaines et de vallées.

Le bassin versant est dominé par les sols calcaires qui longent son thalweg principal et se prolonge au nord-est des monts des Traras et aux piémonts des monts de Tlemcen (Ghenim., 2007).

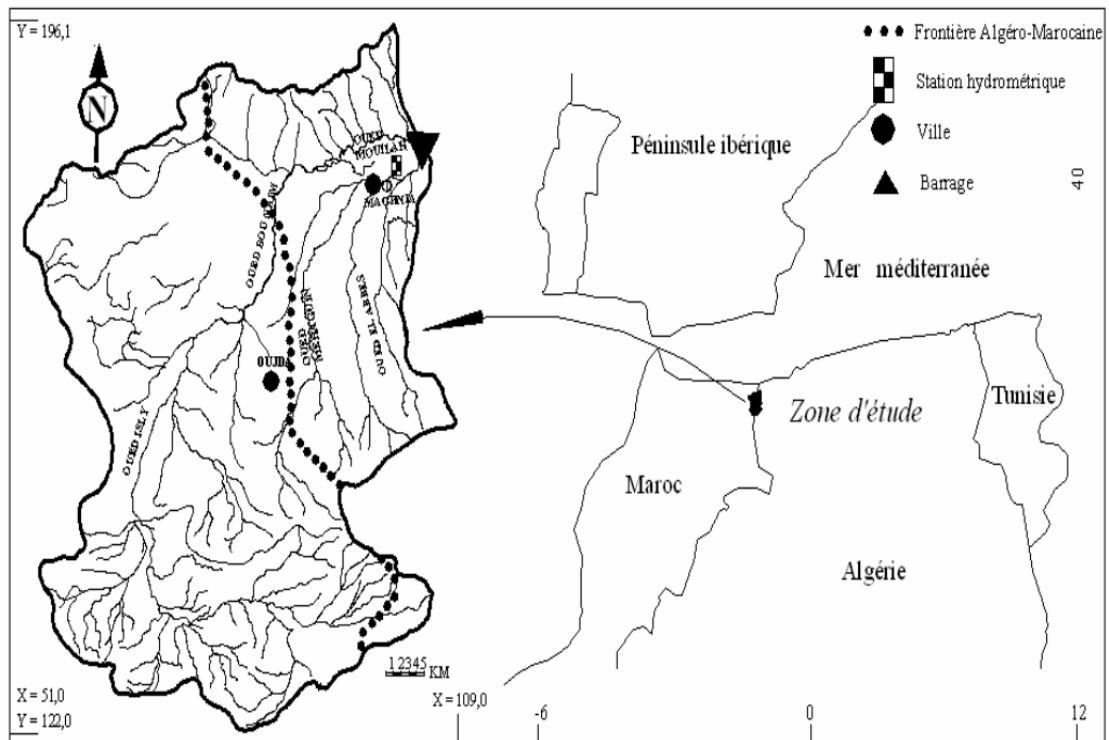


Fig 1.7 /Situation du bassin versant de l'Oued Mouilah (Ghenim., 2007).

I.3 Caractéristiques morphométriques :

L'utilisation des caractéristiques morphométriques a pour but de condenser en un certain nombre de paramètres chiffrés, la fonction $h=f(x, y)$ à l'intérieur du bassin versant (h altitude, x et y coordonnées d'un point du bassin versant).

Nous utiliserons trois types différents de paramètres morphométriques.

I.3.1 Caractéristiques de la disposition dans le plan :

I.3.1.1 Surface A et périmètre P

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface.

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.

Tab 1.1/ Surfaces et périmètres des bassins de barrage h.bougrara, bassin d'oued mouillah et bassin d'oued Tafna :

BASSINS	SURFACE (KM ²)	PERIMETRE (KM)
MOUILLAH	2650	230
BARRAGE H. BOUGHRARA	2950	374
TAFNA	252	57

I.3.1.2 Caractéristique de forme

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants.

Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux.

Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius(1914), défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface.

Les classiques de l'hydrologie proposent, pour caractériser la géométrie d'un bassin versant, différents indices de forme destinés à comparer les bassins voire à estimer certaines de leurs caractéristiques hydrologiques. L'indice auquel il est le plus communément fait référence est l'indice de compacité, dit de Gravelius. Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin étudié à celui d'un cercle de même surface (BENDJOUDI et HUBERT, 2002)

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

A : surface et P : périmètre du bassin versant

Tab 1.2 / Indice de compacité des bassins de barrages h.boughrara, Mouillah et Tafna :

Bassins	Kc	forme
MOUILLAH	1.25	Très allongée
BARRAGE H. BOUGHRARA	1.93	Très allongée
TAFNA	1.11	compacte

On utilise également pour caractériser la forme du bassin, son « rectangle équivalent » et le rapport de la plus grande longueur à la plus grande largeur perpendiculaire.

$$L = \frac{K \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K} \right)^2} \right]$$

Tab 1.3 / longueur et largeur du rectangle équivalent des bassins de barrages h.boughrara

Bassins	Longueur (rectangle équivalent)	Largeur (rectangle équivalent)
MOUILLAH	83.10	31.94
BARRAGE H. BOUGHRARA	168.40	17.50
TAFNA	15.87	15.87

Les sous bassins de la Tafna présentent, dans l'ensemble une forme assez ramassée, favorisant à priori, le temps de concentration des eaux de ruissellement. Mais l'influence du relief est encore plus déterminante.

I.3.2 Caractéristiques des altitudes (hypsométrie) :

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin.

En général, on ne s'intéresse pas à l'altitude moyenne mais plutôt à la dispersion des altitudes.

La majeure partie du bassin de Mouillah se trouve sur le territoire marocain couvrant les plaines des Angads et de Maghnia. Le relief assez varié est constitué de zones de montagnes, de plaines et de vallées. La longueur du thalweg principal est de 124 km.

La forme de la courbe hypsométrique, présente un état d'équilibre du bassin et donc un potentiel érosif moyen.

Tab. 1.4/ Répartition hypsométrique du bassin d'oued Mouilah (moyenne Tafna)

Tranches d'altitudes	Ai (Km2)	Ai cumulées (Km2)	Ai %	% Ai cumulés
1430-1400	26.80	26.00	0.98	0.98
1400-1200	306.00	332.00	11.55	12.53
1200-1000	381.00	713.00	14.38	26.91
1000-800	375.00	1088	14.15	41.06
800-600	414.50	1502.20	15.64	56.7
600-400	904.00	2406.5	34.11	90.81
400-285	243.50	2650	9.19	100

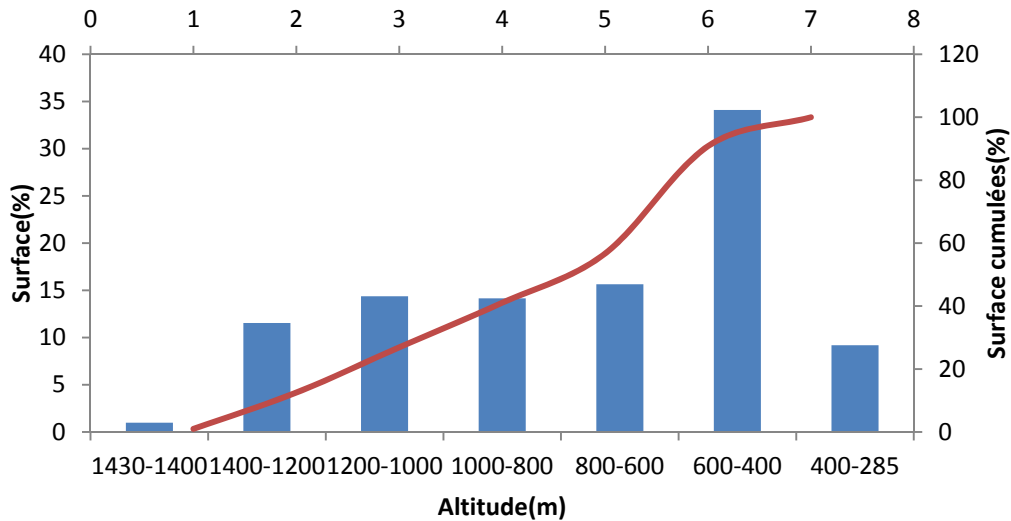


Fig. 1.8 / Courbe hypsométrique et histogrammes des fréquences altimétriques du bassin mouilah

Tab. 1.5/ Répartition hypsométrique du bassin versant du barrage h.bougrara

Tranches d'altitudes	Ai (Km2)	Ai cumulées (Km2)	Ai %	% Ai cumulés
1600-1400	26	26	0.88	0.88
1400-1200	306.60	334.6	10.49	11.37
1200-1000	412.20	746.8	14.02	25.39
1000-800	402.20	1149	13.68	39.07
800-600	513.30	1662.3	17.45	56.52
600-400	997.20	2659.5	33.90	90.42
400-200	281.50	2941	9.45	100

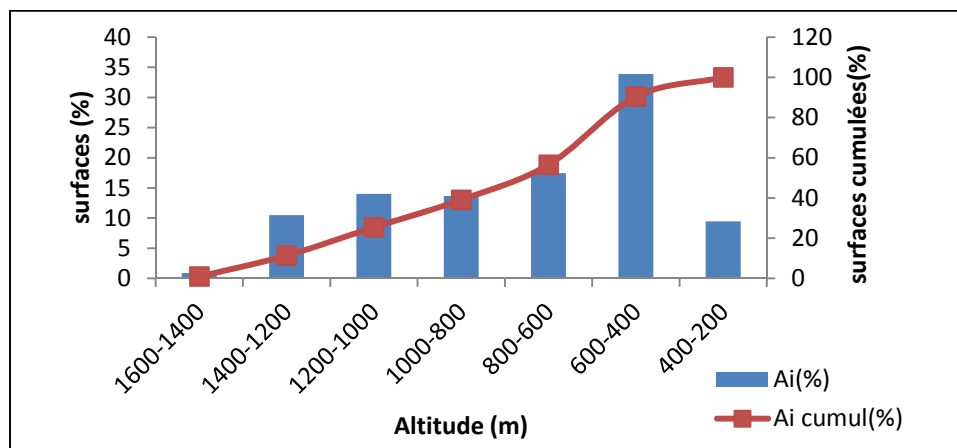


Fig. 1.9/ Courbe hypsométrique et histogrammes des fréquences Altimétriques du bassin versant du barrage h.bougrara

Tab. 1.6/ Répartition hypsométrique du bassin d'oued tafna

Tranches d'altitudes	Ai (Km2)	Ai cumulées (Km2)	Ai %	% Ai cumulés
1255-1200	1.6	1.6	0.63	0.63
1200-1000	29.20	30.8	11.59	12.22
1000-800	25.20	56	10.00	22.22
800-600	96.80	152.8	38.41	60.63
600-400	83.00	235.8	32.97	93.60
400-355	16.00	251.8	6.35	100

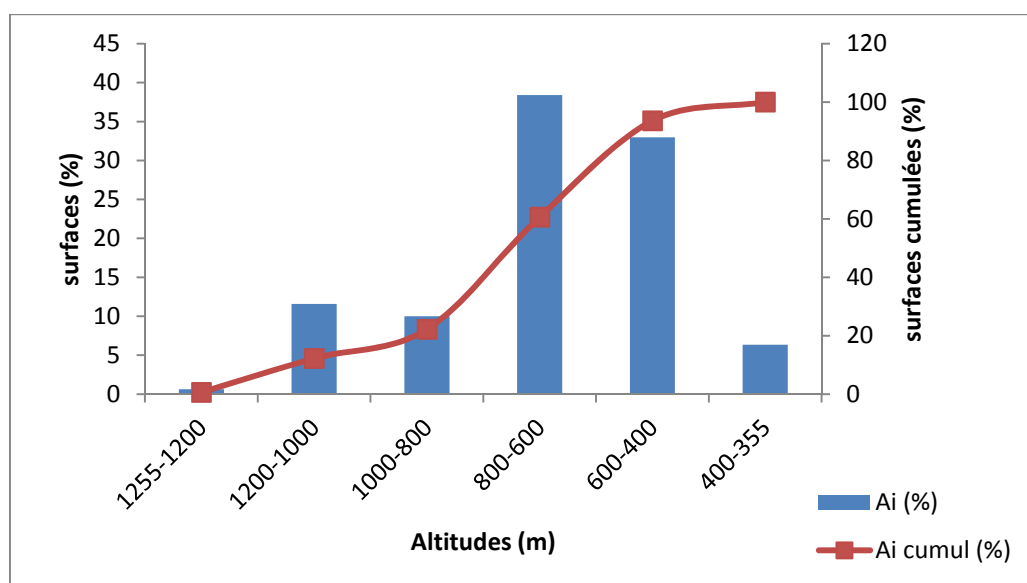


Fig. 1.10 / Courbe hypsométrique et histogrammes des fréquences Altimétriques du bassin versant de l'oued tafna

L'accentuation de la pente de la courbe vers les basses altitudes indique que la partie aval du bassin du mouilah est bien occupée par la plaine importante de Maghnia-Angades. Vers les hautes altitudes, le relief accentué à l'amont du bassin est bien mis en évidence par la forme de la courbe hypsométrique

A partir des courbes hypsométriques et les histogrammes des fréquences altimétriques, nous avons tiré les altitudes caractéristiques et l'état des bassins. Hmax = 1824m ; Hmin = 285m.

L'altitude moyenne est définie comme suit :

$$H_{moy} = \frac{\sum A_i \times h_i}{A}$$

Avec H_{moy} : altitude moyenne du bassin(m) ; A_i : surface comprise entre deux courbes de niveau (km^2) ; h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m) ; A : surface totale du bassin versant (km^2).

$H_{moy}=190.5m$

a)- Indices de pente

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global I_g donné par la relation :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

Où,

I_g : indice globale de Roche

D : dénivelée (m).

L'unité de base du calcul de tous ces caractères est le kilomètre; P , L , l , d_i s'expriment en kilomètres, A en km^2 , CI et I_p sont des nombres sans dimension. Seul I_g fait exception ; pour être plus parlant, cet indice s'exprime en m/km ou en % unité usuelle des mesures de pente ; pour cela, D est pris en mètres et L en km (Dubreuil, 1966)

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale.

H_5 et H_{95} sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin.

La dénivelée D est donc égale à H_5-H_{95} .

Dans notre bassin ; $H_5=500m$; $H_{95}=1350m$.

$$\text{Donc } I_g = \frac{(H_{5\%}-H_{95\%})}{L}$$

$$I_g = \frac{(1350 - 500)}{83.10}$$

$$I_g = 10.23m/km$$

L'indice de pente I_p également défini par Roche à partir du rectangle équivalent est égal à :

$$I_p = L^{-1/2} \cdot \sum_n \sqrt{\alpha_i \cdot d_i}$$

Où α_i représente la fraction en % de la surface A comprise entre deux courbes de niveau voisines distantes de d_i .

L : Longueur du rectangle équivalent

Tab 1.7/ Valeurs des indices de pente de bassin Mouillah :

bassin	I_p (%)	I_g (m/km)	Relief selon I_g
Oued mouillah	0,16	10,23	Très fort

Tab. 1.8/ Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM (Ghenim A., 2001)

Type de relief	Indice de pente globale
Relief très faible	$I_g < 0.002$ m/km
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$0.5 \text{ m/km} < I_g$

➤ Dénivelée spécifique (D_s)

Comme l'indique sa formule, L'indice I_g décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente.

$$D_s = I_g \times \sqrt{A}$$

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$) et de la forme du bassin (I/L).

Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins :

Tab 1.9/ Classification du relief selon D_s . (Ghenim A., 2001)

$D_s < 10M$	Relief très faible
$10m < D_s < 25m$	Relief faible
$25m < D_s < 50m$	Relief assez faible
$50m < D_s < 100m$	Relief modéré
$100m < D_s < 250m$	Relief assez fort
$250m < D_s < 500m$	Relief fort
$D_s > 500m$	Relief très fort

La valeur calculée de (D_s) dans le cas de notre bassin est de 526,62 m. Suivant le tableau (1.3) le bassin est caractérisé par un relief très fort, d'où l'influence bien prononcée des massifs montagneux dans notre bassin.

➤ **Coefficient de torrentialité :**

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage :

$$C_t = D_d \times F_1$$

Avec :

D_d : densité de drainage

F_1 : fréquence des thalwegs élémentaires $F_1 = \frac{N_1}{A}$ avec N_1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1

➤ **Temps de concentration :**

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

$$T_c = \frac{4\sqrt{A + 1.5L}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Où,

Tc : temps de concentration (heures)

A : superficie du bassin (km²)

L : longueur du thalweg principal (km)

Hmoy : altitude moyenne (m)

Hmin : altitude minimale (m)

Tab.1.10 / Valeurs des coefficients de torrentialité et les temps de concentrations des eaux de l'oued mouilah

Bassin	Coefficient de torrentialité CT	Temps de concentration TC
Oued mouilah	0,0032	20h 30min

La basse valeur de l'oued mouilah, est liée soit à la faiblesse des précipitations, ou encore à la forte perméabilité des formations lithologiques.

Le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief (Bouanani, 2004)

La très faible valeur du Ct de l'oued Mouilah est liée à l'échelle de la carte utilisée pour la détermination du nombre et de la longueur des talwegs de différents ordres.

I.3.3 / Le réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux :

- **La géologie :**

Par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. Le réseau de drainage n'est habituellement pas le même dans une région où prédominent les roches sédimentaires, par comparaison à des roches ignées (i.e. provenant du refroidissement du magma). La structure de la roche, sa forme, les failles, les plissements, forcent le courant à changer de direction.

- **Le climat:**

Le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.

- **La pente du terrain :**

Détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

- **Le degré de développement du réseau**

- **La densité de drainage**

La densité de drainage est définie par :

$$D_d = \frac{\sum L}{A}$$

Où,

Dd: densité de drainage en km/km²

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km.

A : aire du bassin en km².

L'importance du drainage est due principalement à la nature des formations qui forment le bassin ainsi qu'aux pentes assez fortes des versants d'une part et d'autre part au régime climatique, caractérisé par ses pluies irrégulières et violentes.

- **Le rapport de confluence**

Il est défini par :

$$R_c = \frac{N_n}{N_{(n+1)}}$$

Où,

R_c : rapport de confluence.

N_n : nombre de cours d'eau d'ordre n.

- **Rapport des longueurs**

La définition est la suivante :

$$R_L = \frac{L_{(n+1)}}{L_n}$$

L_n : longueur de cours d'eau d'ordre n.

Les paramètres qui régissent le régime hydrologique de l'oued mouilah sont mentionnés au tableau ci-dessous :

Tab. 1.11 / Paramètres morphométriques du réseau hydrographique de l'oued mouilah

Bassin	D_d	R_c	R_L
Oued mouilah	0,16	3,88	2,34

Les rapports R_c et R_L expriment simplement que le nombre des cours d'eau de chaque ordre forme, dans un bassin, une série géométrique inverse, et que les longueurs moyennes s'ordonnent selon une série géométrique directe.

Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents importants qui ont affecté les formations carbonatées du Jurassique et se modifie avec l'évolution de la tectonique.

L'étude morphométrique établie à partir de la carte topographique à l'échelle au 1/200000 ne permet pas de reproduire complètement, ni fidèlement le chevelu, d'où disparition importante des thalwegs d'ordre inférieur.

1.3.4 / Le couvert végétal :

D'une manière générale, les sols dans ce bassin sont constitués par :

- les sols calcaires qui longent l'oued Mouilah et se prolongent au Nord-Est des monts des Traras et aux piémonts de Tlemcen. On y trouve généralement une végétation herbacée.
- Les sols calciques : caillouteux et peu profonds, ils se développent surtout le long de la vallée d'oued Mouilah.
- Les sols alluviaux constitués principalement de sols calcaires lourds recouvrant les basses terrasses et les lits des oueds. Ils sont localisés au Nord de la plaine de Maghnia.
- Les sols rouges à encroûtement : ces sols formés de marnes du Miocène, couvrent une grande partie de la plaine de Maghnia où l'on rencontre une culture extensive irriguée.

La quasi moitié de la superficie du bassin (49%) est constituée de terrains Généralement nus, localisés dans la partie ouest du bassin. Dans l'autre moitié, on retrouve une culture extensive (21% de la surface), un couvert forestier normal (14% de la surface) et des terrains de parcours.

Tab. 1.12/ Distribution du couvert végétal dans le bassin d'oued Mouilah (Bouanani, 2004)

occupation des sols	Surface (ha)	% des surfaces
Cultures extensives	57 200	21,58
Couvert forestier dégradé	9 500	3,58
Couvert forestier normal	39 000	14,72
Arboriculture	1 200	0,45
Couvert mort	131 000	49,43
Prairies et terrains de pavage	27 100	10,23

I.3.5 / Conclusion :

Le barrage h.boughrara se situe dans la confluence de l'oued mouillah et l'oued de Tafna, ce dernier a une densité de drainage la plus petite ce qui engendre un écoulement facile des eaux de ruissellement car la stagnation de ces eaux est faible.

Et comme on sait que la majeure partie du barrage est occupée par Le bassin versant de l'oued mouilah qui a une superficie de l'ordre 2650 Km². Il est caractérisé par un relief très fort car la dénivelée spécifique est d'environ 526,62 m

La basse valeur du coefficient de torrentialité (0,0032) de l'oued mouilah, est liée soit à la faiblesse des précipitations, ou encore à la forte perméabilité des formations lithologiques

Le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief ; Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents importants qui ont affecté les formations carbonatées du Jurassique et se modifie avec l'évolution de la tectonique. Ce réseau est caractérisé par le rapport de confluence $R_C = 3,88$ et le rapport des longueurs $R_L = 2,34$.

La moitié de la surface du bassin mouilah est nue (50%) ; Dans l'autre moitié, on retrouve une culture extensive (21% de la surface), un couvert forestier normal (14% de la surface) et des terrains de parcours.

I.4 / GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT

I.4.1 / Introduction :

La **stratigraphie** est une discipline des sciences de la Terre qui étudie la succession des différentes couches géologiques ou strates. Il s'agit d'une approche intégrée, en ce que des résultats apportés par la géochimie, la paléontologie, la pétrographie, l'astronomie... sont réunis et exploités à travers différentes

méthodes : biostratigraphie, chimiostratigraphie, lithostratigraphie, magnétostratigraphie, cyclostratigraphie...

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grés, calcaires, dolomies,...). La nature des affleurements a une influence sur l'hydrologie de surface et le type du dépôt alluvionnaire.

I.4.2 / Cadre géologique général de la Tafna :

Le bassin de la Tafna comprend de grandes plaines, dont les deux principales sont celle de Maghnia à l'Ouest et celle des Ghossels à l'Est entourées de massifs élevés :

- le massif des Traras comprenant la chaîne des Fillaoucène qui s'étend vers l'Ouest par le massif des Béni-Snassen.
- les monts de Tlemcen dessinant la bordure sud du bassin et s'interposent entre deux domaines bien définis :
 - le domaine des nappes du Tell au Nord,
 - le domaine stable des hautes plaines oranaises au Sud.

La terminaison occidentale des monts de Tlemcen qui s'élève graduellement du Nord vers le Sud est occupée par un massif montagneux représenté par les monts de Rhar-Roubane.

I.4.3 / Série stratigraphique :

Les formations géologiques qui affleurent dans l'ensemble du sous bassin versant de l'Oued Mouillah du plus récent au plus ancien sont :

-Quaternaire : Il affleure en général dans la zone d'étude au niveau des oueds comme oued Abbés, oued Aounia, oued Tafna. Il représente les terrasses des oueds (graviers hétérométriques et hétérogènes, galets de taille différente, sables argileux).

-Pliocène continental : Constitué surtout de grès et parfois associés à des limons. Il affleure au niveau des deux rives de l'oued Tafna à Sidi Medjahed.

-Miocène supérieur : Il est caractérisé à sa base par des grès qui annoncent la transgression miocène. On passe à des marnes miocènes bien représentées dans la zone d'étude et au Nord de l'oued Mouillah où il forme sa rive gauche. Vers le haut on passe à des marnes sableuses.

-Miocène inférieur : Il affleure au Sud-Ouest de la zone d'étude, représenté par des marnes.

-Jurassique supérieur : Il affleure à Maghnia et forme la rive droite d'Oued Mouillah au Nord. Il est représenté par des marnes un peu gréseuses à la base qui passe à des dolomies cristallines

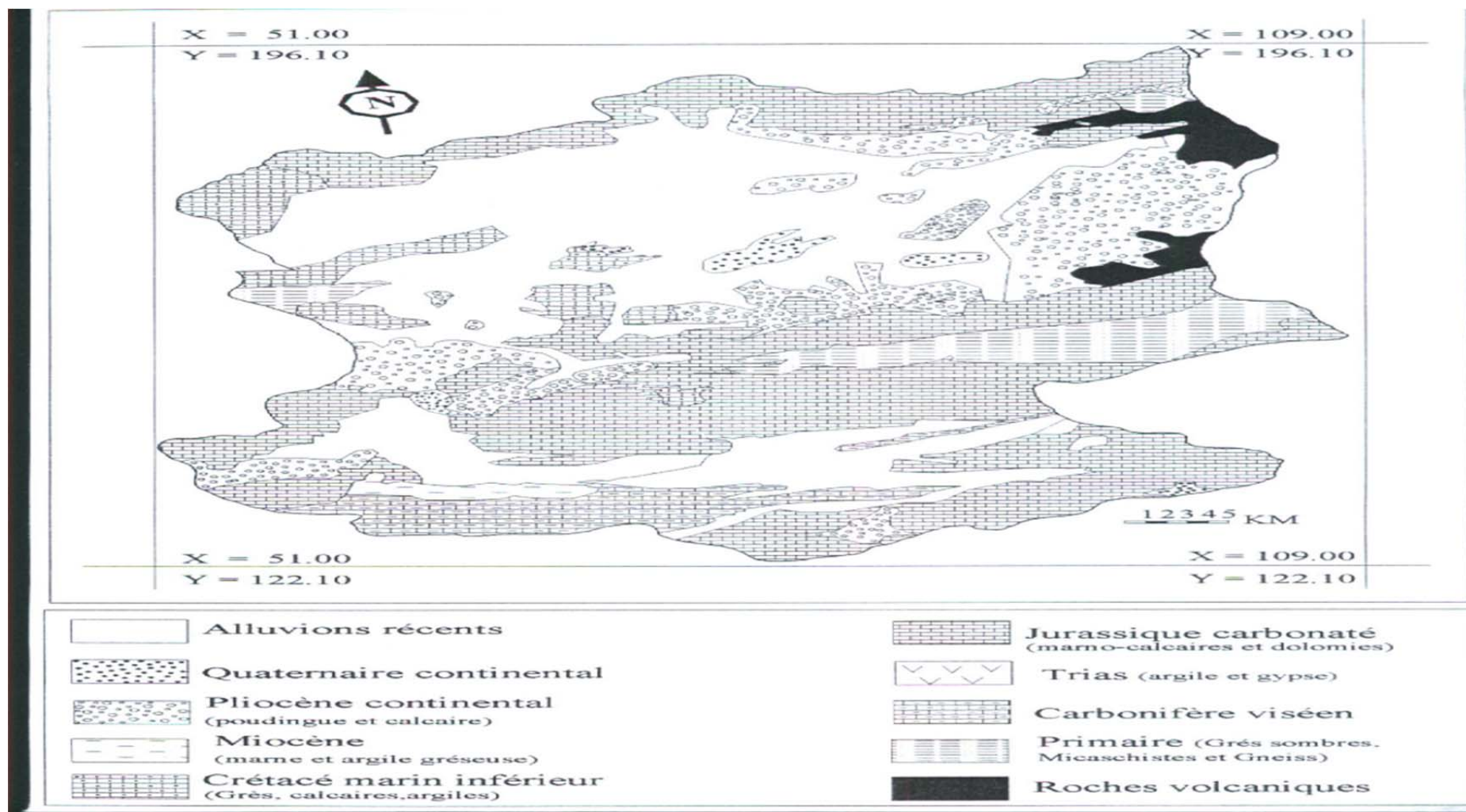


Fig. 1.11/ Carte lithologique du bassin versant d'oued Mouilah (BOUANANI, 2004)

Chapitre II: Climat du bassin versant de L'Oued tafna-Mouilah

II.1/ Introduction :

Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les populations que pour les écosystèmes. Elles sont faciles à mesurer. Autant de raisons qui font que la plupart des études et analyses portent sur les précipitations bien plus que sur d'autres paramètres du climat. Caractériser l'impact de la variabilité climatique sur les régimes pluviométriques saisonniers devient alors indispensable pour proposer des solutions adaptées aux projets de développement.

L'étude de Bouanani (2004), analysant des séries qui s'étalent sur la période 1970-1998, a montré que le bassin de la Tafna présente plusieurs zones pluviométriques bien distinctes. Au nord, apparaît une zone relativement homogène caractérisée par des totaux annuels compris entre 400 et 450 mm ; elle correspond au domaine littoral (basse Tafna), avec cependant deux tentacules qui remontent vers le sud en profitant de l'effet d'abri des vallées de Sebdou et de Khemis qui longent la bordure ouest du bassin. Au centre, le cloisonnement du relief crée une mosaïque de climats locaux. Le dôme traduit des écarts marqués dans la pluviométrie, variant entre 450 et 550 mm, sous la dépendance de l'altitude.

II.2/Aperçu sur le climat de l'Afrique du Nord :

Le climat d'Afrique du Nord est influencé par la mer Méditerranée au nord, l'océan Atlantique à l'ouest, le Sahara au centre sud et dans une moindre mesure le Sahel à l'extrême Sud de la zone. Avec ces influences climatiques, on peut donc citer les climats généraux d'Afrique du Nord :

- Le climat méditerranéen est caractérisé par une saison fraîche et humide en hiver liée à la descente des dépressions dynamiques subpolaires et une saison chaude et sèche en été liée à la remontée des anticyclones dynamiques subtropicaux. Les températures moyennes maximales en été sont souvent légèrement supérieures à 30 °C en été alors que les températures moyennes minimales restent souvent autour de 5 °C en hiver, voire encore moins. Les précipitations annuelles moyennes sont entre 400 mm et 800 mm par an, de façon globale et sont réparties de façon très inégale sur l'année. Le climat y est plutôt sec et très ensoleillé toute l'année. La douceur des hivers et les grosses chaleurs de l'été font de ce climat, un climat relativement chaud.
- Le climat océanique existe mais reste très rare et ne concerne qu'une petite bande étroite de la façade occidentale du Maroc. Ce climat est

caractérisé par une saison fraîche et humide et hiver et une saison douce et assez sèche en été mais la chaleur et sécheresse estivale sont beaucoup moins accentuées que celles qui caractérisent le climat méditerranéen. Les températures moyennes maximales en été sont souvent légèrement supérieures à 25 °C en été alors que les températures moyennes minimales restent souvent autour de 5 °C en hiver, voire encore moins. Les précipitations annuelles moyennes sont supérieures à 800 mm en général. Le climat est doux, humide toute l'année mais ensoleillé.

- Le climat désertique est le climat typique du Sahara, le plus grand désert d'Afrique et le plus grand désert chaud au monde. Ce climat est caractérisé par une sécheresse extrême toute l'année et par l'absence de saison des pluies marquée. Ceci est dû à l'influence plus ou moins permanente des anticyclones dynamiques subtropicaux et de leurs alizés continentaux (vents de nord à nord-est). Le Sahara, en soi, est un désert largement hyper-aride avec des précipitations moyennes partout inférieures à 50 mm par an. Seules ces marges les plus septentrionale et méridionale sont seulement arides avec des totaux annuels moins faibles. Le gigantesque noyau central hyper-aride représente la zone du Sahara située en permanence sous le régime anticyclonique le plus accentué. Les régions les moins sèches composent la partie la plus méridionale du désert et peuvent recevoir jusqu'à 200 mm par an dans la zone de transition avec le Sahel, dont la majeure partie ne tombe qu'en un ou deux mois tout au plus à cause de la remontée des dépressions thermiques équatoriales liées à la zone de convergence intertropicale qui parviennent sur le désert atténuées. Le climat y est très sec et très chaud toute l'année. Les étés sont suffocants avec des températures moyennes maximales supérieures à 40 °C excepté dans les hauts massifs sahariens (Hoggar, Tibesti, Air) où l'altitude abaisse évidemment les températures mais peuvent atteindre jusqu'à 48 °C dans les endroits les plus chauds, ce qui représente un maximum mondial. Les hivers sont modérément chauds voire chauds en journée mais les températures moyennes minimales sont en général inférieures à 16 °C mais peuvent descendre légèrement en-dessous de 4 °C. Le Sahara est une région exceptionnellement ensoleillée toute l'année, hiver comme été.
- Le climat semi-aride est le climat typique du Sahel, bande continue de savanes tropical semi-arides et de steppes située au sud du Sahara. Ce climat est caractérisé par une sécheresse extrême entre 8 et 10 mois par an liée à l'alizé continental appelé harmattan vent chaud et très sec qui souffle du nord-est depuis les anticyclones dynamiques subtropicaux, ainsi qu'une saison des pluies très courte mais intense durant les mois les plus chauds de l'année à cause de la remontée des

dépansions thermiques équatoriales liées à la zone de convergence intertropicale qui atteignent le Sahel ainsi que le sud du Sahara. Les températures moyennes maximales sont en général entre 38 °C et 41 °C ou plus pendant l'été, alors que les hivers restent très chauds avec des températures moyennes minimales qui restent supérieures à 15 °C en général. Les précipitations moyennes annuelles se situent entre 100 et 200 mm dans la zone saharo-sahélienne, entre 200 et 400 mm dans la zone typiquement sahéenne et entre 400 et 600 mm dans la zone sahélo-soudanaise.

Les différentes situations météorologiques perturbées qui sont susceptibles d'affecter l'Afrique du Nord correspondent à une circulation des masses d'air orientées d'une manière zonale (approximativement d'Ouest en Est) suivant le flux de Westerlies (MOKHTARI ELHADJ, 2009)

II.3 / Aperçu sur le climat de l'Algérie :

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

Le climat de l'Algérie est varié, car le pays a une très grande superficie : La partie nord possède un climat méditerranéen (Classification de Köppen *Csa*), alors que le reste du pays possède en majorité un climat désertique. Cependant entre ces deux grands types de climats, existent des climats de transition, notamment le climat semi-aride qui est correspond à un climat méditerranéen avec une sécheresse ne se limitant plus uniquement à la saison estivale mais à une bonne partie de l'année mais aussi un climat méditerranéen aux influences montagnardes, un petit plus continental. Néanmoins, l'Algérie est un pays de la zone subtropicale où le climat dominant est chaud et sec.

En Algérie les précipitations sont caractérisées par une variabilité spatio-temporelle très marquante. La tranche de pluie annuelle décroît à mesure que l'on avance vers le sud et tombe à moins de 100 mm au sud de l'atlas saharien, cette valeur étant habituellement considérée comme marquant le début du désert. A la décroissance des pluies du Nord au Sud se superpose une décroissance de l'Est à l'Ouest.

II.4/ Climat de la Tafna :

Le nord de l'Algérie est dans la zone tempérée et jouit d'un doux climat méditerranéen. Le pays se trouve à peu près à la même latitude que le sud de la Californie et possède des conditions climatiques à peu près

similaires. Compte tenu de sa topographie, il existe de forts contrastes dans les températures avec des incidences sur la pluviométrie.

Les bordures Nord Centre et Est reçoivent en moyenne des quantités annuelles de précipitations variant entre 600 et 1150 mm. Elles sont de ce fait plus arrosées que le reste du pays. Les bordures Nord-Ouest par exemple enregistrent des totaux annuels moyens de l'ordre de 250 à 500 mm (M. Mahmoud, ONM 2012).

La région de Tlemcen se trouve entre deux domaines géographiques contrastés : les monts de Tlemcen au Sud et la zone des plaines qui s'étendent vers le Nord. La Tafna présente en général la même configuration géographique. (Bouanani, 2004)

Les précipitations dans le bassin de l'oued Tafna sont réparties de façon assez irrégulière. La partie est du bassin versant, dont le relief est montagneux, se caractérise par une assez grande abondance en précipitations (500 à 800 mm). La partie ouest, qui inclut le bassin de l'oued Mouilah avec ses confluent, se situe dans la zone où les précipitations font 300 à 400mm et les plaines des Angad et de Maghnia sont les régions les plus sèches du bassin.

II.5/ Etude des précipitations :

II.5.1/Caractéristiques pluviométriques du bassin versant :

Les données de la pluviométrie qui caractérisent notre bassin ont été recueillies au niveau de onze stations les plus proches du barrage boughrara.

Les coordonnées Lambert sont mentionnées dans le tableau (2.1).

Tab.2.1/ Caractéristiques des stations de mesure du bassin d'étude (ANRH, 2011)

Station	Code	Coordonnées			Période d'observation
		X (m)	Y(m)	Z(m)	
HAMMAM BOUGHRARA	160501	103.5	186.1	270	1998/2004
SMALA SIDI MEDJAHED	160407	102.8	173.1	360	1953/1961 et 1967/2004
MAGHNIA FRONT	160302	88.1	176.75	430	1972/2004
BENI OUASSINE	160303	90.8	180.7	410	1953/1961 et 1967/2004
BENI BOUSSAID	160315	92.4	159.6	675	1986/2004
SEBDOU	160401	131.25	158.55	875	1975/2004
BARRAGE BENI BAHDEL	160403	115	164.6	666	1972/2004
khemis	160406	109.55	157.3	920	1972/2004
SEBRA	160502	113.45	178.35	600	1974/2004
MLILIA HENNAIA	160516	126.75	188.25	515	1974/2004
	160517	102.75	202.5	370	1973/2004

Bien que la notion de la moyenne pluviométrique estompe la réalité des faits climatiques, notamment en domaine méditerranéen, sa connaissance demeure nécessaire pour aborder l'étude de l'abondance des cours d'eau et surtout la détermination du bilan moyen annuel de l'écoulement. Elle permet également de cerner la variabilité des pluies sur de longues périodes d'observation, néanmoins, cette variabilité doit être précisée par des moyens statistiques qui permettent de lier les hauteurs précipitées à leur durée de récurrence (Bouanani, 2004).

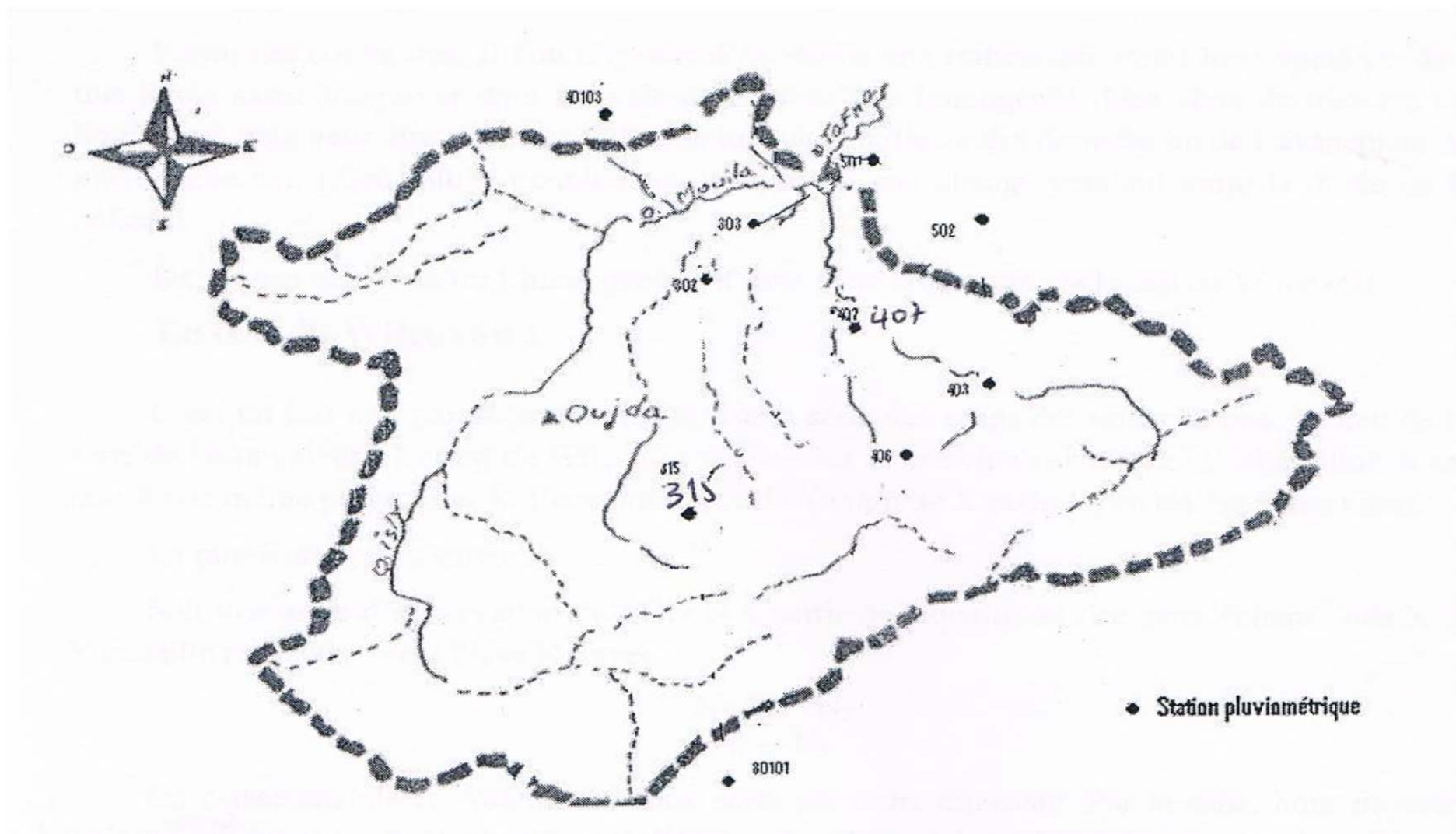


Fig 2.1. Position des stations pluviométriques utilisées (BAHLOUL ,2013)

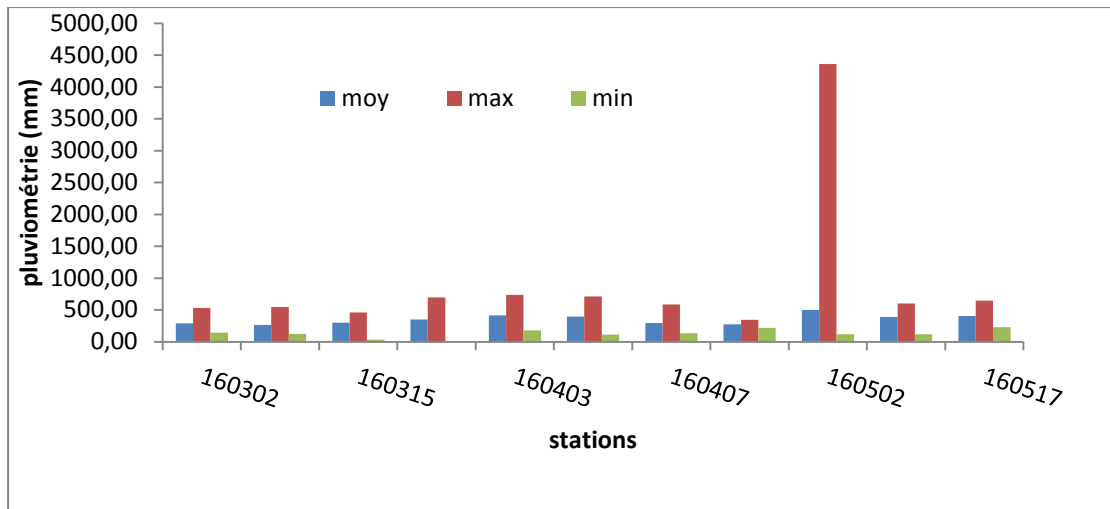


Fig. 2.1/ Caractéristiques pluviométriques des stations de mesure.

Selon le graphe (fig.2.1), on remarque une homogénéité entres les différentes stations pluviométriques, voir les stations de sebdou, beni bahdel et moussa sont presque égales, tandis que pour la station de sebra, on constate une valeur supérieure de la pluviométrie (4358,6 mm).

Tab.2.2/ Caractéristiques des pluies annuelles des stations pluviométriques du bassin versant.

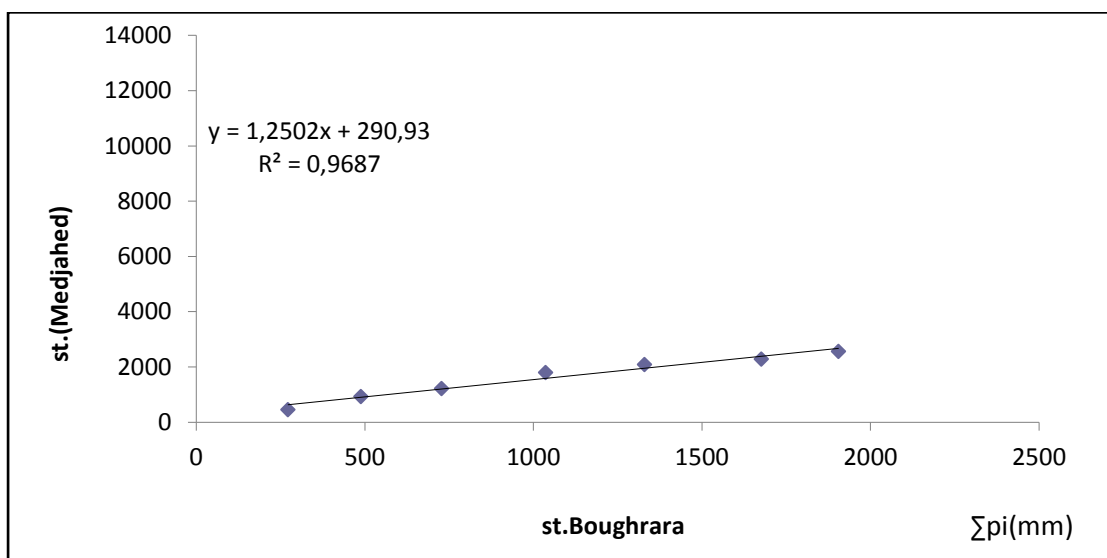
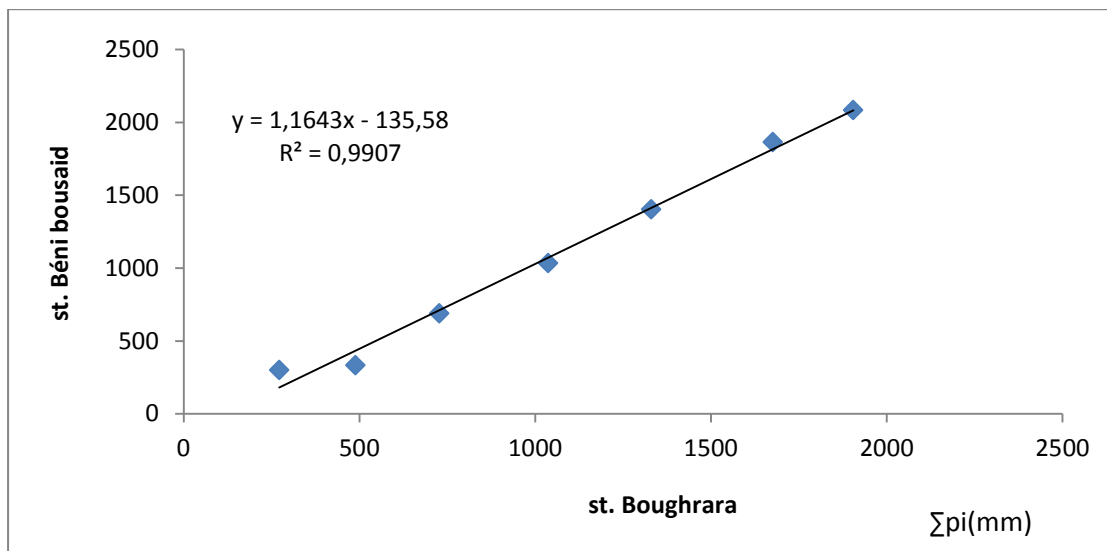
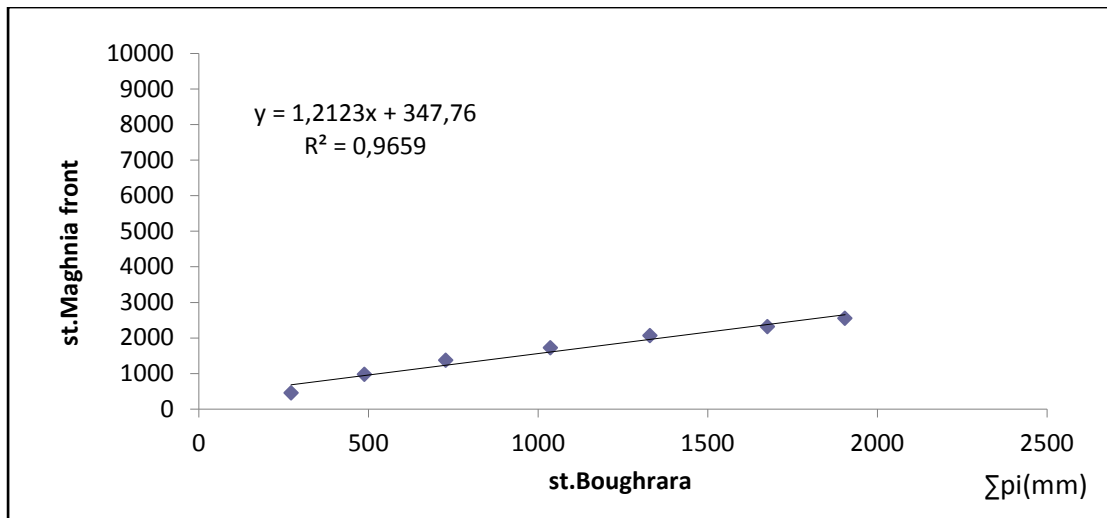
Station	Moyenne (mm)	Pmax (année)	Pmin (année)	Nbre années>moy	P max/Pmin
Bougrara	272,13	346(03/04)	216,5(99/00)	3 sur 7	1,59
Medjahed	314,67	587(73/74)	133(82/83)	16 sur 38	4,41
Maghnia front	294,42	528,4(73/74)	144,9(82/83)	14 sur 30	3,64
Beni ouassine	276,28	544,8(73/74)	121,4(82/83)	18 sur 38	4,48
Beni boussaid	298,48	460,6(03/04)	33,8(99/00)	11 sur 18	13,62
Sebdou	350,49	694(95/96)	1,8(99/00)	13 sur 30	385,55
Barrage benibahdel	413,47	734,6(67/68)	179,9 (78/79)	44 sur 64	4,08
Moussa	396,97	712,3(95/96)	114,4(98/99)	16 sur 32	6,22
Sebra	499,90	4358,6(84/85)	119,7 (81/82)	2 sur 30	36,41
Mliliahennaia	389,10	602,2(74/75)	119,4(81/82)	15 sur 30	5,04
Sidi	406,08	648,2(73/74)	227,4(81/82)	12 sur 31	2,85

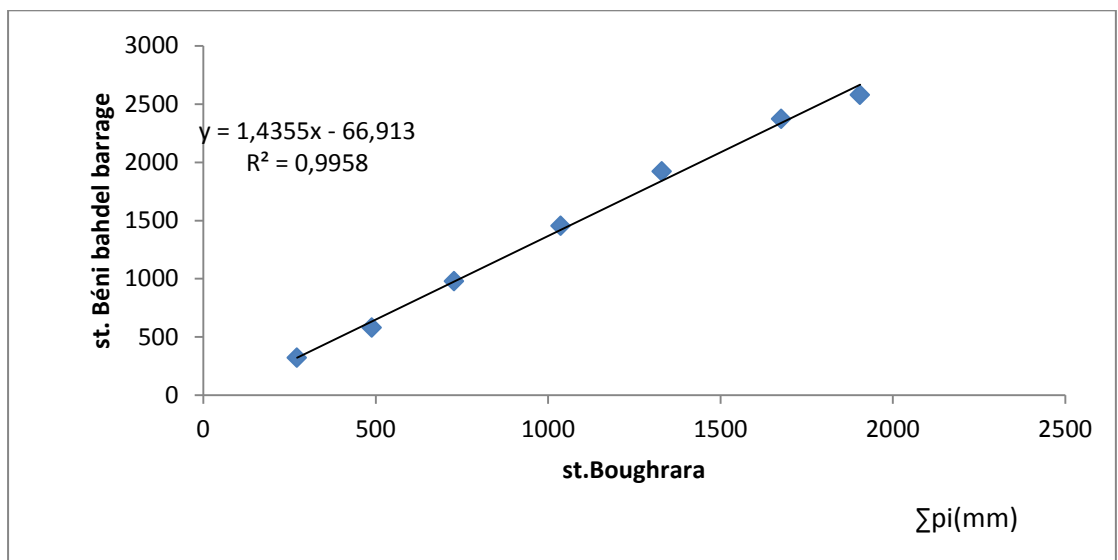
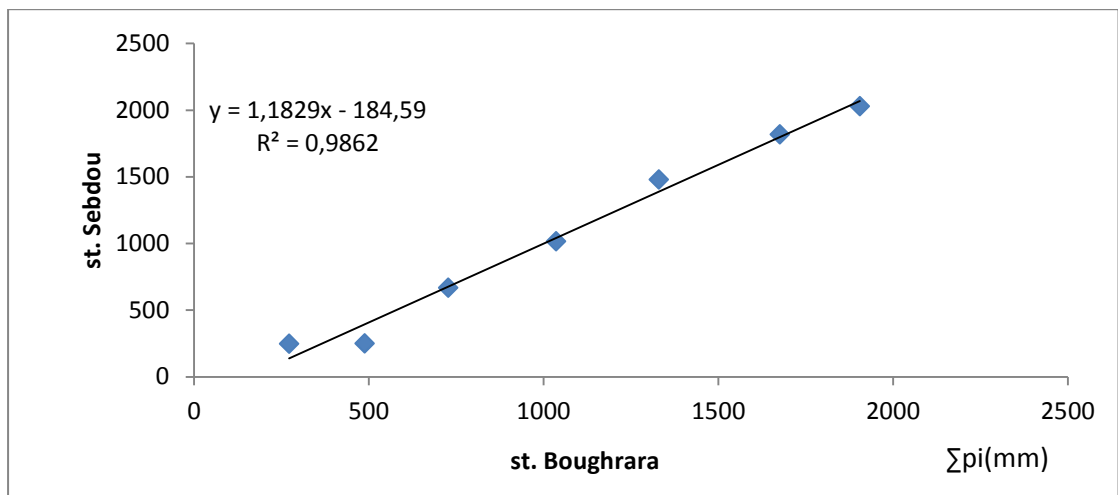
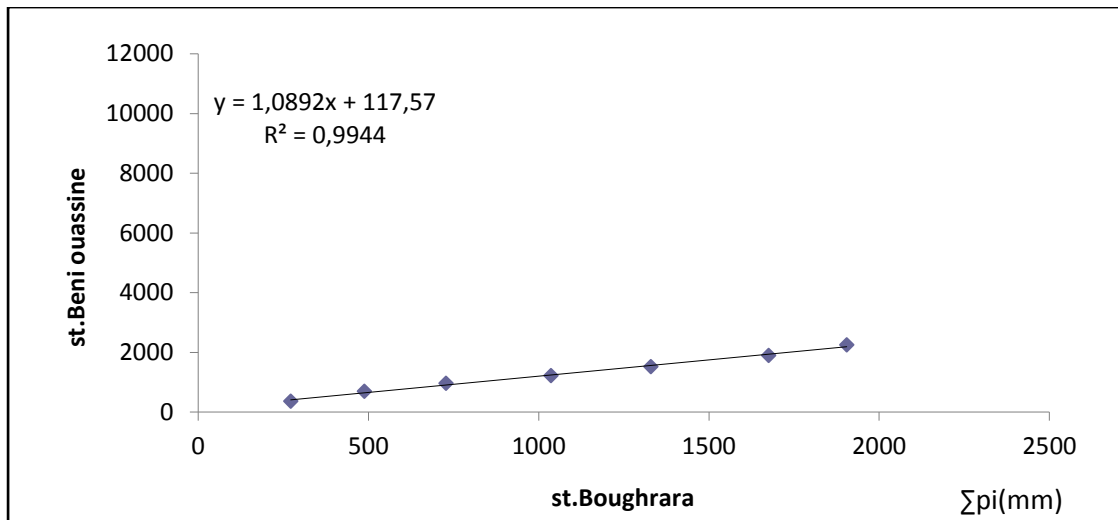
Suivant le tableau (2.2) ci-dessus, les années où la pluie annuelle dépasse la moyenne sont presque la moitié (50%) pour toutes les stations pluviométriques. Cela se traduit par une humidité dans des périodes, par exemple, avant l'année 99/00 pour la station de boughrara, béni boussaid et sebdou, et avant 82/83 pour les stations restantes.

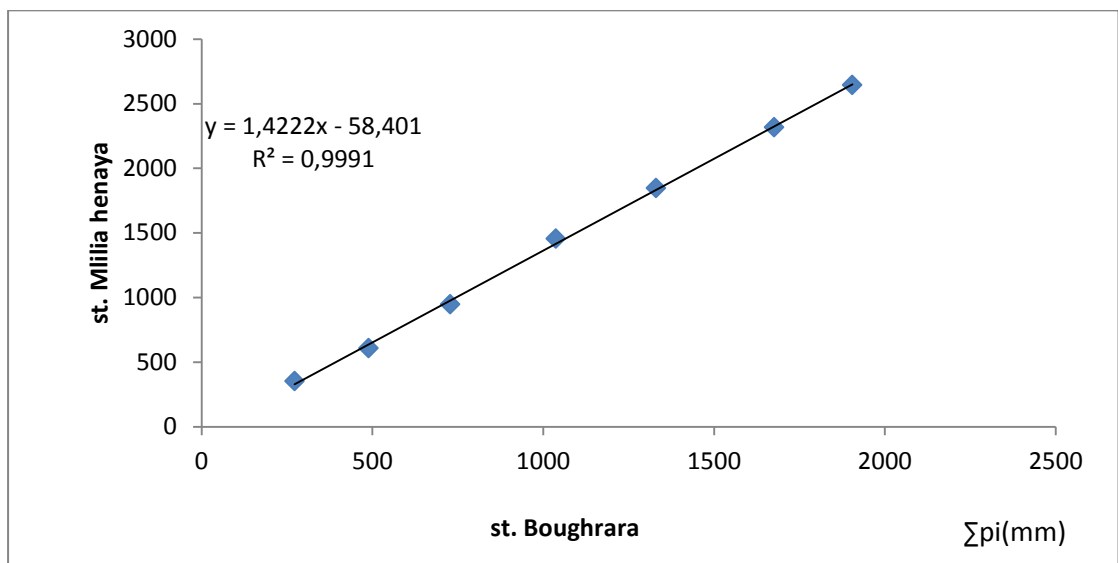
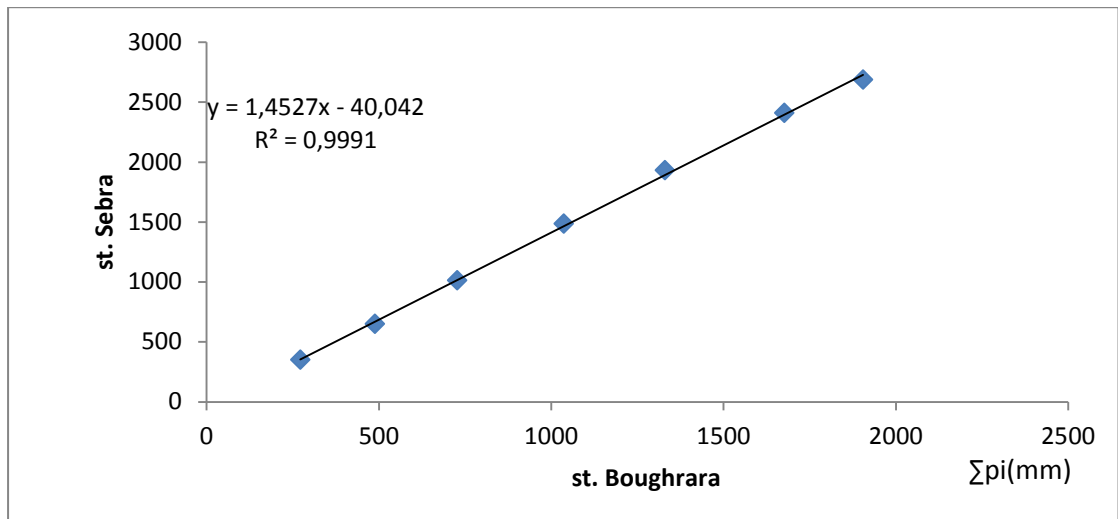
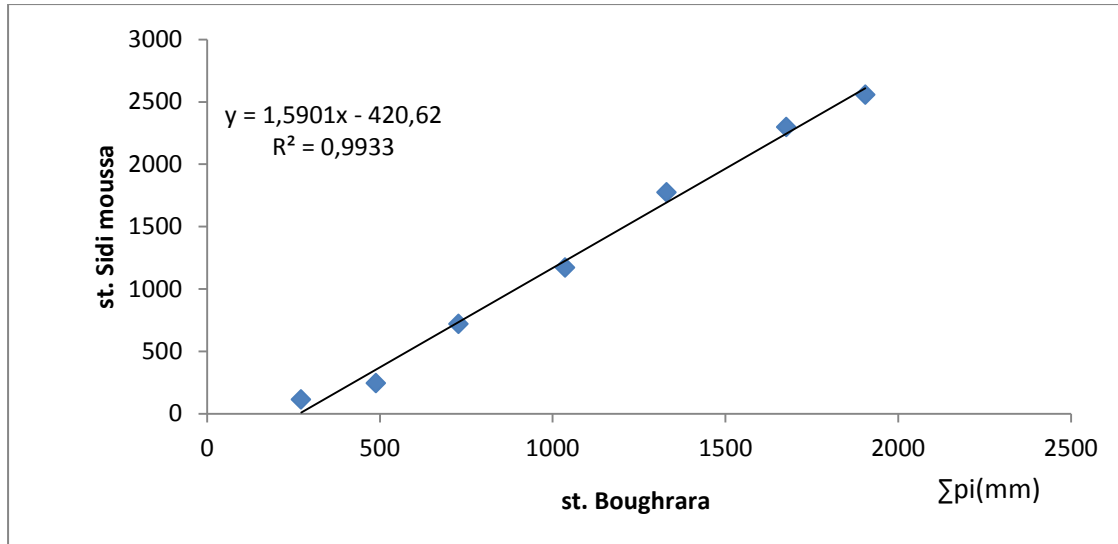
II.5.2 / Homogénéisation des séries pluviométriques:

L'étude de l'évolution des précipitations ne peut utiliser les données hétérogènes. Plusieurs méthodes statistiques permettent de tester l'homogénéité des séries pluviométriques avant utilisation. Parmi elles, nous avons retenu pour sa pertinence et sa simplicité, le test graphique des doubles cumuls ou de cumul simple des totaux pluviométriques annuels (Escourou, 1978). Il s'agit de savoir si les données d'observation sont fiables, donc utilisables telles quelles. En effet, les changements d'observateurs, de déplacements et de fermetures de postes, avaries sur le matériel ou panne d'un pluviomètre qu'on attend plusieurs semaines avant de remplacer, occasionnent de ruptures de continuité dans les séries. Ces aléas peuvent expliquer la présence d'hétérogénéité dans les données. L'intérêt des conclusions des tests apparaît au cours de la classification des régimes pluviométriques et lors de la constitution de la matrice des données en vue d'une étude globale de l'organisation du champ pluviométrique.

En prenant la station boughrara comme station de référence, on peut considérer les autres stations comme homogènes.







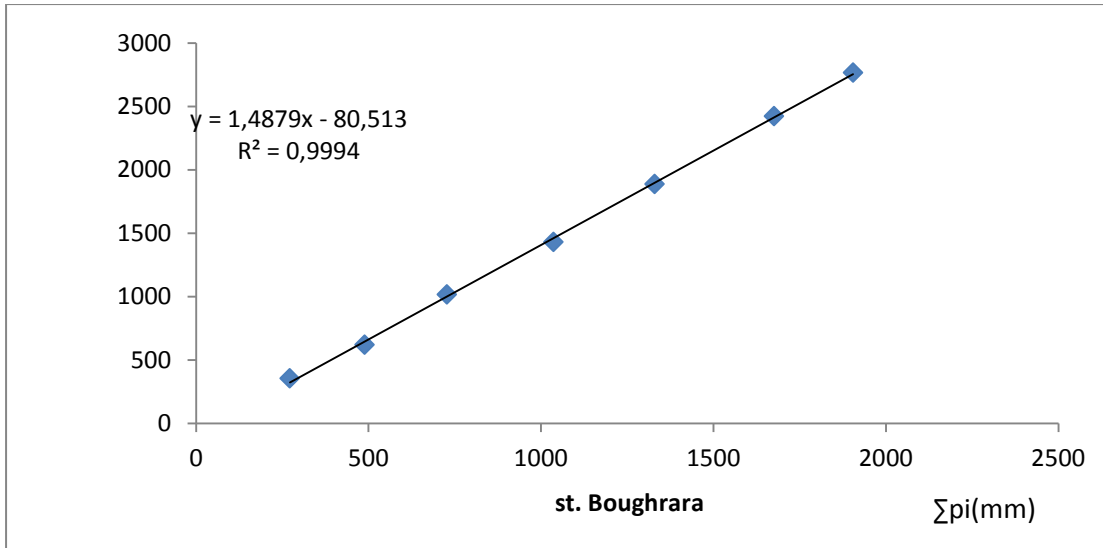


Fig.2.3/la méthode des doubles cumuls entre les stations et la station de Boughrara comme station de référence.

II.5.3/Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles:

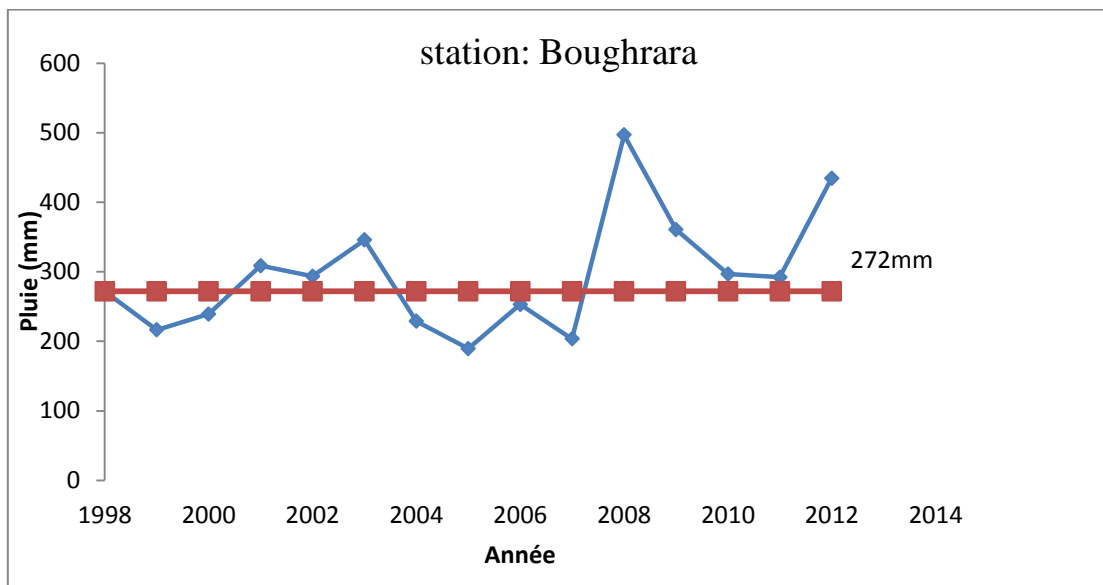


Fig.2.4/Variabilité interannuelle de la pluviométrie annuelle moyenne dans le bassin d'Oued Tafna durant la période (1998/2012)

La figure (2.3) nous montre des fluctuations de précipitations d'une année à l'autre cela nous permet de déterminer les périodes sèches et humides dans la variation interannuelle.

D'après le graphe ci-dessus, on remarque une alternance des années déficitaires et excédentaires durant la période d'étude spécifiant la station

de boughrara qui a connu 08 années excédentaires (2001,2002,2003,2008,2009,2010,2011et 2012) et 07 années déficitaires(1998,1999,2000,2004,2005,2006 et 2007). Dans l'année 2008/2009, il y a un surplus de pluie d'environ 496,9mm.

II.5.4/Variabilité mensuelle et saisonnière des précipitations:

La répartition mensuelle des précipitations dans l'année ainsi que la répartition saisonnière éclaircie La détection des périodes humides et sèches durant l'année hydrologique.

On a choisi 04 stations pluviométriques les plus proches du barrage boughrara pour étudier les précipitations moyennes mensuelles.

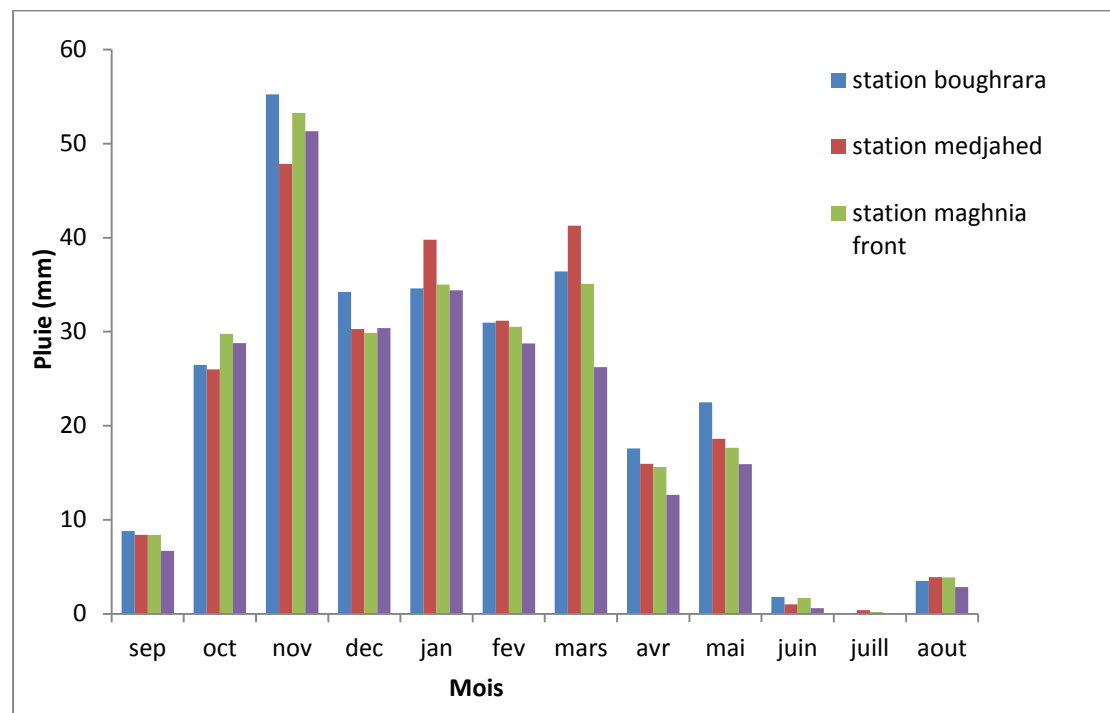


Fig.2.5/Variations des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin d'Oued Tafna (98/04).

D'après la figure 2.5, on distingue deux périodes pluviométriques :

-une période humide qui concerne la saison froide depuis septembre à mai, spécifiant la saison d'automne ou le total de pluie atteint 90mm,

Et l'hiver avec un total de 95mm, après la saison de printemps de 72mm.

La saison sèche est caractérisée par un déficit pluviométrique marqué.

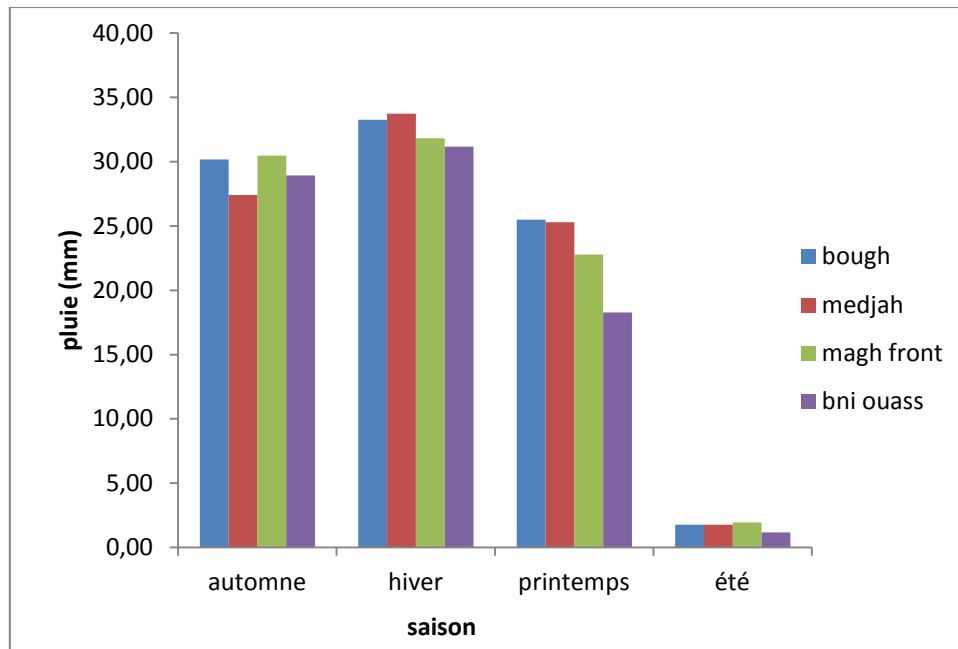


Fig.2.6/ Variation saisonnière des précipitations dans le bassin de l'Oued Tafna (98/12)

Pour bien suivre la variabilité inter mensuelle des précipitations durant la période d'étude, on a établi un graphe qui représente la variation du coefficient de variation mensuellement au niveau de la station de barrage boughrara sur une période de 1998 à 2012 (fig .2.7)

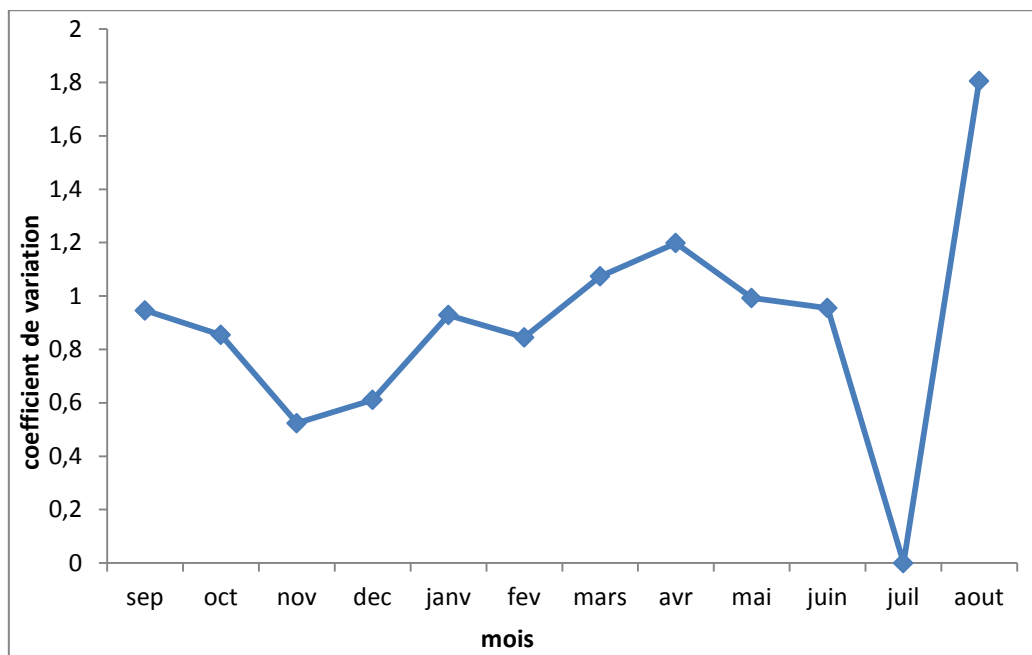


Fig.2.7/ Variations mensuelles du coefficient de variation.

D'après le tableau (2.3) ci-dessous, une très grande irrégularité de la variation pluviométrique d'un mois à l'autre avec des valeurs élevées du coefficient de variation.

La valeur maximale du coefficient de variation a été remarquée au mois d'aout (1,80), cela serait dû à la période de sécheresse associée à l'apparition des orages violents.

Tab.2.3/ moyenne, écart type, coefficient de variation de la série pluviométrique (98/12): Station de Boughrara.

\	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	année
moy	8.81	26.47	55.23	34.23	34.61	30.96	36.41	17.6	22.51	1.8	0	3.5	272.13
Ecart type	8.33	22.61	28.94	20.91	32.13	26.16	39.08	21.09	22.34	1.71	0	6.32	47.11
C_v	0.94	0.85	0.52	0.61	0.93	0.84	1.07	1.20	0.99	0.95	0	1.80	0.17

II.5.5/ Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité

L'étude statistique des séries pluviométriques revêt une importance capitale en hydrologie, surtout en ce qui concerne le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et l'étude des aménagements hydro-agricoles (KARAMBIRI, 1999)

Des études récentes (Hubert et Bendjoudi, 1996) ont montré que la loi de Laplace-Gauss (loi normale) qui est la plus utilisée pour la modélisation statistique des pluies annuelles.

C'est le cas pour notre série pluviométrique des quatre stations (fig 2.8)

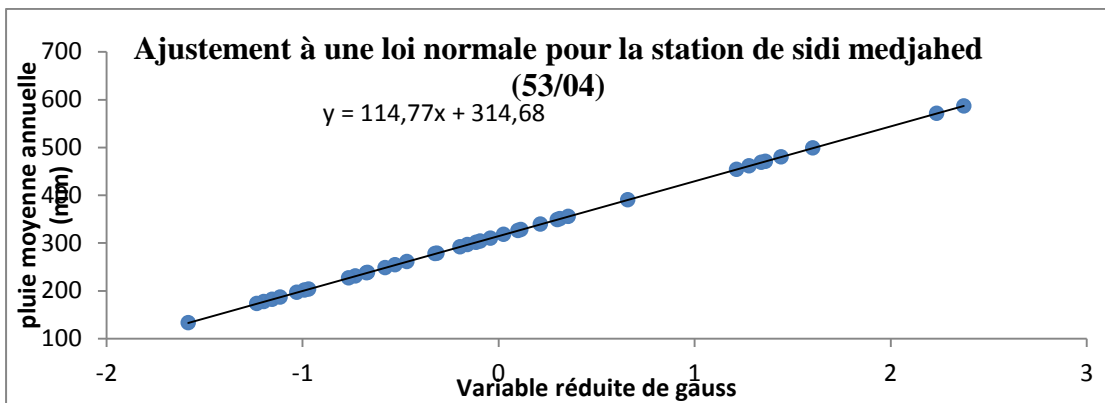
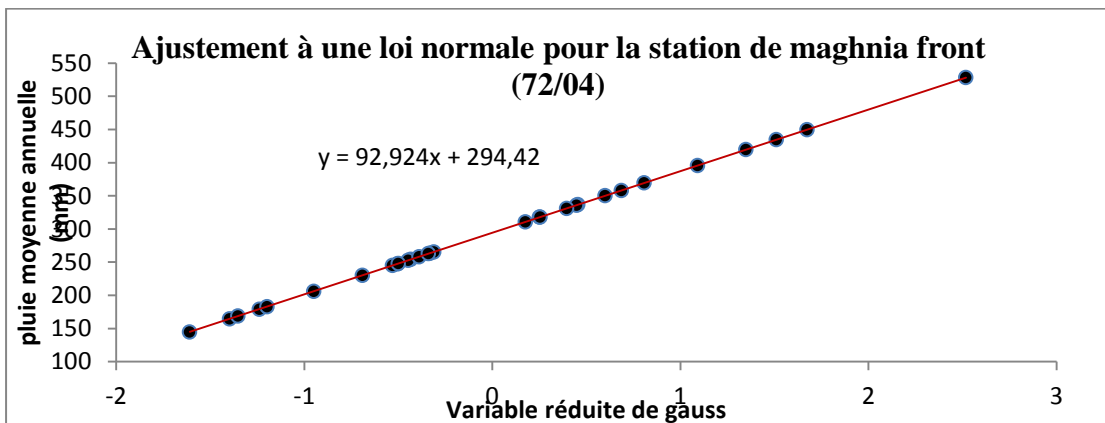
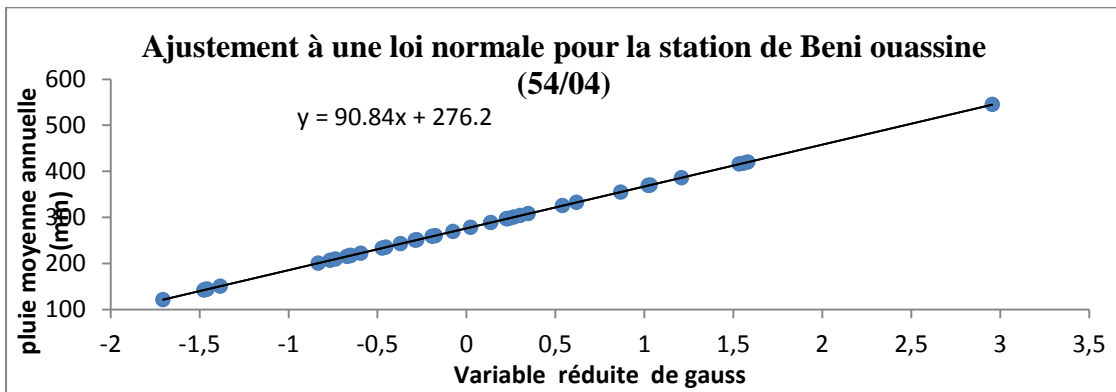
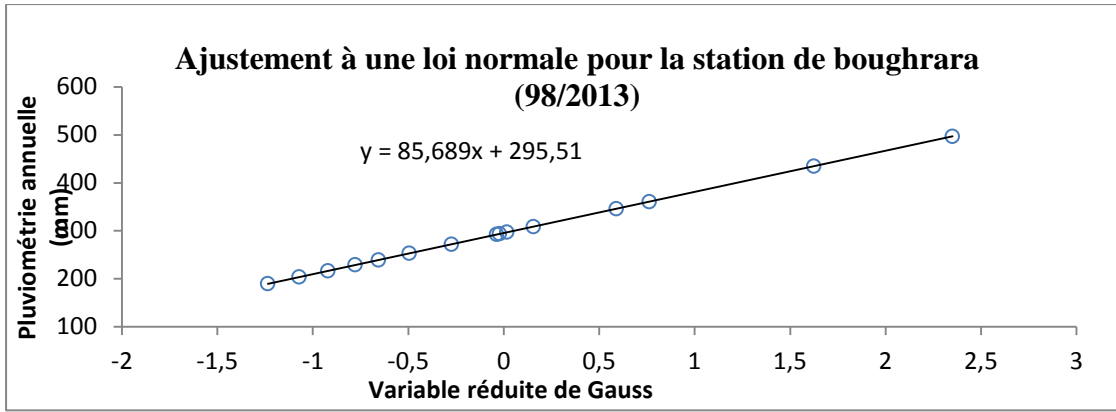


Fig.2.8/Ajustement à une loi normale pour les quatre stations d'étude

Tab.2.4/ Précipitations pour des périodes de récurrence dans les stations du bassin versant.

station	Paramètres statistiques		Pluie moyenne	Pluie décennale	Pluie centennale	Pluie millénaire
	Cv	σ				
bouhrara	0,31	85,689	272,13	381,81	471,78	536,91
Beni ouassine	0,33	90,84	276	392,27	487,66	556,69
Maghnia front	0,32	92,92	294,42	413,36	510,92	581,54
Sidi medjahed	0,36	114,768	314,67	461,57	582,08	669,30

En se référant au tableau (2.2) et suite aux pluies de différentes récurrences, la station de bouhrara a connu une pluie de type décennale pendant l'année (2003/2004), les deux stations, maghnia frontière et sidi medjahed ont connu une pluie de type centennale (73/74). Par contre pour la station béni ouassine la pluie millénaire a été remarquée pendant l'année (73/74).

II.6/ Etude du régime thermique:

Si les précipitations jouent le tout rôle premier rôle en hydrologie, la température de l'air n'en joue pas moins un rôle secondaire. Elle est en effet une des variables indispensables et primordiales pour expliquer la phase des précipitations, la fonte de la neige, les sols gelés, l'évapotranspiration, etc.

On dispose des données de températures moyennes mensuelles et annuelles de la station de bouhrara, avec le minima et les maxima (tableau 2.5)

Tab.2.5/Températures moyennes mensuelles à la station de Bouhrara(ANBT Kobba)

mois	sep	oct	nov	dec	janv	fev	mars	av	mai	juin	juil	aout	ann
moy	25,91	21,77	16,37	13,52	12,27	13,14	15,67	18,78	22,42	27,15	30,23	30,73	20,66
min	23,6	20,5	14	11,3	9,2	11,4	13,6	16,1	18,4	25,3	28,5	28,4	18,36
max	28	23,2	20,2	16,5	14,4	16,7	17	23,2	25,8	28,8	31,3	33	23,18

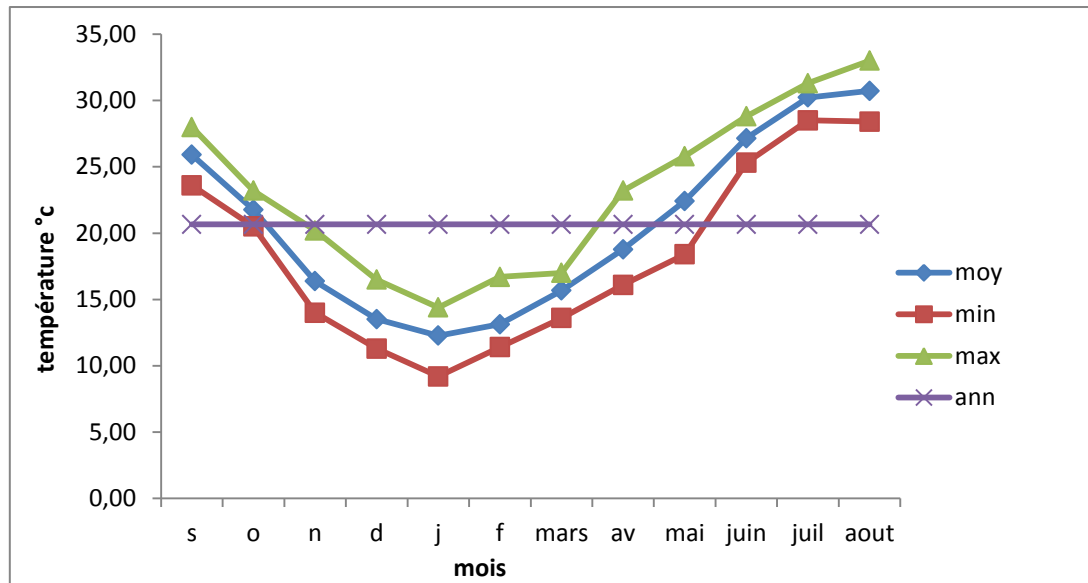


Fig.2.9/Variation mensuelle des températures à la station de Bouhrara (98/14).

La figure (2.9) montre que l'année hydrologique du bassin de l'oued tafna-mouilah se divise en deux saisons thermiques. L'une chaude et sèche qui s'étend d'avril à octobre avec une température moyenne mensuelle ($26,36^{\circ}\text{C}$) supérieure à la moyenne annuelle ($20,66^{\circ}\text{C}$) et l'autre période froide et humide qui s'étend de novembre à avril avec une moyenne de $14,95^{\circ}\text{C}$.

Le mois le plus chaud c'est bien le mois de aout ($30,73^{\circ}\text{C}$) contrairement au mois de janvier le mois le plus froid ($12,27^{\circ}\text{C}$). la température s'abaisse à partir de septembre jusqu'à janvier et commence à augmenter jusqu'au aout.

II.7 /Evaporation:

L'évaporation est le processus par lequel de l'eau passe de l'état liquide ou solide, à l'état gazeux par un transfert d'énergie thermique. C'est une part importante du cycle hydrologique, au point que sur les continents, environ 70 à 75 % du total de la précipitation annuelle retourne à l'atmosphère par évaporation et transpiration. Sous les climats chauds, les pertes d'eau par évaporation à partir des rivières, des canaux et équipements de stockage d'eau à ciel ouvert, constituent un problème vital dans la mesure où elles prélèvent une part importante des approvisionnements en eau.

On dispose des données d'évaporations moyennes mensuelles de la station de boughrara au tableau (2.6) ci-dessous :

Tab.2.6/Evaporations moyens mensuels à la station de Boughrara(ANBT Kobba)

mois	sep	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juill	aout
evaporation (mm)	171.51	119.08	69.82	53.80	52.00	59.33	91.13	123.53	165.71	217.52	260.31	247.17

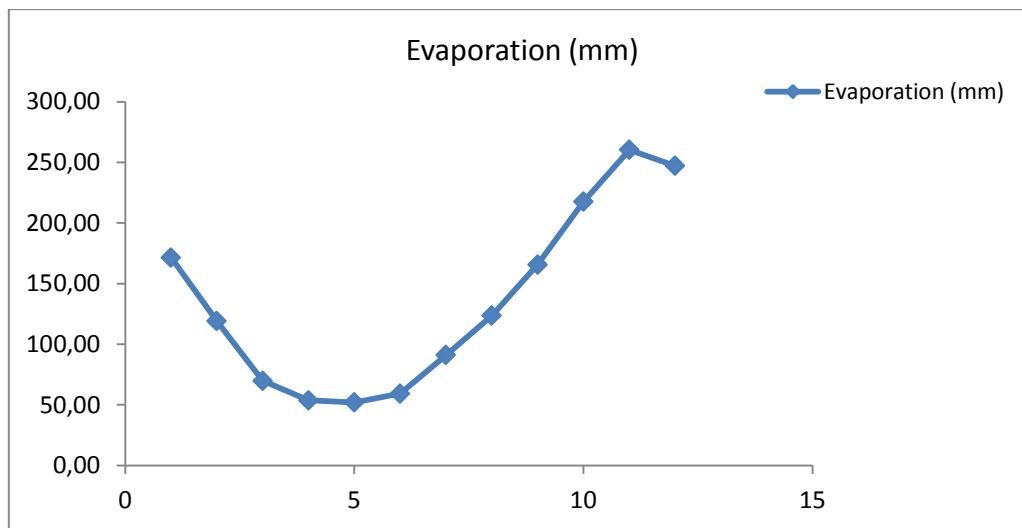


Fig.2.10/Variation mensuelle de l'évaporation à la station de Boughrara (98/14).

II.8/Evapotranspiration et déficit d'écoulement:

L'évapotranspiration (ET) est la vapeur d'eau produite à partir d'un bassin versant, résultant de la croissance des plantes qui y poussent. L'évapotranspiration et la consommation d'eau incluent toutes les deux la transpiration par les végétaux et l'évaporation à partir des surfaces d'eau libre, du sol, de la neige, de la glace et de la végétation. Il est important de souligner ici la différence entre évapotranspiration et consommation d'eau. La consommation d'eau ne diffère de l'évapotranspiration que parce qu'elle inclut l'eau utilisée pour la formation du tissu des plantes (Singh, 1994). Dans le calcul de l'évapotranspiration sont prises en compte à la fois la transpiration et l'évaporation du sol. L'évapotranspiration réelle peut être déduite de l'analyse de l'enregistrement simultané des pluies et des débits d'un bassin versant.

La formule la plus utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration est celle de Turc :

$$D = \frac{P}{\left(\sqrt{0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2} \right)} \right)}$$

Avec,

D : Déficit d'écoulement (mm) ;

P : Pluie annuelle (mm) ;

T : Température moyenne annuelle (°C)

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

$$D = \frac{272.13}{\left(\sqrt{0.9 + \left(\frac{272.13^2}{(300 + 25(20.66) + 0.05(20.66^3))^2} \right)} \right)}$$

$$D = 279.66 \text{ mm}$$

Cette formule donne une valeur de 279,66mm. Ce qui traduit l'aridité du climat, la pauvreté et l'irrégularité de la pluviométrie dans le bassin d'étude.

II.9 /Conclusion

Dans ce chapitre on a plusieurs constatations sur l'étude de climat dans notre bassin qui est caractérisé par la semi aridité ou la moyenne des précipitations annuelle atteint 272,13 mm avec un maximum de 346 mm enregistré à la station de boughrara.

Le coefficient de variation se trouve élevé dans le mois d'Aout (0,81) avec une irrégularité des pluies moyennes mensuelles.

On a déduit aussi deux saisons thermiques dans l'année hydrologique, une chaude depuis septembre au mois de mai et une froide et humide à partir de juin au mois d'aout.

Le mois de novembre c'est le mois le plus pluvieux (55,23mm) à la station de boughrara, 47mm à sidi medjahed, 53mm à Maghnia frontière et 50mm à Béni ouassine. La température maximale atteinte au mois d'aout (30,7 3°C) et la minimale s'est remarquée au mois de janvier (12,27°C).

L'aridité du climat est favorisée par le déficit d'écoulement qui est plus de 90% de la hauteur d'eau précipitée.

CHAPITRE III

Fonctionnement hydrologique du bassin versant du l'oued Tafna

III.1/ INTRODUCTION :

L'**hydrométrie** a pour objet la mesure des hauteurs d'eau et des débits. La connaissance de ces informations s'effectue au moyen d'un réseau hydrométrique au sein duquel seules les stations de jaugeage fournissent des chroniques continues des débits.

L'hydrologie Pris dans le sens quantitatif, ce terme désigne l'utilisation des débits mesurés aux stations de jaugeage (éventuellement en d'autres sites) et les études menées pour évaluer des débits en des points non pourvus de stations de jaugeage.

Le régime hydrologique d'une rivière peut être apprécié de manière qualitative en parlant :

- de hautes eaux ou de **crues**,
- de **moyennes eaux**,
- de basses eaux ou d'**étiage**.

Mais les hydrologues sont amenés à évaluer quantitativement des débits de référence et à les caractériser en termes de fréquence, car un même événement n'a pas nécessairement la même importance en divers points d'une même rivière

Pour les débits moyens, on utilise fréquemment les débits moyens mensuels ou annuels et leurs valeurs moyennes sur toute la période d'observation d'une station de jaugeage ; le **débit moyen interannuel** est souvent appelé **module**.

Le comportement hydrologique d'un cours d'eau est lié à la diversité des facteurs physico géographiques analysés dans les chapitres précédents, et dont la dominance a trait, comme on l'a vu aux facteurs climatiques (Bouanani, 2004)

Une évaluation précise des ressources en eau et de leur variabilité passe donc par la prise en compte des :

- débits moyens annuels et bilans hydrologiques,
- régimes fluviaux et variations saisonnières des débits,
- débits moyens journaliers,
- intensités des débits extrêmes des crues et des étiages ainsi que leur fréquence. (Bouanani, 2004)

Dans notre travail, nous avons étudié les données de débits liquides instantanés. Ces études sont orientées dans les trois stations du bassin versant Tafna dont les données sont fournies par l'A.N.R.H d'Alger (Bir Morad Rayes).

Les coordonnées de ces stations hydrométriques sont mentionnées dans le tableau (3.1)

Tab.3.1 / Caractéristiques de la station hydrométrique du bassin versant Tafna (ANRH Bir morad rais)

Bassin	station	code	X(m)	Y(m)	Z(m)	période
mouilah	Mouilah RN7	160202	83,50	182,40		73/12
Tafna	Hammam Boughrara	160501	103,70	185,80	270	74/86
mouilah	Sidi Belkhir RN35	160504	101,90	185,00	285	73/98

III.2 / DEBITS MOYENS ANNUELS :

Le module hydrologique d'un bassin à une station donnée est le débit moyen que l'on obtiendrait à cette station sur une période d'observation de durée infinie en supposant que le climat n'ait pas varié. Par abus de langage, on a pris l'habitude d'appeler Module le débit moyen observé durant une année quelconque; le vrai module est alors désigné par l'expression module interannuel. Nous nous conformerons à l'usage.

En hydrologie, le module correspond au débit moyen interannuel, c'est une synthèse des débits moyens annuels (Q_{MA}) d'un cours d'eau sur une période de référence (au moins 30 ans de mesures consécutives).

Il est généralement exprimé en mètres cubes par seconde (m^3/s ou $m^3 \cdot s^{-1}$). Il est calculé, en un point du cours d'eau, sur une durée suffisamment longue (annuelle ou pluriannuelle) pour ne pas être influencé par les variations journalières ou saisonnières du débit (crues exceptionnelles, fontes de neige extraordinaires, etc.). Le fait que ce soit un coefficient annuel permet de connaître l'importance relative du cours d'eau.

Pour obtenir le module du cours d'eau, on réalise une moyenne des Q_{MA} d'une tranche d'années de mesures du débit moyen annuel du cours d'eau (tranches de 20 à 30 ans en général).

Le module spécifique est le module rapporté à la surface du bassin versant, généralement exprimé en litres par seconde et par kilomètre carré ($l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$). Il permet d'étudier et de comparer l'hydrologie de bassins versants de dimensions différentes.

III.2.1 /Variations des débits annuels moyens brut (m^3/s) et l'irrégularité inter annuelle des modules et leur répartition statistique :

La variation annuelle des modules (Tableau.3.2) au niveau des stations de Tafna est illustrée par la figure (3.1), montre que l'oued Mouilah dans la partie avale débite $0,69 m^3/s$ avec une aire de réception de $1820km^2$, et atteint $2,32 m^3/s$ au niveau de la station de boughrara avec une superficie de $4000km^2$, et la station de sidi belkhir a connu un débit de $1,70m^3/s$, occupant une aire de $2650km^2$.

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

Tab 3.2 / Débit moyens annuels de l'oued Tafna-Mouilah (station mouilah RN7), (station H.Bougrara) et (station Sidi belkhir)

Station mouilah RN7				Station H.bougrara				Station Sidi belkhir			
année	Q (m3/s)	q (l/s/km2)	Q/Qmoy	année	Q (m3/s)	q (l/s/km2)	Q/Qmoy	année	Q (m3/s)	q (l/s/km2)	Q/Qmoy
73/74	1,09	0,598	1,57	73/74	-	-	-	73/74	3,70	1,39	2,17
74/75	1,74	0,956	2,51	74/75	7,69	1,92	3,31	74/75	3,07	1,16	1,80
75/76	0,48	0,263	0,69	75/76	2,44	0,61	1,05	75/76	1,73	0,65	1,02
76/77	0,42	0,230	0,61	76/77	2,20	0,55	0,95	76/77	2,12	0,80	1,24
77/78	0,46	0,252	0,66	77/78	1,62	0,405	0,70	77/78	1,82	0,69	1,07
78/79	0,19	0,104	0,27	78/79	1,02	0,25	0,44	78/79	1,04	0,39	0,61
79/80	1,85	1,016	2,67	79/80	2,58	0,64	1,11	79/80	2,93	1,10	1,72
80/81	1,64	0,901	2,36	80/81	3,33	0,83	1,43	80/81	2,46	0,93	1,45
81/82	0,31	0,170	0,45	81/82	2,32	0,58	1,00	81/82	1,11	0,42	0,65
82/83	0,25	0,137	0,36	82/83	1,21	0,30	0,52	82/83	1,07	0,40	0,63
83/84	0,27	0,148	0,39	83/84	2,18	0,54	0,94	83/84	0,82	0,31	0,48
84/85	0,18	0,098	0,26	84/85	0,53	0,13	0,23	84/85	0,77	0,16	0,25
85/86	0,18	0,098	0,26	85/86	0,66	0,16	0,28	85/86	0,43	0,16	0,25
86/87	1,64	0,901	2,36	86/87	-	-	-	86/87	2,92	1,10	1,72
87/88	0,36	0,197	0,52	87/88	-	-	-	87/88	0,62	0,23	0,36
88/89	0,39	0,214	0,56	88/89	-	-	-	88/89	0,98	0,37	0,57
89/90	0,83	0,456	1,20	89/90	-	-	-	89/90	1,39	0,52	0,82
90/91	1,14	0,626	1,64	90/91	-	-	-	90/91	1,51	0,57	0,89
91/92	0,91	0,5	1,31	91/92	-	-	-	91/92	0,97	0,36	0,57
92/93	0,15	0,082	0,22	92/93	-	-	-	92/93	0,45	0,17	0,26

CHAPITRE III Fonctionnement hydrologique du bassin versant du l'oued Tafna

93/94	0,19	0,104	0,27	93/94	-	-	-	93/94	1,008	0,38	0,59
94/95	1,3	0,714	1,87	94/95	-	-	-	94/95	4,75	1,79	2,79
95/96	0,83	0,456	1,20	95/96	-	-	-	95/96	2,68	1,01	1,57
96/97	0,36	0,197	0,52	96/97	-	-	-	96/97	2,04	0,77	1,20
97/98	0,49	0,269	0,71	97/98	-	-	-	97/98	0,56	0,21	0,33
98/99	0,91	0,5	1,31	98/99	-	-	-	98/99	-	-	-
99/00	0,41	0,225	0,59	99/00	-	-	-	99/00	-	-	-
00/01	0,78	0,428	1,12	00/01	-	-	-	00/01	-	-	-
2001/02	1,06	0,582	1,53	2001/02	-	-	-	2001/02	-	-	-
2002/03	0,5	0,274	0,72	2002/03	-	-	-	2002/03	-	-	-
2003/04	0,71	0,390	1,02	2003/04	-	-	-	2003/04	-	-	-
2004/05	0,38	0,208	0,55	2004/05	-	-	-	2004/05	-	-	-
2005/06	1	0,549	1,44	2005/06	-	-	-	2005/06	-	-	-
2006/07	0,6	0,329	0,87	2006/07	-	-	-	2006/07	-	-	-
2007/08	0,53	0,291	0,76	2007/08	-	-	-	2007/08	-	-	-
2008/09	1,3	0,714	1,87	2008/09	-	-	-	2008/09	-	-	-
2009/10	0,33	0,181	0,48	2009/10	-	-	-	2009/10	-	-	-
2010/11	0,42	0,230	0,61	2010/11	-	-	-	2010/11	-	-	-
2011/12	0,47	0,258	0,68	2011/12	-	-	-	2011/12	-	-	-
Moy	0,69	0,380	1	moy	2,32	0,58	1,00	moy	1,70	0,64	1,00
Ecart type	0,475	0,261	0,68	Ecart type	1,89	0,47	0,82	Ecart type	1,13	0,43	0,65
CV	0,7	0,7	0,68	CV	0,82	0,81	0,82	CV	0,66	0,67	0,65

Le tableau 3.2 montre que l'hydraulicité (Q_i/Q_{moy}) est faible dans quelques années d'étude et forte dans des autres, mais elle reste déficitaire dans la plupart des années, le débit reste inférieur à la moyenne interannuelle.

✓ Station mouilah RN7 :

Dans la première décennie allant de 73/74 à 82/83, un déficit est remarqué sauf dans les années 73/74, 74/75, 79/80 et 80/81 l'hydraulicité était forte. L'année 92/93 a connu une grande sécheresse tandis qu'en 79/80 l'année était humide avec un débit de 1,85 m³/s. Cela est dû à l'abondance des précipitations ou des crues pendant les mois.

A partir des années 82/83 au 2012, on a remarqué une fluctuation de l'hydraulicité entre faible et forte.

✓ Station H.Boughrara :

On n'a pas eu une longue période d'étude, mais l'année 74/75 et 75/76 toujours humides ainsi que pour les périodes 79/80, 80/81 et 81/82.

✓ Station Sidi belkhir :

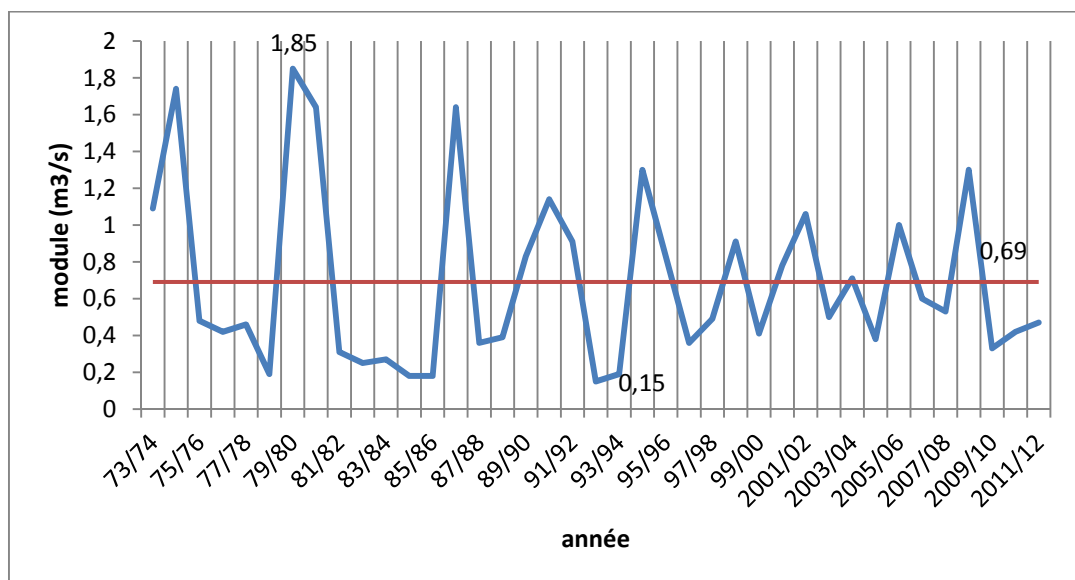
On remarque une fluctuation de l'hydraulicité entre forte et faible, la période la plus humide remarquée était en 94/95 (2,79) et la période sèche était en 84/85 et 85/86.

Le tableau 3.3 nous montre un plus fort coefficient d'immodération ($Q_M/Q_m = 14,50$) remarqué dans la station de Hammam Boughrara et un coefficient de variation remarquable ($CV = 0,82$) suivant une irrégularité des débits interannuels.

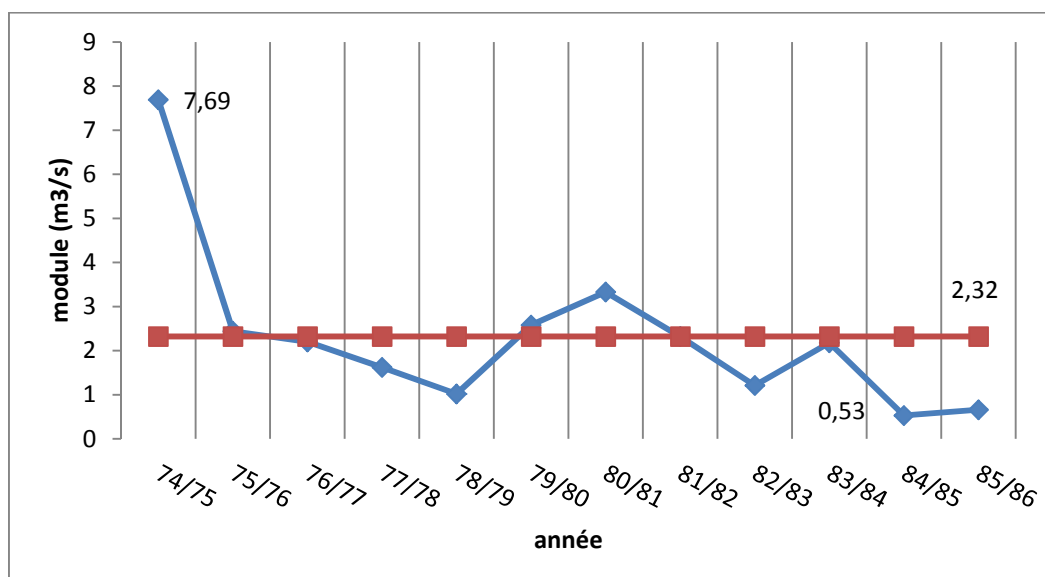
Tab .3.3 / Valeurs caractéristiques des modules au niveau du bassin versant:

station	moy (m ³ /s)	max (m ³ /s)	min (m ³ /s)	nbre année>moy	R=Q _M /Q _m	Cv
Mouillah RN7	0,69	1,85	0,15	16/39	12,33	0,70
H.Boughrara	2,32	7,69	0,53	5/11	14,50	0,82
Sidi Belkhir	1,70	4,75	0,43	11/24	11,04	0,66

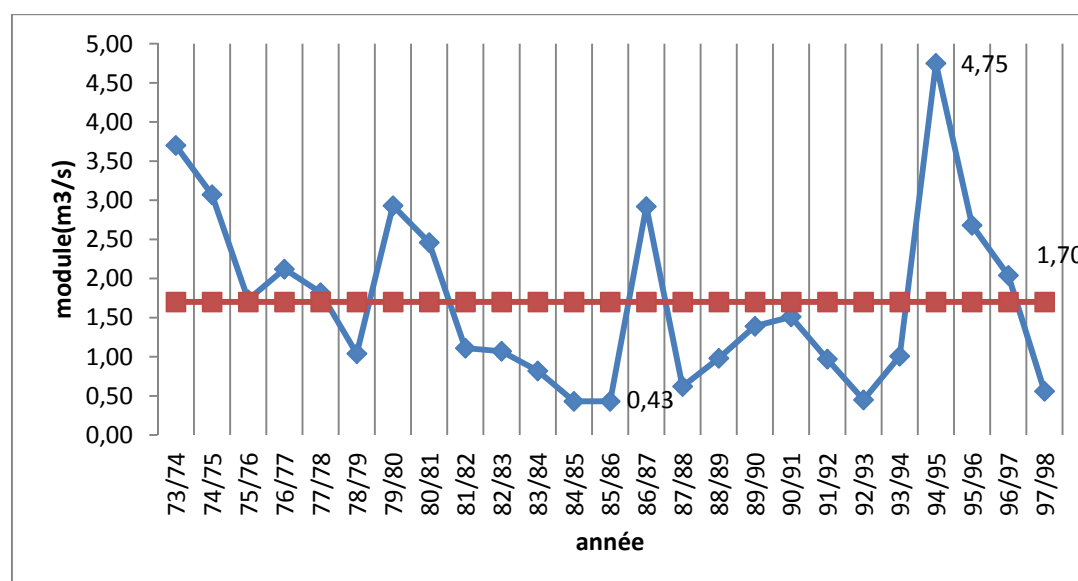
La figure 3.1 présente la variation et irrégularité des débits interannuels entre le plus fort (1,85 m³/s) et le plus faible (0,15 m³/s).



**Fig.3 .1 /Variation interannuelle des module de l'oued mouilah
- station mouilah RN7-**



**Fig.3 .2 /Variation interannuelle des module de l'oued tafna
- station H.Boughrara-**



**Fig.3.3 /Variation interannuelle des module de l'oued mouilah
- station Sidi belkhir-**

III.2.2 /Variations des débits annuels moyens spécifiques (l/s/km²) :

Afin de mieux cerner la variation de l'écoulement dans les quatre bassins, nous utiliserons les modules spécifiques, car ces derniers permettent de les comparer entre eux en ramenant le débit à l'unité de surface. (Bouanani, 2004)

L'abondance spécifique des bassins (tableau. 3.4) varie d'une part en fonction de la distribution des précipitations et d'autre part en fonction des caractéristiques physiographiques de chaque bassin, à savoir la lithologie, le couvert végétal. C'est donc un élément purement géographique.

Tab.3.4/ Débits spécifiques et lames d'eau écoulées :

Bassin	station	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	E (lame d'eau)
Mouilah aval	Mouilah RN7	0,69	0,380	11,95
Tafna	H.Boughrara	2,32	0,58	18,29
Tafna	Sidi Belkhir	1,70	0,64	20,23

Q : module annuel (m³/s) ; q : débit spécifique (l/s/km²) ; E : lame d'eau écoulée (mm)

III.2.3 / Etude statistique des modules :

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

L'étude des phénomènes climatiques et hydrologiques est une tâche assez délicate du fait des fluctuations saisonnières et interannuelles qu'elles peuvent revêtir. Ils sont complexes et dépendent d'un certain nombre de paramètres considérés comme aléatoires. Parmi ceux-ci, les précipitations et les débits sont les paramètres qui déterminent le plus l'évolution hydrologique. Etablir donc la fiabilité de ces données pour leur utilisation a souvent nécessité le recours à plusieurs méthodes. Cependant, de toutes celles utilisées, la statistique semble être de nos jours la plus prisée (Ousmane Dione, 1992)

L'ajustement à une distribution de type Galton ou Log normale à nos bassins donne les résultats du tableau 3.5 suivant :

Tab.3.5/Ajustement à une loi Log-normale des modules annuels :

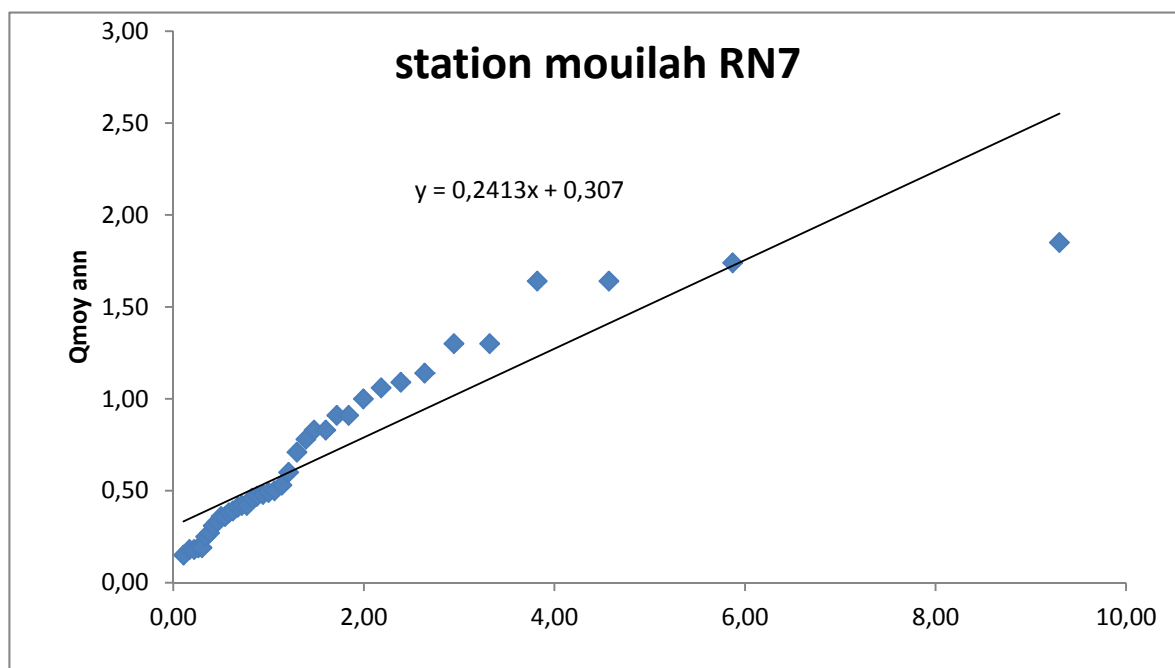
Bassin/Stations	Paramètres statistiques		Droite d'Henry
	Moy log Q	σ log Q	
Mouilah aval/mouilah RN7	6,31 l/s	0,69	Log Q=6,31+0,69. μ
Tafna /H.Bouhrara	7,50 l/s	0,73	Log Q=7,50 +0,73. μ
Tafna / Sidi Belkhir	7,22 l/s	0,70	Log Q=7,22+0,70. μ

CHAPITRE III Fonctionnement hydrologique du bassin versant du l'oued Tafna

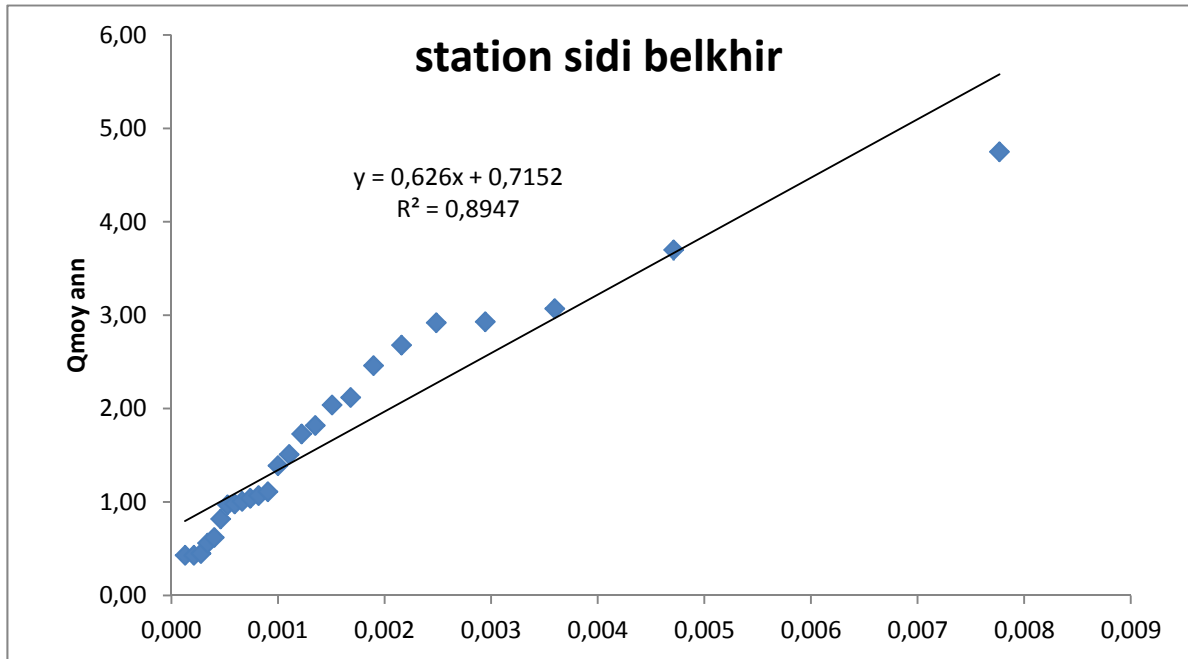
L'adéquation à la loi log normal a été testée par le test du χ^2 et nous avons calculé les modules correspondant à des périodes de retour données au tableau (3.6).

Tab 3.6/ Modules caractéristiques en m³/s pour des périodes de récurrences données.

période de retour	2	10	50	100	200	1000
fréquence de dépassement	0,5	0,9	0,98	0,99	0,995	0,999
Station mouilah rn 7	0,548	1,175	2,181	2,762	3,460	5,610
station sidi belkhir	1,341	2,967	5,578	7,085	8,894	14,473
Station boughrara	1,683	4,742	9,656	12,492	15,897	26,394



**Fig.3.4/Ajustement des débits moyens annuels à une loi log-normale
-station mouillah RN7-**



**Fig.3.5/Ajustement des débits moyens annuels à une loi log-normale
-station sidi belkhir-**

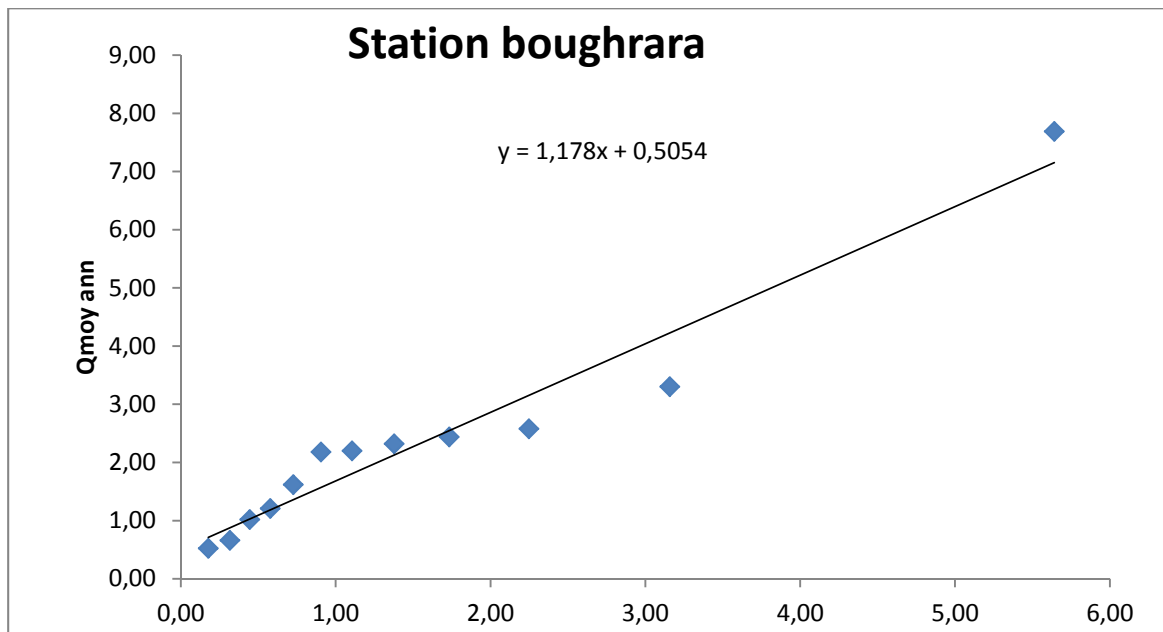


Fig.3.6/Ajustement des débits moyens annuels à une loi log-normale

-station boughrara-

III.2.4 / Bilan moyen annuel de l'écoulement :

Sur toutes les latitudes, le bilan de l'écoulement est exprimé par la différence entre la lame d'eau annuelle précipitée, p et la lame d'eau annuelle écoulée p' , ce qui donne la formule générale du déficit d'écoulement : $D=P-P'$ (Griselin, Madeleine, 1985).

Le rapport (E / P) est appelé, coefficient moyen annuel de l'écoulement "C".

Les bilans moyens annuels des stations du grand bassin de la tafna sont mentionnés dans le tableau (3.7)

Tab.3.7/ Bilans moyens annuels de l'écoulement aux différentes stations :

Bassins	Station de jaugeage	Période	P (mm)	E (mm)	D (mm)	C(%)
Tafna boukiou	H.Boughrara	1998/2012	295,27	18,21	277,06	6,16
Tafna boukiou	Sidi Belkhir	1973/1997	-	20,23	-	-
Mouilah aval	Mouilah RN7	1973/2012	-	11,95	-	-

D'après le tableau ci-dessus (3.7), on a une absence des données de précipitations dans les stations de sidi belkhir et mouilah RN7, on a juste les données de station Boughrara qui sont disponibles, d'où le coefficient d'écoulement 6,16 %, C'est-à-dire que juste 6% de la lame d'eau précipitée s'écoule dans l'oued, tandis que 94% restant s'évapore ou s'infiltré. Cela veut dire que le sol de notre bassin est très perméable.

III.2.5 /Ressources annuelles en eau de surface disponibles :

Tab .3.8/ Evaluation de l'apport total moyen annuel écoulé et ses extrêmes :

Stations	Apport moyen (hm3)	Apports extrêmes (hm3)	
		max	min
H.Boughrara	18,54	81,62	4,92
Sidi Belkhir	49,85	96,99	13,68
Mouilah RN7	21,91	59,09	4,79

Le plus grand apport liquide est remarqué dans la station de sidi belkhir selon la variabilité inter annuelle de l'écoulement superficiel mise en lumière par les valeurs de l'hydraulicité et du coefficient de variation.

III.3 /DEBITS MOYENS MENSUELS ET SAISONNIERS :

La distribution saisonnière des débits dans un cours d'eau est conditionnée par des facteurs climatiques et par les caractéristiques physiques du bassin versant. Le régime d'écoulement mensuel résume la variabilité du débit et sa distribution saisonnière. Les fluctuations d'écoulement pendant l'année sont en général conditionnées par la distribution des précipitations sur le bassin versant. L'analyse des débits moyens mensuels permet de mettre en évidence le régime des cours d'eau et leur variation inter-saisonnière.

III.3.1 / Coefficient mensuel de Débits :

Afin de mieux caractériser la répartition des débits mensuels au cours de l'année, on a calculé le coefficient mensuel de débits (Figure 53). Ce coefficient est le rapport entre le débit moyen mensuel et le module interannuel (moyenne interannuelle calculée sur l'ensemble de données de la série) (Pardé, 1933). La courbe des coefficients mensuels de débits de l'année permet de mettre en évidence le caractère systématique des variations saisonnières et de comparer les cours d'eau entre eux.

Le tableau ci-dessous montre la répartition des débits mensuels de l'oued mouilah et Tafna et divers critères statistiques.

Tab .3.9/Répartition des débits mensuels du bassin tafna aval à la station mouilah RN7, station hammam boughrara et station de sidi belkhir

Station mouilah RN7													
	sep	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	ann
moy	0,67	1,40	0,99	0,72	0,58	0,48	1,30	0,76	0,63	0,29	0,24	0,30	0,70
CMD	0,96	2,00	1,41	1,03	0,83	0,69	1,86	1,09	0,90	0,41	0,34	0,43	1,00
max	4,50	16,58	13,71	15,10	4,48	1,98	12,38	16,75	1,73	2,62	2,09	0,91	1,85
min	0,00	0,01	0,02	0,05	0,07	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
écart type	0,89	2,86	2,39	2,48	0,79	0,44	2,62	2,69	0,49	0,45	0,45	0,23	0,48
Cv	1,33	2,05	2,41	3,44	1,36	0,92	2,02	3,54	0,78	1,56	1,86	0,78	0,70

Station Hammam Boughrara													
Mois	sep	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juill	Aout	Ann
Moy	1,07	2,56	4,71	4,42	3,61	4,79	3,94	6,70	2,87	1,43	1,41	1,16	2,32
CMD	0,46	1,10	2,03	1,90	1,55	2,06	1,70	2,89	1,23	0,61	0,61	0,50	1,00
écart-type	0,70	3,46	9,36	6,11	4,95	6,81	4,19	15,89	3,86	1,14	1,51	1,23	1,89
Cv	0,66	1,35	1,99	1,38	1,37	1,42	1,06	2,37	1,34	0,80	1,07	1,05	0,82

Station Sidi Belkhir													
	Sep	oct	nov	dec	janv	fév	mars	avr	mai	juin	juil	aout	ann
moy	1.24	1.92	2.26	2.02	1.51	1.55	3.63	1.81	1.37	1.08	0.78	0.83	1.70
CMD	0.73	1.13	1.33	1.19	0.89	0.91	2.14	1.06	0.81	0.64	0.46	0.49	1.00
ecart type	1.04	3.20	5.09	3.52	1.08	1.28	6.85	3.46	0.98	0.91	0.81	0.83	1.13
max	4.51	16.54	26.81	14.51	4.73	6.14	33.68	18.15	4.18	3.03	3.19	3.53	3.70
min	0.08	0.18	0.10	0.19	0.29	0.25	0.18	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.43
cv	0.84	1.67	2.25	1.75	0.72	0.83	1.89	1.91	0.72	0.84	1.03	1.00	0.65

- Station mouilah RN7 :

Pour le bassin de l'oued Mouilah, la période des hautes eaux est nettement marquée au cours de trois mois successifs : octobre, novembre et décembre, mais les CMD tombent au-dessous de l'unité pendant les deux mois suivants avant de croître à nouveau en mars et avril. La moyenne mensuelle maximale se situe en mars.

La période de basses eaux, commence en mai, il en est de même pour la moyenne mensuelle minimale qui est réalisée en juillet. Ceci peut s'expliquer, à priori par les variations saisonnières des précipitations, sans échapper aux effets importants de l'évapotranspiration potentielle.

- Station Hammam Bouhrara :

Dans cette station, la période humide ou bien de hautes eaux est remarquable du mois d'octobre jusqu'au mai, le débit atteint son maximum en moi d'avril (6,70 m³/s) après le coefficient mensuel du débit commence à abaisser à partir de juin à septembre.

- Station Sidi Belkhir :

La période des hautes eaux commence par octobre, novembre et décembre après elle se renouvelle dans la saison de printemps spécifiant mars ou le débit atteint son maximum (3,63 m³/s) et le mois d'avril, tandis que les autres mois connaissent des étiages et sècheresse remarquables.

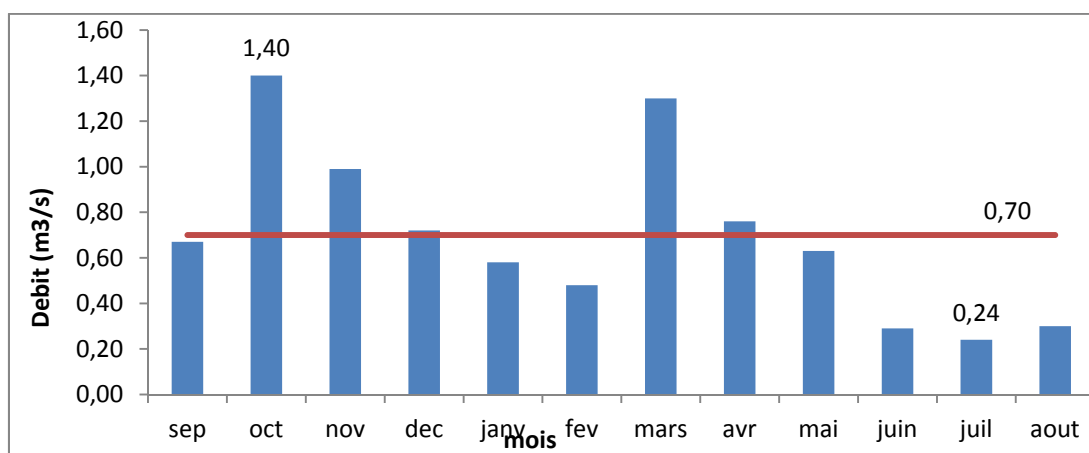


Fig.3.7/Variations des débits moyens mensuels de l'oued Mouilah – station Mouilah RN7-(73/12)

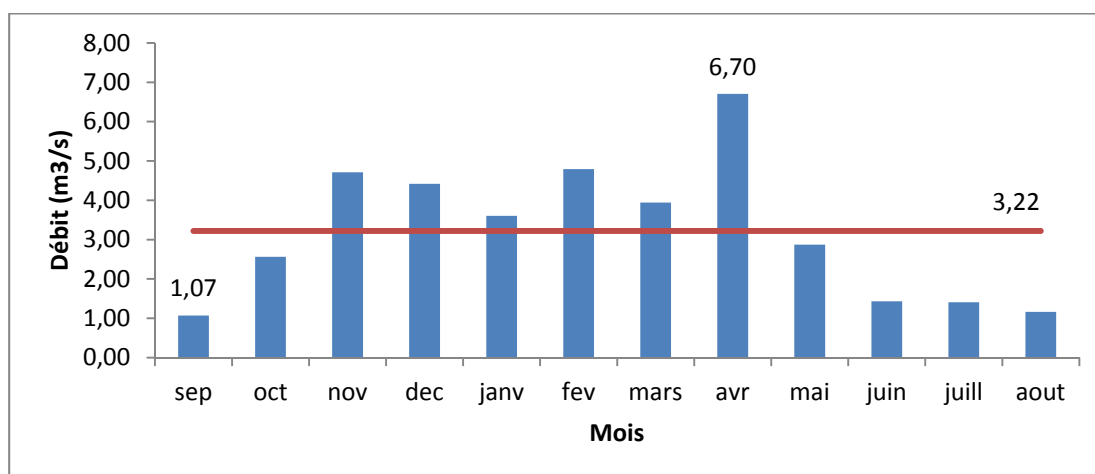


Fig.3.8/Variations des débits moyens mensuels de l'oued Tafna- station hammam bouhrara-(74/86)

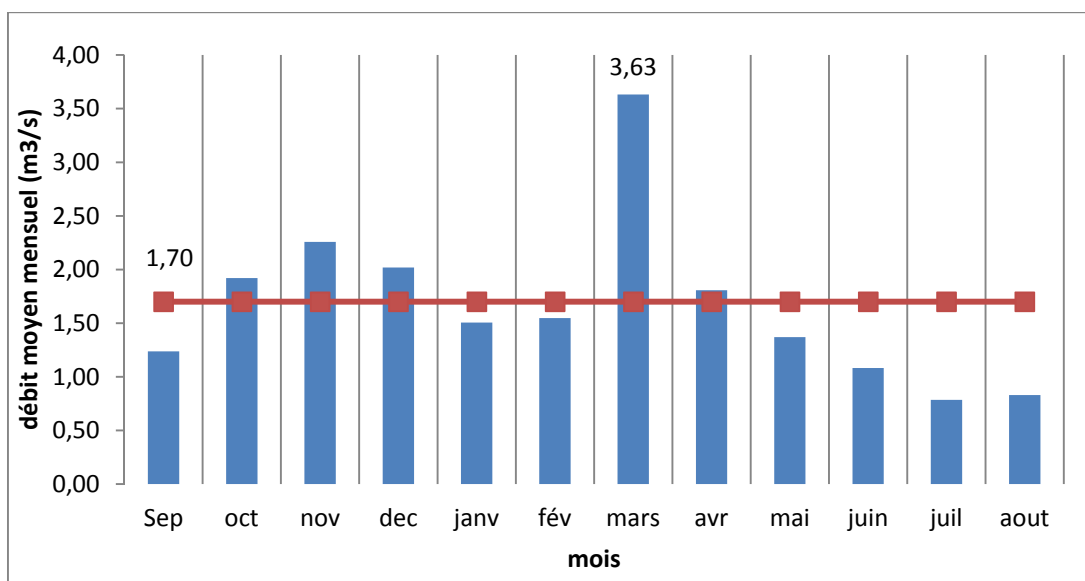


Fig.3.9/Variations des débits moyens mensuels de l'oued mouilah -station Sidi belkhir-(73/98)

III.3.2/ Coefficient de variation :

La variabilité inter mensuelle des débits est très remarquée, les valeurs du coefficient de variation dépassent le seuil (CV= 0,5) pour les trois stations.

III.3.3/ Modifications inter annuelles du régime saisonnier :

On a pris comme exemple la station de mouilah RN7, et durant 38 ans de données ; le maximum mensuel observé a été mentionné généralement en automne, 2 fois au mois de septembre, 2fois au mois d'octobre et une fois au mois de novembre et en printemps au mois de mars (16,74 m³/s)

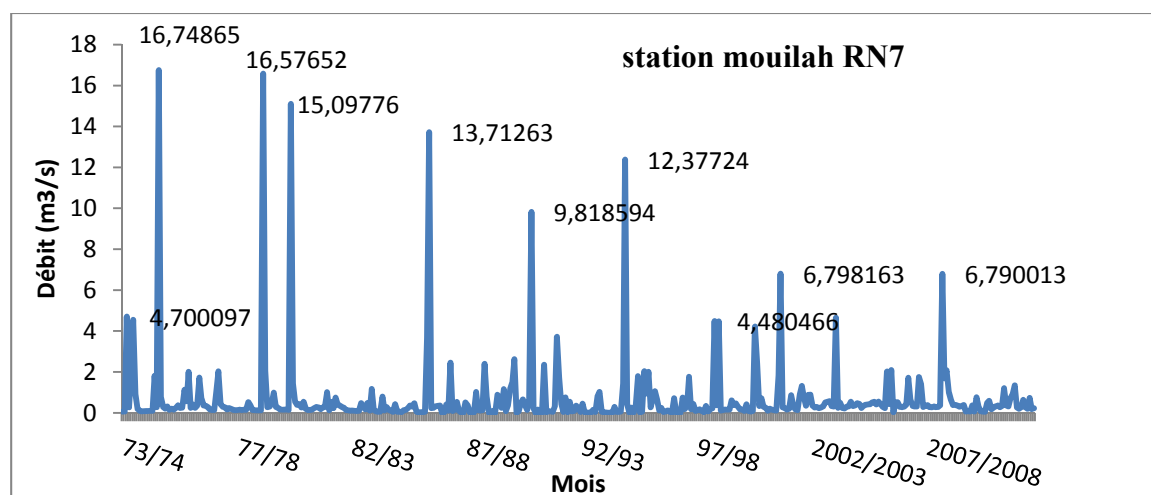


Fig.3.10/ Variations interannuelles des débits mensuels de l'oued mouilah Aval à mouilah RN7

A la station de boughrara, où la période d'observation n'est que de 13 ans, le maximum mensuel a été relevé 03 fois en Novembre (23,08% du total) et 2 fois en Octobre (15,38%), 1 fois successivement en janvier, février, mars, avril, mai et juin.

Alors que le minimum moyen mensuel se place 6 fois en aout, soit 46 % des cas, 2 fois seulement en juillet, 4 fois en septembre et 2 fois octobre.

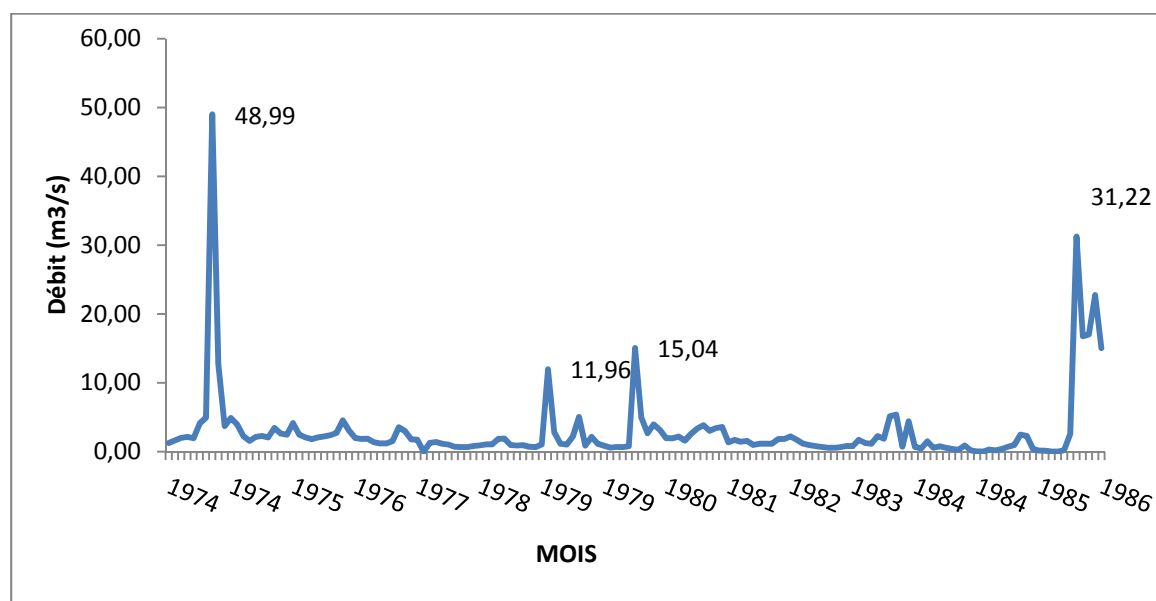


Fig.3.11/ Variations interannuelles des débits mensuels de l'oued Tafna à Hammam Boughrara

Pour (Bouanani, 2004), à Mouilah, (sidi belkhir) où la période d'observation n'est que de 25 ans, le maximum mensuel a été relevé 06 fois en mars (24% du total) et 4 fois en février, 3 fois successivement en septembre, octobre, novembre et mai, enfin 1 fois en décembre et avril. Alors que le minimum moyen mensuel se place 10 fois en juillet, soit 40 % des cas, 5 fois seulement en août, 3 fois en septembre, avril et 1 fois octobre, novembre, mars et juin.

III.4/ DEBITS MOYENS JOURNALIERS :

L'étude du régime fluvial, à l'échelle journalière, mérite une analyse car les oueds subissent des variations journalières importantes. Notre étude s'articule durant douze ans (du 1974 à 1986) au niveau de la station de Hammam Bouhrara.

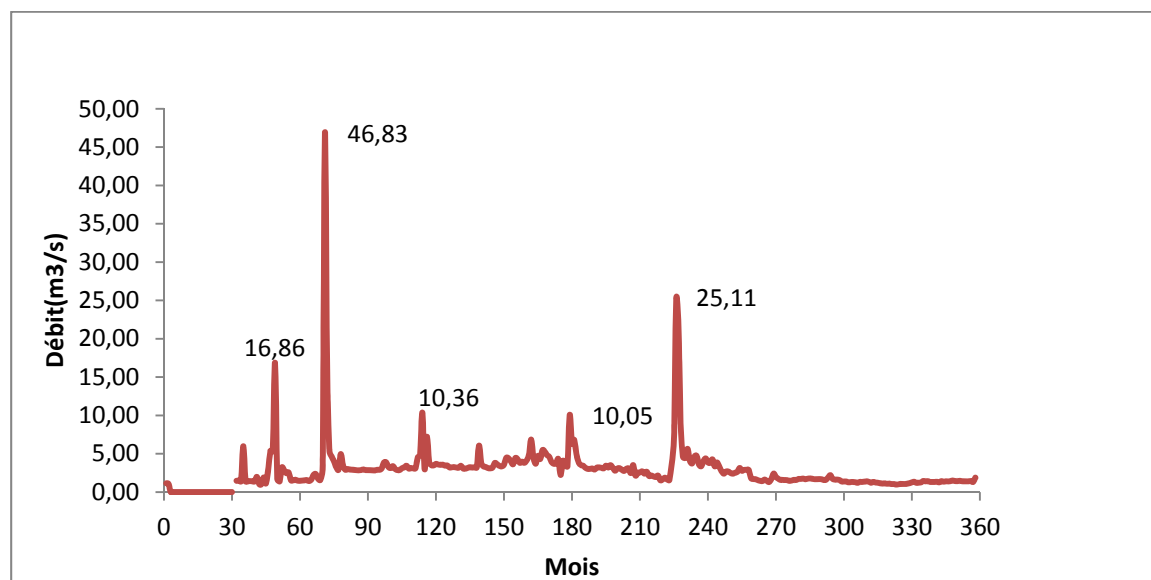


Fig.3.12/ Variations des débits moyens journaliers de l'oued Tafna cas de la station de H.Bouhrara

La période des hautes eaux s'observe essentiellement pendant la saison d'automne et le printemps, ces deux saisons ont marquées des crues de forte intensité, la valeur du débit journalier maximal se trouve au mois de novembre qui succède le mois d'octobre (46,83 m³/s).

Dans la saison de printemps spécifiant le mois d'avril, le débit atteint 25,11m³/s, après il commence à abaisser au minimum au mois d'aout (période de basses eaux).

III.5 / Courbes des débits classés :

Pour mieux saisir les variations journalières, nous avons établi les courbes des débits Classés.

Les débits caractéristiques sont indiqués ci – dessous :

- débit caractéristique maximal (DCM) : débit dépassé 10 jours par an,
- débit moyen caractéristique ou de 06 mois (DC6) : débit dépassé 06 mois par an,
- débit caractéristique de 01, 03 ou 09 mois (DC1, DC3, DC9) : débits dépassés respectivement 01, 03ou 09 mois par an,

- débit caractéristique d'étéage (DCE) : débit dépassé 355 jours par an, il est toujours plus élevé ou égale que le débit absolu (Qmin) d'étéage le plus faible survenu au cours de la période d'observation.

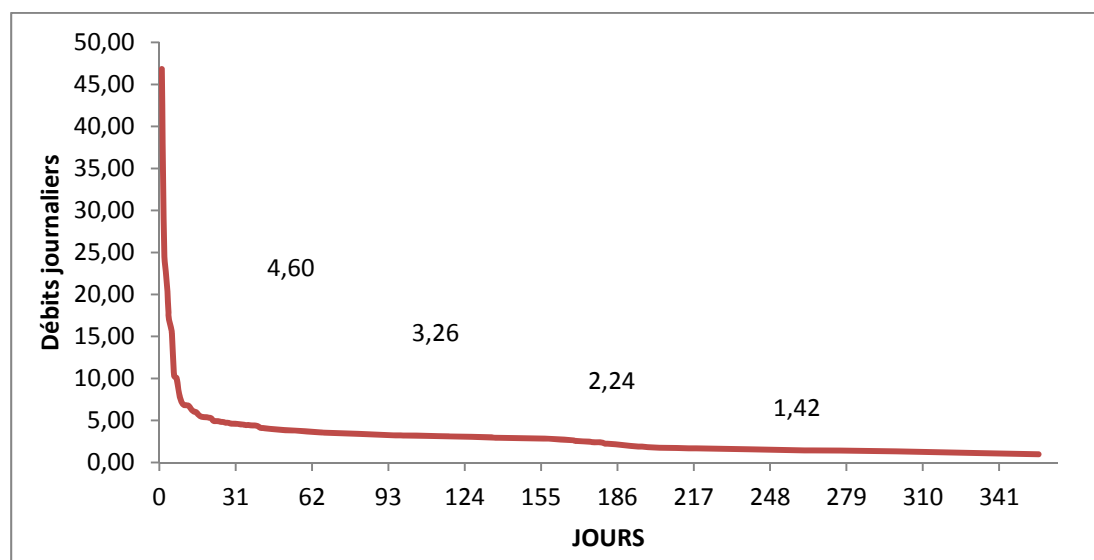


Fig .3.13/Courbes des débits classés d'oued Tafna-hammam boughrara-

III.6/ Etude des crues :

La **crue** est une forte augmentation, un accroissement du débit / de la hauteur d'eau en écoulement d'un cours d'eau. Le « niveau critique de crue » est atteint, quand le débordement du cours d'eau commence à provoquer des dommages en un point quelconque du bief amont. Ce seuil peut être indiqué par un limnimètre fixe. Ce débordement du lit mineur provoque une inondation de zones plus ou moins éloignées des rives, en délimitant ainsi une zone inondable.

L'étude des crues permet de mettre en évidence la réaction du bassin versant pendant un pas de temps réduit à une averse ou séquence plusieurs données. Les crues constituent avec les étiages une situation extrême dans le comportement des cours d'eau (bouguerra)

III.6.1/ Genèse des crues :

Les crues naissent suite à d'importants épisodes pluvieux provoquant le débordement des cours d'eau dans les zones inondables.

La crue dépend essentiellement de l'abondance et de l'intensité de la pluie : son évolution obéit principalement à la puissance et l'intensité de l'averse. Sa vitesse est largement influencée par le couvert végétal, la lithologie, par des paramètres morphométriques du bassin (indice de compacité, densité de drainage, rapports des confluences et des longueurs etc...), par la pente des thalwegs et la forme du lit (Cosandey et Robinson, 2000 ; bouanani, 2004)

L'oued Mouilah, avec une période plus étendue la classe la plus fréquente est celle entre 50 –100 m³/s enregistrant 45.68% des cas.

Dans notre étude, les débits maximums se différent d'une année à l'autre, Pendant l'année 1986/87, au mois de Novembre, de fortes précipitations eurent lieu sur laTafna. Les nappes souterraines avaient atteint un niveau important et le sol était saturé. Ces précipitations ont provoqué la crue du 17 Novembre, qui a engendré certaines inondations d'où une amplitude très élevée par rapport à toutes les crues de la série observée 1880 m³/s avec un coefficient de crue de 36,52.

Les bassins connaissent quelques crues généralisées telle que celle du 20 mars 1989, cette crue a donné un débit de pointe de 104.6 m³/s à Sebdou, 230.0 m³/s à Mouilah, 143.4 m³/s au niveau de l'Isser et 13.2 m³/s au Sikkak.

III.6.2/ Débits extrêmes :

Les débits extrêmes que sont les phénomènes de crues et d'étiages ne peuvent être cernés que dans leur succession chronologique, allant de quelques heures à plusieurs jours (Bouanani, 2004)

On se limitera dans l'étude des crues, à leurs caractères généraux tels que leur genèse, leur puissance, leur fréquence en précisant par ailleurs, le potentiel hydrologique énorme qu'elles représentent.

L'oued Mouilah, avec une période plus étendue la classe la plus fréquente est celle entre 50 –100 m³/s enregistrant 45.68% des cas.

L'évolution des crues est fonction de la répartition des précipitations et de la densité du réseau hydrographique. La vitesse de propagation des maxima, elle-même fonction de plusieurs facteurs (pente, étendue du lit et hiérarchisation du chevelu hydrographique) constitue un élément fondamental dans l'évolution spatiale des crues. Parmi les crues des quatre oueds nous citerons les plus importantes dans les tableaux ci-dessous.

Tab 3. 10/ Crues de l'oued mouilah (74/75-99/00) : station sidi belkhir

date	b	c	d	e
30/12/1973	572	356,35	1,60516346	11,11
29-mars-74	264,00	109,37	2,41	5,13
21-avr-75	709,00	264,31	2,68	13,77
24-janv-77	155,00	72,64	2,13	3,01
26-oct-77	150,00	42,66	3,52	2,91
24-nov-77	132,00	51,27	2,57	2,56
22-oct-79	604,40	244,92	2,47	11,74
30-déc-80	239,00	192,54	1,24	4,64
04-oct-86	377,00	62,21	6,06	7,32
17-nov-86	1912,00	530,00	3,61	37,14
04-oct-87	132,00	25,47	5,18	2,56
19-mars-89	230,00	68,39	3,36	4,47
04-janv-90	135,00	33,86	3,99	2,62
11-mai-90	226,00	40,63	5,56	4,39
05-juin-90	166,00	50,62	3,28	3,22
14-mars-91	600,00	152,45	3,94	11,66
09-avr-92	119,50	59,82	2,00	2,32
01-mars-95	249,00	94,50	2,63	4,84
13-mars-95	823,00	468,17	1,76	15,99
15-juin-96	104,00	17,28	6,02	2,02
07-sept-96	167,00	17,12	9,75	3,24
25-août-97	121,00	22,72	5,33	2,35

Tab 3. 11/ Crues de l'oued mouilah (85/86-00/12) : station mouilah RN7

a	b	c	d	e
17-nov-86	1465	330,94	4,43	34,34
04-oct-86	340,2	56,64	6,01	7,97
04-oct-87	165,4	38,03	4,35	3,88
20-mars-88	96,4	34,68	2,78	2,26
05-juin-89	193	49,93	3,87	4,52
19-oct-89	144,7	22,7	6,37	3,39
11-mai-89	94,1	16,8	5,60	2,21
14-mars-90	419	150,29	2,79	9,82
09-avr-91	141,4	79,69	1,77	3,31
06-sept-91	201,6	25,65	7,86	4,73
18-oct-91	201,6	49,3	4,09	4,73
13-mars-94	379	225,85	1,68	8,88
28-févr-94	143,7	39,4	3,65	3,37
13-oct-95	294,5	34,93	8,43	6,90
16-janv-98	148	45,88	3,23	3,47
17-mars-98	136	52,45	2,59	3,19

Tab 3. 12/ Crues de l'oued Tafna (74/75-86/87) : station Boughrara

a	b	c	d	e
21-avr-75	735	285,94	2,57	11,62
24-janv-77	83,9	37,37	2,25	1,33
26-oct-78	86,5	23,49	3,68	1,37
24-nov-78	77,3	27,48	2,81	1,22
05-mars-80	178,7	81,22	2,20	2,83
22-oct-80	547,87	189,48	2,89	8,66
01-janv-81	243,63	51,1	4,77	3,85
30-déc-81	223,8	88,93	2,52	3,54
17-nov-86	1368	512,98	2,67	21,63
04-oct-86	362,2	55,01	6,58	5,73

- a : date de débit de pointe
b : débit instantané maximal (m³/s)
c : débit moyen journalier maximal (m³/s)
d : moyenne (b/c)
e : coefficient de crue en (m²/s)

$$e = \frac{b}{\sqrt{S}}$$

S: aire réceptrice du bassin (km²)

Pendant l'année 1986/87, au mois de Novembre, de fortes précipitations eurent lieu sur la Tafna. En effet, la hauteur pluviométrique mensuelle à la station de Maghnia a été 168.3 mm soit 43% des précipitations annuelles de l'année même. Les nappes souterraines avaient atteint un niveau important et le sol était saturé. Ces précipitations ont provoqué la crue du 17 Novembre, qui a engendré certaines inondations d'où une amplitude très élevée par rapport à toutes les crues de la série observée 1912 m³/s avec un coefficient de crue de 37.14. la même chose dans la station mouilah RN7 ou on a une crue dans la même période de 1465 m³/s et à la station de boughrara 1368 m³/s.

Les bassins connaissent quelques crues généralisées telle que celle du 20 mars 1989, cette crue a donné un débit de pointe de 104.6 m³/s à Sebdou, 230.0 m³/s à Mouilah, 143.4 m/s au niveau de l'Isser et 13.2 m³/s au Sikkak.

III.6.3/ Puissance des crues :

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

$$e = \frac{Q}{\sqrt{S}}$$

Avec :

S : surface réceptrice du bassin.

Q : débit maximal instantané (m³/s)

Les coefficients de crue varient dans notre bassin entre 0,03 et 36,52 m²/s.

III.6.4/Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles :

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction permettant l'étude des événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future.

Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel, qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus. Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée.

Si dans la plus part des études consacrées à l'hydrologie des bassins versants Sud-Ouest méditerranéens, les séries des pluies annuelles sont distribuées généralement selon une loi normale de Gauss [S.M. Hayane 1983, A. Mebarki 1984, A. Ghachi 1986, A. Megnounif 1999 et All, k. Baba Hamed 2002], les modules à une loi dissymétrique log-normale de Type Galton, [A. Mebarki, 1984, A. Ghachi, 1986, R. Taïbi, 2000, N. Khalil, 2002] la distribution des débits maximums de crues reste mal déterminée, hormis quelques études fragmentaire où les auteurs ont utilisé soit la loi de Gumbel (S.M. Hayane, 1983) soit celle de Frechet (A. Ghachi, 1986).

Les lois de probabilité les plus usuelles sont les suivantes :

- Loi normale ou de Gauss : Concernant les débits annuels et mensuels de certaines rivières où l'écoulement est plus ou moins régulier d'une année à l'autre ;
- Loi de Galton Gibrat (loi normale des logarithmes) : Elle est utilisée pour la description de débits annuels, mensuels et journaliers où la variation de ces débits est plus ou moins irrégulière ;
- Loi de Gumbel : Elle est utilisée pour décrire des valeurs extrêmes (notamment de crues) ;
- Loi de Gamma Incomplète, ou de Pearson III.

En régime fluvial Nord méditerranéen, les débits maximums annuels suivent plutôt une loi de Galton, Gumbel ou Pearson III (Dubreuil, 1974) (Laborde, 2000).

III.6.5/ Résultats et interprétations :

L'analyse fréquentielle de la série des débits maximums annuels dans les trois stations sur une durée d'observation, montre que la loi Log-Normal de (Galton) est la plus représentative de l'échantillon de cette série.

Le traitement statistique aboutit aux résultats suivants (Tableau 3.13) et Figure (3.11).

Tab.3.13 / Ajustement de la série des débits maximums instantanés.

Station sidi belkhir						
Loi d'ajustement	Moy (m3/s)	Max (m3 /s)	Min (m3/s)	σ	Cv	N
Log normal	372,13	1912	104	406,57	1,092	22
Station mouilah RN7						
Loi d'ajustement	Moy (m3/s)	Max (m3 /s)	Min (m3/s)	σ	Cv	N
Log normal	285,225	1465	94,1	329,87	1,156	16
Station boughrara						
Loi d'ajustement	Moy (m3/s)	Max (m3 /s)	Min (m3/s)	σ	Cv	N
Log normal	390,69	1368	77,3	405,309	1,037	10

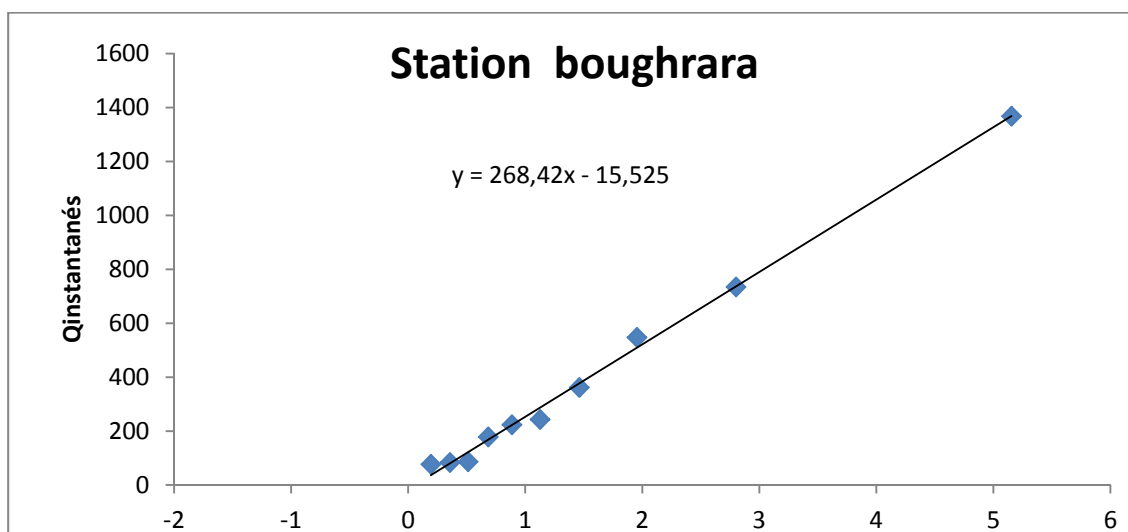
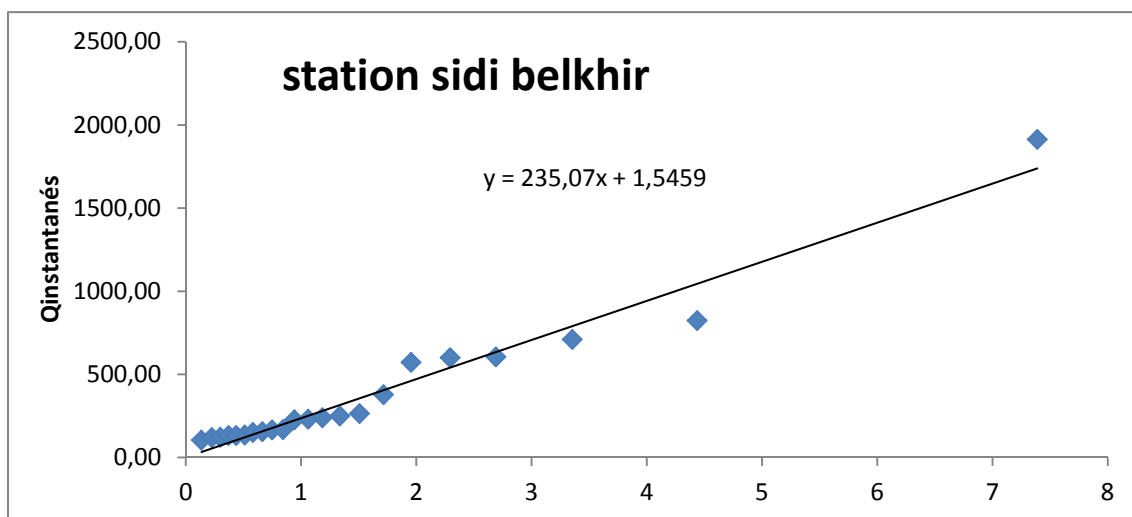
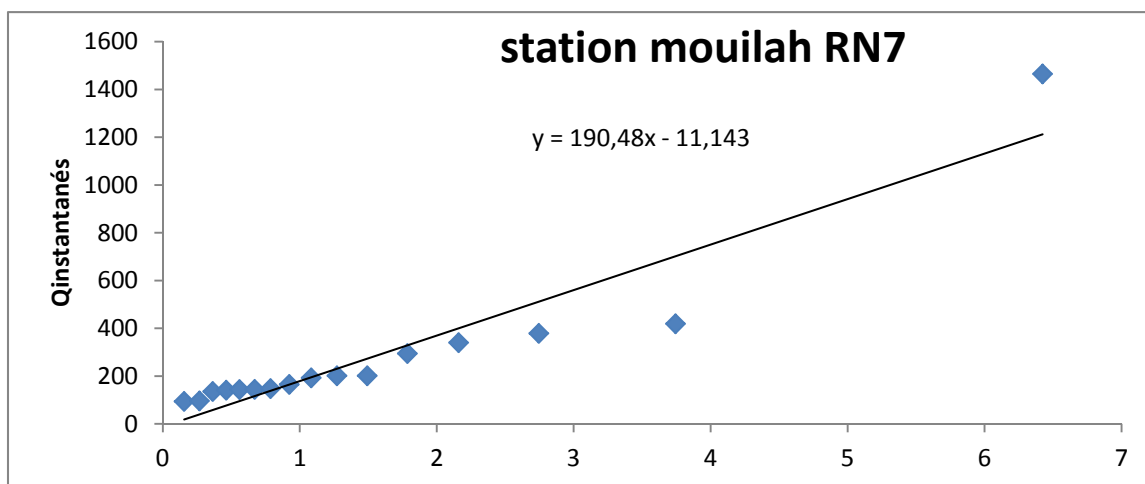


Fig .3.14/ : Ajustement graphique de la série des débits maximums instantanés de l'OuedTafna-Mouilah

L'application de la loi Log-normal pour le calcul des débits extrêmes à des récurrences données donne pour nos différents bassins (Tableau. 3.14).

Tab.3.14 /Estimation des Quantiles de crue.

Station mouilah RN7						
période de retour	2	10	50	100	200	1000
fréquence de dépassement	0,5	0,9	0,98	0,99	0,995	0,999
Q (m3/s)	179,337	673,94	1468,486	1927,119	2477,63	4175,05
Station Boughrara						
période de retour	2	10	50	100	200	1000
fréquence de dépassement	0,5	0,9	0,98	0,99	0,995	0,999
Q (m3/s)	252,895	949,885	2069,535	2715,829	3491,60	5883,56
Station sidi belkhir						
période de retour	2	10	50	100	200	1000
fréquence de dépassement	0,5	0,9	0,98	0,99	0,995	0,999
Q (m3/s)	236,6159	847,008	1827,546	2393,541	3072,929	5167,697

D'après les tableaux (3.13) et (3.14) des débits maximums instantanés, montre que sept (7) valeurs observées sont supérieures à l'estimation de la crue biennale et une valeur (01) atteint la crue cinquanténale au niveau de la station Mouilah RN7. Et dans la station de boughrara il ya (03) valeurs supérieures à l'estimation de la crue biennale et une valeur dépasse la crue centennale. La station sidi belkhir a connu 09 valeurs dépassant la crue biennale et une qui dépasse la crue cinquanténale mais aucune crue n'a été enregistrée semblable à celle de la crue milléniale.

L'augmentation des débits de crue en fréquence est controversée. En effet, l'accroissement biennale et centennale par exemple est énorme (>10), Ceci serait lié, à priori, à l'irrégularité des précipitations, qui malgré leur faiblesse quantitative moyenne peuvent avoir une très forte intensité en fréquence rare. Cette intensité croissante est susceptible de provoquer des crues d'une grande ampleur (Bouanani ,2004).

III.6.7/ Apports de crues :

Les volumes totaux écoulés pendant les crues, ainsi que les volumes écoulés en année moyenne, ont été résumés dans les tableaux (3.15) et (3.16)

Tab.3.15/ Volumes totaux écoulés à l'oued Mouilah-station mouilah RN7-(74/12)

date de crue	débit maximal instantané	q (l/s/km2)	A	B	C
	Q brut (m3/s)				
29/12/1973	309,6	170,11	26,75	34,37	77,83
30/03/1974	198,72	109,19	6,44	34,37	18,73
21/04/1975	823	452,20	35,55	54,872	64,79
24/01/1977	138,24	75,96	2,84	13,245	21,42
24/11/1977	194,4	106,81	6,02	14,506	41,49
22/10/1979	1423,6	782,20	53,81	58,34	92,24
17/11/1979	106,19	58,35	3,44	58,34	5,90
30/12/1980	267,84	147,16	7,71	51,719	14,91
03/06/1982	151,2	83,08	9,80	9,776	100,22
04/10/1986	340,2	186,92	18,37	51,719	35,52
17-nov-86	1465	804,95	47,46	51,719	91,77
04-oct-86	340,2	186,92	18,37	51,719	35,52
04-oct-87	165,4	90,88	8,93	11,3529	78,66
20-mars-88	96,4	52,97	8,33	12,299	67,73
05-juin-89	193	106,04	3,47	26,1748	13,26
19-oct-89	144,7	79,51	7,81	26,1748	29,84
11-mai-89	94,1	51,70	8,13	26,17	31,07
14-mars-90	419	230,22	22,62	35,95	62,92
09-avr-91	141,4	77,69	12,216	28,697	42,57
06-sept-91	201,6	110,77	9,434	28,697	32,87
18-oct-91	201,6	110,77	10,16	28,697	35,40
13-mars-94	379	208,24	32,745	40,9968	79,87
28-févr-94	143,7	78,96	12,415	40,9968	30,28
13-oct-95	294,5	161,81	25,44	26,17	97,21
16-janv-98	148	81,32	12,787	28,69	44,57
17-mars-98	136	74,73	11,75	28,69	40,96
05-sept-99	141	77,47	5,076	12,929	39,26
23-oct-00	359	197,25	12,924	24,598	52,54
15-nov-00	135,4	74,40	4,8744	24,598	19,82

Tab.3.16/ Volumes totaux écoulés à l'oued Mouilah-Sidi belkhir- (74/99)

date de crue	débit maximal instantané		A	B	C
	Q brut (m3/s)	q (l/s/km2)			
30/12/1973	572	215,85	49,42	116	42,60
29-mars-74	264,00	99,62	24,71	116	21,30
21-avr-75	709,00	267,55	51,05	97,86	52,17
24-janv-77	155,00	58,49	8,37	66,86	12,52
26-oct-77	150,00	56,60	9,18	57,52	15,96
24-nov-77	132,00	49,81	7,13	57,52	12,40
22-oct-79	604,40	228,08	46,15	91,9	50,22
30-déc-80	239,00	90,19	52,48	77,2	67,98
04-oct-86	377,00	142,26	16,29	93,25	17,47
17-nov-86	1912,00	721,51	55,41	93,25	59,42
04-oct-87	132,00	49,81	4,75	19,65	24,17
19-mars-89	230,00	86,79	24,84	30,94	80,28
04-janv-90	135,00	50,94	4,86	43,8	11,10
11-mai-90	226,00	85,28	8,14	43,8	18,58
05-juin-90	166,00	62,64	9,56	43,8	21,83
14-mars-91	600,00	226,42	38,89	47,27	82,27
09-avr-92	119,50	45,09	10,28	30,5	33,70
01-mars-95	249,00	93,96	22,41	148,06	15,14
13-mars-95	823,00	310,57	82,96	148,06	56,03
15-juin-96	104,00	39,25	1,87	84,2	2,22
07-sept-96	167,00	63,02	8,42	64,02	13,15
25-août-97	121,00	45,66	3,05	64,02	4,76

Tab.3.17/ Volumes totaux écoulés à l'oued Mouilah-station barrage boughrara(74/86)

date de crue	Débit maximal instantané		A	B	C
	Q brut (m3/s)	q (l/s/km2)			
21-avr-75	735	183,75	15,88	242,51	6,55
24-janv-77	83,9	20,98	7,25	69,38	10,45
26-oct-78	86,5	21,63	7,47	51,09	14,63
24-nov-78	77,3	19,33	6,68	51,09	13,07
05-mars-80	178,7	44,68	15,44	81,36	18,98
22-oct-80	547,87	136,97	47,34	81,36	58,18
01-janv-81	243,63	60,91	21,05	105,01	20,05
30-déc-81	223,8	55,95	19,34	105,01	18,41
17-nov-86	1368	342,00	118,20	475,87	24,84
04-oct-86	362,2	90,55	31,29	475,87	6,58

A : Volume total écoulé pendant la crue .10⁶ en (m3)

B : Volume total écoulé pour une année .10⁶ en (m3) ;

C : (%) du volume de la crue par rapport au volume annuel.

Parmi les quelques crues généralisées au niveau du bassin d'oued Tafna on peut citer celle du 20 mars 1989 qui a généré un volume 24.84 Mm³ au Mouilah, 9 Mm³ au niveau d'oued Sebdou, 4.13 Mm³ à oued Isser et 4.5Mm³ au Sikkak pour des débits de pointes respectivement de 230.4 m³/s, 104.6 m³/s, 143.4 m³/s et 13.2 m³/s (Bouanani, 2004)

Pour une même date (13 Mars 1995), la plus forte crue a écoulé à Mouilah 82.96 10⁶ m³ et 11.45 10⁶ m³ à oued Isser.

III.7 / EVOLUTION DE LA CONCENTRATION DES SEDIMENTS EN SUSPENSION ET DES DEBITS LIQUIDES DURANT LES CRUES :

III.7.1/ Méthodologie :

Les problèmes posés par la mesure du transport solide en suspension de part leur nature, incitent les hydrologues à s'intéresser à l'étude des variations de C et Q au cours d'une crue. En effet, la nature complexe du phénomène de crue, la conception de nouveaux, échantillonneurs et de

nouvelles techniques de mesure, ainsi que les difficultés rencontrées lors des mesures par observateurs, sont les éléments clé de cet intérêt (MOKHTARI, 2009)

Au cours des évènements de fort transport solide en suspension, le pic de concentration n'est pas forcément observé au même instant que le pic de débit. Ce déphasage se traduit par des boucles d'hystérésis lorsque l'on s'intéresse à la relation entre les débits et les concentrations en MES au cours d'une crue. Si pour un débit donné les concentrations sont plus élevées (respectivement plus faibles) lors de la phase de montée de la crue que dans la phase de décrue, on observe une boucle d'hystérésis horaire (respectivement anti-horaire) dans le plan débit-concentration (Vincent Mano, 2009)

La distance entre les sources de sédiments et l'exutoire est la cause principale du caractère hystérétique de la relation débit-concentration à l'échelle de l'évènement (Asselman, 1999; Brasington et Richards, 2000; Lenzi et Marchi, 2000; Benkhaled et Remini, 2003).

Autrement le débit liquide et la concentration instantanée des sédiments en suspension peuvent ne pas avoir une relation stationnaire pendant un écoulement simple dû à une averse. La tendance pour que la concentration en sédiment ait différentes valeurs à des débits identiques est l'effet d'hystérésis (MOKHTARI, 2009)

Cette étude est basée sur les travaux de G.P. Williams, 1989. Selon cet auteur, les relations entre concentration des sédiments en suspension (C) et les débits liquides Q_1 pour un évènement hydrologique telles que les crues, peuvent être étudiées qualitativement par l'analyse des courbes des concentrations et des débits liquides en fonction du temps. A cet effet, l'auteur propose une classification de ces relations basées sur le rapport C/Q_1 durant les phases de montée de crue et de décrue. Cinq modèles de relations sont ainsi établis (figure 3.15).

La forme des courbes de concentration et celle de la relation $C-Q_1$ dépendent en partie de :

- le temps et le volume des sédiments provenant de différentes sources jusqu'à la station de mesure.

- la proximité de la source des sédiments par rapport à la station.

Ainsi, Williams, en 1989, propose une typologie des crues selon l'allure de la courbe traduisant les variations des concentrations en fonction des débits pendant la crue. On a souvent cherché à utiliser le sens de ces

courbes pour expliquer les conditions de fonctionnement du transport solide dans le bassin versant.

Tab. 3.18 / Types de boucles d'hystérésis (d'après Williams, 1989)

Type de classe	Forme de boucle	Rapport C/Q	Référence auteur
1	Ligne droite	Rapport C/Q de la montée égal à celui de la décrue	Wood (1977)
2	Sens des aiguilles d'une montre	Rapport C/Q de la montée supérieur à celui de la descente, pour toute valeur de Q.	Wood (1977)
3	Sens contraire des aiguilles d'une montre	Rapport C/Q de la montée inférieur à celui de la descente pour toute valeur de Q	Axelsson (1967)
4	Forme de huit	A- Rapport C/Q de montée supérieur à celui de la descente pour une partie des valeurs de Q. b- Rapport C/Q de montée inférieur par rapport à la descente pour une autre partie des valeurs de Q	Arnborg et al. (1967)

a)- Modèle Classe I :

Si on ne peut observer de relation univoque entre la concentration en MES et le débit, une forme d'hystérésis est le plus généralement constatée (Borges, 1993 ; Mathys et al. 1989, William, 1989).

La relation C- Q la plus simple est du type linéaire (ligne simple ou courbe simple). Son seul caractère est que les rapports C/QI sont égaux pour les valeurs de QI que ce soit en montée de crue ou en décrue.

D'autres formes peuvent dériver de ce premier cas. Cette situation se produit lorsque les graphiques chronologiques de C et Q présentent des pics simultanés ainsi que les coefficients d'aplatissement et d'asymétrie identiques.

b)-Modèle classe II :

Ce modèle est le plus répandu et le plus étudié. Leopold et Maddock (1953), Sundborg (1956), Wood (1977), Paustian et Beschta (1979) ;

Dans ce cas, les concentrations sont plus élevées à la montée de crue. Ces courbes sont associées à des mobilisations rapides de matériaux disponibles au déclenchement de la crue (Anne-claire Nivet et Cemagref-UR Aema, 2009)

L'hystérésis est selon le sens des aiguilles d'une montre. Cette forme est obtenue lorsque le pic de la concentration arrive à l'exutoire avant la pointe du débit et les deux graphiques chronologiques ont pratiquement le même coefficient d'asymétrie.

L'hystérésis est selon le sens des aiguilles d'une montre. Cette forme est obtenue lorsque le pic de la concentration arrive à l'exutoire avant la pointe du débit et les deux graphiques chronologiques ont pratiquement le même coefficient d'asymétrie.

L'hystérésis type sens des aiguilles d'une montre peut se produire également lorsqu'il y a arrivée simultanée des deux pics (C et Q) et donne une autre forme de boucles. Les différences croissantes en ce qui concerne l'envergure des graphiques chronologiques peuvent affecter la boucle C-Q et donner une forme asymétrique.

Les concentrations dépassant 60 g l, d'une part en raison de la production de sédiments liée à l'orage, qui peut être localement forte, d'autre part en raison des faibles débits observés, qui limitent l'effet de dilution (Vincent Mano, 2009)

c)- modèle classe III :

Dans ce cas, les concentrations augmentent en décrue. Ces courbes sont attribuées à des ruptures de versants, complétées par des processus actifs divers et répartis sur le bassin à des distances variables.

En boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre où « counterclockwiseloop ». Le maximum de concentration est postérieur au maximum des débits. Les valeurs des concentrations C pendant la montée de crue sont inférieures à celle de la décrue pour des valeurs de Q données alors $(C/Q)_r < (C/Q)_d$.

Le retard du pic des sédiments à une station en aval se manifeste au niveau des écoulements dans un cours d'eau caractérisé par des irrégularités qui empêchent le mouvement des sédiments par rapport à celui de l'eau.

d)- le modèle classe V :

Ces courbes sont en général expliquées par la reprise de matériaux en abondance dans les lits et déposés par les crues précédentes. S'il n'y a pas de limitation de l'alimentation du cours d'eau en MES, on observe une relation quasi constante entre concentration et débit.

Sous certaines conditions, une boucle en forme de huit se développe sans considération de la variable dont le pic atteint le premier exutoire. Les deux parties de la boucle se forment selon des directions opposées. Les rapports C/Q à différentes valeurs de Q expliquent pourquoi certains graphes chronologiques fournissent des relations $C-Q$ en forme de huit.

Pour la majorité des types de boucles décrites, il est parfois difficile de trouver une explication à ce phénomène, quand le bassin est hétérogène du point de vue lithologique et du point de vue de la répartition spatiale des pluies (Benkhaled et Remini, 2003).

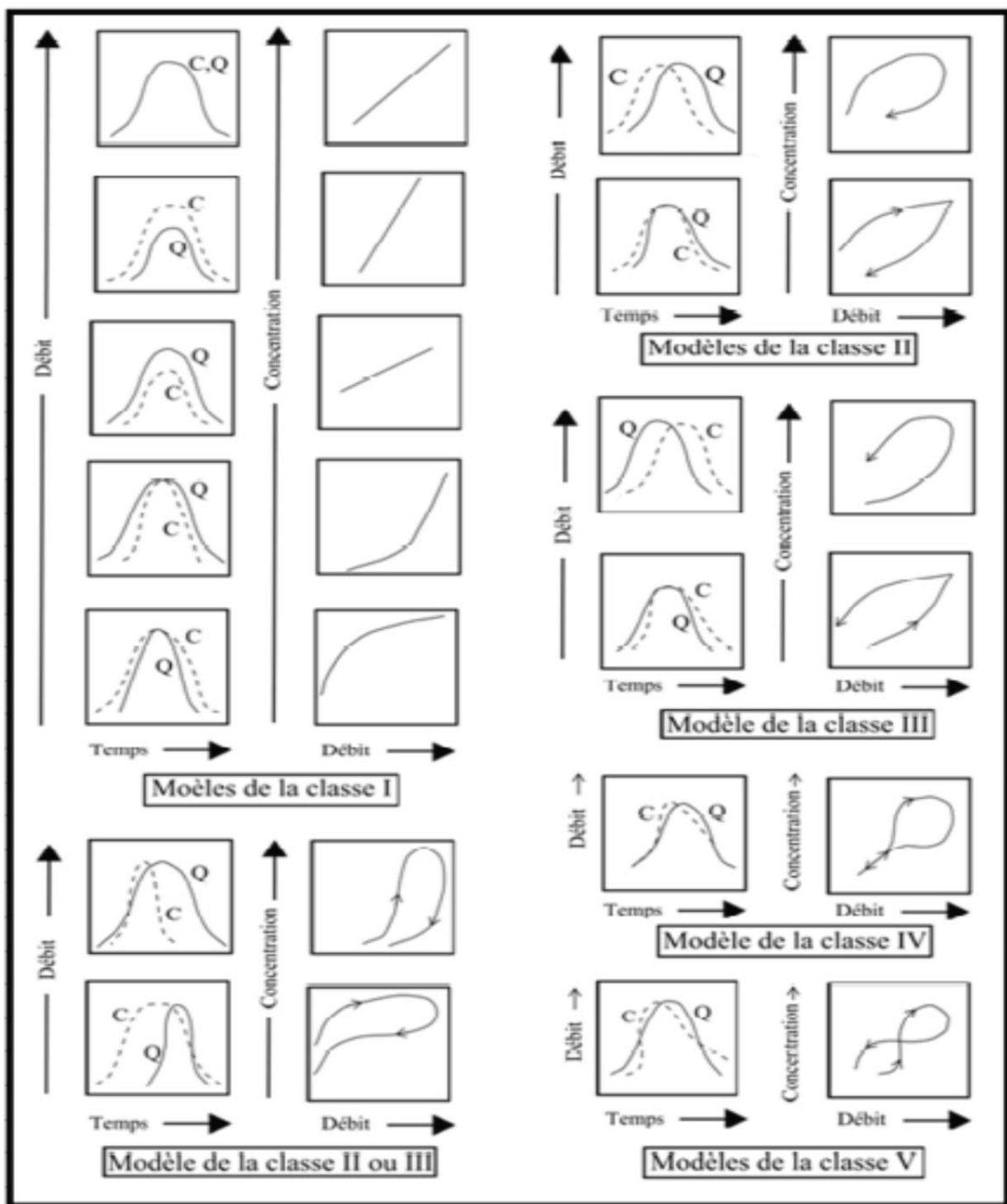


Fig 3.15/Modèles des relations concentration débit liquide (Williams, G.P., 1989)

III.7.2/ Application au bassin d'oued Mouilah :

Les types de relation C-Q, dans leur ensemble restent mal connus. Dans cette étude, on cherche à caractériser la relation C-Q à travers une série d'événements chronologiques (crues).

L'application de l'approche des Hystérésis pour les différentes crues enregistrées au niveau du bassin étudié durant la périodes de données disponibles, fait ressortir la distribution des différentes classes d'évolution des relations concentration en sédiments en suspension avec les débits liquides et leur fréquence relative (Tableau 3.18).

Tab 3.19 / fréquence des différentes classes d'évolution de la relation C-QI des crues au niveau de bassin de Mouilah(Bouanani,2004) :

classe	Nbre total des crues	I (%)	II (%)	III (%)	V (%)
Station sidi belkhir (74/94)	44	40,90	20,45	18,18	20,45
Station mouilah RN7 (85/94)	22	59,09	18,18	4,54	22,72

L'analyse des courbes de concentration en fonction des débits liquides (figure 5.5) pour l'oued Mouilah, montre que pour la majorité des événements enregistrés durant la période 1974/94, les courbes C-Q présentent :

-Pour les deux stations, la classe de courbe I est la plus fréquente. Ces crues ont eu lieu surtout en automne et au printemps et à un degré moindre en hiver et en été. Ca pourrait être associé à un apport continu de sédiments pendant les crues et/ou à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes.

-le modèle « clockwiseloop », se présente pour les crues survenues en automne après une saison généralement sans pluie et où le sol est dénudé et fragilisé (Bouanani, 2004)

Colby (1963) note que la concentration maximale des matériaux fins se produisant avant le maximum de l'écoulement est conforme à l'idée que des particules lâches de sol au début d'une averse sont érodées par le premier ruissellement direct en quantité appréciable. Cette situation peut être aussi obtenue lorsqu'il y a une réduction des matériaux en suspension

juste avant l'obtention du débit maximal (Arnborg et al., 1967, Wood, 1977 ; Battala& Sala, 1992 ; Benkhaled et Remini, 2003) ou une limitation d'approvisionnement en matériaux (Moog&Whiting, 1998).

L'oued mouilah est caractérisé comme la plupart des cours d'eau algériens par un régime hydrologiques irrégulier.

- La forme III : à oued Mouilah les courbes en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre sont caractéristiques surtout des crues d'hiver et de printemps. Le sol étant plus ou moins saturé et couvert résiste mieux à la pluie. L'érosion et le transport solide se verront légèrement retardés par rapport aux écoulements.

La forme de huit : se présentent souvent pendant les crues de printemps, saison caractérisée par de fortes pluies tombant après une saison d'hiver bien que relativement froide mais généralement peu pluvieuse. Aussi, les sédiments accumulés dans le lit de l'oued et laissés pendant l'automne, seront mobilisés dès les premières crues du printemps pour donner au départ des pics de concentration antérieurs aux pics de débit liquide. Le phénomène s'inverse avec le temps dès l'épuisement du stock de sédiment.

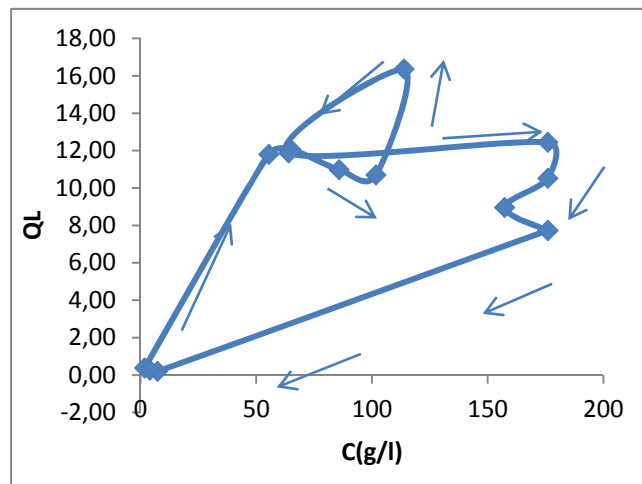
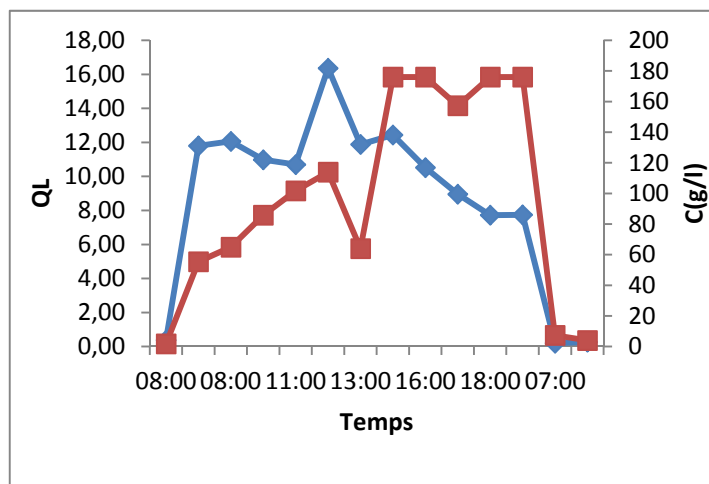
Elle est peu connue et peu de travaux ont été publiés. D'une manière générale les crues de cette classe sont caractérisées par un temps de montée inférieur au temps de concentration du bassin ;

Cette courbe caractéristique surtout des crues d'hiver et de printemps. Le sol étant plus ou moins saturé et couvert résiste mieux à la pluie. Cela peut être indicatif quant à l'érodabilité du sol du bassin de l'oued Cheliff.

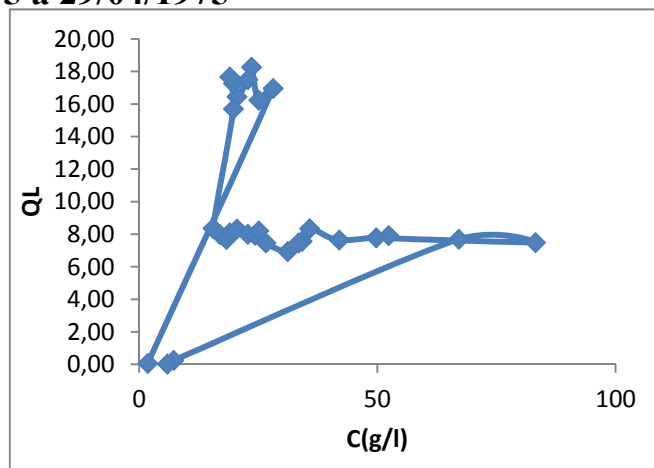
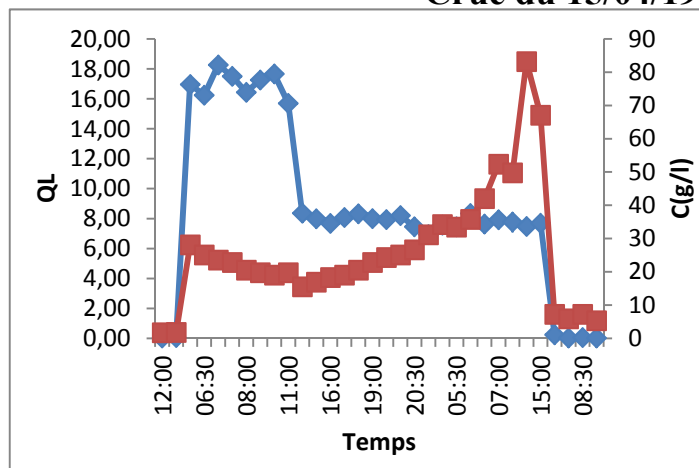
Plusieurs auteurs ont confirmé l'existence de cet effet (Williams, 1989 ; Zhang et al. 1990).

❖ Crues principales au niveau de la station sidi belkhir :

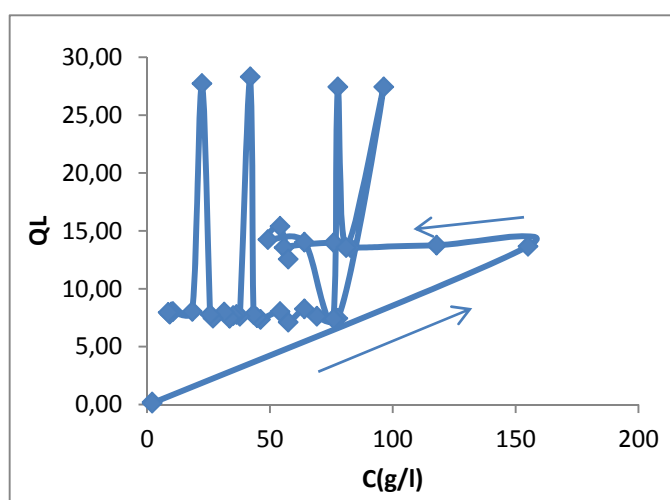
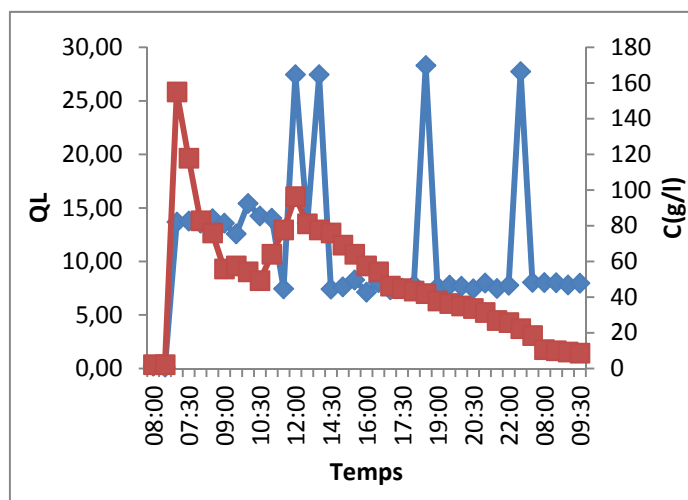
Crue du 28/03/1974 à 06/04/1974



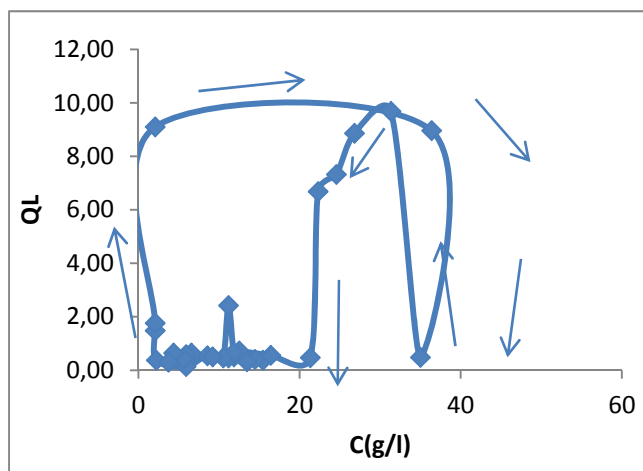
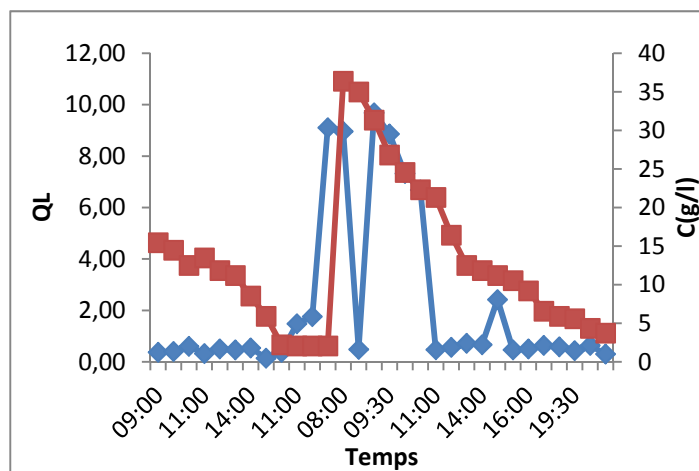
Crue du 15/04/1975 à 29/04/1975



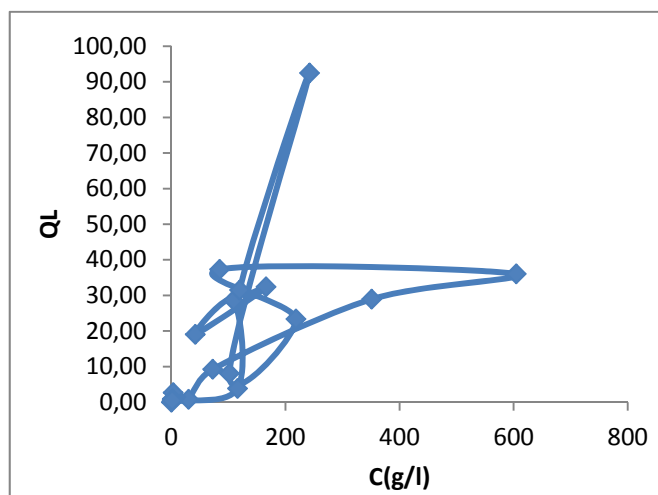
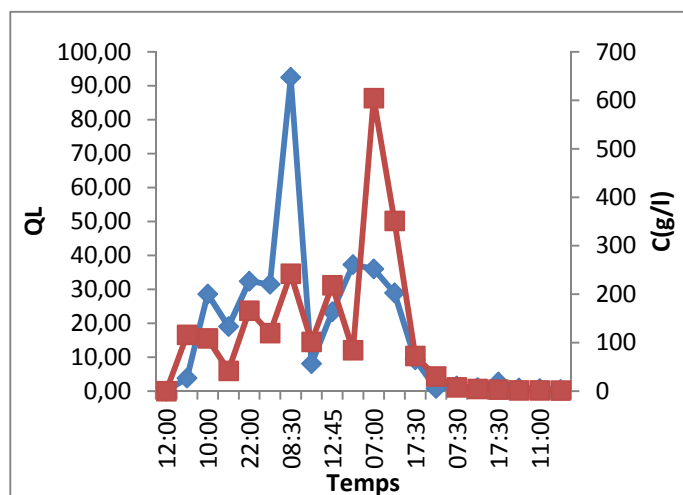
Crue du 22/01/1977 à 25/01/1977



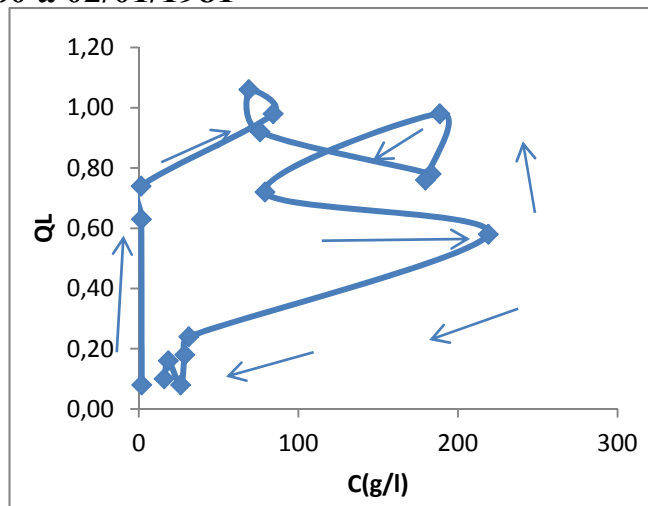
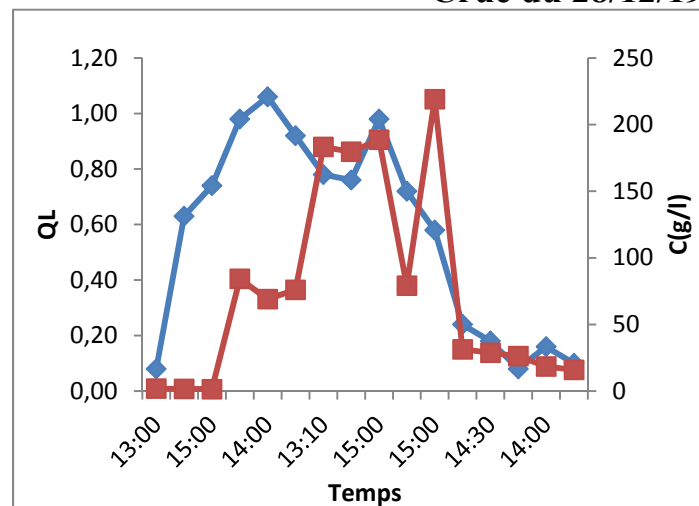
Crue du 21/10/1977 à 26/10/1977



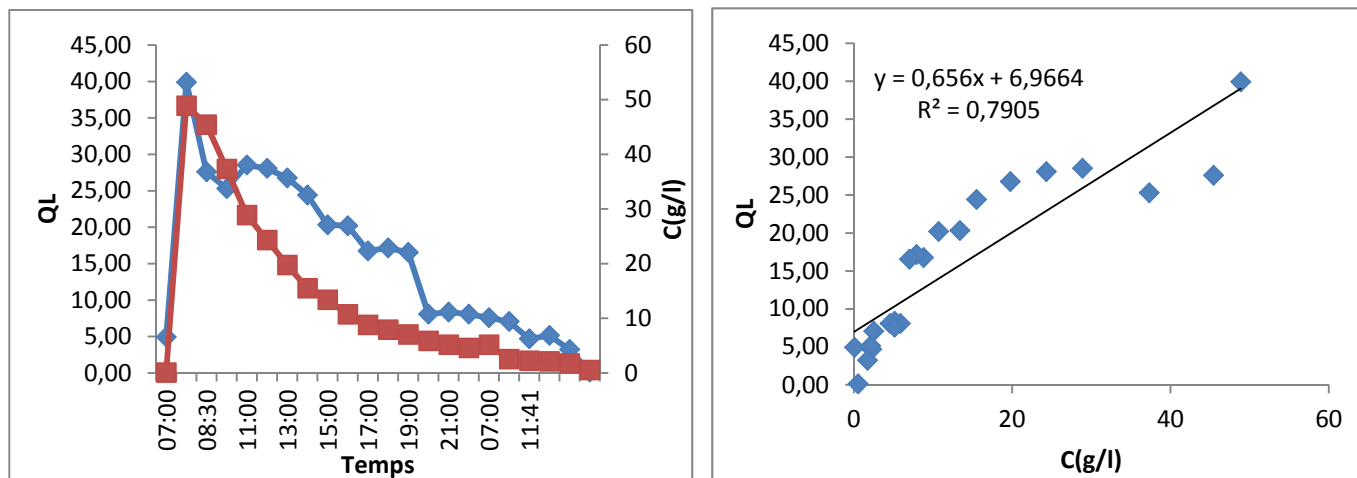
Crue du 18/10/1979 à 25/10/1979



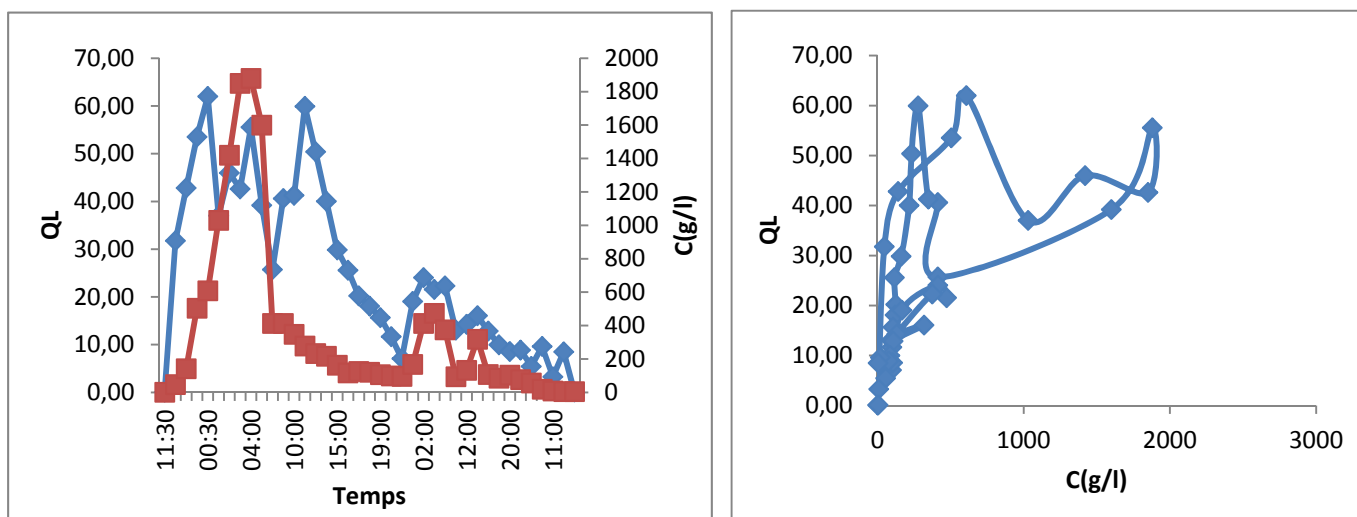
Crue du 28/12/1980 à 02/01/1981



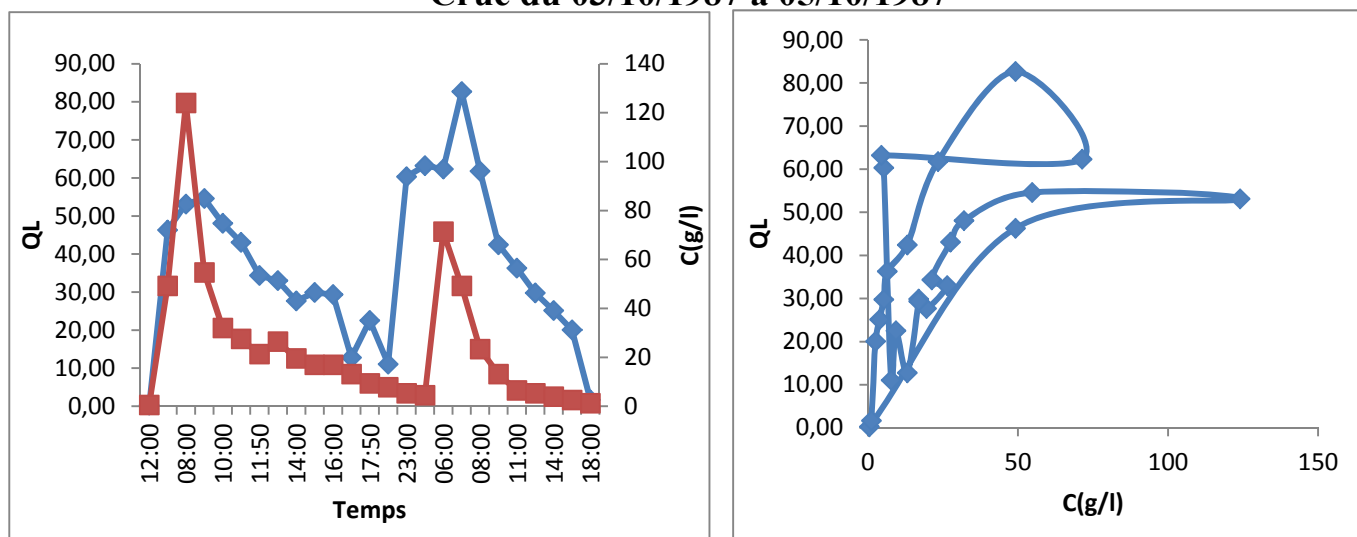
Crue du 04/10/1986 à 05/10/1986



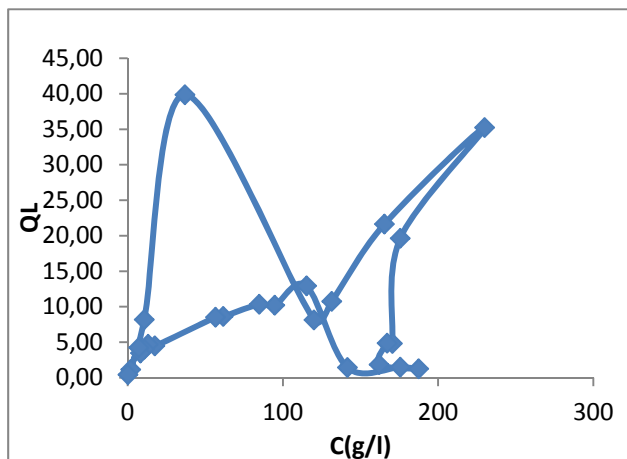
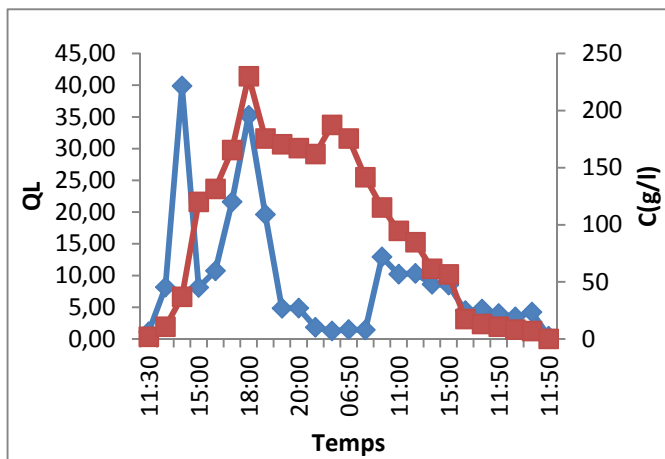
Crue du 15/11/1986 à 21/11/1986



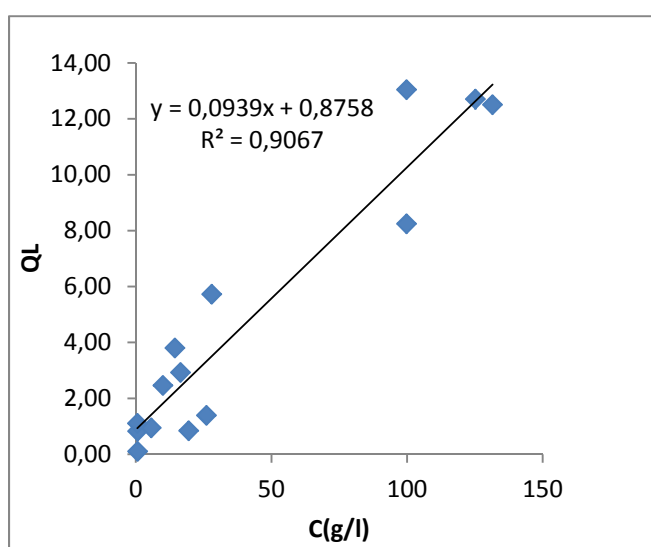
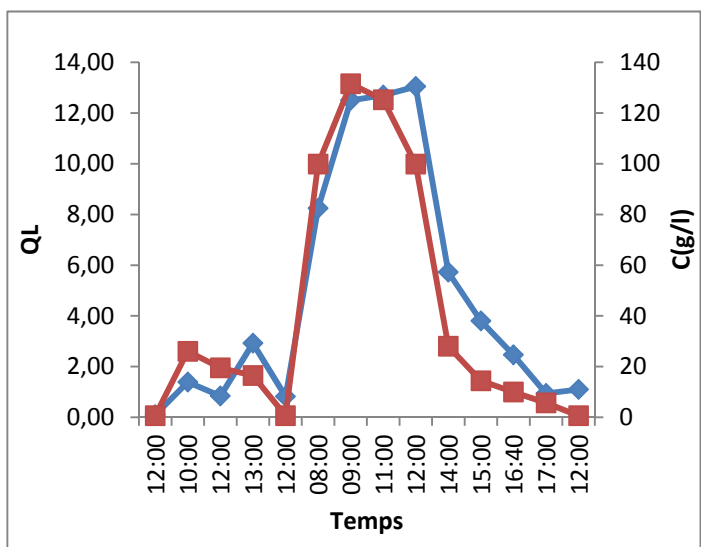
Crue du 03/10/1987 à 05/10/1987



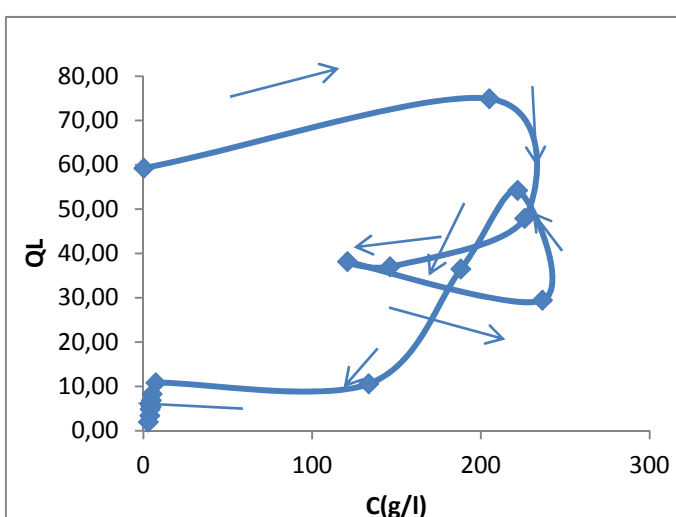
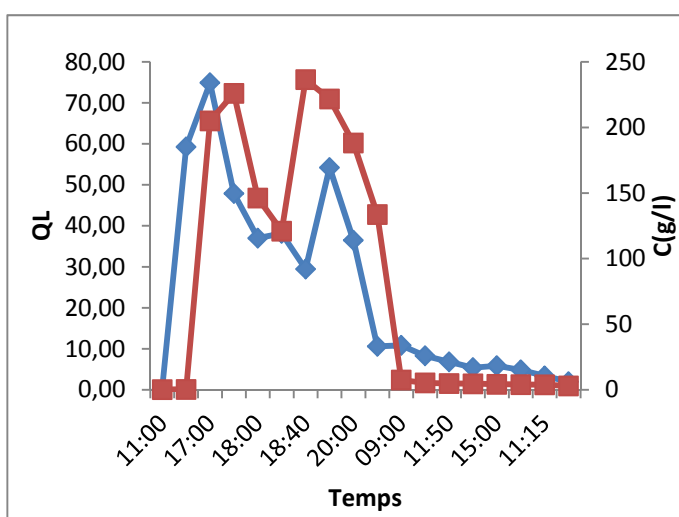
Crue du 19/03/1989 à 25/03/1989



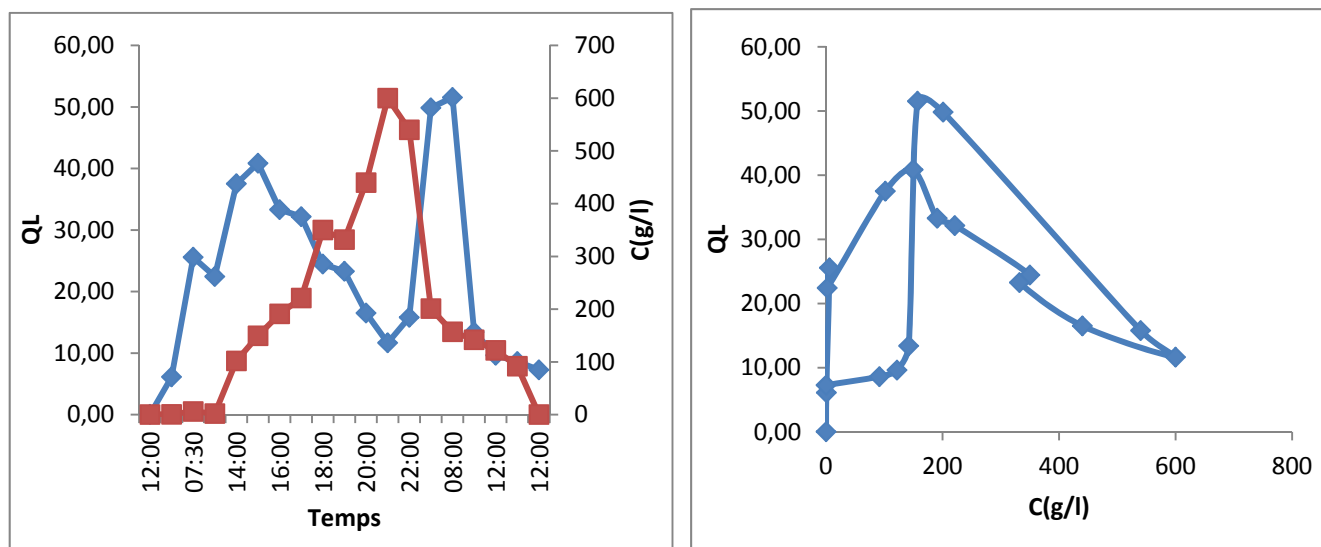
Crue du 31/12/1989 à 06/01/1990



Crue du 11/05/1990 à 14/05/1990



Crue du 13/03/1991 à 17/03/1991



Crue du 15/01/1999 à 01/02/1999

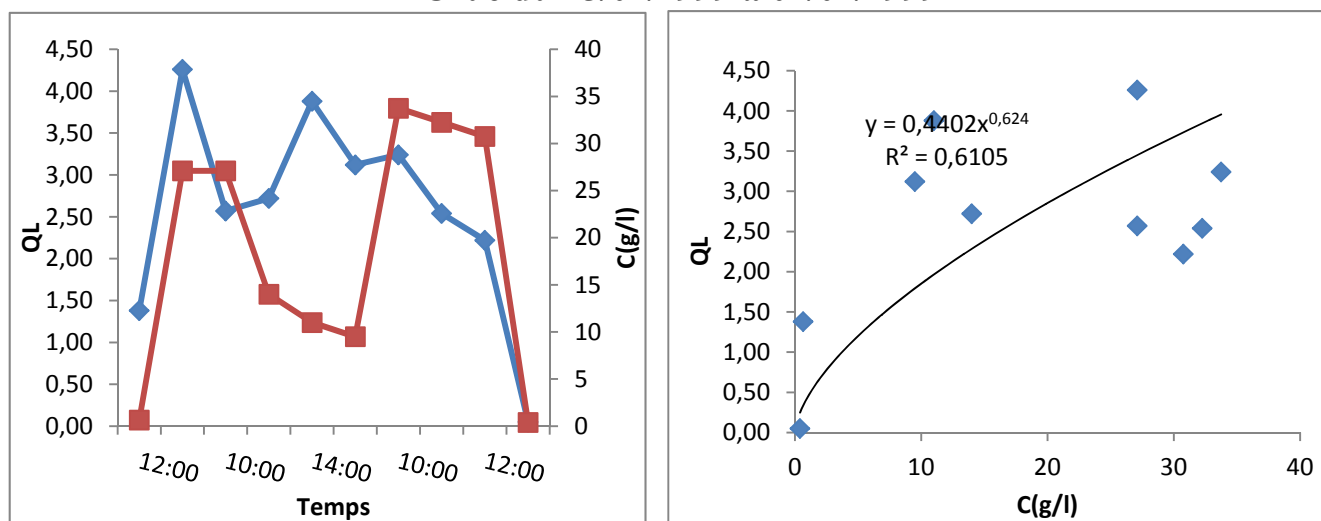
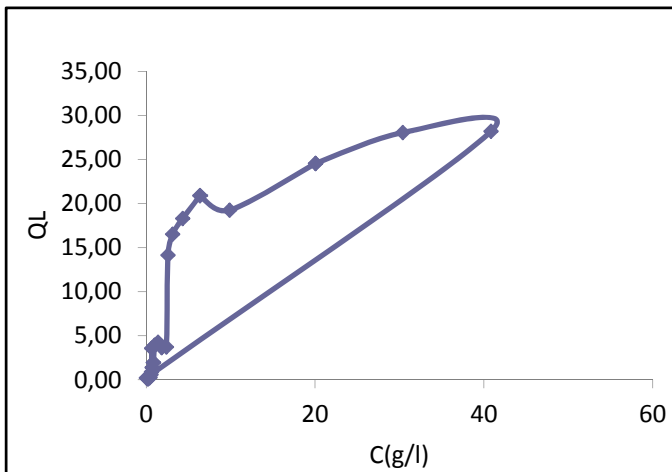
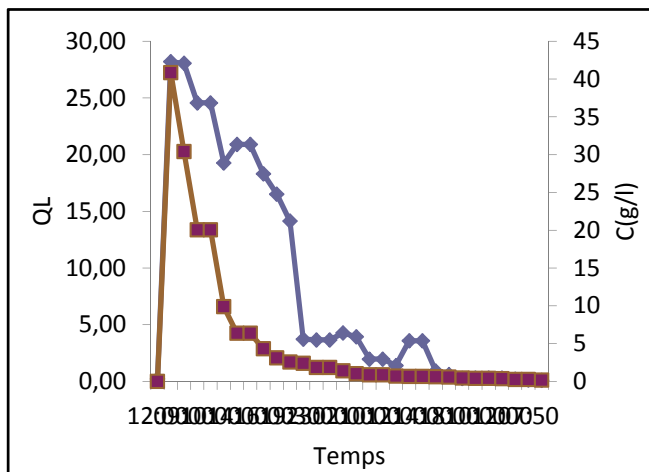


Fig .3.16/ Evolution des concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides en fonction du temps des crues d'oued Mouilah (1974/99).

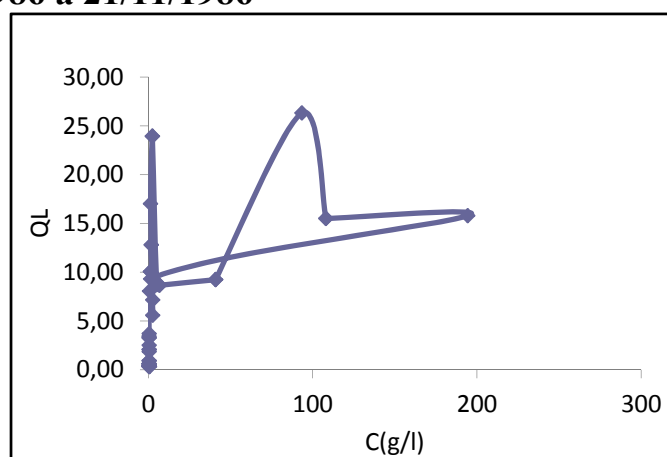
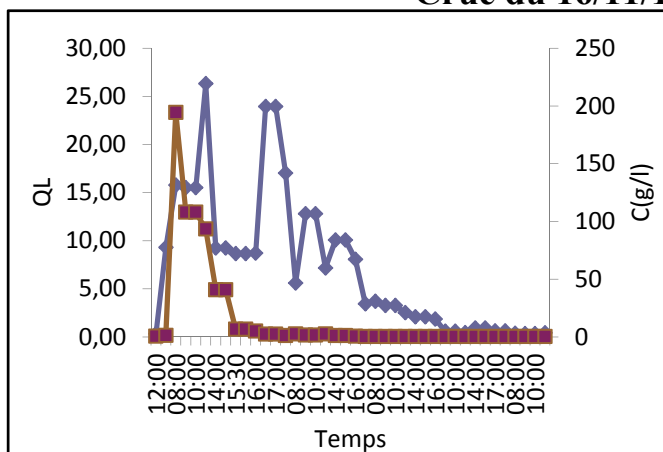
Relation concentration-débit liquide et classification, (station sidi belkhir)

❖ Crues principales au niveau de la station Mouilah RN7 :

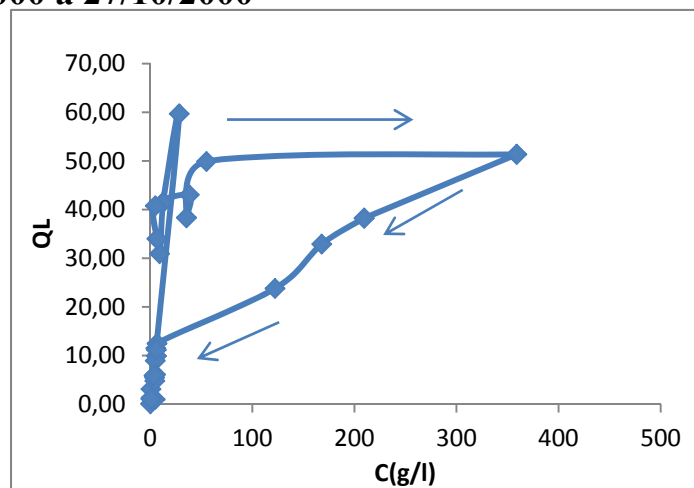
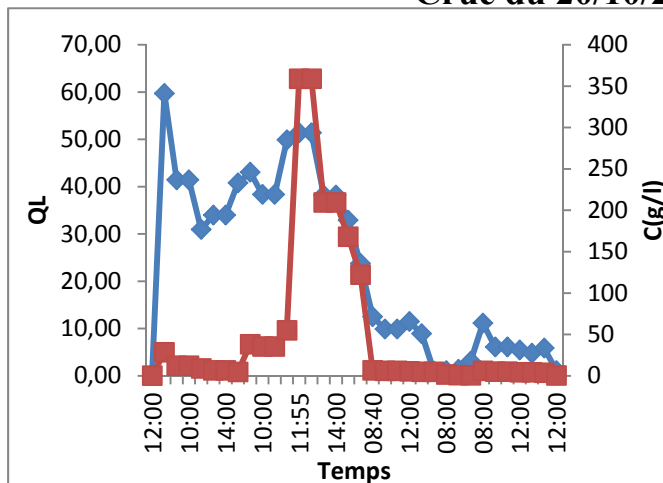
Crue du 03/10/1986 à 07/10/1986



Crue du 16/11/1986 à 21/11/1986



Crue du 20/10/2000 à 27/10/2000



Crue du 13/11/2000 à 17/11/2000

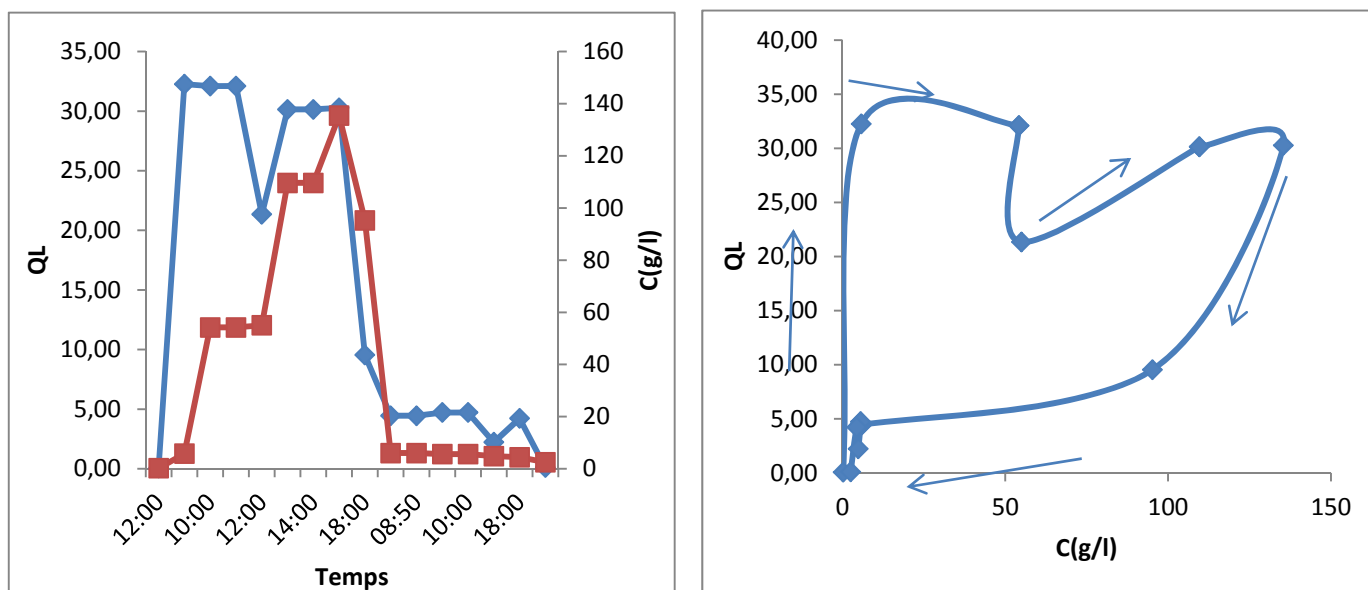


Fig .3.17/ Evolution des concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides en fonction du temps des crues d'oued Mouilah (1985/01).

Relation concentration-débit liquide et classification, (station mouilah RN7)

III. CONCLUSION :

L'insuffisance de l'équipement hydrométrique et le manque de données précises ont été largement ressentis dans la compréhension de certains phénomènes hydrologiques, particulièrement liés aux formes de l'écoulement extrême. En dépit de données de débits parfois fragmentaires, nous avons pu néanmoins, dégager les grands traits du régime d'écoulement de nos sous bassins.

L'analyse des débits moyens annuels de l'oued Mouilah a mis en évidence une irrégularité spatio-temporelle assez marquée de l'écoulement superficiel associée à un coefficient d'immodération très élevé de l'ordre de 14.50 et un coefficient de variation égal à 0.82 ;

Le coefficient d'écoulement est très faible 6,16 %, C'est-à-dire que juste 6% de la lame d'eau précipitée s'écoule dans l'oued, tandis que 94%

restant s'évapore ou s'infiltré. Cela veut dire que le sol de notre bassin est très perméable.

L'étude des variations saisonnières des débits par l'intermédiaire des coefficients mensuels des débits a permis de caractériser le régime hydrologique du cours d'eau. Le printemps et l'automne représentent les deux saisons de hautes eaux où l'oued s'écoule avec un débit moyen mensuel assez important supérieur à la moyenne inter annuelle.

L'analyse fréquentielle des débits instantanés maximums de l'Oued mouilah montre que ces débits suivent la loi Log-normal et confirme l'irrégularité des débits annuels.

Les précipitations sont d'une intensité très élevée et les débits instantanés ainsi observés sont qualifiés de débits extrêmes de fréquences très rares d'où le caractère torrentiel des crues et leur pouvoir dévastateur.

Pour les deux stations, la classe I de courbes hystérésis est la plus fréquente surtout dans la saison d'automne et printemps.

CHAPITRE IV**L'érosion et le transport solide****IV.1/ Introduction :**

En Algérie, l'ampleur de ce phénomène est considérable. L'agressivité des pluies conjuguées à une absence de protection végétale, l'alternance de périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'action anthropique, entraînent l'envasement des retenues

L'Algérie comptera prochainement un nombre important de barrages de toutes catégories et de toutes dimensions. Malheureusement cette richesse se dégrade de jour en jour par la sédimentation accélérée. L'érosion des bassins versants en amont des retenues, sous toutes ses formes ; laminaire, en rigole, en ravine, des berges, glissement de terrains, coulées de boue, etc..., est à l'origine de l'envasement de ses dernières. Les conséquences de l'érosion ne se limitent pas seulement à l'envasement des retenues, mais contribue aussi à la perte de la couche arable, la plus fertile du sol, en diminuant sa productivité et dégradant la qualité des eaux de surface, ce qui affecte alors les infrastructures en aval telles que les usines de traitement d'eau potable, les centrales hydroélectriques et les barrages. Ce dernier problème touche en Algérie, une réduction de 20% de la capacité initiale de stockage était liée à l'envasement des retenues depuis la construction des barrages (Benblidia, Salem & Demmak, 2001). (Bouras, Djebbar,, Abida)

La sédimentation des barrages dans les pays de l'Afrique du nord est très élevée et même spectaculaire. Elle est due directement aux forts taux d'érosion des bassins versants, dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eau et provoqueront à l'entrée des retenues des courants de densité. (W. REMINI, B. REMINI ,2003).

En plus de la réduction de la capacité, la sédimentation a un impact au niveau du réservoir lui-même, en amont, et en aval du barrage. (W. REMINI, B. REMINI ,2003)

IV.2/ Généralité :

Erosion vient de "ERODERE", verbe latin qui signifie "ronger". L'érosion ronge la terre. En fait, c'est un processus naturel qui n'est donc pas forcément souhaitable de l'arrêter, mais de le réduire à un niveau acceptable et tolérable.

L'érosion du sol, soit le mouvement du sol d'un lieu vers un autre, survient sous l'effet de trois principaux phénomènes. Elle se produit naturellement sur les terres agricoles par l'action du vent et de l'eau, et peut être accélérée par certaines activités agricoles. Elle est aussi provoquée directement par la méthode de travail du sol, qui entraîne un mouvement progressif du sol vers le bas des pentes, donnant ainsi lieu à une perte de sol au sommet et à une accumulation à la base des pentes.

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement les pays du Maghreb dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol.

-Une lithologie favorable de la dégradation

-Un climat de type méditerranéen caractérisé par l'irrégularité et l'agressivité des pluies.

-Un couvert végétal pratiquement inexistant. (D.Boudjemline ; K.Zemouri et A.Mechouche)

L'érosion hydrique est un processus qui emporte et redistribue le sol. Bien qu'une certaine érosion se produise graduellement, le phénomène est surtout imputable à des événements météorologiques extrêmes (une forte pluie). L'érosion hydrique emporte la couche arable du sol, la plus propice au soutien de la vie microbienne et végétale. La disparition de la totalité ou d'une partie de cette couche superficielle diminue le potentiel de production d'un sol en réduisant sa fertilité, sa capacité d'accepter et d'emmagasiner l'eau et l'air. Les matériaux enlevés peuvent se redéposer un peu plus loin sans grandes conséquences apparentes pour l'environnement. Cependant, dans certains endroits, l'érosion transporte les matériaux jusqu'aux cours d'eau et aux lacs et même jusqu'aux océans, dont les eaux se dégradent considérablement.

Chaque nouvelle perte de couche arable aggrave les effets de l'érosion, et le sol devient de moins en moins capable de maintenir une productivité optimale, de régulariser et de répartir l'écoulement de l'eau dans l'environnement, ce qui peut être une source d'une pollution diffuse (eutrophisation, contamination des cours d'eau par les pesticides et les engrais, turbidité de l'eau,...etc.).

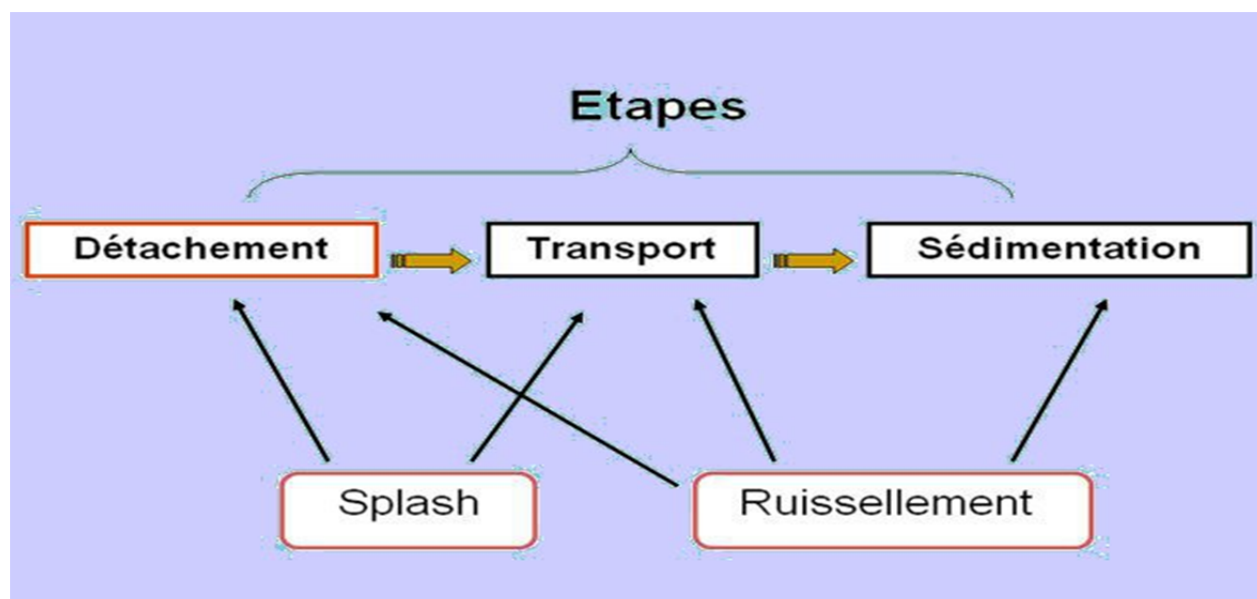


Fig 4.1/ Etapes du transport solide

Il correspond à la séparation entre la particule et son support, sans inclure le transport et la sédimentation, même s'il se produit toujours un micro-transport (1990). Ce phénomène est très répandu en Afrique du nord. En effet, la majorité des bassins versants de l'Algérie, la Tunisie, et le Maroc est

Caractérisée par de fortes dégradations spécifiques dépassant 2000 t/km².an. (*W. Remini et B. Remini, 2003*)

IV.2.1/ Les conséquences de l'érosion : les nuisances

L'érosion des bassins versants en amont des retenues, sous toutes ses formes ; laminaire, en rigole, en ravine, des berges, glissement de terrains, coulées de boue, etc..., est à l'origine de l'envasement de ses dernières. Les conséquences de l'érosion ne se limitent pas seulement à l'envasement des retenues, mais contribue aussi à la perte de la couche arable, la plus fertile du sol, en diminuant sa productivité et dégradant la qualité des eaux de surface, ce qui affecte alors les infrastructures en aval telles que les usines de traitement d'eau potable, les centrales hydroélectriques et les barrages. Ce dernier problème touche particulièrement les pays du Maghreb. En Algérie, une réduction de 20% de la capacité initiale de stockage était liée à l'envasement des retenues depuis la construction des barrages. (Bouras Farida, Djebbar Yassine, Abida Habib)

En Algérie, les conditions physiques des sols, ainsi que celles géomorphologiques, hydro-climatiques, et socio-économiques, sont

toutes favorables à l'accélération du processus de l'érosion. Les écarts climatiques interannuels et intersaisons, la fréquence des précipitations maximales instantanées ainsi que l'existence d'autres facteurs précisés antérieurement accélérant l'érosion, font que 85 % de la surface totale des terres cultivables est soumise à une dégradation élevée intéressant 6 millions d'hectares. (Mme MEZIANI Née MAHI TANI, 2011)

IV.2.2/ Types d'érosion :

Il y a trois types d'érosion

IV.2.2.1/ L'érosion éolienne :

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm), de plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire sub -horizontale. En retombant, ces grains de sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) ou se dégradent les agrégats limono-argileux en dégageant de la poussière (**Heusch, 1988**).

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

IV.2.2.2/ L'érosion aratoire ou mécanique sèche :

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

• Facteurs d'érosion mécanique

Les facteurs influençant la quantité de terre déplacée sont :

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

Plus la pente est forte, plus les mottes de terres détachées roulent vers le bas.

C'est ce qui explique que les sommets des collines sont souvent décapés.

- **L'orientation du travail du sol**

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

IV.2.2.3/ L'érosion hydrique :

- **L'érosion en nappe ou aréolaire ou laminaire "sheet erosion"**

C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion. Cette érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface, autrement dit c'est une forme d'érosion diffuse. De ce fait, elle est peu visible d'une année à l'autre.

Le signe le plus connu de l'érosion en nappe est donc la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés. Egalement, il y a un autre symptôme de l'érosion en nappe est la remontée des cailloux en surface par les outils de travail du sol. Les paysans disent que "les cailloux poussent". Il s'agit en réalité d'une fonte de l'horizon humifère et d'un travail profond du sol qui remonte en surface les cailloux. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies tandis que les cailloux, trop lourds pour être emportés, s'accumulent à la surface du sol.

L'importance de l'érosion en nappe dépend à la fois :

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

En illustration de cette forme d'érosion, voici un ensemble de photos qui montrent clairement comment l'érosion en nappe se manifeste en plein paysage:



Fig 4.2/ Erosion en nappe

- **L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill Erosion)**

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, il se forme d'abord des flaques; ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eau et lorsque ces filets d'eau ont atteint une certaine vitesse, 25 cm par seconde d'après Hjulström (1935), ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dispersée sur l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente. L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses: non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais des graviers ou des cailloux et même des blocs.

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

En effet, sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles.



Fig 4. 3/ Erosion linéaire

Tab 4.1/Les formes d'incision dues à l'érosion linéaire :

Formes	Tracé	Longueur	Largeur	Profondeur
Griffe	Sinueux	< 1 m	< 10 cm	5-6 cm
Rill	Rectiligne	Centaine de m	10-20 cm	5-10 cm
Rigole	Sinueux	Dizaine de m	5-70 cm	10- 30 cm
Ravine	Peu sinueux	Centaine de m	50cm à 1 m	30-50 cm
Petit ravin	Peu signeux	Centaine de m	50 cm à 1m	50-200 cm

- **L'érosion en masse**

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies, comme les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain. Dans ce cas, seul l'Etat dispose des moyens techniques, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour imposer des

restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de mouvement de masse.

- **L'érosion hydrographique**

C'est une forme d'érosion due à la dissipation de l'énergie de l'eau dans les lits des cours d'eau et les rivières. L'énergie de ces dernières est capable, de manière régulière ou accidentelle (lors des inondations) d'emporter une partie des berges. On appelle ce processus le sapement des berges. Il se produit également dans les ravins en formation lorsque l'eau du ruissellement attaque les assises du ravin. Ce type d'érosion est étroitement lié au volume et à la vitesse de l'eau, qui dépend de la pente et du débit.

En guise de conclusion sur l'importance des pertes du sol pour les différentes formes d'érosion, nous consignons cette comparaison dans le tableau suivant :

Tab 4.2/Formes d'érosion

Type d'érosion	Perte du sol
Erosion en nappe	1 T/ha/an
Erosion en rigole	10 T/ha/an
Erosion ravine	100 T/ha/an
Erosion en badlands	1 000 T/ha/an
Sapement des berges	10 000 T/ha/an

IV.2.3/ FACTEURS DE L'ÉROSION HYDRIQUE :

Avant d'adopter l'une ou l'autre des méthodes de lutte antiérosive, il est souhaitable de revenir aux causes de l'érosion et aux facteurs qui en modifient l'expression.

Les facteurs de l'érosion qui influencent les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Wischmeier et Smith, 1978 ; King et Le Bissonnais, 1992).

Les paramètres de l'érosion sont les différentes informations qui peuvent permettre de caractériser les facteurs de l'érosion. Par exemple, la pente est un paramètre pouvant caractériser le facteur topographie, de même que la dénivelée, l'altitude moyenne, etc. Ainsi, pour caractériser l'influence du climat, l'énergie cinétique cumulée des pluies serait probablement le paramètre le plus pertinent, mais il n'est pas disponible, et on retiendra donc les hauteurs de pluie cumulée, pondérées par une information sur l'intensité des précipitations.

IV.2.4 /L'impact De L'érosion Dans Différentes Régions :

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

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

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

En Algérie, L'érosion hydrique affecte de plein fouet les ouvrages hydrauliques,

Conséquence d'un envasement rapide, face à cet épineux problème l'Algérie tente bien que mal d'y remédier. Cependant des mesures ont été

effectuées au niveau de ces ouvrages dans le but de mesurer l'ampleur de ce phénomène qui est l'envasement.

IV.3/QUANTIFICATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE :

La quantification de l'érosion fait appel à de nombreuses méthodes mises au point à travers le monde et qui se résument comme suit :

J Méthodes de bathymétrie,

J Parcelles expérimentales,

J Etude des griffes de l'érosion avec ou pas d'utilisation du SIG et de Télédétection,

J Débits solides et l'étude des turbides,

J Etude des radios nucléides,

J Modélisation de l'érosion par la méthode de Wischmeier (USLE, MUSLE ou RUSLE).

Ces méthodes laissent apparaître un certain nombre d'erreurs qui limitent la spatialisation des équations des pertes en terre (BONN, 1998) car :

J les sédiments générés par l'érosion peuvent être retenus par des trappes à différents endroits du bassin ;

J les sédiments qui atteignent les retenues des barrages sont constitués par un mélange de sédiments érodés sur les versants et les produits arrachés par sapement de berges ;

J enfin la distribution spatiale des précipitations n'est pas uniforme en particulier dans les zones montagneuses et par suite il faut vérifier l'homogénéité de la répartition spatiale des chutes de précipitations.
(Moukhchane M.)

Il existe plusieurs formules permettant la quantification de l'érosion hydrique, nous ne citerons que celles qui impliquent des paramètres physiques représentatifs.

✓ Les modèles empiriques : cas de l'équation universelle (modèle de WISCHMEIER) : L'UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION (USLE)(1978)

Ce modèle empirique établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales menées sur plus de 20 ans exprime les pertes en sol comme le produit de différents facteurs selon la formule :

$$Ps = E_p \times E_s \times F_{lp} \times F_p \times F_{am} \times F_v$$

Avec

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

Ep : érosivité des précipitations (N/h).

Es: érodabilité du sol ou susceptibilité du sol à l'érosion (t.h/N.ha)

Flp: facteur de longueur de pente (sans dimension)

Fp: facteur de pente (sans dimension)

Fam : facteur d'aménagement (sans dimension)

Fv: facteur de conservation des sols pratiqué (sans dimension)

✓ **Formule de Fournier (1960)**

$$A_{SS} = \left(\frac{1}{36}\right) \times \left(\frac{P_m}{P_{am}}\right)^2 \times 2.65 \left(\frac{h}{S}\right)^2 \times 0.46$$

Avec

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

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

P_{am}: précipitations annuelles (mm)

h : dénivelée moyenne (m)

S : superficie du bassin versant (km²).

✓ **Formule de Tixeront (1960)**

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

$$A_{SS} = 354E^{0.15} \quad \text{pour les bassins tunisiens}$$

$$A_{SS} = 92E^{0.21} \quad \text{pour la région est algérien}$$

$$A_{SS} = 200 \times E \quad \text{pour la région centre algérien}$$

Avec :

Ass : apport solide spécifique en t/km²/an

E : Ecoulement en mm

✓ **Formule de la Sogreah**

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

$$A_{SS} = \alpha \times E^{0.15}$$

Avec :

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

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

E : Ecoulement annuel (mm)

Tab 4.3/Valeurs de α pour différentes perméabilités

perméabilité	α
forte	8.5
moyenne	75
Moyenne à faible	350
Perméabilité faible	1400
imperméable	3200

IV.4/ Le transport solide :

Ce phénomène est le principal élément moteur après l'érosion, conduisant au processus d'envasement des barrages. Ce processus fait le lien entre les sols du bassin versant et la retenue du barrage. Il est défini par un écoulement biphasique caractérisé d'une phase liquide (eau) et d'un autre solide (granulats, sol).

Dans les cours d'eau naturels, les particules solides vont être transportées en suspension ou en charriage (**BENAICHA, 2011**)

En rivière, Graf & Altinakar distinguent le transport solide en suspension Intrinsèque (angl. : wash-load), dû à la turbulence et qui concerne les particules qui ne sont jamais en contact avec le fond, et le transport solide de fond (bed-material load). Ce dernier est lui-même décomposé en suspension (suspended-load2), qui concerne les particules se déplaçant par bonds importants, et charriage (bed-load), qui concerne les particules en contact étroit avec le fond (**Matthieu François Daniel Dufresne, 2005**).

Le mode de transport dépend essentiellement d'un paramètre fondamental : la taille du sédiment transporté (bouanani, 2004)

IV .4.1.Transport Par Charriage

.Définition :

Je mentionne une définition disponible en français donnée par Graf et Altinakar (1996) :

« On appelle transport par charriage¹ (*bedload*) le mode de transport de sédiments où les particules roulent, glissent ou sautent (brièvement), mais restent très proches du fond, ..., ne quittant celui-ci que temporairement. ».

Le charriage consiste dans le transport par le flux liquide du matériau le plus grossier du lit d'un cours d'eau. En cours d'eau de montagne, sur fortes pentes, ces écoulements biphasiques se caractérisent par des flux de sédiments intenses et de granulométrie étendue. (FREY, 2008)

. Description du phénomène :

Bagnold distingue les trois types de mouvement suivants pour les particules en charriage : glissement (angl. : sliding), roulement (rolling) et saltation (saltating)

– les particules en glissement ou en roulement se déplacent relativement lentement en restant en contact avec le lit (Ancey & al.).

– les particules en saltation se déplacent par sauts à une vitesse relativement grande (Lee & al. Ancey & al.).

Selon Gomez & Philips, le transport solide présente souvent des variations temporelles. Ainsi, Böhm & al. ont montré que le charriage était un phénomène intermittent à l'échelle du 1/130 de seconde. Le débit solide obtenu dans le cas de leurs expérimentations (canal étroit, pentes fortes, billes de taille uniforme) est sujet à des fluctuations importantes, ces fluctuations (de l'ordre de grandeur du débit solide lui-même) étant particulièrement importantes dans le cas d'un lit mobile.

Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement. De ce fait, les évaluations de ce type de transport sont difficiles à mener en l'absence de bases de données (bouanani, 2004)

IV.4.2. Transport En Suspension

.Définition :

« On appelle transport par suspension (*suspended load*) le mode de transport de sédiments où les particules se déplacent en faisant des sauts importants, mais restent (occasionnellement) en contact avec le charriage, puis avec le fond. » (FREY, 2008)

. Description du phénomène

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), de taille micronique, maintenues en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement (bouanani, 2004)

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

Les critères de suspension, donnés par Bagnold, Van Rijn, Eugelund et Schiedls sont représentés dans la figure 45.

Le processus du transport des matières solides en suspension dans les bassins versants est complexe. Il est étroitement lié à l'intensité des précipitations, à la configuration des bassins versants et aux conditions hydrauliques. (GHENIM A., SEDDINI A., TERFOUS A., 2007)

IV.5/ Etude du transport solide en suspension

IV.5.1- présentation des données

Puisque notre étude est basée sur l'envasement de barrage boughrara, on a choisi les données des stations les plus proches du site d'étude comme la station de sidi belkhir (sous bassin de mouilah) et la station mouilah RN7 ;

Pour la station de barrage boughrara(160501), on a une absence de données du transport solide ;

La source de données est fournie par l'ANRH et Le choix de ces stations est dicté par la disponibilité de données de mesure des concentrations des matières en suspension.

Tab 4.4/ stations hydrométriques et périodes de mesure. (ANRH Bir morad rais)

stations	code	période
Sidi belkhir RN35	160504	1974-1999
Mouilah RN7	160202	1985-2001

L'étude est basée sur les mesures instantanées des débits liquides et des Concentrations réalisées par les services de l'A.N.R.H. Les débits liquides sont obtenus soit à partir de la courbe de tarage suite aux hauteurs d'eau lues sur une échelle limnimétrique, soit à partir des hauteurs d'eau enregistrées par un limnigraphe à flotteur. Quant à la concentration, à chaque lecture de hauteur d'eau, on prélève un échantillon d'eau turbide sur la rive à la surface de l'oued

au moyen d'un flacon de 50 cl. Les sédiments filtrés sur papier filtre sont ensuite séchés à l'étuve pendant 30 minutes à une température de 105 °C. Ramenée à l'unité de volume (1litre), 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 30minutes 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 12 h. Le débit solide en suspension est alors calculé par la relation classique :

$$Q_{SS} = C \times Q_L$$

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

Q_L : Débit liquide (m/s)

C : Concentration ou turbidité (g/l)

IV.5.2/ Apport Solide Annuel

C'est l'un des problèmes de l'envasement des barrages qui présente une variabilité dans l'espace et dans le temps. La capacité de piégeage dépend de nombreuses variables.

Cependant des formules ont été proposées et prenant en considération le volume de la retenue. (Mokhtari, 2009)

IV.5.3 Estimation du transport solide en suspension dans le bassin de Tafna :

IV.5.3.1/Bilan annuel des apports :

La formule de l'apport solide en suspension est comme suit :

$$A_S = \left[\frac{[(Q_{J+1} \times C_{J+1}) + (Q_J \times C_J)]}{2} \right] \times (T_{J+1} - T_J)$$

Avec : C_J et C_{J+1} : les concentrations relevées aux instants t_j et $t_{(j+1)}$ qui correspondent respectivement aux débits liquides Q_J et Q_{J+1} . La somme arithmétique de ces apports pendant l'année représente l'apport solide.

La formule de l'apport liquide (AL) est comme suit :

$$A_L = \left[\frac{(Q_{J+1} + Q_J)}{2} \right] \times (T_{J+1} - T_J)$$

L'apport solide spécifique (A_{SS}) est donné par la formule :

$$A_{SS} = \frac{A_S}{S}$$

Avec : A_S : apport solide annuel, mensuel ou saisonnier(T)

A_L : apport liquide annuel, mensuel ou saisonnier(Hm3)

A_{SS} : apport solide spécifique (T/Km2/an)

S : superficie du bassin versant (km2)

Voici le tableau qui montre les apports liquides et solides ainsi que l'érosion spécifique A_{SS} au niveau des stations de mesure

Tab.4.5/ Apports liquides, solides et apports solides spécifiques au niveau du bassin de Mouilah : (station Sidi belkhir) 73/98, (station mouilah RN7) 85/01

Station Sidi belkhir				Station mouilah RN7			
année	Al (hm3)	As(MT)	Ass(t/km2/an)	année	Al (hm3)	As(MT)	Ass(t/km2/an)
74/75	96,99	0,303	114,34				
75/76	54,65	0,29	109,43				
76/77	67,08	0,0105	3,96				
77/78	57,43	0,191	72,08				
78/79	32,87	0,0019	0,72				
79/80	92,57	2,49	939,62				
80/81	77,59	0,414	156,23				
81/82	35,06	0,0188	7,09				
82/83	33,87	0,2245	84,72				
83/84	26,02	0,036	13,58				
84/85	13,68	0,0419	15,81				
85/86	13,7	0,0486	18,34	85/86	5,640	0,067	36,661
86/87	92,3	5,718	2157,74	86/87	51,360	0,492	270,195
87/88	19,8	0,474	178,87	87/88	11,360	0,560	307,528
88/89	31,1	0,936	353,21	88/89	12,460	0,104	56,921
89/90	43,9	1,482	559,25	89/90	26,050	0,770	423,337
90/91	47,7	2,82	1064,15	90/91	36,390	1,406	772,372
91/92	30,6	3,466	1307,92	91/92	28,610	1,715	942,537
92/93	14,3	0,23	86,79	92/93	4,790	0,399	219,092
93/94	31,8	0,0589	22,23	93/94	5,700	0,014	7,426
94/95	150	0,331	124,91	94/95	41,230	2,071	1137,941

95/96	84,6	1,17	441,51	95/96	26,440	1,004	551,836
97/98	64,4	0,805	303,77	97/98	15,360	0,832	456,914
98/99	17,6	0,00168	0,63	98/99	29,120	0,002	0,994
99/00		2,987	1127,17	99/00	12,890	0,905	496,995
				00/01	24,840	1,760	967,170
				01/02	33,360	0,092	50,643
moyenne	51,23	0,98	370,56	moyenne	22,850	0,762	418,660
écart type	34,03	1,44	542,46	écart type	13,798	0,677	371,765
Cv	0,66	1,46	1,46	Cv	0,60	0,89	0,89

En interprétant ces données, le bassin de mouilah et dans la station de sidi belkhir, la moyenne annuelle de la charge solide est 0.98 MT transportée en suspension, déduit d'un débit solide moyen annuel de 31,16 Kg/s sachant que la surface du bassin versant est de 2650km². La dégradation spécifique varie de 0.63 à 2157.74 T/km²/an, soit une moyenne de 370.56T/km²/an.

L'année 1986/1987 a connu toute seule une dégradation spécifique de 2157,74 qui avoisine presque la dégradation moyenne annuelle du bassin de l'Oued Cheliff – Ghrib de 2540,885t/km² (MOKHTARI, 2009)

Pour la station de mouilah RN7, la dégradation spécifique varie de 0,99 à 970 T/Km²/an soit une moyenne de 418 T/Km²/an. La surface du bassin versant est de 1820 km² occupant une lame d'eau écoulee d'environ 12 mm/an et un débit solide moyen de 24kg/s.

En Algérie, le taux d'érosion dépasse 2000t/km².an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Telien (Rhiau, Sly, Fodda, Mazafran, Isser). Il atteint 4000t/km².an sur la chaîne côtière de Dahra, et 5000 t/km².an sur le bassin très dégradé de l'Oued Agrioum (1982). Sur la Seine, par contre, le taux d'érosion est de 62t/km².an, il atteint 1500 t/km².an sur celui de la Durance (France), et dépasse 2500 t/km².an sur certains

bassins de la Chine, et de l'île de Java (1980)(W. REMINI, B. REMINI ; 2003).

La dégradation spécifique annuelle du bassin versant mouilah paraît très grande par rapport aux résultats de (Bouchelkia.H et Belarbi.F et Remini.B, 2011) (entre 17,73 et 28,41 t/km²) et pour (Terfous et al. ,2001) (126 t/km² sur une période d'étude entre 1977 à 1993).

IV.5.3.2/Variabilité interannuelle des apports solides et liquides :

Dans la région du Maghreb au climat semi-aride méditerranéen, l'agressivité des pluies et leur forte variabilité contribuent à l'érosion des sols qui alimente la charge solide des oueds, facteur d'envasement rapide des barrages hydrauliques ; Aspect important caractérisant les écoulements liquides et solides dans le contexte méditerranéen, le thème de la variabilité temporelle est privilégié dans ce travail(A. Louamri, A. Mebarki & B. Laignel,2013)

Les zones méditerranéennes et semi - arides sont caractérisées par des régimes pluviométriques irréguliers dans le temps et dans l'espace (M. Achite et M. Meddi,2005)

1. Station sidi belkhir :

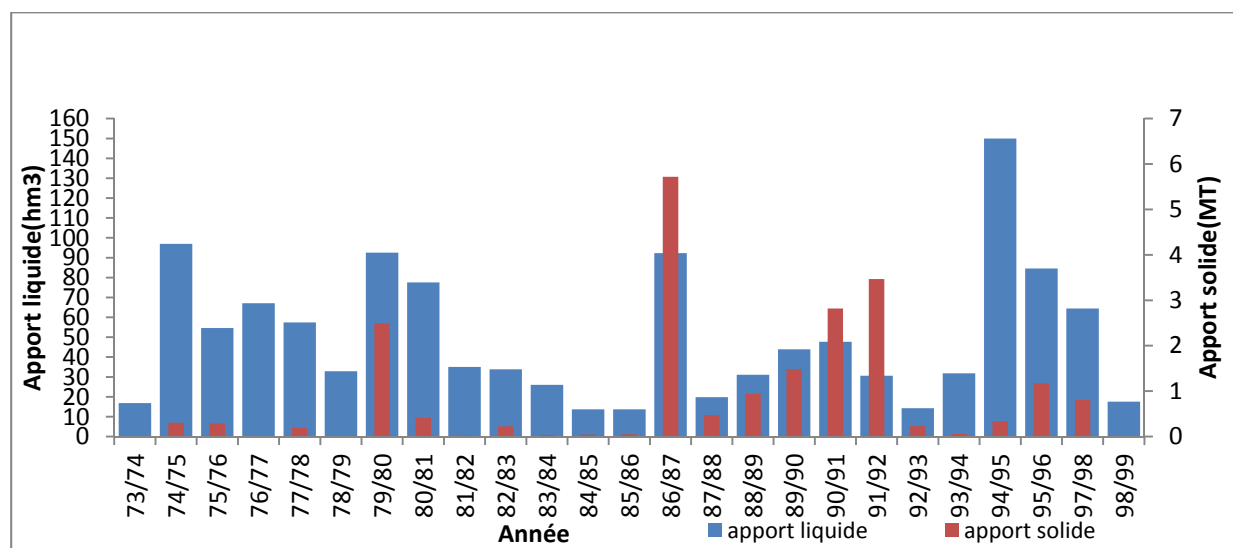


Fig .4.4/Apports liquides et solides annuels de l'oued mouilah (station sidi belkhir)

D'après le graphe ci-dessus, on a remarqué une grande charge solide dans l'année 86/87 ; soit 23% du tonnage global et la dégradation spécifique de cette période est d'environ 2157 T/km²/an. La concentration moyenne annuelle est de 16,62 g/l.

Pour notre bassin, le coefficient de variation des apports solides est plus importants (1,64) que celui des apports liquides (0,66).

L'année hydrologique 94/95 a connu un grand apport liquide de 150 Hm³ avec un faible apport solide de 0,33 MT, cela est dû à la présence des facteurs hydro climatiques qui génèrent l'effet érosif des crues.

Durant cette année, la crue survenue le 17 novembre 1986 a été la plus exceptionnelle avec un débit instantané maximal de 1880 m³/s et un débit solide correspondant de 104434 kg/s

Cet apport représente six fois la valeur moyenne annuelle de la période (1977/95) (Bouanani, 2004)

2. Station mouilah RN7 :

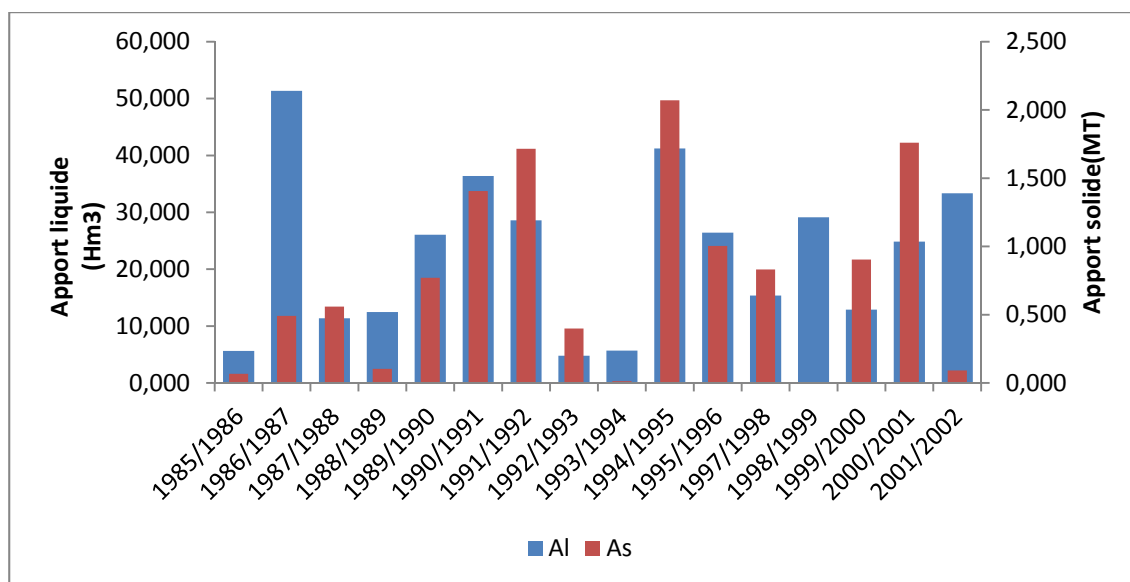


Fig .4.5/Apports liquides et solides annuels de l'oued mouilah (mouilah RN7)

Dans la station mouilah RN7 (figure) durant l'année 1994/95, l'apport solide atteint son maximum (2,07 MT) représente 17% de l'apport global enregistré en 17 ans de 1985/86 à 2001/02.

La dégradation spécifique de l'année 1994/95 est de 1173,9 T/km²/an, elle est presque 3 fois supérieure à la valeur moyenne de la période avec un apport liquide de 41Hm³.

Le plus grand apport liquide observé durant cette période de 17 ans est de 51,36 Hm³ en 86/87 suivi d'un faible apport solide 0,49 MT.

IV.5.3.3/ Variation mensuelle des apports solides :

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

Les variations des apports liquides moyens mensuels et les charges solides en suspension qui leur correspondent sont mentionnées dans le tableau (4 .6) et tableau (4 .7)

1. Station sidi belkhir :

La variation des débits solides mensuels (figure), montre que sur une série de 300valeurs correspondant à la période (1974/1999), 33 seulement soit de 11% sont supérieures à la moyenne.

D'après le tableau (4.6), Deux mois sont responsables d'une action érosive, le mois d'octobre présente 20% de l'apport solide total et le mois de novembre avec un taux de 30% , ces deux mois érosifs assurent un taux de 50% , le mois de mars a une contribution de 17% tandis que pour les autres mois , l'apport solide était modeste.

Tab .4.6/Apports liquides et solides moyens mensuels à l'oued mouilah.

Période (1974/1999) : station sidi belkhir

Station sidi belkhir				
mois	AL(Hm3)	E (mm)	AS(T)	Ass(t/km2/mois)
sep	3,13	1,18	65370,24	24,67
oct	4,97	1,87	151463,52	57,16
nov	5,70	2,15	227862,72	85,99
dec	5,28	1,99	6926,34	2,61
janv	4,15	1,56	17222,11	6,50
fev	3,74	1,41	22525,34	8,50
mars	9,00	3,39	131450,52	49,60
avr	4,14	1,56	32970,24	12,44
mai	3,16	1,19	67361,76	25,42
juin	2,33	0,88	29600,64	11,17
juil	1,65	0,62	2346,28	0,89
aout	1,77	0,67	7178,11	2,71

En effet, après la grande saison sèche, les premières pluies de septembre trouvent un sol sec et dur, difficilement érodable. La réponse du bassin en matières en suspension est donc très faible. C'est les pluies torrentielles qui suivent en octobre et novembre qui arracheraient de grandes quantités de matières solides, qui seront par la suite véhiculées en suspension par le cours d'eau.

Prenons un exemple de crue importante le 17 novembre 1986 qui a connu un débit instantané maximal de 1880 m³/s, soit un débit de pointe de 581 m³/s, suivi d'un débit solide d'environ 25451,67 kg/s, et une concentration de 36g/l.

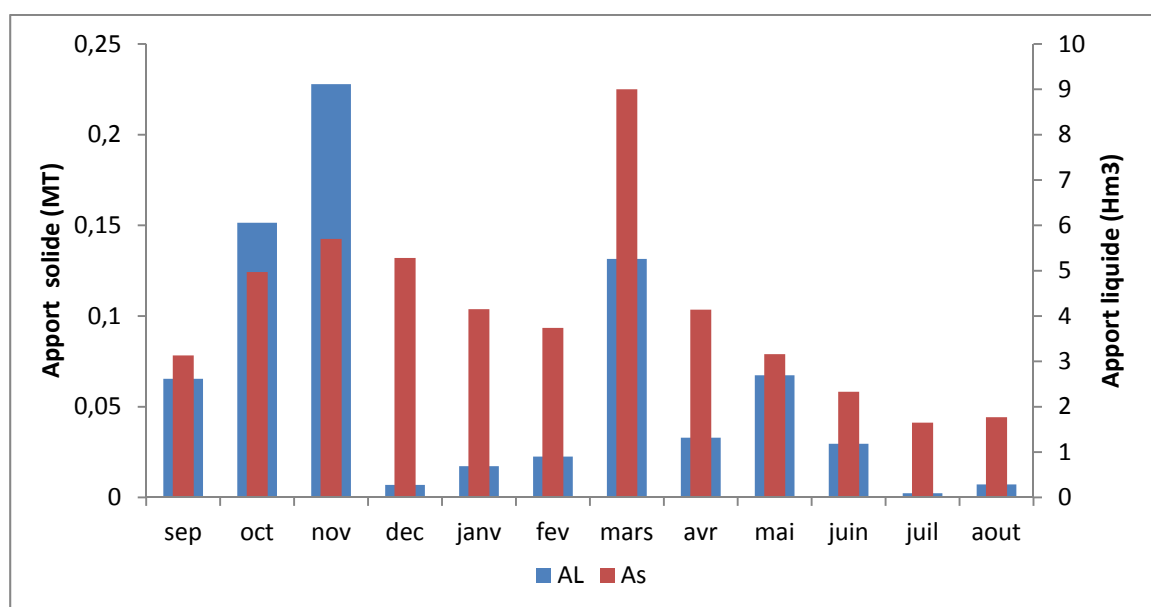


Fig.4.6/ Apports liquides et solides mensuels de l'oued Mouilah à Sidi Belkhir (1974/99)

2. Station mouilah RN7 :

La variation des débits solides mensuels (figure), montre que sur une série de 204 valeurs correspondant à la période (1985/2001), 29 seulement soit de 14% sont supérieures à la moyenne.

Ici dans cette station, les mois qui ont marqués de grandes valeurs des apports solides sont le mois d'octobre (176000 Tonnes) et le mois de mars (127000 Tonnes), assurent successivement une contribution de 25% et 18%.

Tab .4.7/ Apports liquides et solides moyens mensuels à l'oued mouilah aval.

Période (1985/2001) : station mouilah RN7

Mois	Al(Hm3)	E (mm)	As(MT)	Ass(T/km2/mois)
septembre	1,997	1,097	0,093	50,920
octobre	3,029	1,664	0,176	96,472
novembre	4,163	2,287	0,068	37,412
décembre	0,752	0,413	0,027	14,811
janvier	1,827	1,004	0,018	10,071
fevrier	0,993	0,546	0,046	25,226
mars	5,285	2,904	0,127	69,869
avril	1,386	0,762	0,043	23,371
mai	0,972	0,534	0,014	7,629
juin	0,862	0,473	0,036	19,762
juillet	0,289	0,159	0,029	16,072
aout	0,610	0,335	0,013	7,176

Les crues de 14 mars 1991 et celles de 23 octobre 2000 sont la preuve des grandes valeurs des apports solides en suspension, la première crue a connu un débit de pointe de 214 m³/s suivi d'un débit solide d'environ 6000 kg /s et une concentration de 27g/l. La deuxième crue d'octobre a marqué un débit de pointe 159 m³/s, un débit solide 6842 kg/s et une concentration remarquable 40,5 g/l.

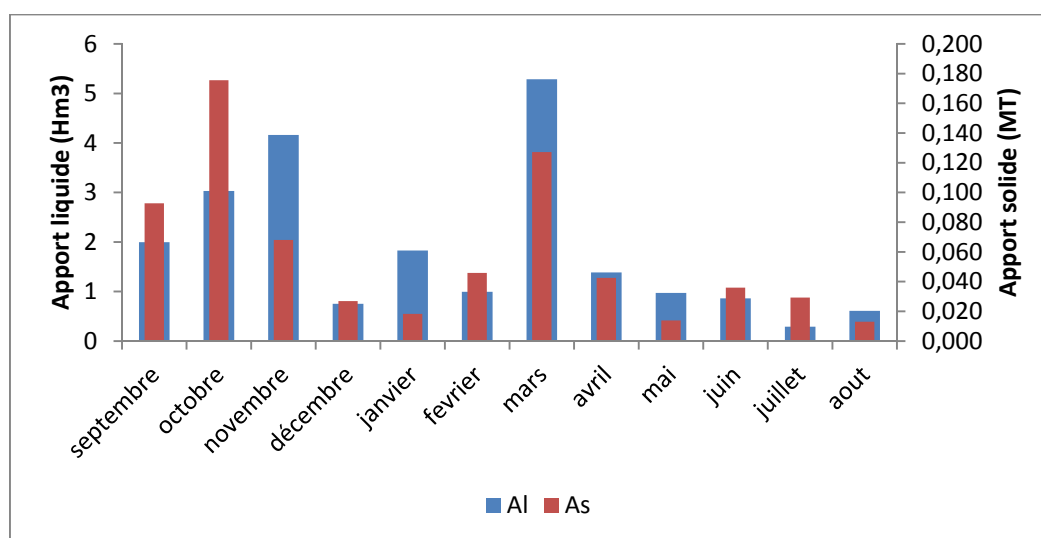


Fig.4.7/ Apports liquides et solides mensuels de l'oued Mouilah aval à mouilah RN7 (1985/01)

IV.5.3.4/ Variation saisonnière des apports solides :

Précédemment, on a étudié le phénomène du transport solide annuellement et mensuellement, et ça n'empêche pas de comprendre ce phénomène en analysant la répartition saisonnière des flux de sédiments en suspension.

La répartition saisonnière des transports solides est mentionnée dans les tableaux (4.8) et (4.9)

1. Station sidi belkhir :

Tab .4.8/Apports liquides et solides moyens saisonniers –station sidi belkhir-(1974/1999)

saison	automne	hiver	printemps	été
AL (hm3)	13,8	13,17	16,30	5,75
Le (mm)	5,20	4,96	6,14	2,17
As(MT)	0,445	0,047	0,232	0,039
Ass(t/km2/saison)	167,925	17,736	86,792	14,717

L'analyse du tableau (4.8) montre que la saison d'automne et de printemps connaissent des apports liquides forts ainsi qu'une charge en sédiments importante, soit 59% de la charge en suspension est transportée en automne, 6% en hiver et 30% au printemps (Figure)

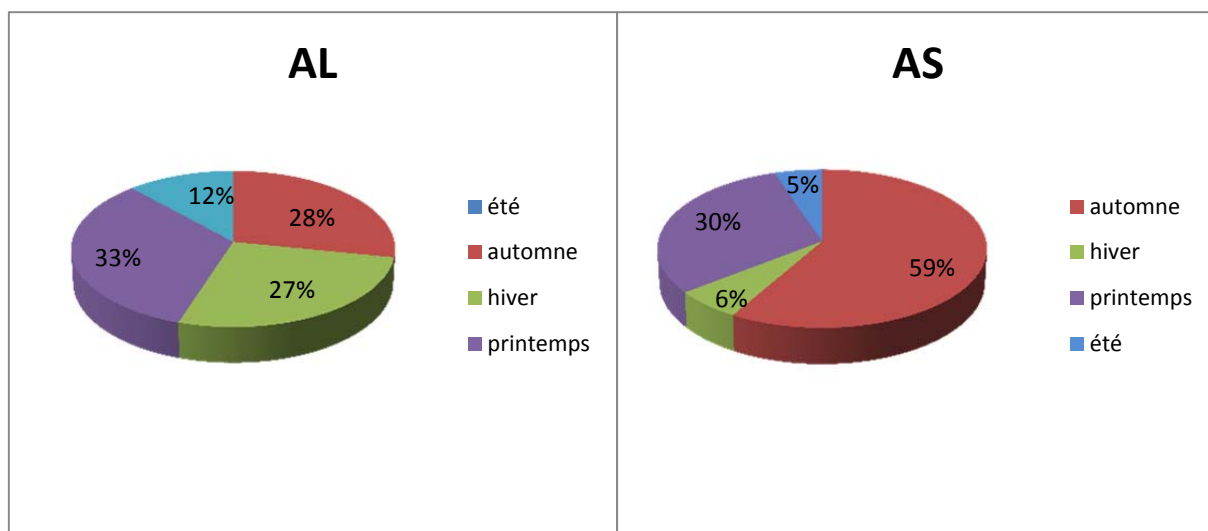


Fig.4.8/ Répartition saisonnière des apports liquides et solides de l'oued Mouilah à Sidi Belkhir (1974/99)

La réponse du bassin se manifeste rapidement par les ruissellements et des écoulements hypodermiques peu profonds. Quoique moins importantes que celles de l'automne, les pluies du printemps survenues après un hiver peu pluvieux et froid avec une succession de gels et dégels favorisant la déstabilisation de la structure du sol le rendant plus vulnérable à l'érosion, trouvent un sol meuble et déclenchent alors des écoulements fortement chargés.

En hiver, période de transition entre deux saisons humides, bien que la pluviométrie soit nettement beaucoup plus faible, les écoulements le sont moins. Ceci est dû essentiellement aux réserves importantes en eau, emmagasinées dans le sol, suite aux fortes pluies de l'automne (Bouanani, 2004)

La saison d'été a connu un transport solide 5% et un apport liquide de 12%, mais parfois des orages estivaux ramènent des quantités considérables de matières en suspension.

2. Station mouilah RN7 :

Tab .4.9/Apports liquides et solides moyens saisonniers –station mouilah RN7-(1985/2001)

Saison	automne	hiver	printemps	été
Al (Hm3)	9,189	3,572	7,643	1,761
Le (mm)	5,049	1,963	4,199	0,967
As (MT)	0,336	0,091	0,184	0,078
Ass (t/km2/saison)	184,804	50,109	100,869	43,011

La charge en sédiments transportée atteint son maximum dans les deux saisons de printemps et l'automne avec des apports liquides forts.

Le taux d'apport solide en suspension en automne et printemps est successivement 49% et 27%.

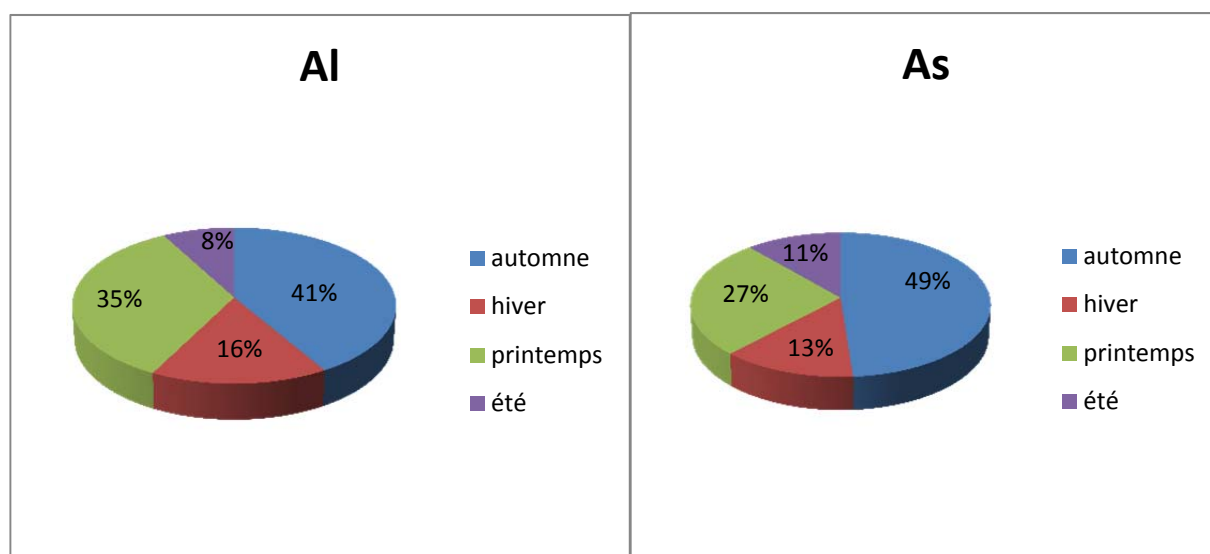


Fig.4.9/ Répartition saisonnière des apports liquides et solides de l'oued Mouilah à mouilah RN7 (1985/01)

IV.6/ La bathymétrie :

A l'instar des pays de la méditerranée, et en particulier ceux du sud, l'Algérie n'est pas épargnée par l'érosion dont l'intensité varie d'une région à une autre. Elle est plus ressentie à l'ouest du pays avec un taux de 47% suivie de la région centre avec 27% et l'Est avec 26%. La capacité globale (initiale) est de 7745 hm³ pour un volume régularisé de 3552 hm³. Le levé bathymétrique des barrages en 2004 a montré que la capacité de stockage a été réduite à 6736 hm³ du fait de l'envasement.

A raison de 2000 à 4000 T/km²/an, les apports solides enregistrés au niveau des barrages sont de l'ordre de 48 hm³/an, occasionnant un taux d'envasement de plus de 12% correspondant à une perte de capacité de stockage de l'ordre de 958 hm³ (MANSER Amor,)

IV.6.1/Généralité :

La bathymétrie est l'étude des profondeurs marines des étages d'un océan (ou d'une mer) ou, en eau douce, d'un lac. En d'autres termes, la bathymétrie est l'équivalent sous-marin à l'hypsométrie ou de la topographie terrestre. Les mesures bathymétriques, ou hydrographiques, établissent des cartes qui sont généralement produites pour aider à la sécurité de la navigation de surface ou sous-marine, et

montrent habituellement les reliefs sous-marins, telles qu'une fosse océanique, ou de terrain comme des lignes de contour (appelées contours de profondeur ou isobathes) et des profondeurs sélectionnées (sondages), et généralement aussi pour fournir une information de surface pour la navigation littorale.

Une bathymétrie représente un ensemble de mesures de profondeur de la retenue d'eau du barrage. Ces mesures visent à connaître la topographie du fond submergé.

Cette méthode a été utilisée par plusieurs auteurs au Maroc comme (Lahlou, 1994 ; Marzouki, 1992 ; Tayaa, 1997 ; Abdellaoui et Merzouk et Aberkan et Albergel, 2002)

IV.6.2/Taux d'envasement et estimation de la dégradation du bassin versant de barrage Boughrara:

La méthode d'estimation du taux d'envasement et de dégradation au niveau du bassin versant a été basée sur l'étude de bathymétrie de la retenue du barrage. Les résultats de ce contrôle bathymétrique en termes de volume total envasé et le taux moyen d'envasement correspondant sont présentés dans le tableau (4.10)

Tab 4.10/ Résultats des données de bathymétrie

volume initial m3 (1998)	volume restant m3 (juin 2004)	volume envasé m3	perte totale (%)
177 000 000	175450000	1 550 000	0,8757062

Le tableau (4.10) fait ressortir que l'envasement total depuis la mise en eau du barrage en 1998 est de l'ordre de 1,55Hm³, soit une perte totale de la capacité initiale du barrage de 0,87 %.

Le volume de vase s'avère négligeable à titre de comparaison avec le volume de la retenue de barrage Bouhanifia Plus de 35 Hm³ de vase d'une capacité initiale de 73 Hm³ (Labioud,Remini, Belaredj , 2004)

IV.7/ Conclusion

Dans notre travail, on a étudié les deux stations du bassin de mouilah, une de sidi belkhir (74/99) et l'autre située en aval, mouilah RN7 (85/01) ; et d'après les données obtenues au niveau de chaque station, on a conclu une dégradation spécifique moyenne annuelle qui est respectivement 370 t/km²/an , varie de 0,63 à 2157,74 t/km²/an et 418 t/km²/an (de 0,994 à 1137,94 t/km²/an) .

Une très grande variabilité annuelle des apports liquides et solides a été remarquée durant les périodes d'étude, la charge solide maximale est observée dans l'année 86/87 qui a connu une crue catastrophique. Et suivant l'échelle mensuelle et saisonnière, le maximum des apports solides est atteint en automne (novembre et octobre) d'un pourcentage de 59% et 49% dans les deux stations.

Les levés bathymétriques faits en juin 2004 au niveau de barrage boughrara, nous a donné un envasement de 1,55 Hm³, soit une perte de 0,87%.

CHAPITRE V :

Modélisation du transport solide en suspension

IV.1. INTRODUCTION :

Le transport solide par suspension (TSS) représente près de 80% du transport de la charge solide dans la plupart des cours d'eau. Malgré ces flux importants, la recherche sur les outils de modélisation du TSS est restée modeste au cours des dernières décennies, par comparaison au transport solide par charriage, pour lequel on dénombre des dizaines de formules de transport. Et pourtant les besoins en connaissances sur les processus du TSS répondent à une demande sociale forte (qualité des milieux, ressources en eau, gestion des ouvrages), (Alain RECKING,).

La recherche de modèles reliant les paramètres hydro climatiques – précipitations, écoulement et/ou transport de matériaux solides en zones arides ou semi-arides – a fait l'objet de nombreuses études. On peut citer les travaux de Demmak (1982), Megnounif et al. (2000), Achite (2002) et Elahcene et Remini (2009), qui mettent en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou à des bassins- versants pour lesquels les mesures sont rares, incomplets ou inexistantes. En Algérie, l'ordre de grandeur des concentrations moyennes de sédiments transportés par l'eau des oueds varient de 50 à 150 g/L avec des valeurs maximales qui peuvent atteindre parfois les 600 g/L (Medjber, 2011). (Yles, Bouanani, 2012)

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

L'ampleur de l'érosion et du transport solide dans les bassins versants des zones semi-arides méditerranéennes a suscité l'intérêt d'un grand nombre de chercheurs, qui ont multiplié cette dernière décennie les études pour comprendre et expliquer les mécanismes, leurs causes et leurs conséquences. Dans ce contexte, on tentera de montrer à partir de

mesures in situ la relation entre débits liquides et solides (CHERIF, ERRIH & MADANI CHERIF, 2009)

V.2/ EVOLUTION DES DEBITS SOLIDES EN FONCTION DES DEBITS LIQUIDES :

Depuis longtemps, on a essayé de corréliser les débits solides aux débits liquides et de déterminer une relation qui permettait d'estimer les premiers à partir des seconds. A ce titre, nous citons les travaux de Jakuschoff (1932) sur les rivières de Turquie et ceux de Straub (1936) sur le fleuve du Missouri (USA) (Einstein., 1950, Leopold. et al. 1953).

La concentration des sédiments en suspension C et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance $Y = a X^b$ (Etchanchu et al. 1986; Walling. et al., 1981 ; Wood P.A., 1977).

$$C_S = a \times Q_L^{b-1}$$

Une autre relation empirique communément appelée courbe du transport solide (CambellF.B. et al. 1940 ; Crawford, 1991) lie le débit solide au débit liquide :

$$Q_S = a \times Q_L^b$$

Généralement, les meilleurs résultats sont obtenus par cette équation avec a et b : coefficients empiriques (Elahcene et Remini ,2009)

V.3/Données et méthodologie :

Toutes les recherches qui sont faites sur le transport solide mettent en cause la difficulté de mesure du charriage malgré qu'il constitue une part considérable du transport total. Il ne s'agit donc que des mesures du transport en suspension (CHENAOUI.).

Cette banque de données couvre la période allant de 1974/1975 à 1999/2000 et la période de 1985/1986 à 2001/2002 au niveau du bassin mouilah. Ces mesures relatives respectivement à la station sidi belkhir et mouilahRN7.

L'étude du transport solide au niveau de la station de barrage hammam boughrara n'est pas prise en considération à cause de l'absence des données.

La méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau algériens est l'échantillonnage uni-ponctuel. Le prélèvement d'un échantillon se fait par l'observateur à l'aide de bouteilles de 0.5 à 1 litre de contenance. Les échantillons prélevés sont

analysés par les procédés classiques (filtrage sur filtre millipore et la charge en suspension est mesurée par pesée des filtres). Pour les débits liquides, les lectures de hauteur d'eau effectuées sont transformées en débits liquides grâce aux courbes d'étalonnage établies par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Ces courbes sont valables pour une période donnée dite période de validité.

Quant au transport solide, l'évaluation durant une crue est effectuée de la même façon que pour les débits liquides, sur la base d'un dépouillement des lectures. Avant

le tracé du turbidigramme, l'opération de report sur le limnigramme est nécessaire. Les valeurs de concentration en temps et date sont positionnées sur le limnigramme. Le nombre de prélèvements et leur échelonnement correct dans le temps conditionnent la fiabilité et la précision des graphes temporels de la concentration des sédiments en suspension (Touat, 1989).

L'analyse de ces données montre une variation d'année en année et de saison en saison en volume et en quantité de sédiments charriés (Bouanani, 2004)

V.4/ Relation entre le débit solide (Q_s) et le débit liquide (Q_l) de l'oued mouilah:

Généralement, les meilleurs résultats sont obtenus par l'équation :

$$Q_s = a \times Q_l^b$$

Avec a et b: coefficients empiriques (Elahcene et Remini ,2009)

L'étude porte sur les valeurs instantanées des débits liquides en m³/s et des débits solides en kg/s, mesurés au niveau de bassin de l'oued Mouilah, respectivement aux stations de Sidi Belkhir (1974/99), Mouilah RN7 (1985/01).

L'analyse de la relation de puissance à l'échelle du bassin versant de l'oued mouilah laisse apparaître une certaine tendance d'évolution des paramètres a et b. le comportement de ces derniers est étudié à plusieurs échelles temporelles.

V.4.1/ Echelle interannuelle :

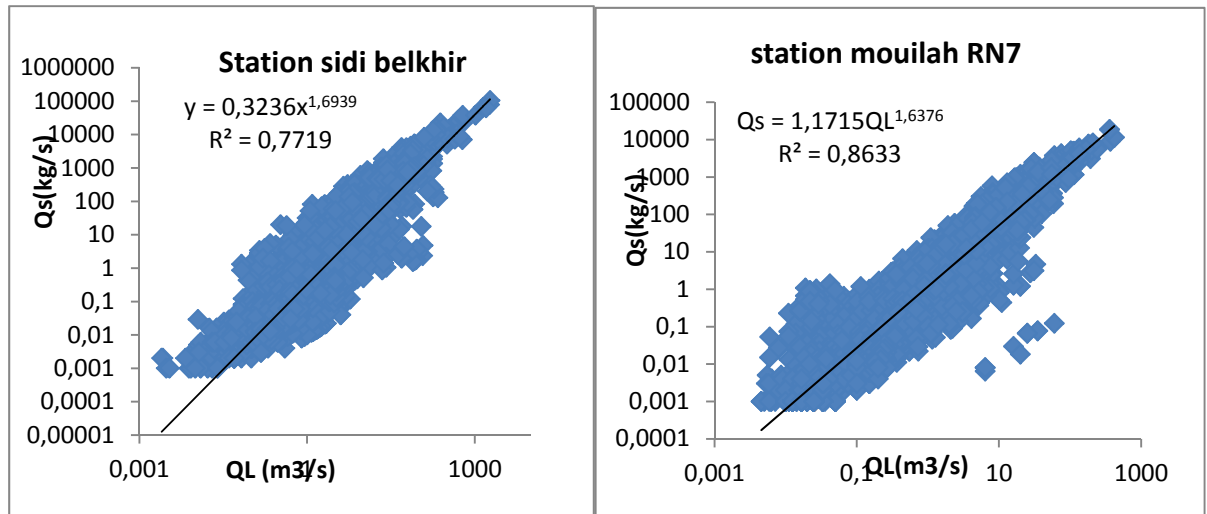


Fig.5.1 : Relations débits solides en fonction des débits liquides dans le sousbassin de l'oued Mouilah,

Les valeurs des paramètres a et b, le coefficient de corrélation (R2) sont regroupés dans le tableau 5.1 :

Tab.5.1/ Paramètres de relation débit solide-débit liquides

station	période	Taille d'échantillon	a	b	R2
sidi belkhir RN35	1974/1999	4694	0,32	1,69	0,77
mouilah RN7	1985/2001	3976	1,17	1,64	0,86

Une première analyse, graphique montre qu'à de faibles débits liquides généralement estivaux (moins de 1 m³/s) peuvent être associés de forts débits solides (près de 10 kg/s) déclenchés sûrement à la suite d'orages violents. De même, de fortes valeurs des débits liquides n'ont engendré qu'un faible transport solide dû à la vidange des nappes survenue à la suite d'une crue importante.

Le paramètre a varie de 0,32 au niveau de la station de sidi belkhir et 1,17 au niveau de mouilahRN7. Tandis que b est presque le même dans les deux stations.

V.5/ Analyse à l'échelle annuelle :

Cette analyse fait intervenir le critère de l'hydraulicité qui est un paramètre utilisé dans les études de régularisation et qui est défini comme étant le rapport du débit moyen annuel de l'année considérée sur le débit moyen inter annuel (A. Benkhaled et B. Remini, 2003)

L'analyse des données de couples (QL,Qs) à l'échelle annuelle a révélé les résultats des modèles aux tableaux (5.2) et (5.3) ci-dessous :

Tab 5.2/ Paramètres du modèle annuel (74/99)-station sidi belkhir-

Année	N	Modèle	R2
74/75	144	$Q_s=0,045QL^{2,227}$	0,85
75/76	168	$Q_s=0,024QL^{2,838}$	0,80
76/77	233	$Q_s=0,023QL^{2,732}$	0,45
77/78	193	$Q_s=0,146QL^{2,106}$	0,79
78/79*	107	$Q_s=0,060QL^{2,217}$	0,27
79/80	206	$Q_s=0,144QL^{2,111}$	0,78
80/81	170	$Q_s=0,144QL^{1,739}$	0,83
81/82*	165	$Q_s=0,059QL^{1,969}$	0,60
82/83*	189	$Q_s=0,136QL^{2,542}$	0,78
83/84*	196	$Q_s=0,255QL^{1,885}$	0,81
84/85*	282	$Q_s=0,334QL^{1,901}$	0,93
85/86*	255	$Q_s=0,874QL^{1,647}$	0,829
86/87	372	$Q_s=0,778QL^{1,763}$	0,913
87/88*	219	$Q_s=0,803QL^{2,154}$	0,886
88/89*	232	$Q_s=0,732QL^{1,601}$	0,881
89/90*	220	$Q_s=0,683QL^{1,715}$	0,919
90/91*	269	$Q_s=0,864QL^{1,915}$	0,867
91/92*	179	$Q_s=0,508QL^{1,868}$	0,922
92/93*	183	$Q_s=0,276QL^{1,455}$	0,706
93/94*	185	$Q_s=0,542QL^{1,875}$	0,826
94/95	79	$Q_s=0,235QL^{1,870}$	0,58
95/96	92	$Q_s=0,030QL^{2,820}$	0,785
97/98	159	$Q_s=0,666QL^{1,725}$	0,745
98/99*	160	$Q_s=0,103QL^{1,215}$	0,526
99/00	47	$Q_s=0,168QL^{1,663}$	0,85

Tab 5.3 / Paramètres du modèle annuel (85/01)-station Mouilah RN7-

Année	N	Modèle	R2
85/86*	290	$Q_s=1,687QL^{1,193}$	0,61
86/87	431	$Q_s=2,33QL^{1,315}$	0,77
87/88*	262	$Q_s=1,695QL^{1,708}$	0,94
88/89*	271	$Q_s=0,855QL^{1,543}$	0,86
89/90	370	$Q_s=1,4275QL^{1,704}$	0,91
90/91	419	$Q_s=1,586QL^{1,72}$	0,92
91/92	287	$Q_s=0,6148QL^{1,75}$	0,93
92/93*	316	$Q_s=0,956QL^{1,7168}$	0,93
93/94*	205	$Q_s=0,69QL^{1,5945}$	0,88
94/95	37	$Q_s=0,7625QL^{1,72}$	0,98
95/96	155	$Q_s=1,5755QL^{1,7691}$	0,97
97/98*	192	$Q_s=1,657QL^{1,7346}$	0,91
98/99	170	$Q_s=0,113QL^{1,17}$	0,81
99/00*	237	$Q_s=0,462QL^{1,7042}$	0,92
00/01	230	$Q_s=0,8529QL^{2,156}$	0,92
01/02	89	$Q_s=0,425QL^{2,079}$	0,75

* : Année sèche

Le coefficient de détermination (R^2) est très élevé dans la plupart des années et dépasse 0,80 que ce soit la station de sidi belkhir ou la station de mouilah RN7.

V.6/Analyse saisonnière :

Les modèles obtenus pour l'échelle saisonnière sont regroupés au tableau (5.4) ci-dessous :

Tab.5.4/ Paramètres du modèle saisonnier (Qs-QI) au niveau du bassin de mouilah

Station Mouilah RN7					
Saison	N	a	b	R2	Modèle
Automne	1391	1,7168	1,6396	0,88	$Q_s=1,72QL^{1,64}$
Hiver	1001	0,6273	1,7508	0,88	$Q_s=0,63QL^{1,75}$
Printemps	1046	1,0716	1,601	0,87	$Q_s=1,072QL^{1,60}$
Eté	535	1,7728	1,5936	0,80	$Q_s=1,77QL^{1,59}$
Station sidi belkhir RN35					
saison	N	a	b	R2	Modèle
Automne	1318	0,508	1,828	0,82	$Q_s=0,508QI^{1,828}$
Hiver	1247	0,232	1,82	0,74	$Q_s=0,232QI^{1,82}$
Printemps	1334	0,306	1,583	0,77	$Q_s=0,306QI^{1,583}$
Eté	791	0,219	1,416	0,67	$Q_s=0,219QI^{1,416}$

a et b : paramètre du modèle en puissance ; R^2 : coefficient de corrélation ;
N : taille de l'échantillon

D'après les résultats du tableau ci-dessus, nous constatons que :

- ❖ **En automne**, le facteur a et l'exposant b sont plus élevés pour les deux stations du bassin de Mouilah, avec des valeurs de b qui varient de 1,60 à 1,80. Ceci peut expliquer l'importance de l'activité érosive en cette saison. En effet à la saison sèche d'été où le sol se fissure et perd sa cohésion, succède l'automne avec des averses plus ou moins violentes sur un sol fragilisé. Il se produit alors pour de faibles écoulements des apports solides importants. Le coefficient de corrélation R^2 dépasse 0,80 dans les deux stations, et cela signifie que le modèle puissance est représentatif.

- ❖ **En hiver**, le facteur a est très faible (0,23) dans la station de sidi belkhir contrairement à la station de mouilah RN7, et malgré ça le paramètre b reste élevé ; cela dénote qu'à de forts débits liquides sont associés de faibles débits solides.

En effet dans ces bassins l'écoulement en hiver est plutôt assuré par la vidange des nappes que par la pluviométrie. De même que l'état du sol doit se trouver avec une certaine saturation qui limite les effets de la pluie (Bouanani, 2004)

- ❖ **Au printemps**, le facteur a et l'exposant b présentent des valeurs moyennes entre celles de l'automne et celles de l'été et sont proches de ceux du modèle global pour chaque bassin.

Le meilleur coefficient de corrélation est donné au printemps à la station mouilah RN7 plus que sidi belkhir.

Au printemps, l'état du sol et la couverture végétale font que l'action érosive se trouve diminuée par rapport aux écoulements abondants.

En été, L'oued Mouilah a connu lui aussi des crues estivales assez importantes en juin (1990 et 1996) et août (1997), ce qui explique aussi bien les valeurs élevées de a et de b du modèle que la répartition des points de la figure (5.2) et (5.3), avec un petit nuage représentant des valeurs assez importantes.

- le facteur b est peut être lié directement à la superficie de drainage en période de crue (Benkhalel et al. 2003), mais il exprime aussi l'importance du taux des transports solides.

- Le paramètre a exprimé l'état du sol d'un bassin d'une manière générale et son degré de saturation en particulier (Benkhalel et al. 2003). Ce paramètre a reste en général inférieur à 1.

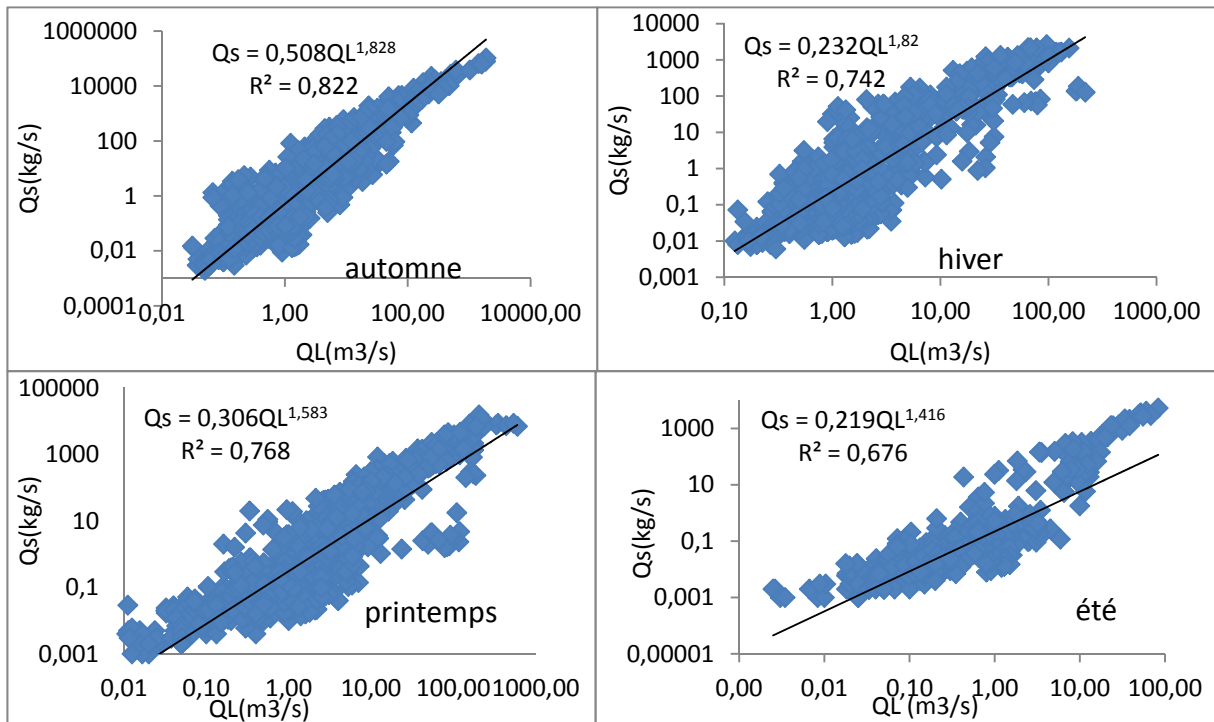


Fig 5.2 : Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin versant de Mouilah-station sidi belkhir-

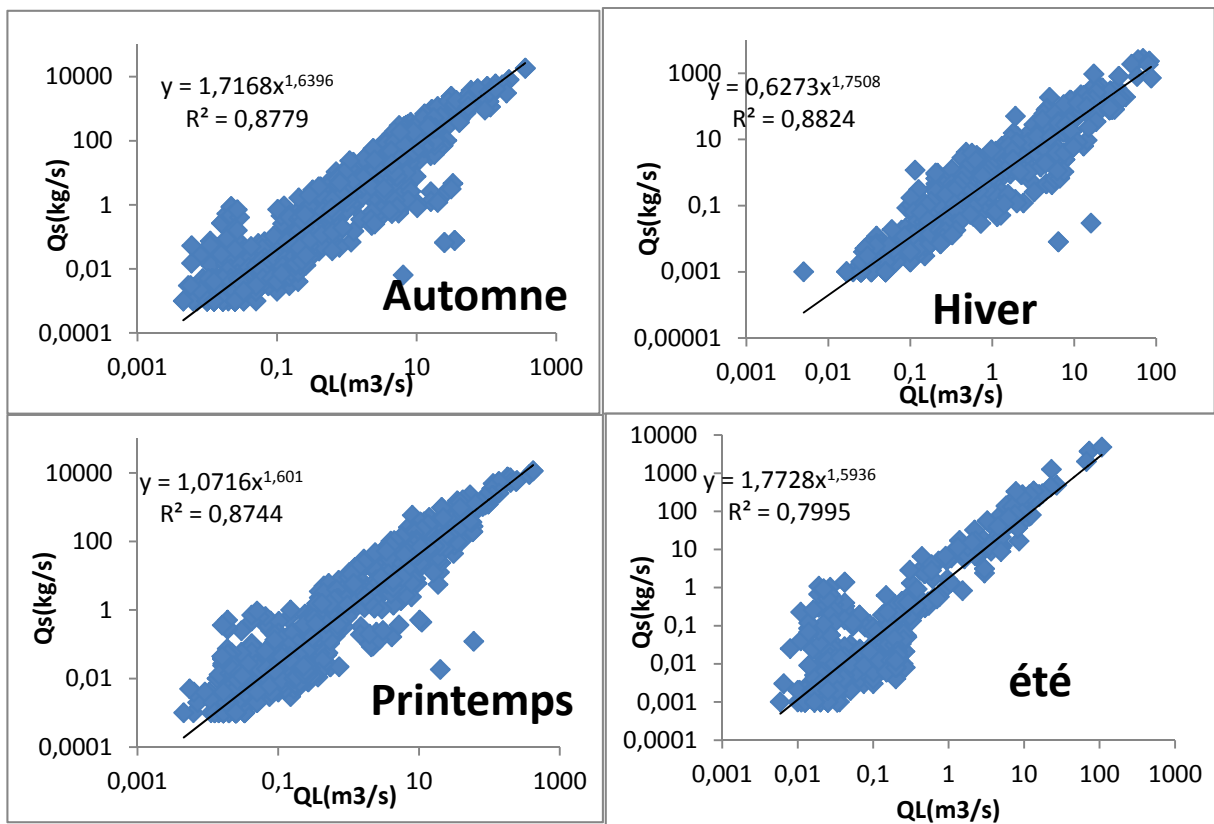


Fig 5.3 : Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour le bassin versant de Mouilah-station mouilah RN7-

Tab.5.5/ Paramètres du modèle mensuel

STATIONS							
Sidi belkhir				mouilah RN7			
mois	N	modèle	R2	Mois	N	Modèle	R2
sep	371	$Q_s=0.655QL^{2.020}$	0,851	Sep	408	$Q_s=2,1167QL^{1,5287}$	0,83
oct	536	$Q_s=0.481QL^{1.870}$	0,832	Oct	522	$Q_s=2,1378QL^{1,7027}$	0,94
nov	411	$Q_s=0.437QL^{1.667}$	0,798	Nov	459	$Q_s=1,0885QL^{1,6479}$	0,86
dec	373	$Q_s=0.224QL^{1.601}$	0,62	Dec	286	$Q_s=0,718QL^{1,7739}$	0,86
janv	479	$Q_s=0.225QL^{1.858}$	0,77	Janv	427	$Q_s=0,6475QL^{1,7254}$	0,88
fev	395	$Q_s=0.234QL^{1.966}$	0,788	Fev	286	$Q_s=0,5403QL^{1,773}$	0,90
mars	470	$Q_s=0.280QL^{1.706}$	0,808	Mars	431	$Q_s=0,826QL^{1,6521}$	0,89
avr	388	$Q_s=0.255QL^{1.375}$	0,683	Avr	307	$Q_s=1,3759QL^{1,6316}$	0,85
mai	476	$Q_s=0.362QL^{1.608}$	0,792	Mai	306	$Q_s=1,183QL^{1,5378}$	0,87
juin	303	$Q_s=0.309QL^{1.747}$	0,832	Juin	247	$Q_s=1,2862QL^{1,6428}$	0,85
juil	223	$Q_s=0.116QL^{0.883}$	0,433	Juillet	101	$Q_s=1,5118QL^{1,47}$	0,43
aout	265	$Q_s=0.135QL^{0.165}$	0,536	Aout	185	$Q_s=2,5761QL^{1,5587}$	0,81

L'analyse effectuée à l'échelle mensuelle fait ressortir les mêmes conclusions qu'à l'échelle saisonnière (tableau 5.6). Les faibles valeurs de (a) et (b) concernent le mois d'été, et les forts paramètres (a) sont associés aux mois de l'automne suite à l'activité hydro sédimentologique durant cette période de l'année et éventuellement en raison d'autres facteurs tel que l'état et la nature du sol.

V.7/Analyse à l'échelle mensuelle :

En dehors des deux mois de l'été (juillet et aout) à la station de sidi belkhir, et le mois d'aout à la station mouilah RN7, les coefficients de détermination varient entre 0.7 et 0,8, cela témoigne encore de la représentativité du modèle en puissance à cette échelle de régression entre les deux variables débit liquide et débit solide.

V.7.1/ Estimation de la dégradation spécifique à la station de barrage boughrara :

Puisque la station du barrage boughrara a été dépourvue des données des transports solides, on a utilisé les résultats des modèles de différentes échelles temporelles au niveau des deux stations précédentes pour quantifier le transport solide au niveau de cette station, le tableau (5.6) montre cette quantification :

Tab.5.6/ Apport solide et dégradation spécifique dans le bassin versant de tafna-mouilah – station barrage boughrara-

station mouilah RN7					
période	annuel	automne	hiver	printemps	été
débit liquide moyen (m3/s)	9,73	7,66	11,34	14,21	5,72
Débit solide moyen (kg/s)	48,626	48,49	11,148	74,87	28,33
Apport solide (tonne)	1533495,43	377058,24	343294,85	582235,77	220286,30
Apport solide annuel (tonne)	1533495,43	1522875,16			
Dégradation spécifique (t/km2/an)	842,58	836,74			
station sidi belkhir					
période	annuel	automne	hiver	printemps	été
débit liquide moyen (m3/s)	9,73	7,66	11,34	14,21	5,72
Débit solide moyen (kg/s)	15,27	21,00	19,27	20,43	2,587
Apport solide (tonne)	481554,72	163301,44	149843,52	158863,68	20121,95
Apport solide annuel (tonne)	481554,72	492130,59			
Dégradation spécifique (t/km2/an)	181,77	185,71			

On a obtenu une dégradation spécifique moyenne annuelle de 842,58 t/km2/an et à l'échelle saisonnière elle atteint 836,74 t/km2/an, en la comparant avec celle de la station mouilah RN7 elle s'avère très inférieure (418 t/km2/an) ; la même chose pour la station de sidi belkhir qui a connu une perte de sol d'environ 370 t/km2/an très grande par rapport aux résultats ci-dessus (181,77 t/km2/an), cela est dû en particulier à la variabilité spatiale des caractères topographiques, hydrologiques et géologiques entre ces trois stations.

V.8/ Conclusion :

La régression s'est présentée dans ce travail comme une solution plus proche de la réalité

Aussi bien pour le modèle puissance, s'est avéré significatif, R2 étant supérieur. Donc, nous pouvons conclure que le modèle puissance est le plus performant.

Le paramètre a varie de 0,32 au niveau de la station sidi belkhir et 1,17 à la station mouilah RN7 tandis que b varie de 1,60 et 1,70 (>1) dans les deux stations.

Pour des faibles débits liquides sont associés de forts débits solides suite aux orages violents, et vice versa pour des forts débits liquides il y a un faible transport solide.

CONCLUSION GENERALE

Les ouvrages hydrauliques sont le siège de toutes sortes de pollution et d'envasement qui entraînent une dégradation de la qualité de leur eau et une diminution progressive de leur capacité utile.

Malheureusement pour faire face à ces problèmes, l'expérience algérienne sur le plan technique se montre très limitée et très retardée par rapport à celle de nombreux pays méditerranéens.

Parmi les facteurs de ce retard, on cite le manque de données hydro pluviométriques. Les recours aux méthodes empiriques, notamment pour la prévision des écoulements et la charge solide, est pratiquement impossible en raison de l'hétérogénéité des caractéristiques de l'état de surface et du climat.

Les équations empiriques comme celles du Wislizenus et Smith doivent être considérées comme valides seulement dans leurs conditions d'application. En outre, elles n'expriment pas l'érosion totale d'un bassin versant, mais seulement l'érosion superficielle de celui-ci sous l'action de splash et l'écoulement en nappe. De ce fait les méthodes directes sont souvent privilégiées pour l'estimation de l'érosion totale du bassin versant.

De la présente étude relative à l'envasement de barrage boughrara, il résulte :

✓ **Paramètres hydrologiques de sous bassin mouilah :**

- Les paramètres physiques montrent que mouilah présente une forme allongée avec un coefficient de compacité $K_c = 1,25$ et un relief du modéré à très fort selon l'indice de pente globale I_g et la dénivelée D_s ; la densité de drainage atteint 0,16 très faible par rapport aux autres bassins comme sebdou, c'est-à-dire un bassin mal hiérarchisé et drainé. Le coefficient de torrencialité ne dépasse guère 0,1, il est de l'ordre de 0,0032 et un temps de concentration de 20h30minutes.

L'analyse hypsométrique de ce bassin nous a déduit les altitudes maximales et minimales ainsi que l'altitude moyenne.

- Dans l'étude géologique, nous avons remarqué les formations stratigraphiques selon leur perméabilité comme les terrains imperméables (roches marneuses ou argileuses) favorisent le ruissellement superficiel et les terrains perméables comme les calcaires qui limitent l'écoulement et favorise l'entraînement souterrain de celui-ci.
- Une variation et irrégularité remarquée dans le temps et dans l'espace des précipitations, et déduction de deux périodes une qui est humide et froide (du septembre à mai) et une sèche et chaude à partir de juin.

Durant la période d'étude, le coefficient de variation annuelle des précipitations dans la station de barrage boughrara est de 0,31 ; les séries pluviométriques des stations de mesures s'ajustent en général à une loi normale de gauss.

Ces variabilités spatio temporelles conditionnent l'écoulement et les transports solides dans le bassin.

Le régime thermique est caractérisé par une température moyenne annuelle de 20,66°C, ce qui favorise l'évaporation et l'évapotranspiration ainsi que l'assèchement des sols et cours d'eau.

✓ **Paramètres de l'écoulement :**

L'insuffisance des données hydrométriques sont la cause de mal compréhension des phénomènes hydrologiques.

L'interprétation statistique et graphique des données nous a permis de saisir les variations spatiales de l'écoulement superficiel avec les données climatiques de sous bassin et sa forte variabilité temporelle, annuelle et saisonnière.

La faiblesse du coefficient d'écoulement est remarquée dans notre sous bassin de barrage boughrara (6%) cela ça veut dire que notre bassin est perméable, et la taille de celui-ci est élargie.

L'analyse mensuelle des débits est faite en calculant le coefficient mensuel a fait montrer qu'il Ya une opposition entre l'abondance hivernale et l'indigence estivale des cours d'eau (Bouanani, 2004)

L'étude des débits extrêmes et les crues ont mis en évidence la torrentialité de ces dernières et l'intensité des précipitations, en fin on a

fait une analyse fréquentielle des débits maximums par la loi log normale (Galton-Gibrat).

✓ **Erosion et transport solide :**

Les calculs des apports liquides et solides au niveau des stations de mesure de sidi belkhir et mouilah RN7 nous en fait déduire que la dégradation spécifique moyenne est respectivement 370 t/km²/an (1974/1999) varie de 0,63 à 2157,74 t/km² /an dans la première station et 418 t/km²/an (1985/2001) et varie de 0,994 à 1137,941 t/km²/an au niveau du deuxième station; ces taux de dégradations se situent dans la fourchette des valeurs proposées par (walling,1984).

Plusieurs variations de perte des sols ont été estimées par différents auteurs.

La variation de cette dégradation résulte de la différence de lithologie, couvert végétal, pente et la taille des bassins.

On a connu aussi une variabilité à l'échelle mensuel et saisonnier, d'où un maximum du transport solide a été remarqué en automne avec un pourcentage de (59%) après vient le printemps (30%) ; ces variations dépendent des fréquences des orages et leur périodes d'occurrence.

Une analyse de l'état d'envasement de la retenue de barrage boughrara par la méthode des levés bathymétriques a montré que la retenue présente une perte de 0,78% de sa capacité initiale pendant 6 ans d'exploitation. Un taux négligeable par rapport aux autres barrages.

✓ **Modélisation :**

L'aboutissement logique d'une analyse de données est la modélisation, d'où on a étudié les débits liquides et solides ainsi que la charge solide :

- 1- La relation entre QL et QS est de type puissance ($QS = a QL^b$), le paramètre a atteint 0,32 et 1,17 dans les deux stations et l'exposant b est de 1,69 et 1,63. Les variations de ces deux paramètres sont étudiées à l'échelle saisonnière. Le facteur b

explique l'influence de l'écoulement ou état hydrologique du bassin et a exprime l'état du sol.

- 2- L'évolution des concentrations en fonction des débits liquides durant les crues montre que ces derniers suivent Quatre classes de courbes (simple, dans le sens des aiguilles d'une montre, dans le sens contraire aux aiguilles d'une montre et en forme de huit), la classe simple I est la plus fréquente dans notre étude.

Recommandations

- Il est intéressant, en vue de parfaire l'analyse précédente, d'augmenter la fréquence de travaux d'envasement des barrages existants,
- Il est recommandé d'analyser tous les facteurs intervenant dans le phénomène de l'érosion: exemple couvert végétal, superficies cultivées, pluviométrie avec toutes ses fréquences (maximale de 24 h, de 30'/etc...): apports de crues, pentes, etc...Une série de formules, basées sur ces données, reste à établir.
- Les interventions biologiques annuelles, en vue de réduire l'érosion à son origine, seront 10 fois plus importantes que celles précédemment réalisées,-pour cette raison, un intérêt particulier est à imposer dans divers domaines : financier, technique, moyens personnels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdellaoui A., Merzouk A., Aberkan M., Albergel J., 2002. Bilan hydrologique et envasement du barrage saboun (Maroc).
- Achite M., 2002. Approche statistique d'évaluation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina (Nord-ouest Algérien), colloque international sur l'eau dans le bassin méditerranéen, 10-13 octobre, Monastir (Tunisie), 894-9.
- 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 Algérie). Rev. Sci. Eau.18 (Spécial), pp : 37-56.
- Recking A., 2013. Bed load transport in rivers: From the flume to the field.
- Amil M., 1992. Bassin versant du nekor recherche des zones sources d'envahissement de la retenue du barrage M.B.A el khettabi doctorat de troisième cycle de géologie appliquée (Maroc).
- Ammari A., 2012. Vulnérabilité à l'envasement des barrages. (cas du bassin hydrographique des côtières Algérois), thèse de doctorat université Mohamed khider -Biskra-.
- Anne-Claire Nivet ; Cemagref – UR Aema, 2009. caractérisation du transport solide en ravine et cours d'eau permanent.
- Arnborg T., Walker H.J., Peippo J., 1967. Suspended load in the Colville River, Alaska, 1962. In: Sediment concentrations versus water discharge during single Hydrologic events. pages 131-144
- Asselman N.E.M, 1999. «Suspended sediment dynamics in large drainage basin: the river Rhine ». Hydrological processes 13:1437-1450.
- Baba Hamed K., 2001. contribution à l'étude hydrologique de trois sous bassins de la Tafna (bassin de sebdou, de mouilah et isser) : Analyse et quantification .sem. Nat. Sur l'eau – SNE 2001, tlemcen.
- Baba Hamed K., 2002. Analyse des crues de l'oued sebdou (Tafna – NW Algérie). coll. Int. sur l'eau. Univ. Hassiba ben boualiChlef 5-6 février.
- Bahloul A., 2013. Etude de la variabilité climatique à travers les séries pluviométriques –exemple du bassin versant du barrage Hammam Boughrara

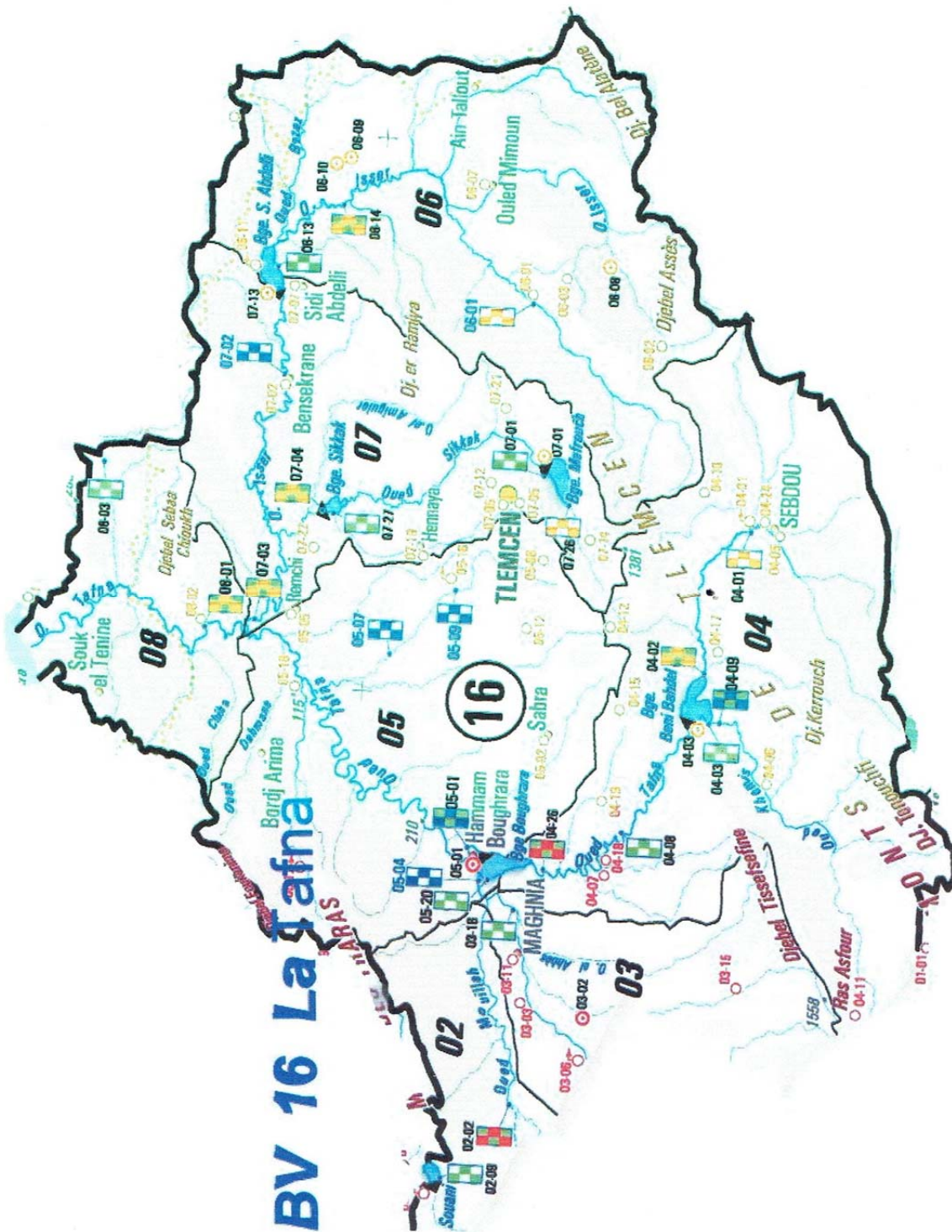
- Battala R., sala M., 1992. Temporal variability of suspended sediment in a Mediterranean river. Pages 229-305 of: publication, IAHS (ed), International conference Canberra, vol. 224.
- Benaicha A.C., 2011. Étude des processus des transports solides et leur impact sur l'alluvionnement des barrages.
- Benblidia M., Salem A., Demmak A., 2001. Extraction de sédiments dans les retenues. La houille blanche, 6(7), 76 – 78.
- BenKhaled A., Remini B., 2003. variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'oued wahrane (Algérie). – hydrol. Sci. Jour., 48(2) : 243-255.
- Benkhaled A., Remini B., 2003. Analyse de la relation de puissance débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'oued wahrane (Algérie).- Revue des sciences de l'eau, 16/3 : 333-356.
- Bonn F., 1998. spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection des sig : possibilité, erreurs et limites. Sécheresse, : 185-192.
- Bouanani A., 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algerie). _ thèse de doctorat d'État, université de tlemcen, 249 p.
- Bouchelkia H., belarbi F., Remini B., 2011. Quantification du transport solide en suspension par analyse statistique : Cas du bassin versant de mouilah, Revue scientifique et technique. LJEE N° 19.
- Boudjemline D., Zemouri K., Mechouche A., 1993. contribution à l'étude de l'envasement du barrage d'Iril-EMDA (kherrata).In : neuvième réunion du réseau érosion. Réseau Erosion .Bulletin, (13) ,200-214.
- Bouguerra S., 2014. quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie septentrionale : cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (tlemcen).
- Bouras F., Djebbar Y., Abida H., 2010. Estimation de l'envasement des barrages : une approche nom paramétrique. International network environmental Management conflits, Santa Catarina – Brazil, 1(1), pp. 113-119.
- Brasington J., Richard K., 2000. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal middle hills, volume 14, issue 14-15 october 2000 pages 2559-2574.

- Campbell F.B., Bauder H.A., 1940. A rating curve method for determining silt -discharge of streams, Eos Trans. Am. Geophys. Union, N°21,603-607.
- Chenaoui B., 2010. Quantification du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'oued el Ardjem.
- Cosandey C., Robinson M., 2000. hydrologie continentale p 360. Ed. Armand colin.
- Craw Ford, C.G., 1991. Estimation of suspended sediment rating curves and mean suspended sediment load, - J. Hydrol. , 129:331-348.
- Demmak A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. – thèse doctorat. Inj., Paris, 323p.
- Dubreuil P., 1974. Initiation à l'analyse hydrologique .Edition Masson et cie. 2016p, 35 fig.
- Dubreuil P., 1966. Les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versant, leur détermination avec une précision acceptable. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer.
- Einstein B.A., 1950. The bed load for sediment transportation in open channel flow, U.S. Department of agriculture, soil conservation. Tech, bull. 1026.
- EL Amine C., ERRIH M., Madani C.H., 2009. Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne.
- Elahcene O., et Remini B., 2009. Corrélation entre la concentration en matière en suspension et le débit liquide dans le bassin versant de l'oued bellah.
- Escourrou G., 1978. climat et types de temps en Normandie, thèse de doctorat d'État, Paris, honoré champion, 1081p. +525p.
- Etchanchu D., Probst J.L., 1986. Erosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Acad. Sci. Paris, 302, série II, N°17, 1063-1067.
- yles F., Bouanani A., 2012. Quantification et modélisation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Saïda (hauts plateaux Algériens, sécheresse 2012 ; 23 :289-96).
- Ghachi A., 1986. Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie : thèse de doctorat 3^e. cycle, O.P.U., 499 pages.
- Ghenim A., Seddini A., Terfous A., 2007. Production et exportation des sédiments en suspension lors des évènements de

- crue. Cas du bassin versant de l'oued Mouilah. Larhyss journal, ISSN 1112-3680, N°06, Décembre 2007, pp. 35-44.
- Griselin M., 1985. l'abondance annuelle et le bilan hydrologique d'un bassin partiellement englacé de la côté. nord-ouest du Spitsberg, volume 125 numéro 1 pp.19-33.
 - Heusch B., 1988. Aménagement d'un terroir. Techniques de lutte contre l'érosion. CNEARC. Montpellier. France, 199p.
 - Hjulstrom F., 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river fyris. In bulletin of the geological institute of Uppsala, 25, 1935. (Cité en page 32 et 33).
 - Bendjoudi H., Hubert P., 2002. Le coefficient de compacité de gravelius : analyse critique d'un indice de forme des bassins versants, hydrological sciences -journal- des sciences hydrologiques, 47 (6) : 921-930.
 - Hubert P., bendjoudi. H., 1996. Introduction á l'étude des longues séries pluviométriques (XII èmes journées hydrologiques de l'orstom, Montpellier, 10-11 oct. 1996).
 - Karambiri H., 1999. Étude de la distribution statistique des pluies annuelles. DEA hydrologie, hydrogéologie, géostatique et géochimie.
 - Khalil N., 2002. Démarche méthodologique pour une meilleure connaissance de l'hydrologie et de la géochimie des aquifères de moyenne montagne : Cas du haut bassin d'Oum Erbia (moyen Atlas, Maroc). Th. Doc. Étal. Univ. Cadi Ayad, Marrakech, 196p.
 - King D., Bissonnais y., 1992. Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. C.R. Acad. Agric., N°78(6), p.91 – 105.
 - Labiod Z., Remini B., Belaredj M., 2004. traitement de la vase du barrage de Bouhanifia en vue de sa valorisation (Larhyss journal, ISSN 1112-3680, N°03, juin 2004, pp.7-12 2004 laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface.
 - Laborde J.P., 2000. Éléments d'hydrologie de surface université de Nice – sophia Antipolis. Édition 2000, 204p.
 - Lahlou A., 1994. Envasement des barrages au Maroc. Casablanca (Maroc) ; édition wallada, 277p.
 - Lenzi M.A., Marchi L., 2000. suspended sediment load during floods in a small stream of the dolomites (Northeastern Italy).

- Leopold L.B., Maddock T., 1953. The Hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, Washington, D.C. U. S. G. S. Professional paper, 252p.
- Louamri A., Mebarki A., Laignel B., 2013. Variabilité inter-annuelle et intra annuelle des transports solides de l'oued Bouhamdane, á l'amont du barrage Hammam Debagh (Algérie orientale).
- Mahmoud D. M, ONM ,2012. office national de la météorologie : données climatiques de 1995 á 2011.
- Mebarki A., 1984. Ressources en eau et aménagement en Algérie. Le bassin du kebir – Rhumel. O.P.U. Alger. 302p.
- Medjber A., 2011. Influence de la variabilité climatique (précipitations) sur le taux de sédimentation dans certains barrages algériens. International scientifique work shop, relation man, environment and sediment transport.
- Merzouki T., 1992. Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains. Rev. Marocaine du génie civil, 38 : 46-50.
- Meziani W. Née Mahi tani, 2011. Aménagement intégrés des bassins versants et développement durable dans la région de Maghnia cas du barrage hammam boughrara. Tlemcen (Algérie).
- Mokhtari E., 2009. contribution á l'étude du transport solide en suspension _ Bassin de l'oued cheliff – Ghrib.
- Moog D.B., whiting P., 1998. Annual hysteresis in bed load rating curves, water resources research, vol. 34, N°9, pages 2393-2399.
- Moukhchane M., 2002. Différentes méthodes d'estimation de l'érosion dans le bassin versant du NAKHLA (Rif accidentel, Maroc).Bull Réseau Erosion, 21 :255-80
- Pardé M., 1933. fleuves et rivières, collection Armand colin , Paris , 1933 , 224p. , 18 graphiques et cartes.
- Paustian S.J., Beschta. R., 1979. The suspended sediment regime of an Oregon coast range stream .water ressources Bulletin, v.15 N°1 pp .144-154.
- Frey P., 2008. Transport solide par charriage á différentes échelles. Application aux cours d'eau de montagne. Mécanique, institut polytechnique de Grenoble.
- Remini W., Remini B., 2003. la sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord (larhyss journal ISSN. 1112 – 3680, N°02, juin 2003, pp 45-54 2003 Laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface).

- Roose E., 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agon. Trop.*22(2) : 123 – 152.
- Roose E., Piot J., 1984. Runoff, erosion and soil fertility restoration on the mossi plateau (central zone of upper – volta). *Sympa. Intern challenge in african hydrology and water ressource. Harare symposium I.A.N.S.publ, 144, p485-498.*
- .Hayane S.M., 1983. contribution á l'évaluation de l'impact sur l'environnement du barrage sikkak (Nord-ouest Algérien).
- Seltzer, p., 1946. - le climat de l'Algérie. *univ. Alger. Inst . Météo et phys du globe, carbonnel. 219p. 2 cartes.*
- Sundborg Å., 1956. The river klaralven, chapter 2: The morphological activity of flowing water erosion of the stream bed. *Geografiska annaler, 38: 165-221, 1956 (cité en Page 32).*
- Tayaa M., 1997. Bassin versant de l'oued NAKHLA, caractéristiques physiques, hydrologiques et détermination du taux d'érosion. *Projet PREM. Min. Env. Maroc, USAID. 74P.*
- Terfous A., Megnounif A., Bouanani A., 2001. Étude du transport solide en suspension dans l'oued mouilah (nord-ouest. Algérien), -*Rev. Sci. Eau, 14 : 173-185.*
- Touat S., 1989. contrôle de la représentativité de l'échantillon des transports solides en suspension. pages 48-54 of : *Rev. Eau et sols de l'Algérie, vol. N°2. Bir Mourad Raïs, Alger : ANRH.*
- Mano V., 2009. processus fondamentaux conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues – optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique.
- Walling D.E., Webb B.W., 1981. The reliability of suspended sediment load data. *Erosion and sediment transport measurement, IAHS publ., N°. 133,197-194.*
- Williams G.P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. – *J. Hydrol. , 111.89-106.*
- Wischmeier W.H., smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *USDA_ARS Agriculture hand book N°537, Washington DC. p58.*
- Wood P. A., 1977. Controls of variation in suspended sediment concentration in the river Rother, west Sussex, England, *sedimentology, 24: 437-445.*



Bassin versant de la Tafna (source ANRH Bir Morad Rais)