

Université Mohamed Khider - Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Génie civil et Hydraulique

Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية و الري

المرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de

Doctorat en sciences

Spécialité : Sciences Hydrauliques

**Etude de la Qualité des Eaux et de Transport Solide dans le Barrage de
Beni-Haroun (Mila), Son Impact sur l'Environnement de la Région**

Présentée par : Nadir MAROUF

Soutenue publiquement le 26 janvier 2012

Devant le jury composé de :

Dr. B. ACHOUR	Grade Prof.	Président	Université de Biskra.
Dr. M. DEBABECHE	Grade Prof.	Examineur	Université de Biskra.
Dr. S. HAMOUDI	Grade Prof.	Examineur	Université de Chlef.
Dr. A. BOUDOUKHA	Grade Prof.	Examineur	Université de Batna.
Dr. A. BENKHALED	Grade M.C.	Examineur	Université de Biskra.
Dr. B. REMINI	Grade Prof.	Rapporteur	Université de Blida.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT	i
DEDICACE.....	ii
RESUME.....	iii
خلاصة.....	iv
ABSTRACT	v
LISTES DES FIGURES.....	vi
LISTES DES TABLEAUX.....	vii
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I BIBLIOGRAPHIE SUR LE TRANSPORT SOLIDE

I.1 GENERALITE.....	6
I.2 MODES DE TRANSPORT	8
Schéma I.1 Modes de Transport des Sédiment	8
I.3 MOUVEMENT DES SEDIMENTS.....	9
I.3.1 Caractéristiques des sédiments	9
I.4 TRANSPORT PAR CHARRIAGE ET SALTATION	12
I.4.1 Définition.....	12
4.1.1 La charge de fond	12
I.5 TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION.....	15
I.6 MODÈLES DE LA CHARGE SÉDIMENTAIRES	18
I.7 TRAVAUX EFFECTUÉS EN ALGÉRIE.....	20
I.8 CARACTERISTIQUES DE LA RELATION CONCENTRATION EN SEDIMENTS EN SUSPENSION-DEBIT LIQUIDE.....	22
I.9 LE TRANSPORT SOLIDE ET L'IMPACT DE POLLUTION.....	30
I.9.1 Généralité.....	30
I.9.2 Relation sédiment-pollution.....	30
I.9.3 Effet des polluants sur l'environnement aquatique.....	31
CONCLUSION	34

CHAPITRE II CARACTERISTIQUES DU BARRAGE DE BENI HAROUN (CARACTERISTIQUES DE L'AMENAGEMENT)

INTRODUCTION.....	35
II.1 LOCALISATION.....	36
II.2 PRINCIPALES MODIFICATIONS APPORTEES AU PROJET DURANT LES TRAVAUX.....	36
II.2.1 Modification de la cote de retenue normale	36
II.2.2 Adoption d'une solution de barrage BCR.....	37
II.3 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU BARRAGE	37
II.3.1 Caractéristiques principales de l'aménagement	42
II.4 GEOLOGIE ET GEOTECHNIQUE DU BARRAGE	44
II.4.1 Géologie de site de barrage	44
II.4.2 Lithologie de site de barrage	46
II.4.3 Terrasse alluviale.....	47
II.4.4 Alluvions	47
II.4.5 Remblais.....	47
II.4.6 Structure	48
II.5 HYDROGEOLOGIE	49
II.5.1 Hydrogéologie du site	49

II.5.2 Perméabilité en forage.....	49
II.6 CARACTERISTIQUE MECANQUES DES TERRAINS DE FONDATION.....	49
II.6.1 Nature des terrains.....	49
II.7 SEISMISITE REGIONALE.....	50
II.8 TRANSFET DE BENI-HAROUN.....	51
INTRODUCTION.....	51
II.8.1 Mobilisation et transfert.....	51
II.8.2 Le tracé de l'ensemble du transfert.....	53
8.2.1 Transfert de Beni-Haroun au profit de l'A.E.P. de Mila-Constantine.....	56
8.2.2 Transfert de Beni-Haroun au profit de l'A.E.P. de Khenchela-Batna.....	57
8.2.3 Transfert de Beni-Haroun au profit de l'A.E.P. d'Oum-El-Bouaghi.....	58
II.8.3 Les projets de périmètres d'irrigation alimentés par « Beni-Haroun ».....	59
CONCLUSION.....	60

CHAPITRE III CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT KEBIR RHUMEL

III.1 CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN.....	61
III.1.1 Liste des sous bassins.....	36
III.1.2 Caractéristiques des stations étudiées.....	64
III.2 LA GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT.....	64
III.3 LITHO-STRATIGRAPHIE DU BASSIN.....	66
III.4 CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES GENERALES DU BASSIN.....	67
III.4.1 Etude morphométrique du bassin versant Kébir Rhumel.....	69
III.4.2 Le Climat.....	70
III.4.3 La courbe hypsométrique.....	70
III.5 PROFIL EN LONG.....	73
III.6 LA VEGETATION ET LEUR REPARTITION GEOGRAPHIQUE.....	74
III.6.1 Classification des types de végétation.....	74
CONCLUSION.....	76

CHAPITRE IV LA POLLUTION DES EAUX DE SURFACE DANS LE BASSIN VERSANT KEBIR RHUMEL

INTRODUCTION.....	77
IV.1 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	77
IV.2 DONNÉES ET PRÉLÈVEMENTS DES ÉCHANTILLONS.....	78
IV.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	79
IV.3.1 Paramètres indicateurs de pollution.....	79
3.1.1. Etude du paramètre NH_4^+	79
3.1.2 Variation de paramètre NO_2^-	80
3.1.3 Variation de paramètre O_2 dissous.....	80
3.1.4 Variation de paramètre NO_3^-	81
3.1.5 Variation de paramètre SO_4^-	82
3.1.6 Variation de la turbidité.....	82
3.1.7 Variation de paramètre PO_4	83
3.1.8 Variation de paramètre DCO.....	84
3.1.9 Variation de paramètre DBO_5	85
IV.3.2 La qualité des cours d'eau du bassin Kébir-Rhumel (1984-2005).....	85
IV.3.3 Résultats organoleptiques et physico-chimiques des eaux du barrage de Beni-Haroun.....	86
IV.3.4 Analyses bactériologiques des eaux du barrage de Beni-Haroun.....	87
CONCLUSION.....	89

CHAPITRE V ANALYSE DES PLUIES

V.1 PLUVIOMÉTRIE DANS LE BASSIN KÉBIR RHUMEL.....	90
V.2 APERÇU SUR LE CLIMAT DE L'AFRIQUE DU NORD.....	90
V.2.1 Aperçu sur le climat de l'Algérie.....	91
V.3 ETUDE DE PRÉCIPITATIONS.....	91
V.3.1 Homogénéisation des données pluviométriques.....	96
3.1.1 Méthode des rapports.....	96
3.1.2 Méthode de la régression linéaire.....	96
3.1.3 Analyse en composante principale (ACP).....	97
V.3.2 Ajustement des précipitations à une loi de probabilité.....	105
3.2.1 A l'échelle annuelle.....	106
3.2.2 A l'échelle mensuelle.....	107
3.2.3 A l'échelle journalière.....	108
CONCLUSION.....	111

CHAPITRE VI ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT

ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT.....	112
VI.1 VARIATION DE L'ÉCOULEMENT.....	113
VI.1.1 Débit moyen et max annuel.....	118
VI.1.2 Variation mensuelle de débit.....	123
VI.2 ANALYSE DES CRUES.....	124
CONCLUSION.....	129

CHAPITRE VII ANALYSE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

VII.1 CHRONOLOGIE DES COLLECTES.....	131
VII.2 DONNÉES DE DÉBITS INSTANTANÉES.....	133
VII.3 GAMME DES CONCENTRATIONS.....	133
VII.4 METHODES ET OBSERVATIONS.....	133
VII.5 ETUDE DES CRUES.....	134
VII.6 TRANSPORT DE SEDIMENTS DANS LE BASSIN.....	138
VII.6.1 Mise en forme des données.....	138
VII.6.2 Variation annuelle de la charge sédimentaire.....	139
VII.6.3 Variation mensuelle de la charge sédimentaire.....	141
VII.6.4 Variation saisonnière.....	144
VII.7 VARIATION MOYENNE MENSUELLE.....	147
VII.8 L'ÉROSION SPÉCIFIQUE.....	149
VII.8.1 Calcul du taux d'érosion spécifique.....	149
CONCLUSION.....	150

CHAPITRE VIII ANALYSE DE L'EFFET D'HYSTERESIS SUR LA RELATION CONCENTRATION-DEBIT

VIII.1 INTRODUCTION.....	152
VIII.2 DONNÉES.....	152
VIII.3 IDENTIFICATION DES CLASSES DE RELATION C-Q.....	153
VIII.4 CARACTÉRISTIQUES DES BOUCLES D'HYSTÉRÉSIS.....	158
VIII.5 INTERPRÉTATIONS.....	158
VIII.5.1 Analyse de l'hystérésis.....	160
VIII.6 DISCUSSION ET CONCLUSION.....	162

CHAPITRE IX IMPACT DU SYSTEME DE TRANSFERT HYDRAULIQUE DU BARRAGE DE BENI-HAROUN SUR LA REGION EST DE L'ALGERIE

INTRODUCTION.....	163
IX.1 LES IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES.....	165
IX.2 IMPACTS SUR LA QUALITÉ DE L'EAU ET LE MILIEU NATUREL.....	171
IX.3 IMPACTS DU TRANSFERT SUR LE TRANSPORT SOLIDE.....	173
IX.4 IMPACTS MORPHOLOGIQUES ET TECTONIQUES.....	175
IX.5 STRATEGIES DE DE POLLUTION.....	178
IX.5.1 Considérations générales sur les niveaux de rejet à atteindre.....	178
IX.5.2 Solutions visant à réduire les impacts de la pollution résiduelle après traitement.....	180
IX.5.3 Sélection des modes d'épuration envisageables.....	182
5.3.1 Les différents processus.....	182
5.3.2 Définition des critères spécifiques et déterminants pour le choix du processus.....	183
5.3.3 Analyse des solutions envisageables.....	183
CONCLUSION.....	185
CONCLUSION GENERALE.....	186
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	194
ANNEXES.....	216

Remerciement

La réalisation de cette recherche a été rendue possible grâce à l'appui de plusieurs personnes dévouées à qui je tiens à exprimer ma reconnaissance.

Je tien vivement à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à toutes les personnes ayant contribuées de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements particuliers vont :

A mon directeur de thèse Mr B. Rejini, Professeur à l'université de Blida, pour avoir accepté de m'encadrer et pour tous les orientations précieuses qu'il m'a pensé pour l'enrichissement de ce travail. Son assiduité et son suivi permanent m'ont été un apport sans égal.

Mes remerciements s'adressent aux membres de jury pour m'avoir honoré de leurs présences en particulier :

Mr B. Achour, Professeur à l'université de Mohamed Kholder. Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider le jury. Je lui en suis très reconnaissant.

Mr M. Debabeche, Professeur à l'université de Biskra, Mr H. S. Hamoudi, professeur à l'université de Chlef, Mr A. Boudoukha professeur à l'université de Batna et Mr A. Benkhaled, maître de conférences à l'université de Biskra pour bien également accepter de juger le contenu de ce travail et participer au jury

J'adresse également mes remerciements à :

Mr J.P. LABORDE. Université de Nice Sophia Antipolis, France. Pour m'avoir accueilli dans son laboratoire. Il m'a permis avec beaucoup de confiance d'assimiler beaucoup de concepts dans le domaine de l'hydrologie. Je tiens aussi à le remercier aussi pour l'obtention des documents et des informations nécessaires

Mr. Mar-COT, professeur émérite de l'université d'Aix-Provence de Marseille, pour sons aides, et ses nombreux orientations et encouragements dans mes recherches.

Mes vifs remerciements vont a :

Mme Abda, chef de service à l'ANRH d'Alger, et M. Hadef, chef de service à l'ANRH de Constantine qui n'ont pas hésité un moment de me fournir les documents et les données nécessaires pour élaborer et enrichir ce travail.

Toute ma gratitude va à messieurs les directeurs de l'ANRH de Constantine et l'ANBT d'Alger pour toutes les facilités fournies pour l'acquisition des données. On n'oublie pas aussi monsieur El Manaa, le chef d'exploitation du barrage de Beni-Haroun qui m'a vraiment donner tous les moyens disponibles pour que je puisse terminer mon travail dans les meilleures conditions.

Mes vifs remerciements aussi vont aux docteurs :

Mr M. Bouanani enseignant à l'université d'Oran et A. Benkhaled enseignant à l'université de Biskra pour leurs travaux de thèses de doctorat qui m'ont fait un véritable support scientifique et technique dans l'élaboration de ma thèse de doctorat. Je n'oublie pas aussi de remercier infiniment M. Mébarki, enseignant à l'université de Constantine pour son aide et ses conseils précieux. Son travail de doctorat de 3ème cycle sur le bassin versant Kébir-Rhumel, m'a aidé vraiment dans mon sujet. C'est un document qui reste toujours une référence.

Un merci tout spécial à K. Yousfi, M. Addad, R. Koussa et M. Maaref pour leurs aides et orientations dans les traductions de mes articles et mes travaux scientifiques. Un grand merci aussi à Mme D. Brintoon, professeur au département de linguistique appliquée. Los Angeles, USA pour accepter de lire et de corriger mon article scientifique.

Je voudrais remercier tous mes collègues de département de l'hydraulique à l'université d'Oum-El-Bouaghi pour leurs encouragements et soutiens.

Je n'oublie pas tout le personnel technique des laboratoires de Chimie et de Biologie à l'Université d'Oum-El-Bouaghi pour leurs aides dans l'élaboration des analyses nécessaires. Aussi le laboratoire d'analyse de l'ANRH de Constantine pour toutes les données fournies.

Mes remerciements aussi, au responsable de laboratoire de cartographie au département de géographie à l'université de Constantine pour leurs aides dans l'élaboration de certaines cartes du bassin d'étude.

Je rends un grand hommage à mes chers parents, à ma femme, à mes frères et soeurs et à toute la famille pour leurs aides et soutien morale tout le long de ce travail.

Je voudrais remercier mes amies desquels j'ai reçu aussi beaucoup de soutien en particulier, Mrs A. Takouachet, D. Lakfichen, H. Toute, et A. Aouidane.

Mes sincères remerciements vont à mes confrères et amis enseignants, administrateurs et travailleurs à l'université d'Oum-El-Bouaghi en particulier, Mrs N. Mezza F. Afoufou, F. Sekou, E. Mokhtari, H. Saifi et également à Mrs S. Kechida, M. Lekhal, M. Benmia, L. Tamrabet, M. Djaddou B. Belkacem, A. Khiari, E. Merzougue, M. Belkadh, A. Toumi et tous ceux que je n'ai pas cités.

Ces remerciements ne peuvent s'achever, sans une pensée pour mes proches, et plus particulièrement mes parents qui n'ont pas arrêté de me soutenir, qui ont su me pousser à en arriver au bout. Je leur serai toujours redevable de tous les efforts qu'ils ont fournis à mon égard.

Enfin, si je n'avais qu'une personne à remercier, ce serait celle qui partage ma vie depuis quatre ans : ma très chère et adorée épouse, qui a su faire preuve d'une grande patience et pour son soutien de tout temps. Alors un grand merci à Kenza pour tout le bonheur qu'elle m'apporte, son soutien quotidien indéfectible. Elle mérite amplement que je lui dédie ce travail.

Dédicace

Je dédie humblement ce manuscrit :

A la mémoire de ma mère

A mon père

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

A ma petite fille Aya

A toute ma famille et ma belle famille

RESUME

L'objectif de cette thèse est d'étudier le transport solide et la qualité des eaux du barrage de Béni-Haroun et son impact sur l'environnement. Dans ce cadre nous espérons apporter une contribution utile grâce à améliorer la compréhension et l'estimation du phénomène de transport solide par l'étude des modèles du transport de sédiment et des sources de sédiment dans le bassin Kébir-Rhumel en tenant compte le rapport entre les débits solides et les débits liquides en tenant compte les différentes échelles temporelles. Et aussi le contrôle des paramètres de pollution des eaux de surface dans le bassin d'étude et par conséquent, le barrage de Béni-Haroun. En se basant sur les mesures continues des concentrations des sédiments en suspension au droit de la station d'El Ancer et les données de pollution de quatre stations de mesure durant une période de 10 ans. Le calcul du transport de sédiment dans ce bassin, montre qu'environ vingt million de tonnes de la charge sédimentaire annuelle tend vers la retenue du barrage de Béni-Haroun. La représentation de l'ensemble des données à l'échelle de crue montre l'excellente tendance exponentielle entre les débits liquides et les débits solides par rapport à celles de l'échelle mensuelle et annuelle. Les modèles d'hystérésis observés a permis d'identifier les principales classes d'évolution. Le modèle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre est le prédominant (le plus fréquent), où les sédiments prévenus des rives de cours d'eau principaux et les versants sont considérablement importants par rapport à la vallée du bassin. Les estimations des débits solides de cours d'eau principal du bassin d'étude confirme la gravité du taux d'érosion dans ce dernier (environ 7.4 millions de tonnes/km.an), ce qui provoque également, l'envasement rapide de plus grands barrage en Algérie (le barrage de Béni-Haroun). En plus les résultats obtenus sur paramètres de pollution indiquent ainsi la contamination chimique et microbiologique des eaux des cours d'eau principaux du bassin et de la retenue du barrage. Le complexe hydraulique de Béni-Haroun demeure une réalisation stratégique majeure dans le programme du développement du secteur des ressources en eau. Cet énorme édifice, érigé, sert à satisfaire aux besoins de six wilayas de l'Est Algérien ainsi que vers des régions limitrophes ayant souffert de manque de l'eau de consommation, notamment en période estivale.

Mots clés : bassin Kébir-Rhumel, transport solide en suspension, Courbe d'hystérésis C-Q, débit liquide, débit solide, envasement, indicateurs de pollution, barrage Beni-Haroun, contamination des eaux.

خلاصة

الهدف من هذه الأطروحة هي دراسة الحمل الصلب ونوعية مياه سد بني هارون و تأثيرها على المحيط. في هذا الإطار يكمن إسهامنا بتحسين الفهم الجيد وتقدير ظاهرة الحمل الصلب وذلك بدراسة نماذج الحمل الصلب ومنابع الحمل لحوض كبير الرمال مع أخذ بعين الاعتبار، العلاقة بين التدفق الصلب و التدفق السائل باستعمال مختلف أساليب التقدير. كذلك تحليل ودراسة متغيرات تلوث المياه السطحية لحوض كبير الرمال و سد بني هارون.

باعتمادنا على قياسات مستمرة لتركيزات الحمل العالق لمحطة القياس "العنصر" ومعطيات التلوث لأربع محطات قياس لمدة زمنية قدرها 10 سنوات.

إن حساب الحمل في الحوض يبين أنه حوالي 10 ملايين طن من حمولة الترسبات تصب سنويا في سد بني هارون. بيان مجموعة المعطيات على سلم الفيضان يبين بشكل جيد العلاقة الأساسية الموجودة بين التدفق الصلب و التدفق السائل مقارنة مع السلم الشهري و السنوي. أساليب التباطؤ المدروسة سمحت لنا بمعرفة الصنف الأساسي السائد وهو الصنف في الإتجاه المعاكس لعقارب الساعة حيث الرواسب التي تأتي من ضفاف الأودية الرئيسية و السفوح و المنحدرات هي أكثر اعتبارا بالنسبة للحوض.

تقييم التدفق الصلب للمواد الراسبة لحوض كبير الرمال يؤكد لنا خطورة نسبة تعرية و تآكل التربة في هذا الحوض (حوالي 7.4 مليون طن/كم² سنويا). زيادة عن ذلك النتائج المحصل عليها على متغيرات التلوث والتي تبين خطورة التلوث الكيميائي و المكروبيولوجي لمياه الحوض و سد بني هارون.

ان مركب بني هارون يعتبر انجاز استراتيجي كبير في برنامج تنمية قطاع الموارد المائية. هذا الصرح العظيم سيسمح بتزويد ستة ولايات من الشرق الجزائري بالمياه الشروب والمناطق المجاورة التي تعاني من نقص المياه خاصة في فصل الصيف.

مفتاح الكلمات: حوض كبير الرمال، الحمل العالق، التدفق الصلب، التدفق السائل، ترسب، تلوث المياه ، سد بني هارون.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to study sediment transport and water quality in the Beni- Haroun dam and its impact on the environment. In this context we hope to make a useful contribution through better understanding and estimation of phenomenon of sediment transport through the study of sediment transport models and sources of sediment in the basin Kebir-Rhumel taking into account the relationship between the solid flow and liquid flow with different methods of calculation. And also the control parameters of pollution of surface water in The Kebi-Rhumel Basin and therefore the Beni-Haroun dam. Basing on continuous measurements of suspended sediment concentrations at El Ancer gauging station and pollution data from four gauging stations for 10 years. The calculation of sediment transport in the basin, shows annually about twenty million tons of sediment loads on an annual basis tends towards the Beni-Haroun dam. The representation of all data at the scale of the flood shows excellent exponential tendency between the liquid discharge and solid discharge compared to those of monthly and annual scale. Hysteresis models observed has allowed identifying the main hysteresis classes. The model in the counterclockwise is the predominant (most frequent), where the sediment prevented on the level of the principal streamwater banks and hillslopes are significantly large compared to the valley basin. Estimates of rates of solid main river catchment Kebir-Rhumel confirms the gravity of erosion at Kebir-Rhumel basin (about 7.4 million ton/km.year), which may cause, the fast silting of Algeria's biggest dam (Beni Haroun). In addition to the results of pollution parameters indicate the chemical and microbiological contamination of streamwater basin and Beni-Haroun dam. The hydraulic complex of Beni-Haroun remains a major strategic achievement in the program of development of the sector of water resources. This huge building, erected, used to meet the needs of six Wilaya in eastern of Algeria as well as to neighboring regions have suffered from lack of drinking water, especially during summer.

Keywords: Rhumel-Kebir basin, suspended sediments transport, C-Q hysteresis curve, liquid flow, solid flow, siltation, pollution indicators, Beni-Haroun dam, water contamination.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I BIBLIOGRAPHIE SUR LE TRANSPORT SOLIDE

Figure I.1 Diagramme de Hjustrom (d'après boulvain, 2004)	7
Figure I.2 Schéma de modes de transport des sédiments	8
Figure I.3 Modes de transport des particules dans un courant (d'après Boulvain, 2004)	9
Figure I.4 Granulométrie en variables adimensionnelles (Wite et al., 1978)	10
Figure I.5 Vitesse de dépôt des particules (Yalin, 1972).....	11
Figure I.6 Seuil de mise en mouvement. (d'après White, W.R, 1972).....	11
Figure I.7 Modèle d'évolution de forme et du lit du tri granulométrique de dunes mixtes	13
Figure I.8 Diagramme de Shields modifié par Bagnold (Bagnold, 1996).....	14
Figure I.9 Critère de suspension des sédiments.....	15
Figure I.10 Pourcentage du temps quand des particules progressent selon différents modes de transport en fonction de l'intensité de flux (d'après Abbot et Francis, 1977.....	16
Figure I.11 modèle de la relation C-Q 1 : érosion ; 2 transport ; et 3 : dépôt.....	23
Figure I.12 Modèles de boucles d'hystérésis (Williams, 1986)	29

CHAPITRE II CARACTERISTIQUES DU BARRAGE DE BENI HAROUN (CARACTERISTIQUES DE L'AMENAGEMENT)

Figure II.1 Retenue du barrage de Beni-Haroun	35
Figure II.2 Vue du barrage de Beni-Haroun (ANBT, 2002)	38
Figure II.3 Vue de l'évacuateur de crue du barrage de Beni-Haroun.....	39
Figure II.4 Galeries de dérivation du barrage	40
Figure II.5 Vidange de demi-fond du barrage.....	40
Figure II.6 Profil longitudinal du barrage.....	41
Figure II.7 Contexte géologique du site du barrage de Beni-Haroun (ANBT, T.E., 2001)	44
Figure II.8 Schéma de transfert hydraulique de Beni-Haroun.....	52
Figure II.9 Schéma régional de transfert de Beni-Haroun.....	53
Figure II.10 Profil longitudinal du transfert de Beni-Haroun (d'après ANBT ; T.I., 1999).....	54
Figure II.11 Schéma de transfert de Beni-Haroun au profit de l'A.E.P. de Mila-Constantine...57	
Figure II.12 Schéma de transfert de Beni-Haroun au profit de l'A.E.P. de Khenchla-Batna....58	
Figure II.13 Schéma de transfert de Beni-Haroun au profit de l'A.E.P. d'Oum-El-Bouaghi ...59	

CHAPITRE III CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT KEBIR RHUMEL

Figure III.1 Situation géographique et limites du bassin.....	62
Figure III.2 Réseau hydrographique du bassin Kébir-Rhumel.....	62
Figure III.3 Carte de la morphologie du bassin Kébir-Rhumel.....	65
Figure III.4 Carte de lithologie du bassin Kébir Rhumel (Mébariki, 1986).....	67
Figure III.5 Chevelu hydrographique (délimitation du bassin d'après Mébariki, M., 1986).....	68
Figure III.6 Courbe hypsométrique du bassin Kébir-Rhumel.....	71
Figure III.7 Profil en long principal et ses effluents du bassin versant Kébir-Rhumel.....	73
Figure III.8 Carte de végétation dans le bassin Kébir Rhumel (Mébariki, 1986).....	75

CHAPITRE IV LA POLLUTION DES EAUX DE SURFACE DANS LE BASSIN VERSANT KEBIR RHUMEL

Figure IV.1 Situation géographique des stations de mesure dans le bassin Kébir-Rhumel.....	78
Figure IV.2 Variation moyenne annuelle du paramètres NH_4^+ durant la période (84-05).....	80
Figure IV.3 Variation moyenne annuelle du paramètres NO_2^- durant la période (84-05).....	80
Figure IV.4 Variation moyenne annuelle du paramètres $\text{O}_{2\text{dissous}}$ durant la période (84-05).....	81
Figure IV.5 Variation moyenne annuelle du paramètres NO_3^- durant la période (84-05).....	82
Figure IV.6 Variation moyenne annuelle du paramètres SO_4 durant la période (84-05).....	82
Figure IV.7 Variation moyenne annuelle de la turbidité durant la période (84-05).....	83
Figure IV.8 Variation moyenne annuelle du paramètres PO_4 durant la période (84-05).....	84
Figure IV.9 Variation moyenne annuelle du DCO durant la période (1984-2005).....	84
Figure IV.10 Variation moyenne annuelle du DBO_5 durant la période (1984-2005).....	85
Figure IV.11 Variation de MES et TUR dans la retenue.....	88
Figure IV.12 Variation de PO_4 dans la retenue.....	88
Figure IV.13 Variation de Sulfate au niveau de la retenue.....	88
Figure IV.14 Variation de NH_4^+ et NO_3^- au niveau de la retenue.....	88
Figure IV.15 Variation de $\text{L}'\text{O}_2$ saturé et $\text{L}'\text{O}_2$ dissous.....	88
Figure IV.16 Variation de DBO_5 et de DCO.....	88

CHAPITRE V ANALYSE DES PLUIES

Figure V.1 Carte des précipitations annuelles dans le bassin Kébir-Rhumel.....	95
Figure V.2 Ajustement du vecteur régional C_1 à une loi normale.....	99
Figure V.3 Projection des variables sur le plan 1-2.....	101
Figure V.4 Projection des variables sur le plan 1-3.....	101
Figure V.5 Projection des variables sur le plan 2-3.....	101

Figure V.6 Projection des variables actives.....	105
Figure V.7 Projection des observations actives.....	105
Figure V.8 Ajustement des précipitations annuelles à la loi normal : station de Constantine (Code 100410).....	106
Figure V.9 Ajustement des précipitation maximales journalières à la loi normal : station de Constantine (Code 100410).....	110

CHAPITRE VI ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT

Figure VI.1 Histogramme de débits moyens mensuelles (Station El ancer, Grarem et Tassaadane)	118
Figure VI.2 Variation annuelle des débits d'écoulement (Station El Ancer)	119
Figure VI.3 Variation annuelle des débits d'écoulement (Station Grarem)	119
Figure VI.4 Variation annuelle des débits d'écoulement (Station Tassaadane).....	119
Figure VI.5 Ajustement des débits moyens à la loi log normal : Station Tassaadane.....	120
Figure VI.6 Ajustement des débits moyens à la loi log normal : Station Grarem.....	121
Figure VI.7 Ajustement des débits moyens à la loi log normal : Station El Ancer.....	121
Figure VI.8 Lames d'eau précipitée et écoulee annuelles (Station El Ancer).....	122
Figure VI.9 Lames d'eau précipitée et écoulee annuelles (Station Grarem).....	123
Figure VI.10 Lames d'eau précipitée et écoulee annuelles (Station Tassaadane).....	123
Figure VI.11 Variation saisonnière des débits moyens mensuels	124
Figure VI.12 Variation saisonnière des débits maxims mensuels	124
Figure VI.13 Chronologique des débits instantanés sur l'oued Kébir Rhumel (Station El Ancer).....	125
Figure VI.14 Hydrogramme de crues duranrécoulement (Station El Ancer).....	126
Figure VI.15 Graphique chronologique des concentrations pour les débits >100 m ³ /s	126
Figure VI.16 Ajustement des débits maxims à la loi de Gumbel : Station El Ancer.....	129

CHAPITRE VII ANALYSE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

Figure VII.1 variation du nombre de mesure de la coccentration durant la période d'étude (1979-1991) : a)- fréquence relative ; b)- fréquence cumulée)	132
Figure VII.2 Relation entre la concentration des sédiments et le débit d'écoulement durant les crues (période: 1982-1991 ; Station El Ancer).....	137
Figure VII.3 Representation graphique des débits solides et débits liquides pour 35 crues durant la période 1982-1992 (a : la monté de l'hydrogramme).....	137

Figure VII.4 Représentation graphique des débits solides et débits liquides pour 35 crues durant la période 1982-1992 (b : la décrue de l'hydrogramme).....	138
Figure VII.5 Présentation des données instantanées (débit liquide/débit solide : Station El Ancer).....	138
Figure VII.6 Variation annuelle entre les débits liquides et les débits solides (Station El Ancer).....	141
Figure VII.7 Relation entre les débits solides et les débits liquides à l'échelle mensuelle (Station El Ancer).....	142
Figure VII.8 Relation saisonnière entre les débits solides et les débits liquides (Station El Ancer).....	145
Figure VII.9 Variation de la charge sédimentaire pour différents modes de calcul (Echelle annuelle et Modèle annuel ; Echelle annuelle et Modèle mensuel).....	146
Figure (VII.10 ;a) Variation moyenne mensuelle des concentrations des sédiments en suspension et le débit d'écoulement (a : $C < 9g/l$) ; Station El Ancer.....	148
Figure (VII.10 ;b) Variation moyenne mensuelle des concentrations des sédiments en suspension et le débit d'écoulement (b : $C > 9g/l$) ; Station El Ancer.....	148

CHAPITRE VIII ANALYSE DE L'EFFET D'HYSTERESIS SUR LA RELATION CONCENTRATION-DEBIT

Figure VIII ;1-16 : Courbes d'hystérésis entre les concentrations des sédiments et les débits d'écoulement sélectionnées durant les crues 1984-1990 (Station El Ancer)	156
--	-----

CHAPITRE IX IMPACT DU SYSTEME DE TRANSFERT HYDRAULIQUE DU BARRAGE DE BENI-HAROUN SUR LA REGION EST DE L'ALGERIE

Figure IX.1 Schéma de fonctionnement et allocation des ressources : Transfert de Beni-Haroun	164
Figure IX.2 Carte des rejets urbains et industriels (ABH Constantine, 1999)	166
Figure IX.3 Périmètre d'irrigation Chemora	169
Figure IX.4 Périmètre d'irrigation Touffana-Remila	170

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I BIBLIOGRAPHIE SUR LE TRANSPORT SOLIDE

Tableau I.1 Type de boucles d'hystérésis (d'après Williams, 1989).....	24
--	----

CHAPITRE II CARACTERISTIQUES DU BARRAGE DE BENI-HAROUN (CARACTERISTIQUES DE L'AMENAGEMENT)

Tableau II.1 Caractéristiques principales de l'aménagement.....	42
---	----

CHAPITRE III CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT KEBIR RHUMEL

Tableau III.1 Surfaces drainées aux points caractéristiques du bassin.....	62
Tableau III.2 Différentes surfaces des sous bassins de Kébir-Rhumel	63
Tableau III.3 Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin.....	64
Tableau III.4 Caractéristiques morphométriques du bassin versant Kébir-Rhumel.....	69
Tableau III.5 Répartition altimétrique dans le bassin versant Kébir-Rhumel	70
Tableau III.6 Caractéristiques morphométriques des grands sous bassins contrôlés par des stations hydrométriques principales	72

CHAPITRE V ANALYSE DES PLUIES

Tableau V.1 Identification des stations pluviométriques	92
Tableau V.2 Précipitations annuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques (n=30 ans)	93
Tableau V.3 Vecteurs régionaux de l'analyse en composantes principales	97
Tableau V.4 Moyenne, écart type des variables initiales	97
Tableau V.5 Matrice des coefficients de corrélation entre les variables actives	98
Tableau V.6 Projections des variables actives.....	98
Tableau V.7 Projections des observations actives.....	98
Tableau V.8 Stations représentatives du bassin d'étude.....	100
Tableau V.9 Précipitations mensuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques.....	102
Tableau V.10 Vecteurs régionaux de l'analyse en composantes principales	103
Tableau V.11 Moyenne, écart types des variables initiales.....	103
Tableau V.12 Matrice des coefficients de corrélation entre les variables	103
Tableau V.13 Projections des variables actives.....	104
Tableau V.14 Projections des observations actives.....	104

Tableau V.15 Equations d'ajustement des précipitations annuelles a la loi log-normale	106
Tableau V.16 Précipitations annuelles (mm) pour différentes périodes de retour	107
Tableau V.17 Equations d'ajustement des précipitations mensuelles a la loi Log-Normale : stations de Constantine, Hamala et Hamma Bouziane (codes ; 100410, 100703 et 100603) .	107
Tableau V.18 Précipitations maximales journalières en (mm) aux stations représentatives...	108
Tableau V.19 Equations de la droite de Galton : précipitations maximales journalières	110
Tableau V.20 Précipitations maximales pour différentes périodes de retour	110

CHAPITRE VI ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT

Tableau VI.1 Identification des stations hydrométriques	112
Tableau VI.2 Variation interannuelle de l'écoulement au droit de différentes stations	114
Tableau VI.3 Caractéristiques de l'écoulement du bassin Kébir-Rhumel a la station de Grarem (code 100601).....	115
Tableau VI.4 Caractéristiques de l'écoulement du bassin Kébir-Rhumel a la station de Tassaadane (code 100109)	116
Tableau VI.5 Caractéristiques de l'écoulement du bassin Kébir-Rhumel a la station Al Ancer (code 100701).....	117
Tableau VI.6 Equations d'ajustement des débits moyens annuels a la loi Log-Normal	120
Tableau VI.7 Débits moyens pour différentes périodes de retour	121
Tableau VI.8 Crues observées au seuil de 300 m ³ /s (station El Ancer)	127
Tableau VI.9 Crues observées à la station de Grarem.....	128
Tableau VI.10 Crues observées à la station de Tassaadane	128

CHAPITRE VII ANALYSE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

Tableau VII.1 Variation mensuelle et annuelle du nombre de mesure de la concentration des sédiments en suspension.....	131
Tableau VII.2 Paramètres statistiques de la concentration et du débit	133
Tableau VII.3 Modèles retenues et leurs coefficients de corrélation calculés à l'échelle annuelle pour la station El Ancer	139
Tableau VII.4 Modèles retenues et leurs coefficients de corrélation calculés a l'échelle mensuelle pour la Station El Ancer	143
Tableau VII.5 Modèles retenues et leurs coefficients de corrélation calculés a l'échelle saisonnière pour la station El Ancer	146
Tableau VII.6 Résultats de quantification du transport solide en suspension	147
Tableau VII.7 Résultats de l'érosion spécifique.....	149

CHAPITRE VIII ANALYSE DE L'EFFET D'HYSTERESIS SUR LA RELATION CONCENTRATION-DEBIT

Tableau VIII.1 Chronologie des crues sélectionnées	153
Tableau VIII.2 Paramètres statistiques des crues sélectionnées	157
Tableau VIII.3 Classement et caractéristiques des crues sélectionnées	159

CHAPITRE IX IMPACT DU SYSTEME DE TRANSFERT HYDRAULIQUE DU BARRAGE DE BENI-HAROUN SUR LA REGION EST DE L'ALGERIE

Tableau XI.1 Industrie dans le bassin Kébir-Rhumel.....	167
Tableau XI.2 Les caractéristiques des périmètres à irriguer du bassin.....	170
Tableau XI.3 Etat des forages dans le bassin Kébir-Rhumel	178
Tableau XI.4 Positionnement des filières selon les critères définis (selon, ANBT, GG., 2003)	184

INTRODUCTION GENERALE

Les précipitations et la charge de sédiments jouent un rôle important dans la modification de la morphologie des rivières, à travers des modèles, dans le temps et dans l'espace, (Hupp et Osterkamp, 1996 ; Lu et Higgitt, 1998, 1999 ; Miller et Gupta, 1999). Les processus physiques, en fonction de ces deux paramètres résultent de l'effet de la source de l'eau et du sédiment, le flux du sédiment, la géomorphologie fluviale et la circulation atmosphérique (Milliman et du Syvitski, 1992 ; Gupta et Asher, 1998). On peut dire que leur effet est principalement, la géologie et le climat et secondairement, la géomorphologie du bassin (Zhongyan et als., 2001).

Beaucoup de recherches sur l'érosion et le transport solide se basent sur le rapport entre la concentration du sédiment et le débit d'écoulement d'un cours d'eau pour évaluer le transport du sédiment et les sources du sédiment, dans les petits bassins (Walling et Webb, 1982 ; Cordova et Gonzalez, 1997 ; Chen et als., 2001 ; Simon et als., 2004 ; Umesh et als., 2005 ; Hassan et als., 2005). En raison des sources variables de sédiments, ce rapport montre fréquemment, des effets d'hystérésis (Bogen, 1980 ; Carson et al., 1973). Toutes ces études ont considéré le modèle des boucles, par hystérésis comme un indicateur possible de la source du sédiment, dans un bassin, mais les rapports réels, causals sont difficiles à définir en raison de nombreux facteurs impliqués, y compris des caractéristiques d'orage, des conditions antécédentes d'humidité, la disponibilité du sédiment et surtout, la présence des sources riches en sédiment (Peter et Diconzo, 1997).

Klein, 1984 et Debcer et al., 1989 dans leurs travaux ont montré que la plus grande source de sédiments se déplace loin de la station de mesure, le modèle d'hystérésis observé, devrait changer le sens des aiguilles d'une montre, en sens contraire. La quantité des précipitations et les conditions antécédentes d'humidité ont contrôlé le type d'hystérésis observé. Piest et al., (1975) a constaté que pour les ruisseaux du fond de vallée, en Iowa occidentale, l'hystérésis dans le sens des aiguilles d'une montre s'est produite, en raison de la disponibilité des débris mobiles, des petits cours d'eau. Cependant, peu de considération a été donnée à la façon dont la source du sédiment peut se relier aux modèles du débit et du sédiment, dans le chenal principal.

L'eau de surface drainée, dans un bassin versant, exemple : le cas du bassin kébir Rhumel sera indispensable, pour les activités industrielles et commerciales. Le développement industriel, avec une utilisation excessive d'eau et de produits chimiques, dans la fabrication et le traitement industriel, et les engrais en agriculture constitue, une menace sérieuse pour la qualité de l'eau. La plupart des industries évacuent leurs effluents, dans les cours d'eaux les plus proches. Cette option n'a qu'une alternative provisoire qui ne fait que transférer le problème ; d'où la nécessité de lutter, contre la pollution sous toutes ses formes, notamment la pollution des eaux.

L'évacuation non contrôlée, de ces déchets liquides, soit par manque des stations d'épuration ou à défaut, ces stations ne sont pas opérationnelles, le cas de

fonctionnement des stations d'épuration en Algérie, aboutit à la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines, véritable danger pour la flore et la faune. Les rejets d'eaux usées constituent donc un élément fondamental, en matière de pollution et de la reproduction de nombreux vecteurs de maladie.

L'eau transporte les métaux lourds et les insère dans la chaîne alimentaire. Même si ces derniers sont le plus souvent, présents à l'état de traces, dans les rejets industriels ; ils n'en restent pas moins très dangereux puisque leur toxicité se développe, par bioaccumulation, dans l'organisme. L'inquiétude s'amplifie et les contentieux se multiplient. Les rejets industriels et artisanaux représentent réellement un danger, de part leurs qualités physico-chimiques et microbiologiques mais aussi pour l'environnement qu'ils contaminent.

Au regard de tout ce qui précède, l'assainissement, en milieu urbain des agglomérations qui entourent les retenues des barrages constitue, un véritable problème pour le traitement et le contrôle de la qualité de l'eau.

L'Algérie se caractérise, par la rareté des ressources en eau, rejoignant ainsi l'ensemble des pays arides et semi-arides, la pollution de ces ressources, par les effluents domestiques et industriels due à l'accroissement démographique et les activités industrielles favorise la dégradation de la qualité de l'eau et compromette le déséquilibre du milieu récepteur.

A priori, le constat est rassurant l'eau distribuée, aux abonnés est de bonnes qualités physicochimiques et bactériologiques. Les programmes d'approvisionnement, en eau, ont surtout visé à développer, les sources de stockage et les systèmes de distribution (barrages et transferts hydrauliques) ce qui nécessite à modifier l'environnement mais malheureusement sans tenir compte de la gestion des eaux usées domestiques et industrielles déversées dans les cours d'eau des bassins.

Les nappes aquifères ont été épuisées et les écosystèmes peuvent être perturbés. Il sera difficile de satisfaire les besoins en eau d'une bonne qualité, dans les villes de l'Algérie du nord et en particulier les villes intérieures, dans les années à venir.

Beaucoup des travaux élaborés, sur la pollution des eaux de surface montrent: une forte concentration de phosphore et de nitrate (Evan et Johnes, 2004). Pauwels et Talbo, 2004 montrent que des concentrations élevées de polluants ont été observé, particulièrement, pendant les événements d'orage en Automne et en Hiver. Michal et Robain en 2002 ont déduit que 85 % de la quantité du phosphore drainée par le bassin d'étude a été produite, dans les plaines, à cause des rejets d'assainissement et d'érosion intensive des terres agricoles.

L'enrichissement nutritif, de ces cours d'eau, ayant pour résultats: la croissance excessive des plantes aquatiques, les changements de la structure biotique et la réduction de l'oxygène dissous (Ryding et Rast, 1994 ; Carblancos, 2002). Ce phénomène, appelé l'eutrophisation, est un problème croissant, en particulier, dans les secteurs ruraux (Neal et Whitehead, 2002). Les travaux de Kelly et Wilson, 2003 présentent les conditions eutrophiques dominées, dans tout le fleuve de Stour à

Ashford. Finalement ayant aussi pour résultats, la mort de la vie aquatique (exemple les poissons. (Duda, 1993 ; Carpenter et al., 1998)).

D'autres travaux (Dorioz et Pelletier, 1998) indiquent que la pollution est excessive en aval du fleuve, à l'amont, les sédiments constitués de matériaux à faible teneur en phosphore total, à faible biodisponibilité potentielle et à fort pouvoir fixateur. Tous ces éléments suggèrent une origine plus liée à l'érosion des berges qu'à celle des sols. Transférés vers l'aval lors des crues, ces sédiments se mélangent aux matériaux, issus de l'érosion des terres agricoles et progressivement en phosphore, surtout lors des étiages, en particulier en contact avec des eaux enrichies des eaux usées.

La majorité des rejets domestiques et industriels déversés dans les cours d'eau du bassin Kébir Rhumel (ANBT, 2003) favorisent l'enrichissement de l'eau, en éléments nutritifs, phosphore et azote et notamment l'augmentation corrélative de la production végétale aquatique, principalement des algues planctoniques ou fixées ce qui altère les propriétés physiques et chimiques de l'eau.

Plusieurs études menées, sur les lacs, ont mis en relation la quantité de phosphore disponible, la typologie des plans d'eau et la biomasse des algues du plancton. Ces résultats ont accrédité l'idée qu'on pouvait limiter le développement d'algues en réduisant les apports de phosphores (Carblancos, 2002 ; Deceballos et al., 1998). C'est pour cela, il est indispensable d'adopter, les démarches nécessaires pour protéger les cours d'eau et de réagir rapidement pour faire le recyclage et la récupération des eaux polluantes avant de les rejetées aux oueds, pour éviter tous risque de contamination des eaux de la retenue du barrage.

Cette étude élaborée, sur le transport solide et la pollution des eaux du barrage de Beni-Haroun et du bassin versant Kébir-Rhumel, coïncide avec une étape très importante dans le développement de l'Algérie, liée à la valorisation et la bonne exploitation du potentiel hydrique et le développement du secteur hydraulique. En effet, les exigences accrues en eau d'un pays méditerranée, en pleine construction et en plein développement, disposant de plus de sept millions d'hectares de terres agricoles majoritairement sèches, ont aidé à faire prendre conscience plus que jamais, du rôle capital de l'eau, dans le processus global de développement.

Dans ce cadre, nous espérons apporter, une contribution utile grâce à l'étude de débit, transport solide en suspension et le contrôle de la pollution des eaux de surface dans le bassin Kébir-Rhumel et par conséquent, le barrage Béni-Haroun.

Spécifiquement, les objectifs de cette thèse est de contrôler les paramètres de pollution des eaux du barrage de Béni-Haroun et les différents cours d'eau du bassin Kébir-Rhumel et d'étudier les modèles de transport du sédiment et des sources du sédiment, dans ce bassin, en tenant compte le rapport, entre les débits solide et les débits liquide avec les différents modes de calcul, annuelle, mensuelle etc.).

Le bassin d'étude Kébir-Rhumel est situé à l'est de l'Algérie, qui s'étend sur une superficie totale, d'environ 8800 km² déborde largement, les limites géographiques du constantinois. Il se divise en deux parties distinctes, La partie occidentale, constituée, du bassin de l'oued Enndja qui se caractérise, par des précipitations relativement élevées et d'une topographie montagneuse et la partie orientale, constituée par le bassin de l'oued Rhumel qui se caractérise, par une topographie plus douce et des précipitations modérées. Les deux rivières confluent près de l'extrémité amont de la gorge de Beni Haroun pour former l'oued El Kébir. La confluence se situe à environ 3 kilomètres, au sud de l'extrémité amont de la gorge de Constantine. Les propriétés d'infiltration, dans le bassin de l'oued Rhumel semblent aussi indiquer que le sol y est plus perméable que dans celui de l'oued Enndja.

Ce bassin a permis de réaliser, le plus grand barrage en Algérie " le barrage de Béni-Haroun". Il est situé, à la sortie du bassin à environ 30 Km de l'amont de la station d'El Ancer, contrôlant une surface drainante de 7.725 Km². Ce barrage atteint les 120 m, de hauteur, à partir des fondations. Une longueur de 710 m en crête, avec une capacité de retenue normale de 960 millions m³/an.

Cette infrastructure qui relevait de la gageure et qui fût, l'un des plus grands défis de l'Algérie est aujourd'hui une réalité. Le complexe hydraulique de Béni Haroun demeure une réalisation stratégique et majeure, dans le programme, du développement du secteur des ressources en eau. Cet énorme édifice, érigé sur le territoire de la wilaya de Mila, sert à satisfaire les besoins, de six wilayas de l'Est Algérien (les wilayas de Jijel, Mila, Constantine, Oum El Bouaghi, Khenchla et Batna), ainsi que d'autres régions limitrophes ayant souffert du manque d'eau de consommation, notamment, en période estivale.

A ce titre, cette source vitale est destinée à peu près à quatre millions d'habitants, répartis, sur le territoire de six wilayas. En sus, il permettra l'irrigation de plus de 42.000 hectares, allant ainsi jusqu'aux plaines de Téléghma, Remila, Ouled Fadel, Chemora, Batna et Aïn Touta.

Sur le plan technique, notre étude s'articule sur plusieurs volets :

- Une synthèse bibliographique sur le mode de transport des sédiments, leur rapport, avec la pollution des eaux de surface et leur impact sur l'environnement. Cette synthèse, en première partie, passe en revue les processus et paramètres mis en cause dans le phénomène de transport solide, les différents modèles de la charge sédimentaire et caractérisation de la relation concentration de sédiments en suspension-débit liquide, à l'échelle d'une crue. Secondairement, la relation sédiments-pollution a été invoquée ont montre, les principaux vecteurs de transport des polluants et par conséquence leur effet sur l'environnement aquatique.
- Les caractéristiques de la digue du barrage et du transfert hydraulique de Beni-Haroun montrant, l'importance de ce système hydraulique, dans le bassin kébir-Rhumel. La consistance physique de cet aménagement, composé

d'ouvrages de mobilisation, transfert, de traitement, d'adduction et des réseaux d'irrigation, comprend globalement : Deux barrages principaux, Trois barrages réservoirs. Trois stations de pompage, 200 Km de conduites de gros diamètres de transfert d'eau brute dont 7 Km de tunnel et Six couloirs d'alimentation en eau potable comprenant 3 stations de traitement, 490 Km de conduites d'adduction, 25 réservoirs et 15 stations de pompage et aussi quatre périmètres d'irrigation, d'une superficie totale d'environ 42.000 ha.

- Le diagnostic physico géographique est la première étape de la connaissance d'un bassin versant, à permettre de caractériser les principaux facteurs naturels, intervenant, dans l'alimentation et dans l'écoulement : facteurs orographiques, morphologiques, lithologiques et climatiques.
- L'étude hydrologique, basée sur le traitement statistique, des données pluviométriques et hydrométriques, nous permet d'avoir un aperçu sur le régime pluviométrique, du bassin et les aspects fondamentaux de la variation de l'écoulement, dans les cours d'eau du bassin (annuelle, saisonnière et extrême).
- L'étude de la pollution des eaux de surface, dans le bassin à pris aussi, de l'importance, dans ce travail, les paramètres de pollution ont été analysés, dans les différentes stations de mesure et également, au niveau de la retenue du barrage de Beni-Haroun.
- En se basant, sur les mesures continues de concentration de sédiments en suspension, au droit de la station d'El Ancer. Nous disposons, d'une série moyenne de mesure, environ de 2030 valeur des débits liquides instantanés, et des concentrations de sédiments en suspension, allant du 1979 jusqu'à 1990.
- Des prélèvements quotidiens, des hauteurs d'eau, dont la fréquence augmente surtout, en période de crue, sont effectués pour l'estimation du transport solide. Ces données ont été sélectionnées pour la recherche de modèles mathématiques, entre le débit solide et le débit liquide.
- Pour chercher à caractériser la relation C-Q, à travers, une série d'événements chronologiques (crues), l'analyse à mener est orientée beaucoup plus vers l'aspect graphique. Les paramètres débit et concentration de sédiments en suspension et leurs phénomènes d'hystérésis, dans le bassin de l'oued Kébir ont été recueillis afin d'examiner leurs distributions temporelles. L'objectif est d'élaborer une classification de cette relation, et de faire ressortir, le modèle de boucle d'hystérésis dominant.
- L'impact du transfert hydraulique de Beni-Haroun, sur les régions environnantes a été aussi examiné. Cette partie intéressante, aura pour aboutissement, la détermination, des axes majeurs, d'un aménagement intégré du bassin et de son environnement dont la bonne gestion du système hydraulique de Beni-Haroun.

CHAPITRE I

BIBLIOGRAPHIE SUR LE TRANSPORT SOLIDE

I.1 GENERALITE

La matière première du débit solide est l'érosion, c'est-à-dire: le détachement de fragments ou de particules de sol ou de leurs positions initiales, par les agents atmosphériques tel que le gel, l'impact des gouttes de pluie, l'érosion pluviale (surtout sur les terrains meubles), le vent, la variation brutale des températures, les actions chimiques de l'eau et de l'air et le ruissellement. Les matériaux arrachés au sol, par l'érosion continentale finissent presque, à coup sûr, par atteindre le réseau hydrographique, sauf dans certains cas particuliers (relief particulièrement dégradé où l'endoréisme sévit à l'échelle microgéographique).

Il convient de signaler, dans le cas, des régions arides et semi-arides, l'effet saisonnier sur l'érosion, après une grande période de sécheresse qui s'étale sur plus de six (6) mois. Le sol nu est particulièrement sensible à l'érosion fluviale, en particulier, lors des crues intenses qui peuvent charrier une quantité importante de matériaux des sédiments. Lorsque les matériaux ainsi arrachés ont atteint le réseau hydrographique, ils vont être transportés, par le courant ou bien déposés en constituant la partie affouillable du lit de la rivière. Si la capacité de transport de la rivière est supérieure à la charge solide, l'eau conservera un reliquat d'énergie qui pourra être utilisé au creusement du lit. Si au contraire, en un point du cours d'eau, la capacité de transport tombe en dessous de la charge, une partie des matériaux va se déposer (Roche, M., 1963).

Les matières arrachées au sol, par l'érosion continentale finissent par atteindre le réseau hydrographique.

On distingue plusieurs types de mobilisation:

- Mobilisation des matériaux grossiers.
- Le mouvement des débris, les plus grossiers est généralement discontinu et brutal. Il se fait sous forme, d'éboulement, de glissement en masse, de glissement à grain.
- Mobilisation des matériaux plus fins est liée essentiellement, au ruissellement superficiel. Ce ruissellement peut être concentré ou diffus.

En général, le transport solide est principalement réglé, par deux propriétés du cours d'eau:

- Sa compétence ; elle est mesurée, par le diamètre maximum, des débris rocheux que peuvent transporter le cours d'eau. Cette caractéristique est essentiellement en rapport avec la vitesse de l'eau. Les variations de la compétence, en fonction de la vitesse et la granulométrie du substrat ont été étudiées par Hjulstrom (figure. I.1).

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

La granulométrie des particules sédimentaires a donc une influence majeure sur leurs transports Hjulström (1935), leur diagramme montre la vitesse minimale, d'un courant nécessaire pour mobiliser, transporter et déposer des grains de quartz de granulométrie variable.

Dans la partie supérieure, de ce graphe (figure I.1), la portion de la courbe représentant l'érosion des particules moyennes à grossières (sable fin à galets). La vitesse du courant, nécessaire pour mobiliser les grains augmente avec leur granulométrie. Pour les particules fines, la courbe montre une augmentation de la vitesse du courant, avec la diminution de la granulométrie. Ce comportement paradoxal est la conséquence de la cohésion élevée, des particules fines, surtout liée à un effet électrostatique (Boulvain, 2004). La partie inférieure du graphe, montre la relation, entre la granulométrie des particules et la vitesse du courant, lors de leur dépôt.

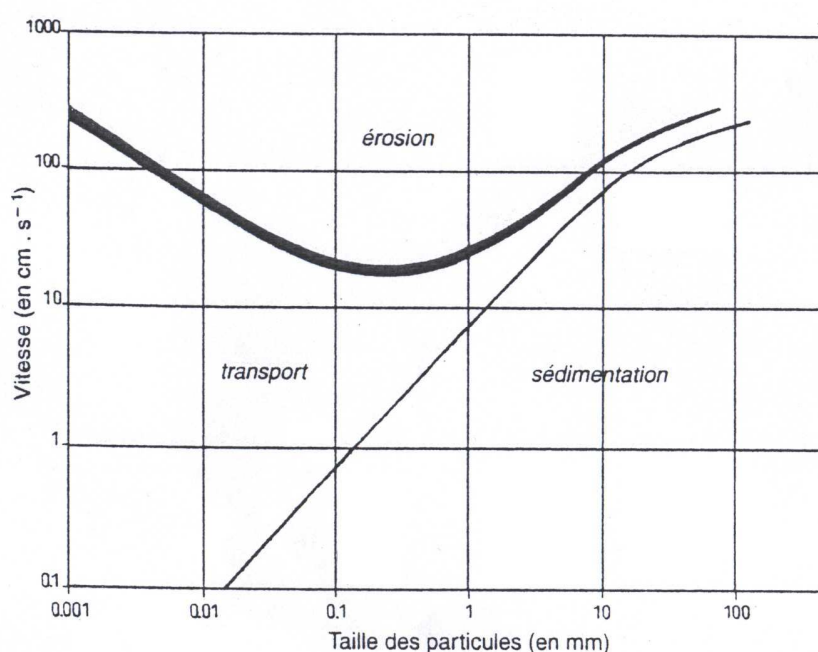


Figure I.1 Diagramme de Hjustrom (d'après Boulvain, 2004)

I.2 MODES DE TRANSPORT

Le transport total de sédiment, par l'eau, est l'ensemble de transport de particules solides qui se passe dans une section du cours d'eau (Graf, 1996).

On classe habituellement, le transport de sédiments, en différents modes, correspondant à des mécanismes physiques de base, relativement distincts. (Figures I.2, et I.3)

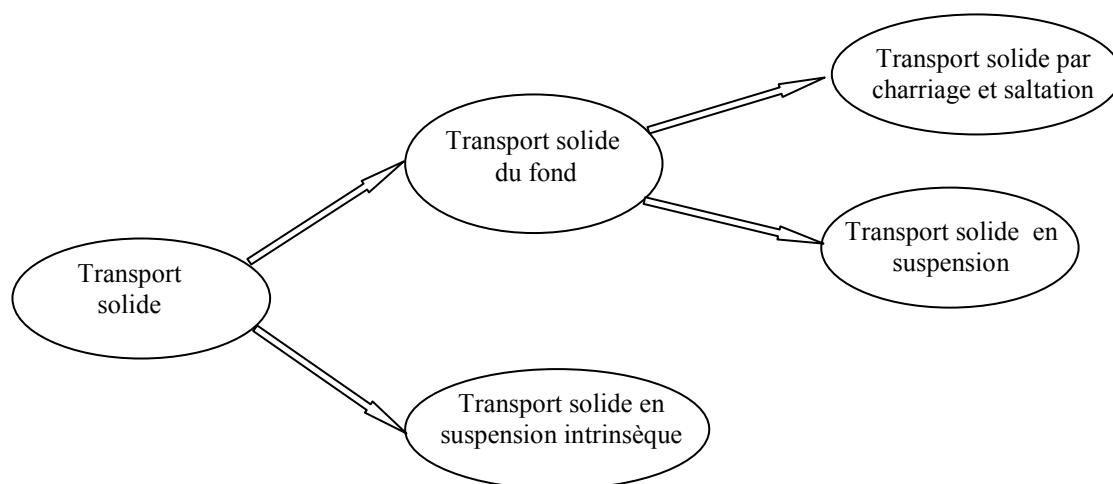


Figure I.2 Schéma de modes de transport des sédiments

Dans un cours d'eau, les sédiments sont transportés par:

- **Charriage** : le débit solide volumique, par unité de largeur. Si les particules restent, en contact étroit, avec le fond ; elles se déplacent en glissant, roulant ou sautant (brièvement): ce mode de transport concerne, les particules relativement grandes.
- **En suspension**: les particules restent occasionnellement, en contact avec le fond : elles se déplacent, par bonds (assez longs) et restent souvent, en trouées d'eau ; ce mode de transport concerne les particules relativement fines.
- **Charriage + suspension** : représentant le transport solide total du fond dont les particules sont, en contact plus ou moins continu avec le fond.
- **En suspension intrinsèque** : les particules ne sont jamais, en contact avec le fond. Elles se déplacent en étant employées par l'écoulement ; ceci concerne les particules relativement très fines.

Les particules en mouvement, par roulement, traction et saltation constituent la charge de fond, généralement formée de galets et de sable (figure I.3). La charge en suspension est surtout constituée, d'argile et de silt. La charge en suspension, des écoulements turbulents est beaucoup plus importante que celle des écoulements laminaires.

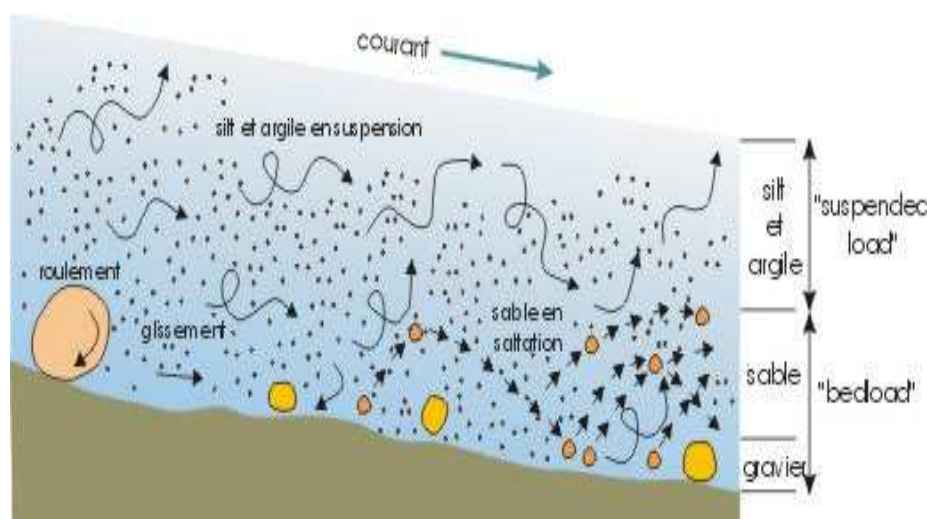


Figure I.3 Modes de transport des particules dans un courant (d'après Boulvain, 2004)

I.3 MOUVEMENT DES SEDIMENTS

I.3.1 Caractéristiques des sédiments

On peut distinguer les sédiments cohérents et non-cohérents. Les sédiments cohérents reposant, sur le fond ou dans les berges. Ils sont consolidés, par des liens électrostatiques ou chimiques qui opposent une résistance, aux forces d'érosion. Une fois en mouvement, cependant, ils perdent, dans une certaine mesure, ces liens et peuvent devenir non-cohérents, après avoir poursuivi leur mouvement. La taille des sédiments cohérents est en général inférieure à 0,06mm mais sans que cette limite soit précise. Les sédiments non-cohérents sont constitués, des particules, de plus grande taille dont les mouvements sont déterminés, par les propriétés physiques des particules et par les forces hydrodynamiques appliquées. Parfois le lit du cours d'eau est composé, d'un mélange hétérogène des deux types de sédiments (Unesco, 1986).

- Taille des particules

La taille des particules est, en rapport direct, avec l'aptitude à être transportés des sédiments. Les tailles vont d'un diamètre équivalent de plus de 2 mètres (très gros rocher roulant dans le lit des torrents de montagne) jusqu'à moins de 5×10^{-4} mm (argile très fine restant presque indéfiniment, en suspension, sans flocculer). Les sédiments d'origine naturelle sont de forme irrégulière et par conséquent définir la taille à une seule dimension est une simplification qui peut par fois être trompeuse. Les sédiments d'origine naturelle sont généralement composés des particules de taille variée qu'on peut caractériser, par une courbe de fréquence cumulée. La figure I.4, représente les courbes granulométriques, d'une série des sédiments et montre clairement que dans un cours d'eau, l'écart type des tailles, pour un sédiment grossier est plus grand que pour un sédiment fin (White et al., 1978).

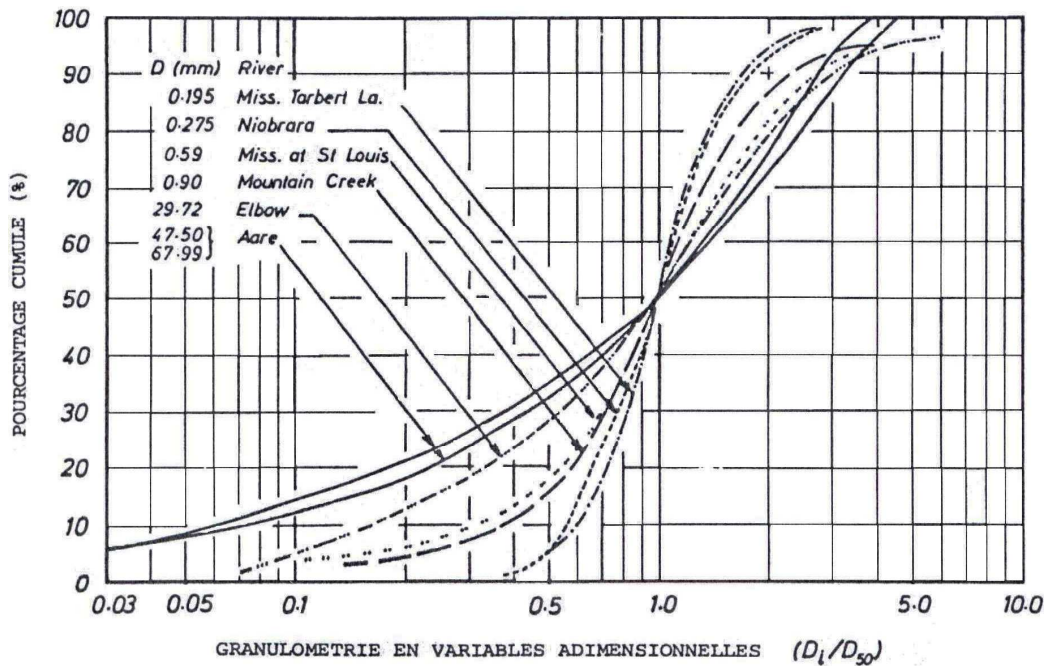


Figure I.4 Granulométrie en variables adimensionnelles (Wilte et al., 1978)

- *Forme des particules :*

Ce facteur a une influence sur le volume de transport solide.

Les particules de schistes ou d'ardoise, par exemple, reposent sur le fond, orientées, de façon, à offrir le minimum de prise au courant. Cela veut dire que, pour une telle particule, la force tractrice n'est pas la même que pour une particule plus arrondie de même volume, les caractéristiques du mouvement s'en trouvent modifiées.

- *Masse volumique de la particule:*

Le mouvement d'une particule dépend du rapport de la force tractrice au poids de la particule. La force tractrice dépend de la forme de la particule, le poids de cette dernière dépend de sa taille et sa masse volumique. La masse volumique a par conséquent un effet important sur le mouvement. Les sédiments naturels peuvent contenir des minéraux variés, les différences de masse volumique pouvant être appréciables. Il en résulte une sélection des particules et des effets d'érosion ou de dépôts différentiels.

Il est, parfois, indispensable de prendre en considération la densité apparente et la porosité des sédiments. Les dépôts récents, par exemple, dans les retenues peuvent présenter une grande porosité et une faible densité apparente, en comparaison avec ce qui est observé dans le bassin à l'amont de la retenue. La vitesse de chute est, très souvent, utilisée dans les méthodes de prévision des transports solides. C'est une propriété fondamentale du système eau/sédiment qui dépend de la taille, de la forme et de la densité de la particule, de la densité et de la viscosité de l'eau. Yalin, (1972) donne un graphique adimensionnel, (figure I.5) qui fournit la relation générale pour des particules sphériques. La forme des particules modifie cette relation et l'écart est très net, pour les grosses particules, ayant des vitesses de chute élevées (Graf, 1971; Romanovsky, 1972 et ASCE, 1975).

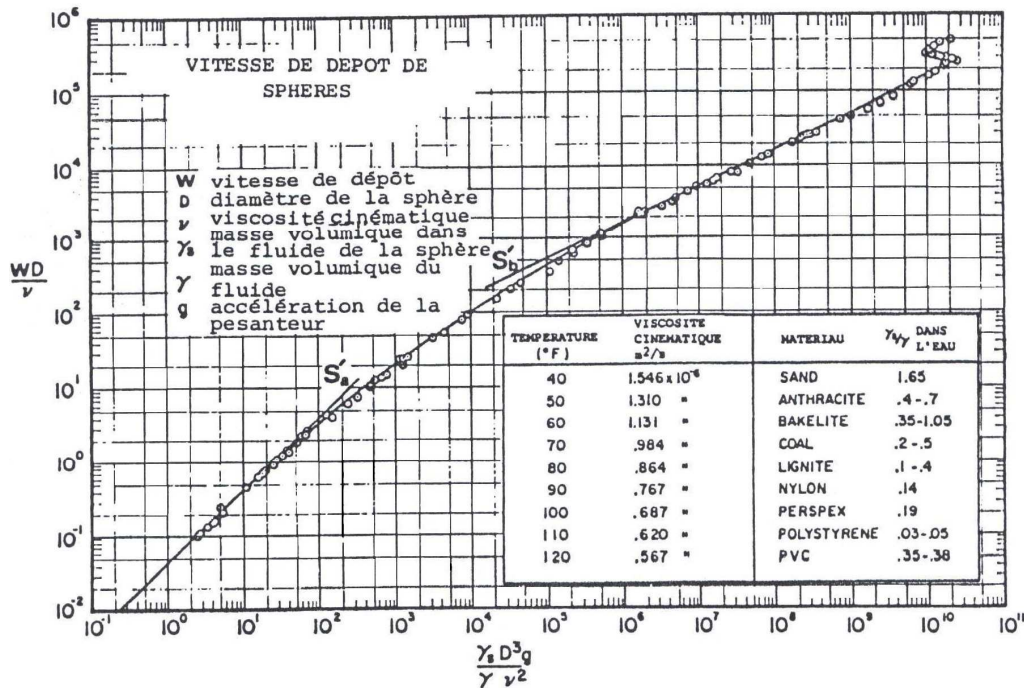


Figure I.5 Vitesse de dépôt des particules (Yalin, 1972)

Lorsque la vitesse du courant croit au-dessus d'un lit de matériaux granuleux non cohérents, il arrive un moment où quelques grains sont délogés par l'écoulement et se déplacent à petite distance dans le sens du courant. Ceci, bien que difficile à préciser, définit le seuil de mise en mouvement. Bien des auteurs ont décrit le phénomène comme Shields, 1936; Grass, 1970; White, S.J, 1970; Neill, 1976 et White, W.R, 1972, en s'appuyant sur les propriétés physiques des sédiments et les contraintes de cisaillement imposées. La figure I.6 représente, de manière commode, en variables adimensionnelles, les relations fonctionnelles obtenues.

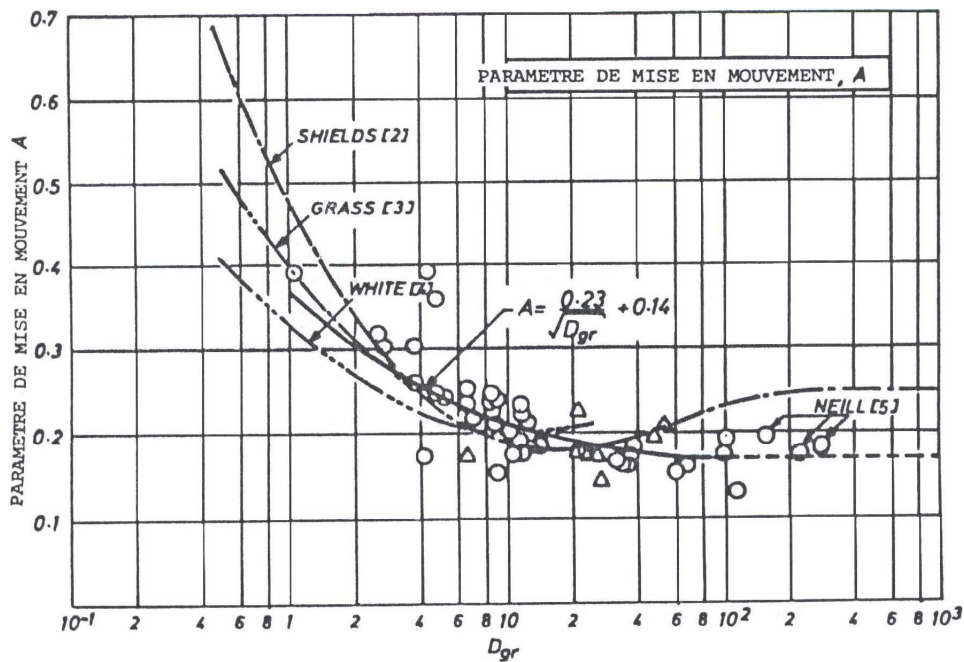


Figure I.6 Seuil de mise en mouvement. (d'après White, W.R, 1972)

I.4 TRANSPORT PAR CHARRIAGE ET SALTATION

I.4.1 Définition

On appelle transport solide par charriage et saltation, le mode de transport de sédiments où les particules roulent, glissent ou éventuellement par des sauts, par saltation, mais reste très proches du fond, ne quittant celui-ci que temporairement. Les particules se déplacent de façon intermittente ; le transport aléatoire de la turbulence joue ici un rôle important. La direction du mouvement est en gros parallèle, au fond et les accélérations verticales sont faibles. Ces particules qui se déplacent constamment, près du fond, à tout instant, constituent le transport de fond du cours d'eau.

4.1.1 La charge de fond

Une définition générale a été formulée par Einstein (1950) et reprise par de nombreux auteurs (Bagnold, 1966 ; Engelund et Fredsoe, 1976 ; Knighton, 1998) : la charge de fond correspond à l'ensemble des sédiments transit dans la couche de fond. L'épaisseur de cette dernière est d'environ deux fois le diamètre des sédiments constituant le fond de chenal (Einstein, 1950 ; Bagnold, 1966). Les sédiments de cette couche peuvent être déplacés, par charriage et saltation. Le charriage ne s'applique qu'aux sédiments non généralement incluse au charriage, ses limites (charriage-saltation et saltation-suspension) étant difficilement définissables (Frenette, 1996).

Les différentes thématiques, relatives à la charge de fond (quantification, mises en mouvement, équations) sont souvent menées, dans des organismes à charge de fond graveleuses (Meyer-Peter et Muler, 1948 ; Gilbert, 1975 ; Einstein, 1950 ; Acquers et White, 1973 ; Fernandez Luques et Van Beek, 1976 ; Ergenzinger et Conrady, 1982 ; Emmet, 1984 ; Robert, , 1996 ; Sear, 1996 ; Robert et al., 1997 ; Western et al., 1997 ; Haschenburger et Church, 1998 ; Ryan et Porth, 1999 ; Thompson et al., 1999 ; Carbonneau et Bergeron, 2000 ; Doyle et Shields., 2000 ; Garcia et al., 2000 ; Thompson et Hoffman, 2001 ; Zimmerman et Church, 2001 ; Racoszi et Szekeres, 2002. ; Fort et al., 2002 ; Surian, 2002).

La majorité des formules citées ne permettent pas évaluer la valeur réelle, mais la valeur maximale des quantités de granulats qu'un écoulement uniforme. Ces formules ne donnent pas, toujours, des bons résultats, pour des granulats de diamètre non uniforme.

Les méthodes actuelles, de calcul du débit solide, de transport par charriage et par saltation, reviennent à poser que ce débit dépend essentiellement, des éléments suivants : tension de frottement à la paroi, vitesse moyenne d'écoulement.

Les travaux, sur les organismes, à charge de fond sableuse sont moins nombreux (Golz, 1990 ; Guillen et al., 1992 ; Simon et Darrby, 1997 ; Van Den Berg et Van Gelder, 1998 ; Belaud et Paquier, 2000 ; Carling et al., 2000 ; Molilinas et Wu, 2001 ; Dinehart, 2002) et/ou concernant souvent les zones de transition entre la charge de fond graveleuse et sableuse (Jiongxin, 1996 ; Sambrook Smith et Ferguson, 1996 ; Kleinhans, 2001 ; Knighton, 1999a).

La granulométrie de la charge de fond décroît de l'amont vers l'aval, par trigranulométrique et /ou abrasion des particules. La part relative à chacun de ces processus reste encore contradictoire, selon les études comme souligne Surian (1999) et Knighton (1999b). Les apports d'affluents peuvent permettre l'accroissement local de la granulométrie, tout comme les extractions et l'incision des chenaux à l'aval des barrages modifiant alors les modèles d'affinements granulométriques (Surian, 1999).

Dans les organismes, à fond sableux et /ou mixte, il semble que les dunes hydrauliques jouent également un rôle essentiel, dans le transit sédimentaire (Kleinhans, 2001 ; Carling et al., 2000). Kleinhans (2001) a proposé un modèle conceptuel de l'organisation sédimentaire des dunes dans un lit à charge mixte (figure I.7) qui montre l'impact des plus fortes débits dans la structuration/déstructuration des formes, alors que les débits moindres entraînent des modifications uniquement à la surface des anciens dépôts. Les dunes hydrauliques peuvent être également entièrement sableuses comme celles observées sur le Rhin par Golz (1990) et Carling et al. (2000) où dans le Rhône deltaïque (Arnaud-Fassetta et al., 1996 ; Quisserne, 2000). Leur progression se fait par avalanche du matériel, sur la face avale, de la dune et se produit généralement durant les crues. Elles présentent, en général, un granoclassement vertical positif. Leur progression peut être rapide : les mesures de Carling et al. (2000) sur le Rhin montrent que les petites dunes peuvent se déplacer à la vitesse de 1 à 3 mm/s, les plus grandes migrent de 3 m/j. Les grandes dunes peuvent être surmontées des dunes plus réduites à la surface desquelles peuvent également se développer des rides. Dans le Rhône aval, l'auteur a observé une organisation à deux niveaux de dunes. Une investigation instrumentée, selon la méthode proposée, par Kleinhans (2001), permettrait une meilleure connaissance des formes deltaïques mais serait probablement perturbée, par la présence des mégaformes que constituent les seuils et mouilles qui jalonnent le fleuve.

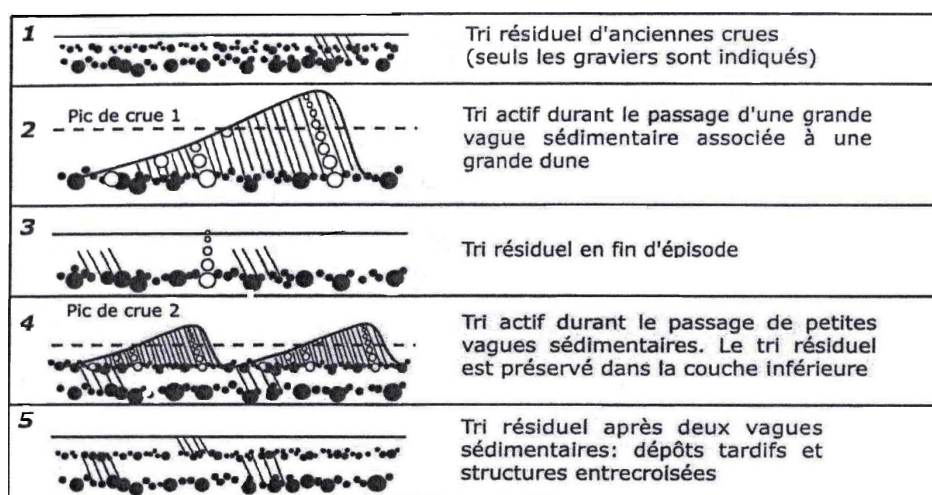


Figure I.7 Modèle d'évolution de forme et du lit du tri granulométrique de dunes mixtes (graviers-sables) en Kleinhans, 2001).

La mise en mouvement de la charge de fond est classiquement déduite, par la vitesse critique d'érosion, introduite par Hjulstrom (Petit et al., 2000). Cependant, Bravard et petit (1997) émettent quelques réserves quant à son utilisation, en raison notamment de la mauvaise définition des paramètres à utiliser. De plus, il semble que les valeurs de vitesses critiques mesurées postérieurement soient inférieures à celles déduites des courbes de Hjulstrom.

Petit et al. (2000) notent que la notion de contrainte critique (ou force de cisaillement critique, notée τ_c) est actuellement, en plein essor, en géomorphologie fluviale. Lorsque la contrainte de cisaillement au fond exercée, par le fluide (τ_0) est inférieure à la force tractrice critique de mise en mouvement des sédiments (τ_c), il y a immobilité du matériel. Dans le cas contraire ($\tau_0 > \tau_c$), il y a une mise en mouvement des sédiments (Leopold et al., 1964 ; Frenette, 1996 ; Bravard et Petit, 1997 ; Knighton, 1998). La force tractrice critique, des sédiments grossiers, peut être déterminée à l'aide du diagramme de Shields (figure I.8) bien que des modifications aient été apportées, en fonction de la densité des matériaux (Millier et al., 1977) et que des expériences en milieu naturel, montrent des limites différentes (citées par Bravard et Petit, 1997). Frenette (1996) a longuement décrit les conditions de mise en mouvement de la charge de fond. D'après l'auteur, sa mise en mouvement dépend des caractéristiques du matériel de fond (taille, forme, densité) ; des effets intergranulaires (granulométrie, arrangement au fond, également mis en évidence par Petit (1987-1989), des forces hydrodynamiques moyennes et des fluctuations turbulentes de l'hydrodynamique. Pour les sédiments sableux, on peut retenir la relation $\tau_c = D$ comme le suggèrent Leopold et al. (1964).

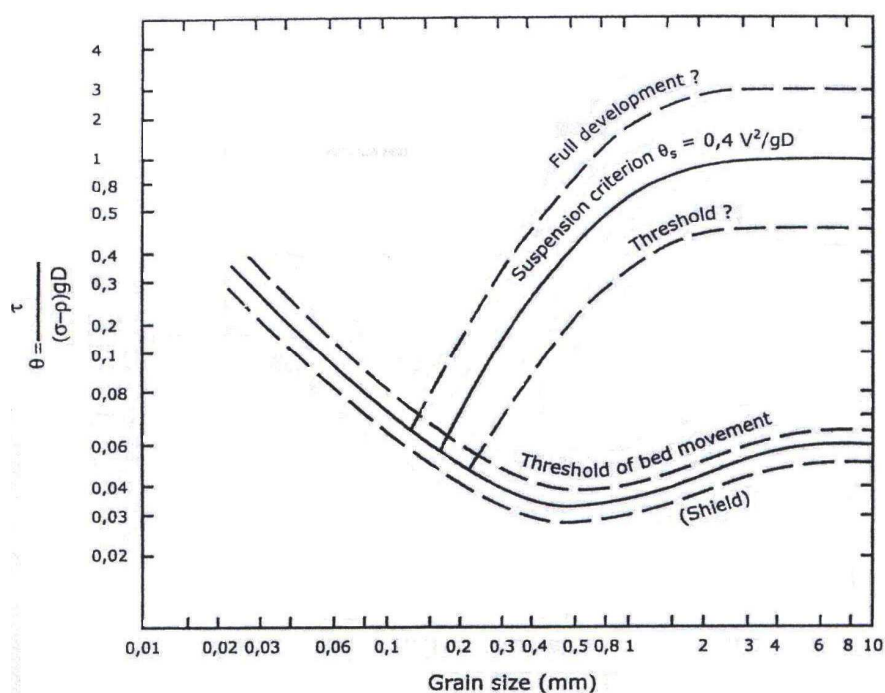


Figure I.8 Diagramme de Shields modifié par Bagnold (Bagnold, 1996)

Le second moyen de quantifier la mise en mouvement passe, par le calcul de la puissance critique, proposée, par Bagnold (1980) et dont la simplification mathématique aboutit à une relation (Petit et al., 2000) qui tient compte de la taille du matériel et la profondeur du chenal. Néanmoins que cette équation repose sur des paramètres moyens (profondeur, diamètre) aboutissent à une approximation des vitesses critiques de mise en mouvement. Les mesures en milieux naturels s'éloignent, en effet, les unes des autres, selon les caractéristiques géomorphologiques des organismes étudiés (Petit et al., 2000).

I.5 TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

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

Les matières solides, en suspension, sont des fractions de grains très fins qui sont transportés, essentiellement, en suspension. Ils peuvent se déposer, seulement, dans un grand réservoir où la vitesse peut être considérée comme nulle. Les dimensions des matières solides en suspension, sont en général, inférieures à 1,0 mm. Elles sont transportées, essentiellement, de la région où le cours d'eau prend sa source. Le transport en suspension est le processus dominant du transit sédimentaire, puisqu'il représente 90 % de la charge totale transportée, annuellement, des fleuves vers les océans (Milliman et Meade, 1983). La figure I.9, définit les conditions dans lesquelles il se produit un transport en suspension en tenant compte des forces de cisaillement et des forces de gravité (Bagnold, 1956, 1966) et aussi de la vitesse d'arrachement par rapport à la vitesse de chute (Einstein 1944).

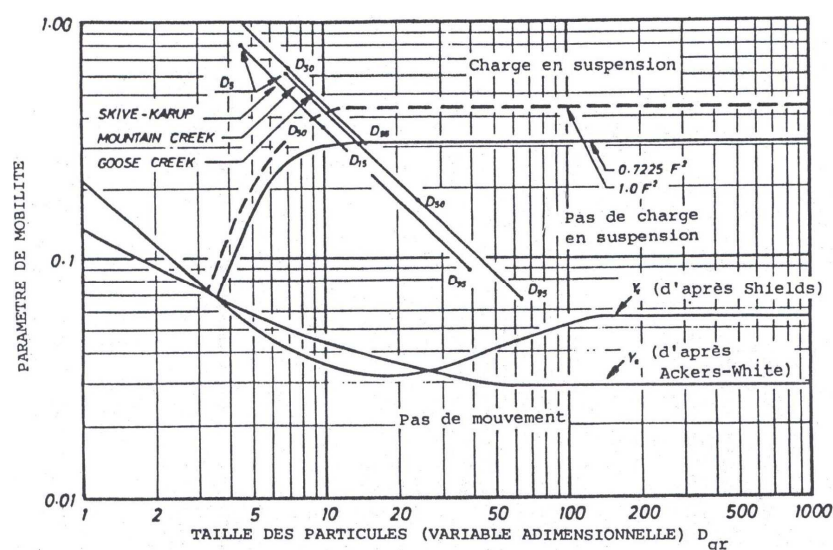


Figure I. 9 Critère de suspension des sédiments

Les travaux de Abbot et Francis, 1977, montre qu'il ya une suspension des sédiments lorsque le flux présente énormément d'énergie, c'est-à-dire lorsque la vitesse du flux est nettement supérieure aux conditions critiques de mise en mouvement (Figure I.10).

Remarquons que la mise en mouvement des particules d'un diamètre donné se fait au-delà d'un seuil critique.

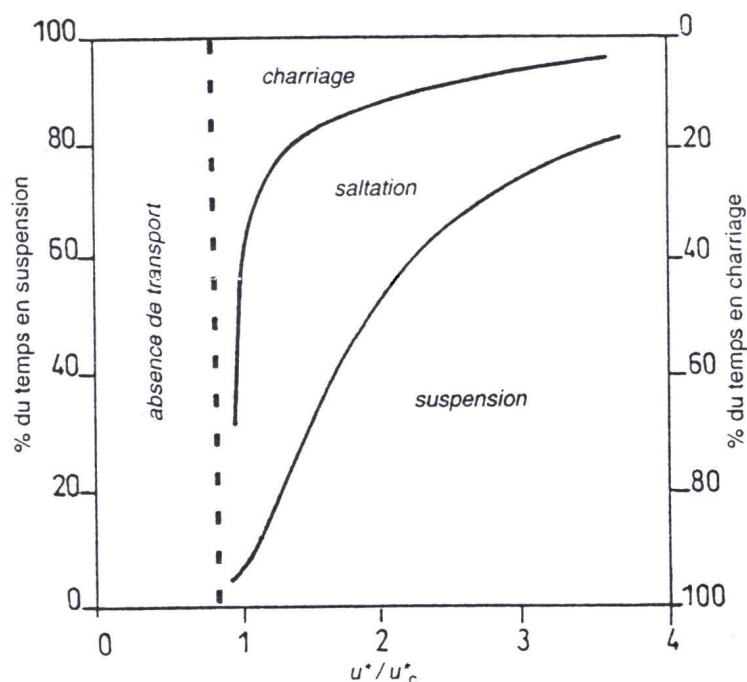


Figure I.10 Pourcentage du temps quand des particules progressent, selon différents modes de transport, en fonction de l'intensité de flux (d'après Abbot et Francis, 1977)

La mesure et la caractérisation des matières en suspension (MES) en transit ont fait l'objet de multiples études (Asselman, 1999 ; Corbonnois, 1991, 1998 ; Golz, 1990 ; Gomez et al., 1993 ; Green et al., 1999 ; Klein, 1982, 1984 ; O'Riordan et al. 1996 ; Owens et Walling, 2002 ; Picouet et al., 2001 ; Restrepo et Kjerfve, 2000 ; Rondeau et al., 2000 ; Serrat et al., 2001 ; Van Wilgaarden, 1999 ; Walling et al., 2000 ; Martin, 2003 ; Antonelli, 2002).

Notons, aussi, l'étude de Gomez et al. (1993) qui ont pu évaluer la charge en suspension, par analyse d'images satellites, pour une crue importante du Mississippi ($Q = 12320 \text{ m}^3/\text{s}$) ; récurrence supérieure à 100 ans). Là, encore, les données ont été calibrées, grâce à des prélèvements des matières en suspension. Cette technique qui entraîne, certainement, une image d'erreur sur l'estimation globale est néanmoins intéressante, dans la mesure où, elle permet d'obtenir une distribution spatiale en 2D des matières en suspension en crue. Son application aux cours d'eau algériens pourrait être envisagée pour estimer les flux des événements, les plus intenses, le cas du bassin Rhumel et Soummam, pendant lesquels les mesures sont difficiles à réaliser (vitesses de courant élevées, soudaineté de l'événement).

Les estimations annuelles sont, ensuite, établies en appliquant la concentration ainsi calculée à la chronique des débits journaliers. On notera cependant que la relation n'est valable que pour le cours d'eau le quel elle a été établie et sur la gamme des débits liquides sur laquelle les mesures ont été effectuées. On tiendra également que bien que significatives ces relations sont parfois difficilement applicables aux débits les plus élevées. Par exemple, en réexaminant les données proposées par Restrepo et Kjerfve (2000) sur le fleuve Magdalena (Colombie, 257 000 Km², débit moyen annuel de 7200 m³/s), on peut constater que la relation, bien que significative ($R^2 = 0.76$) peut être en fait séparée en deux ensembles. En deçà de 7500 m³/s, la relation débits-MES semblent satisfaisante, tandis qu'au-delà de 7500 m³/s, le nuage de point est très dispersé. Les auteurs ne mentionnent cependant pas cette anomalie dans leur analyse qui pourrait être liée à la variabilité, des apports solides et des crues qui affectent ce vaste bassin versant.

La distribution spatiale de la charge en suspension dans le chenal dépend, en partie, de la granulométrie des sédiments. Einstein (1950) et Bagnold (1966) indiquent que celle-ci ne peut se maintenir, en suspension, que par la présence de turbulence dans l'écoulement.

Depuis le fond de chenal, Passega (1963), Bravard et Petit (1997), Knighton (1998) décrivent une suspension graduée qui correspond à un gradient de concentration et de granulométrie décroissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne du fond. Passega (1963) indique que cette suspension graduée atteint jusqu'à 20 mètres de hauteur sur le Mississippi.

Au-dessous de cette couche, se développe la suspension uniforme, dans laquelle les concentrations, en sédiment, se répartissent uniformément sur la section. Le matériel transporté est essentiellement composé de limons et d'argiles (Shumm, 1977; Bravard et Petit, 1998, Knighton, 1998). En période de faible hydraulité et en l'absence de suspension graduée, la suspension uniforme se développe, sur l'ensemble de la colonne d'eau.

Cependant Passega (1957) a également démontré que dans les organismes turbulents, les tailles des MES prélevés en flux ne s'organisent pas en fonction de la profondeur.

D'autre part, Walling et al. (2000) ont montré que la granulométrie ne semblait pas entretenir de relation directe avec le débit des rivières Tweed et Humber (Angleterre) bien que des tendances d'évolution parallèle aient été mises en évidence. Selon ces auteurs, la granulométrie des MES est davantage contrôlée, par la diversité lithologique du bassin versant, par les capacités de production sédimentaire du bassin versant et par la taille des sédiments stockés sur les berges et dans le chenal que par les débits et les paramètres hydrauliques du chenal (Walling et al., 2000). Ils constatent néanmoins que les crues permettent l'arrivée massive de sédiment plus grossier, notamment pendant la phase de montée des eaux. Ceci est confirmé par de nombreux auteurs (Corbonnois, 1991, 1998 ; Asselman, 1999 ; Restrepo et Kjerfve,

2000 ; Picouet et al, 2001). Notons également que Klein (1984) met en évidence des phases de décrue plus chargées que les phases de montée des eaux. Cependant, ces phénomènes ont essentiellement été observés, dans de petits bassins-versants. Dans le travail de Antonelli, 2001, les mesures ont montré l'existence d'une organisation spatio-temporelle, des flux de MES, contrôlée par la valeur de débit, la morphologie des sites étudiés, la phase de la crue et l'origine des masses d'eau.

I.6 MODELES DE LA CHARGE SEDIMENTAIRES

Un certain nombre des modèles ont été proposés par les chercheurs pour tenir compte des changements temporels de la charge sédimentaire. Les modèles donnent de bons résultats pour des courtes périodes (Morehead et als, 2003), mais peu de modèles ont été appliqués et testés, sur une variété des rivières pour des longues périodes. Morehead et als, (2003) ont choisi deux rivières pour tester un certain nombre de modèles proposés. La plupart des modèles de sédiments en suspension s'appuient sur l'estimation de l'équation standard des sédiments relative à la concentration de sédiments en suspension (C) et au débit d'écoulement (Q) à travers une équation de loi de puissance:

$$C = aQ^b \quad 1$$

Où a est le coefficient d'estimation ([masse de sédiments/volume d'eau]/[volume de l'eau/temps de l'eau]^b) et b est l'exposant d'estimation adimensionnel.

Le coefficient (a) est la concentration de sédiments mathématique à l'unité de débit.

L'exposant (b) est la pente de la droite relative aux paramètres, concentration de sédiments en suspension (C) et débit d'écoulement (Q) dans une échelle log-log, représente la force de la relation puissance.

La variabilité de la charge sédimentaire provient d'un part des erreurs de mesure, mais dans la plupart du temps, elle est due à la variabilité naturelle de la rivière. L'équation Standard d'estimation est couramment utilisée, et contient un nombre minimum des paramètres pour caractériser les séries chronologiques de la charge de sédiments en suspension.

Bogardi, en 1974 suggère que l'exposant (b) et la constante (a) reflètent les caractéristiques du bassin versant, alors que Vanoni, (1977) considère que la constante (a) représente un indice d'érodabilité du sol.

Étant donné que de nombreuses rivières ont des concentrations plus élevées de sédiments, sur la partie montante d'une crue, par rapport à la partie de décrue (hystérésis dans le sens des aiguilles d'une montre), il est préférant d'améliorer l'équation d'estimation des sédiments, par un facteur de correction en utilisant la première différence de débit avec le temps (Willis et al, 1996; Richards, 1984). La méthode de la première différence utilise l'équation d'estimation modifiée :

$$C = aQ^b(c \, dQ/dt) \quad 2$$

L'approche de la première différence utilise trois paramètres (a, b, c) et peut fournir une amélioration dans les valeurs prédites, sur des courtes périodes (Willis et al, 1996; Richards, 1984). Le Test de ce modèle, avec les données historiques des rivières de Liard et Eel sur de longues périodes (plusieurs décennies) n'a pas montré une amélioration par rapport à l'équation de l'estimation Standard ((Morehead et als, 2003).

Moog et Whiting (1998) ont remarqué une hystérésis, dans les courbes d'estimation de la charge de lit (charriage), sur un ensemble de cours d'eau dans l'Idaho, avec un épuisement de la charge sédimentaire apparente à la suite de la première crue majeure de la saison, appelée crue de seuil. La crue de seuil a été définie, par le temps de rinçage de la première pulsation à la charge de fond. La crue de seuil a été jugée d'être supérieure au débit moyen annuel et environ un tiers de débit à plein bord de ces rivières. Moog et Whiting ont défini le modèle de la crue de seuil à l'aide de deux ensembles de paramètres d'estimation Standard (Equation (1)), une série avant le seuil de la crue et une autre après l'évènement.

La reconnaissance que l'épuisement des sédiments, dans le chenal de la rivière, peut se produire d'une façon quasi-continue à travers une saison d'écoulement. Moog et Whiting (1998) pour dériver un modèle, en utilisant la variation saisonnière de débit (ΣQ). Cette méthode est similaire à la méthode du seuil, mais elle prend une diminution plus progressive de l'épuisement des sédiments dans le chenal, par rapport à la méthode de la crue de seuil. Le modèle de débit calculé contient trois paramètres:

$$C = aQ^b \cdot (\Sigma Q)^c \quad 3$$

Van Sickle et Beschta (1983) et Beschta (1987) dérivent un modèle qui tient compte du stockage des sédiments dans le réseau de chenal en période d'étiage et de son épuisement ultérieur au cours des événements de la plus grande crue. La forme standard de l'équation d'estimation a été utilisée avec une fonction stockage/lessivage (G(S)).

$$C = aQ^b \cdot G(S) \quad 4$$

Empiriquement, Van Sickle et Beschta à mentionné que la fonction de lessivage prendre une forme exponentielle, il a choisi:

$$G_s = p \cdot \exp(r \cdot S/S_0) \quad 5$$

Où S_0 est le sédiment total disponible, p et r sont des paramètres dérivés empiriquement. Les Équations (4) et (5) peuvent être combinées pour décrire la concentration des sédiments dans une rivière, à travers le temps et l'approvisionnement des sédiments peut être déterminé de l'équation :

$$dS/dt = -Q/Cs \quad 6$$

Cette méthode a été utilisée par la résolution itérative pour l'approvisionnement initial des sédiments pour chaque événement d'orage (pluviaux) qui conviennent mieux à la charge de sédiments en suspension.

Pour que cette méthode soit utilisée, dans les bassins non jaugés, les algorithmes pour calculer l'apport des sédiments vers le chenal et la détermination des coefficients p et r seraient nécessaires.

Une méthode utilisée par Syvitski et al., (1998) sépare les coefficients de classement pour chaque source de débit d'eau :

$$Q_s = a_n Q_{\text{nival}}^{\text{bn}} + a_r Q_{\text{pluie}}^{\text{bp}} + a_i Q_{\text{glace}}^{\text{bg}} + a_g Q_{\text{eau souterraine}}^{\text{bes}} \quad 7$$

Où le débit solide (Q_s) est la masse des sédiments déplacés par unité de temps ; il est égal au débit liquide multiplié par la concentration des sédiments (Q_c). Cette méthode fonctionne bien, dans les modèles numériques où les sources sont clairement définies (Morehead, 2003), mais il est difficile de l'utiliser avec des données mesurées, puisque les sources de débit (écoulement) ne sont pas clairement séparables. Un des points forts de ce modèle, c'est la simulation de l'effet d'hystérésis du paramètre débit-concentration de sédiments en suspension à travers une saison d'écoulement.

I.7 TRAVAUX EFFECTUES EN ALGERIE

Plusieurs recherches ont été entamées, en Algérie, dont celles de Tixeront (1960) qui, travaillant sur 32 bassins versants algériens et 09 tunisiens, les résultats obtenus montrent que la concentration en éléments fins augmente quand le ruissellement et la nature de la roche à son impact sur l'érosion, les terrains jeunes fournissent des taux d'abrasion importants. Capolini (1965-1969), a élaboré une étude géomorphologique sur le bassin versant de l'oued Chélif et ses principaux affluents. Les résultats s'avèrent encourageants, en effet, il trouve une bonne corrélation entre la torrentialité et la géomorphologie en montrant une relation statistique entre l'érosion spécifique et la torrentialité du bassin versant.

Demmak en 1982 montre, que l'agressivité des pluies est faible en Algérie et par conséquent aussi, l'érosion pluviale. Il indique que la construction de banquettes anti-érosives et le boisement de grandes surfaces, qui étaient alors propagés dans toutes l'Algérie ont non seulement été un échec, mais été aussi une gêne pour l'agriculture et une accélération de l'érosion.

Sur 30 bassins versant au nord de l'Algérie qui représentent des différentes conditions physiques, géomorphologiques et hydrométéorologiques. Il définit une corrélation multiple très significative incluant plusieurs paramètres physiques pour un bassin versant côtier à très forte érosion, qui ne s'est avérée valable que pour les bassins versants telliens ayant un pourcentage marneux érodable supérieur à 10% et une pluviométrie moyenne annuelle qui dépasse les 300 mm. Il a prévoie, que l'apport de sédiments dans le barrage El Ibtissam sur l'oued Deurdeur est de l'ordre de six (06) Millions de m^3 .

Meddi, en (1992) montre qu'on peut déterminer les zones de plus forte ablation, de manière satisfaisante, par les démarches de type boîte noire. La méthode qu'il préconise se prête à la délimitation générale, des zones fournissant beaucoup ou peu de sédiments en suspension. En 1998, le même auteur présente un travail sur l'Afrique du Nord (pays du Maghreb Arabe). Il a développé des modèles liant la dégradation spécifique au débit liquide moyen annuel et la superficie. Les résultats obtenus sont satisfaisants. Les erreurs sur l'estimation de la dégradation spécifique, pour les dix (10) stations, sont inférieures à 10%.

Une approche adoptée, dans le travail de Touaibia, et al., en (1999), sur la quantification de l'érosion à plusieurs échelles spatiales. Dix parcelles expérimentales appartenant à trois micro-bassins expérimentaux ont été étudiés ; les résultats montrent la bonne corrélation entre les débits solides et les débits liquides quelque soit l'échelle spatiale considérée. D'une manière générale, l'érosion varie proportionnellement au ruissellement, pour les années de mesures considérées. L'auteur montre que l'approche mensuelle (Touaibia, et al., 2001) avec un modèle en loi de puissance reste le plus significatif expliquant en moyenne 80% de la variation totale.

Terfoud, et al., en (2001) ont permis, lors de l'analyse graphique des valeurs instantanées, des débits solides en suspension, en relation avec, le débit liquide dans l'oued Mouilah au Nord Ouest de l'Algérie de montrer l'existence de deux périodes d'érosion actives, une première période en Automne, la seconde, à plus faible ampleur, au Printemps.

Lefkir, A et als, (2006) ont décrit dans leurs travaux, une nouvelle méthode d'estimation de flux des matières en suspension (MES), au niveau du barrage de Béni-Amrane. Cette méthode est basée sur la technique floue tels que (faible, moyenne et élevée), pour décomposer le processus de débit MES en plusieurs sous ensemble flous et déduire les quantités des matières solides en fonction du débit observé de la rivière. Le modèle flou a donné des résultats performants au pas de temps horaire et journalier et peut être exploité dans la quantification et le suivi de l'envasement des barrages Algériens.

Remini dans beaucoup de travaux, sur le transport solide et l'envasement des barrages (Remini, B., 1995, 1996, 1997, 1999 et 2002) à montrer la gravité de se phénomène en Algérie et leur conséquence sur les retenues et les digues des barrages. 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. Cette sédimentation pose d'énormes problèmes à savoir: la réduction de la capacité, l'obturation des organes de vidange, la sécurité de l'ouvrage, la sédimentation des canaux d'irrigation et elle a même un impact, sur la qualité de l'eau (Remini W et Remini, b 2003).

I.8 CARACTERISTIQUES DE LA RELATION CONCENTRATION EN SEDIMENTS EN SUSPENSION-DEBIT LIQUIDE

Les problèmes posés, par la mesure du transport en suspension de part leur nature, incitent les hydrologues et les hydrauliciens à s'intéresser à l'étude des variations de C et Q au cours d'une crue.

En effet, la nature complète du phénomène de crue, la conception de nouveaux échantillonneurs et de nouvelles techniques de mesure, ainsi que les difficultés rencontrées, lors des mesures par les observateurs, sont les éléments clés de cet intérêt.

Dans les petits cours d'eau, les concentrations de sédiments en suspension sont directement liées au débit. Les concentrations de sédiments en suspension augmentent, généralement, très rapidement pendant les montées des crues, produisent une pointe avant le débit maximal puis diminue plus lentement pendant la crue. Autrement, le débit liquide et la concentration instantanée de 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 a différentes valeurs à des débits identiques est l'effet d'hystérésis (Benkhaled, 2001).

La figure (I.11) Montre le caractère cyclique de la relation C-Q. Trois périodes peuvent être distinguées, dans cette boucle:

- a) La première période est caractérisée par, une forte augmentation de la concentration de sédiments en suspension et du débit. Cette phase est définie, par l'arrivée successive des premières quantités de matériaux en suspension produites essentiellement par l'effet « splash » des pluies érosives, dans les zones de ruissellement proche de l'exutoire du bassin. Cette période peut aussi correspondre à la remobilisation des matériaux déposés, sur le fond, lors des basses eaux (Kattan et al., 1987).
- b) La seconde période est caractérisée, par une diminution de la concentration de sédiments en suspension et une forte augmentation du débit. Cette phase de transport correspond à la dilution de la concentration des sédiments et peut également être attribuée à l'érosion des berges du cours d'eau (Kattan et al., 1987 ; Dinehart, 1992).
- c) La troisième période est caractérisée, par une diminution de la concentration de sédiments en suspension et du débit. Cette phase correspond au dépôt des matériaux sur le lit des cours d'eau et dans les zones alluviales du bassin.

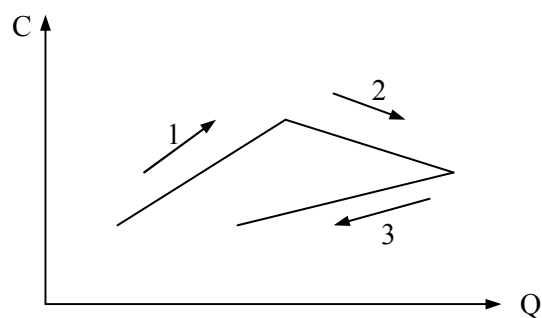


Figure I. 11 Modèle de relation C-Q 1 : érosion ; 2 : transport ; et 3 : dépôt

Ce chapitre est basé sur les travaux de Williams, G.P., 1989. Selon lui, les relations entre les concentrations de sédiments en suspension C et les débits liquides Q pour un événement hydrologique telles que les crues, peuvent être étudiées qualitativement, par l'analyse des courbes de 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 durant les phases de montée de crue et de décrue. Cinq modèles de relations sont, ainsi établis (tableau I.1 et figure I.12).

Plusieurs facteurs, affectent les relations C-Q. L'intensité des précipitations et leurs distributions spatiales, volume et vitesse d'écoulement, les distances parcourues des eaux des crues dans le cours d'eau principal.

La concentration des sédiments, à travers une section, affecte la mobilisation continue, le stockage et la diminution spatio-temporelle des sédiments disponibles. Les sédiments transportés proviennent, du lit et des berges, par érosion ou glissement et des affluents tributaires. Le matériel du lit transporté en suspension à la station de mesure peut être influencé, par les volumes, la hauteur, la puissance des crues précédentes, le pouvoir du courant à passer tout obstacle et par le couvert végétal qui peut retenir ou relâcher les sédiments. Les sédiments provenant des versants peuvent venir des terres, par ruissellement. Dans certains endroits l'homme joue un rôle important, dans la production des sédiments par ses pratiques culturales.

La forme des courbes de concentration et celle de la relation C-Q 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.

Parmi d'autres considérations sont impliqués, le temps et la vitesse d'entraînement des sédiments relative par rapport à la vitesse du mouvement de l'eau.

Dans le tableau (I.1) présenté ci-dessous, montre probablement la majorité des boucles d'hystérésis relevées, à travers les différentes recherches effectuées, dans plusieurs bassins du monde.

Les effets de la combinaison des différents paramètres statistiques (mode, aplatissement et asymétrie) peuvent constituer une approche adimensionnelle et qualitative beaucoup plus importante que les méthodes avec calculs détaillés (Benkhald, 2001).

Dans cette caractérisation, les parties montées et décrues représentent les deux zones de base pour l'analyse des classes d'hystérésis. Le critère rapport C-Q, est un critère simple, objectif et fiable. Il est considéré comme étant le premier critère de base.

Tableau I.1 Type de boucles d'hystérésis (d'après Williams, 1989)

Type de classe	Forme de boucle	Rapport C/Q	Référence auteur
1a	Ligne droite	Rapport C/Q de la montée gal à celui de la décrue	Wood (1977)
2b	Sens des aiguilles d'une montre	Rapport C/Q de la montée supérieur à celui de la descente, pour toute valeur de Q	Paustian et Beschta (1979)
3c	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)
4d	Linéaire simple plus une boucle	a)- Rapport C/Q de la montée \approx à celui de la descente pour une partie des valeurs de Q b)- Rapport C/Q de la montée \gg à celui de la descente pour une autre partie des valeurs de Q	Williams (1989)
5e	Forme de huit	a)- Rapport C/Q de la montée, supérieur à celui de la descente, pour une partie des valeurs de Q. b)- Rapport C/Q de la montée, inférieur à celui de la descente, pour une partie des valeurs de Q.	Arnborg et al (1967)

a)- Modèle Classe I, de la courbe simple, la relation C- Q_t la plus simple est du type linéaire, dont l'unique caractéristique est que le rapport C/Q, lors de la montée de la crue est le même que celui lors de la décrue. Trois sous groupes découlent, dans ce type de modèle (figure I.12 ; a, b et c) : la ligne droite, la ligne à concavité vers le haut et la ligne à concavité vers le bas. Dans le premier cas, elle pourrait être associée à un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Wood, 1977). Ce modèle indique aussi que les concentrations de sédiments en suspension doivent augmenter ou diminuer en parfaite synchronisation avec le débit liquide. C'est que les courbes

doivent avoir des pics simultanément, avec des largeurs et des pentes semblables (coefficient d'aplatissement et d'asymétrie identique). L'apport continu des sédiments pourrait s'étendre même au delà de la courbe des débits ou descendre sous celle-ci.

On peut concevoir la même chose pour résulter des facteurs qui influencent l'entraînement des sédiments (taille des particules).

b)- Modèle classe II, de la boucle dans le sens des aiguilles d'une montre ou peut être due à deux causes principales.

- A un épuisement de la couche de sédiments disponible avant le maximum du débit (Arnborg et al., 1967; Walling, 1974; Wood, 1977; Wansickel et Beschta, 1983). L'épuisement ou la diminution des sédiments peut s'expliquer soit, par un petit apport disponible, soit par un débit continu et/ou intense.
- Le deuxième postulat consiste en l'existence d'une couche de pavage formé, sur le lit de l'oued antérieurement à la crue. (Arnborg et al. 1967).

Le sens des aiguilles d'une montre a tendance à se produire plus, au début de la saison des pluies, d'après (Sidle et Campbell, 1985). Ceci est lié à la disponibilité, des sédiments, produits, par les crues précédentes, comparés à un manque ou à une diminution, des réserves en sédiments à la fin de la saison sèche.

Selon, Heidel (1956), dans les petits cours d'eau, la concentration maximale des sédiments se produit habituellement avant le débit maximum.

Le modèle représenté dans la figure (I12 ;d) est le plus répandu et le plus étudié (Leopolds et Maddok, 1953; Sundborg, 1956) ; Wood, 1977, Paustian et Brchta, 1979). 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.

Ce schéma classique des hystérésis ne se répète cependant pas lors de toutes les crues. L'hystérésis peut être inverse (figure I12 ;e). Le pic de la concentration arrive après celui du débit. Les valeurs de la concentration dans la partie de montée sont inférieures à celles de la décrue. Cette forme est peu connue et peu de travaux ont été publiés (Benkhaked, 2001).

L'hystérésis type des aiguilles d'une montre, peut se produire également lorsque les deux pics (C et Q) arrivent simultanément et donne une autre forme de boucles (figure I12 ;f).

Les différences croissantes, en ce qui concerne, l'envergure des graphiques chronologiques peuvent affecter la boucle C-Q et donner une forme asymétrique (figure I.12 ;g).

c)- Modèle classe III, en boucle, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, 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 $(C/Q)_m < (C/Q)_d$. La disposition chronologique des données se présente, comme une boucle, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

La boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre est peu connue et peu de travaux ont été publiés (Heidel, 1956 ; Péter et al, 1997). D'une manière générale, les crues de cette classe sont caractérisées, par une courte période, lors de la montée par rapport, au temps de concentration du bassin et une forte concentration des sédiments.

Les boucles dans le sens contraire des aiguilles d'une montre résultent au moins de trois causes (Williams, 1989).

- Une des causes possibles, est le temps de parcours de l'onde relatif à la crue et du flux des sédiments, en particulier, en tenant compte la distance entre la source de la crue et la station de jaugeage (Heidel, 1956). Les variations des débits tendent à suivre les vitesses de l'onde de crue. Cette vitesse est généralement plus rapide que la vitesse moyenne d'écoulement (Williams, 1989) puisque les sédiments en suspension tendent à être transportés, avec une vitesse proche de celle de l'écoulement moyen, le flux des sédiments à traîner derrière l'onde de crue. Aussi le temps de retard (latence) augmente, avec la distance en aval. Le retard du pic des sédiments à une station en aval se manifeste, au niveau des écoulements, dans un cours d'eau caractérisé par des irrégularités qui empêchent le mouvement des sédiments, par rapport à celui de l'eau.
- La deuxième cause rapportée des boucles dans le sens contraire des aiguilles d'une montre est l'érodabilité importante du sol en même temps que de l'érosion prolongée, pendant la crue (Kung et Chiang, 1977).
- La troisième cause est la variabilité de la distribution saisonnière des pluies et de la production des sédiments dans le bassin, la montée et la décrue annuelles de débit dans un cours d'eau à l'aval du bassin. (Shi et al., 1985)
- La quatrième cause est l'instabilité des rives et des lits des cours d'eau, lors des événements des crues. (Marouf et Remini, 2011).

d)- Modèle classe V, en forme de huit (8) ou « figure eight ». La diffusion jugée approximativement constante, la distribution des variables indique, qu'avec d'abord un maximum des concentrations en premier, on a souvent la formation d'une boucle dans le sens des aiguilles d'une montre. Toutefois, dans certaines conditions, se développe une boucle, en forme de huit, indépendamment des pics des variables. Les deux parties du huit sont dirigées séquentiellement, dans des directions opposées. Le

rapport C/Q pour différentes valeurs de Q explique l'orientation des courbes en fonction du temps sous une forme en huit pour les relations $C-Q$.

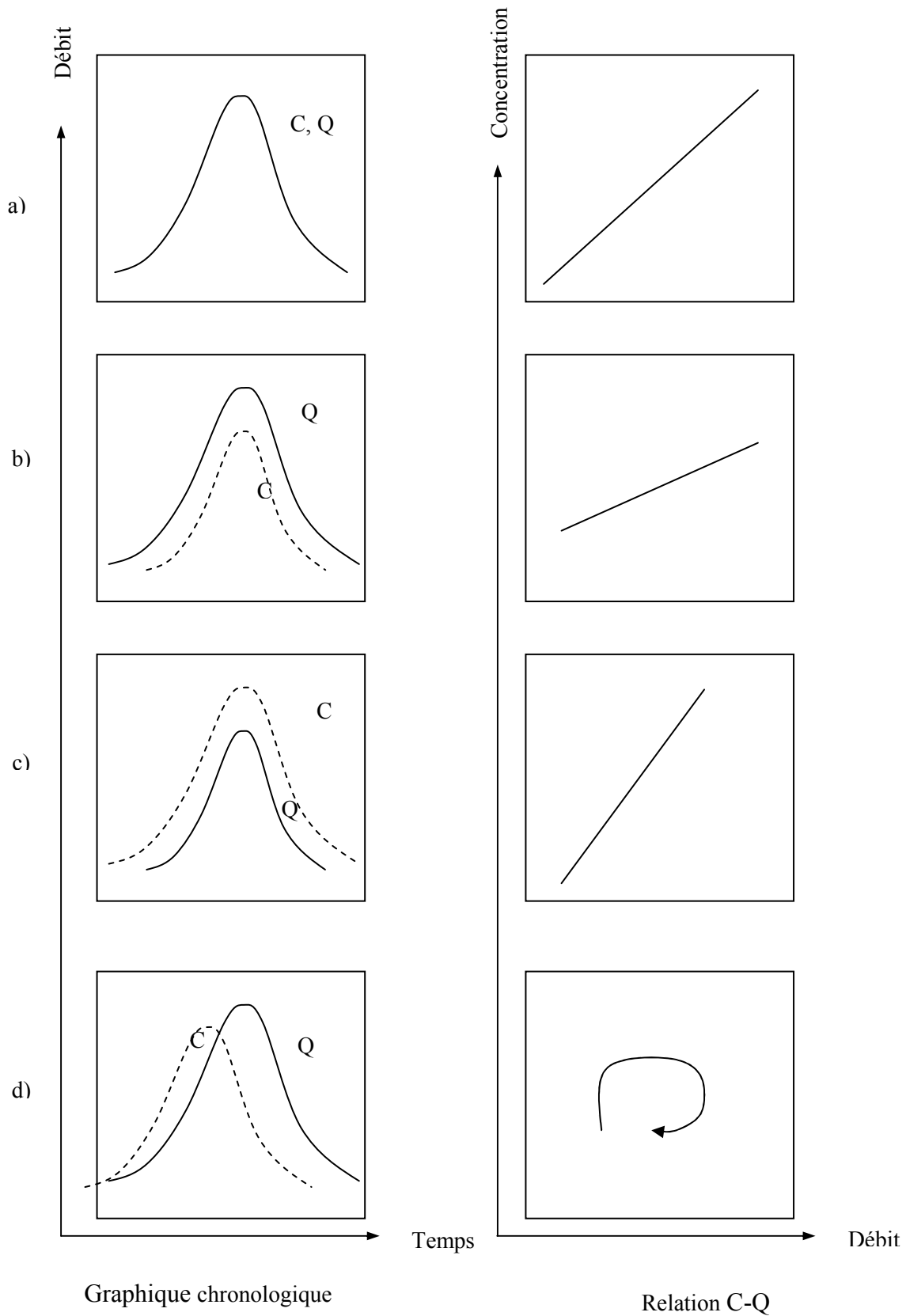
Pour les événements hydrologiques simples, les relations en forme de huit, n'ont pas reçu beaucoup d'explication.

La forme en huit de la classe V est une combinaison des parties de la classe II (boucle dans le sens des aiguilles d'une montre) et la classe III (boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre). En effet, bien que les maximums des concentrations et des débits arrivent au même moment, l'augmentation de la concentration de sédiments (C) est plus rapide que celle de débit liquide (Q) et le pic de la concentration vient avant celui du débit. Ceci donnera une boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre, pendant la montée de la crue. Après, le pic de la concentration diminue doucement, en fonction du temps, relativement aux débits liquides, pendant la décrue et on obtient une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

Sous certaines conditions, une boucle en forme de huit se développe sans considération de la variable dont le pic atteint le premier l'exutoire. Les deux parties de la boucle se forment selon des directions opposées (figure I.12 ;h) 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).

Les différentes relations entre la charge solide et le débit liquide visualisent les déphasages qui existent entre la propagation des ondes de la crue et des ondes de matériel sédimentaire en suspension associées.



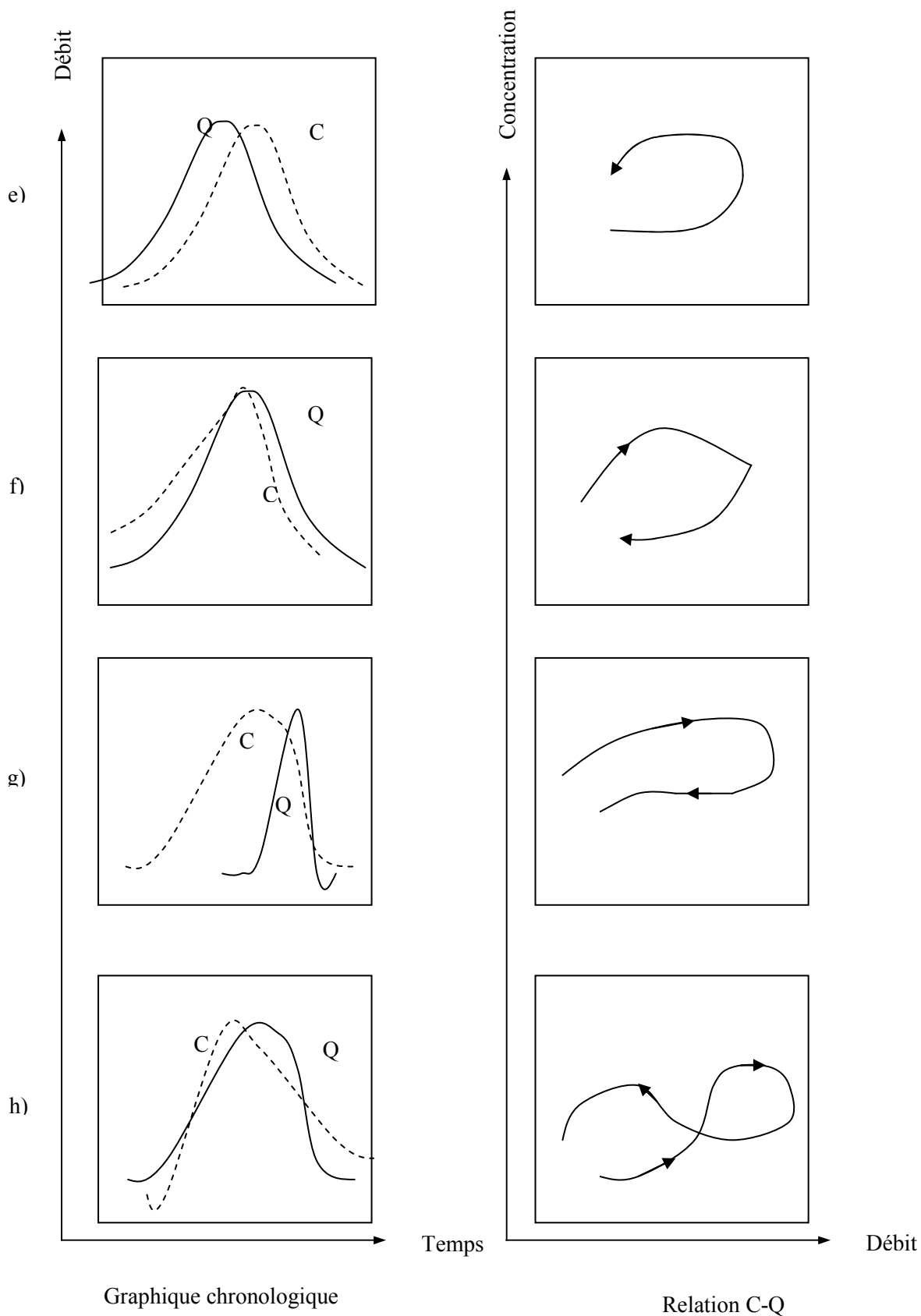


Figure I.12 Modèles de boucles d'hystérésis (Williams, 1986)

I.9 LE TRANSPORT SOLIDE ET L'IMPACT DE POLLUTION

I.9.1 Généralité

Les eaux courantes sont le principal vecteur de transport des produits de l'érosion à la surface des continents en milieu tempéré (Coque, 1998). Les berges et le lit du cours d'eau sont également sujets à l'érosion, par la force de cisaillement de l'eau courante, mais aussi par des mouvements de masse de plus ou moins grande envergure. Certains auteurs estiment que l'érosion du lit et des berges produit 50% des sédiments transportés (Knighton, 1998). Il est maintenant prouvé qu'un grand nombre de produits minéraux et organiques d'origine naturelle, agricole rejetés dans les fleuves et les cours d'eau se fixent sur les sédiments très fins ainsi que sur les matières organiques qui leur sont souvent associées. Ces matériaux sont donc à la fois le support physique et le vecteur de nombreuses nuisances à la suite de processus faisant intervenir (Parker et al., 1995 ; Dorioz et Pelletier, 1998).

I.9.2 Relation sédiment-pollution

La plupart des polluants rejetés en solution ou en suspension dans les rivières, que ce soit des polluants chimiques, organiques, bactériens ou radioactifs peuvent se fixer sur les sédiments très fins dispersés dans les eaux, être entraînés avec eux sur de grandes distances et venir se déposer dans des secteurs privilégiés (Migniot, 1981). Il pourra donc exister des zones de concentration en polluants, préjudiciables à un équilibre de l'environnement, et dont il faut évaluer l'importance. Les conditions de fixation de ces polluants sur les particules fines dépendront de la nature minéralogique de ces particules et du milieu aqueux et dans certains cas, la fixation des polluants ne pourra être que provisoire, les sels chimiques ou les bactéries repassant dans le milieu aqueux avec une augmentation locale de la contamination des eaux.

De nombreuses sources anthropiques de polluants peuvent contaminer les matières solides en suspension et les sédiments dans les rivières, y compris l'apport direct des eaux usées, élimination des déchets et l'utilisation des terres pesticides contenant, ou l'entrée indirects tels que les dépôts atmosphériques et l'érosion des sols (Yinxian et al., 2010). Les sédiments sont donc souvent étudiés comme réservoirs ou puits de nombreux polluants chimiques (Yao et al., 2009). Les fortes concentrations de sédiments en suspension réduisent la qualité de l'eau et peuvent dégrader les habitats aquatiques (Yves, 2008). Les dommages physiques, chimiques et biologiques causés par les sédiments en Amérique du nord par exemple, sont estimés à 16 Milliards de dollars annuellement (Gray et Glysson, 2002).

Les sédiments transportés par les rivières sont l'un des principaux vecteurs du transport de polluants en rivière, surtout dans les régions les plus urbanisées. Les substances chimiques toxiques peuvent se fixer aux particules de sédiments ou être absorbées par celles-ci, puis transportées et déposées dans un autre milieu. Cet aspect a fait l'objet de nombreuses études pour quantifier et prévoir le phénomène. Beaucoup des travaux élaborés sur la pollution des eaux de surface montrent, des concentrations élevées de phosphore et de nitrate dans les fleuves, en particulier pendant les

événements d'orage en Automne et en Hiver (Evan et Johnes., 2004 ; Pauwels et Talbo, 2004). Michal et Robain en 2002 ont déduit que 85 % de la quantité du phosphore exportée dans un bassin versant a été produite dans les plaines et cela est dû aux rejets des eaux usées et les pertes intensives des terres agricoles.

Nessah, (1999) a noté que la transcription des relations débit- concentration en termes de flux instantanés en fonction des débits montre que les flux instantanés des métaux particuliers, augmentent nettement avec le débit et que les apports à l'exutoire du bassin s'effectuent essentiellement lors des crues. Ces flux ne sont que faiblement affectés par la dilution des concentrations lors des crues et par la diminution des teneurs dans les suspensions. Ceci est dû essentiellement aux importants ordres de grandeur dans lesquels varient les débits et les concentrations des matières en suspension (MES) par rapport à ceux beaucoup plus faibles des teneurs dans les MES. Idlafkih et al., en (1995) ont motionné que, le débit d'écoulement varie de plus d'un même ordre de grandeur que les MES pour la période de l'étude. Les MES augmentent avec le débit et montrent la bonne corrélation pour les traces des métaux lourds, en particulier, le Cu et le Zinc.

Les travaux de Guo et al., (2010) montrent que la contamination des sédiments et l'eau de la rivière de Xiangjiang causant d'importants problèmes environnementaux potentiels, au sein de l'écosystème fluvial et la possibilité des risques écotoxicologiques pour les organismes vivant dans les sédiments. Les concentrations moyennes des métaux lourds dans les sédiments dépassent les normes. La distribution spatiale des concentrations de ces métaux sont plus à l'aval qu'à l'amont.

I.9.3 Effets des polluants sur l'environnement aquatique

L'enrichissement nutritif des cours d'eau ayant pour résultats, la croissance excessive des plantes aquatiques, les changements de la structure biotique, et la réduction de l'oxygène dissous (Ryding, Sve-Olof. et Rast Walter, 1994 ; Carplancq et al., 2002). Ce phénomène appelé l'eutrophisation est un problème croissant en particulier dans les secteurs ruraux (Neal et Whitehead, 2002), les travaux de Kelly et Wilson, en 2003 présentent des conditions eutrophiques dominées dans tout le fleuve de Stour à Ashford et ayant aussi pour résultat final, l'extinction de la vie aquatique (ex les poissons) (Duda, 1993 ; Carpenter et al., 1998).

D'autres travaux (Dorioz et Pelletier, 1998) indiquent que la pollution est excessive en aval du fleuve, à l'amont les sédiments constitués de matériaux à faible teneur en phosphore total, à faible biodisponibilité potentielle et à fort pouvoir fixateur. Tous ces éléments suggèrent une origine plus liée à l'érosion des berges qu'à celle des sols. Transférés vers l'aval lors des crues, ces sédiments se mélangent aux matériaux issus de l'érosion des terres agricoles et progressivement en phosphore, surtout lors des étiages, en particulier en contact avec des eaux enrichies des eaux usées (Dorioz, et al., 1998). Les travaux de Lisbeth et al., (2006) montrent des concentrations élevées de Cu allant jusqu'à 200 mg/kg, les concentrations du Cd présentent un maximum 4,0 mg/kg, ont été trouvés dans les sédiments de l'environnement aquatique autour de Sisimiut à Groenland. Ces concentrations sont

quatre fois plus élevées que la concentration limite où les effets toxicologiques sont attendus. La pollution pourrait être liée aux activités humaines dans le Sisimiut.

Les sédiments fluviaux ont plusieurs effets directs sur les habitats aquatiques, de part leurs caractéristiques et la toxicité des éléments qu'ils peuvent véhiculer. Ils peuvent compromettre certains habitats de manière importante, mais ils représentent aussi une source de nourriture pour les organismes des écosystèmes aquatiques en fixant la matière organique (Dodds et While, 2004). Les fortes concentrations peuvent également poser des problèmes pour l'alimentation en oxygène des poissons (Waters, 1995).

L'effet de la pollution organique, en particulier, sur les organismes aquatiques se traduit évidemment par l'élimination des espèces exigeantes pour l'oxygène puis par l'appauvrissement de la faune et de la flore pour aboutir à une biocénose dégradée, composée uniquement d'espèces tolérantes (Descy et Lambinon, 1984).

Beaucoup de ces espèces résistantes se nourrissent des matières organiques ou de leurs sous-produits et participent de ce fait au processus de biodégradation : les déchets organiques peuvent ainsi être consommés et transformés finalement en sels minéraux, qui, à leurs tours sont utilisés par les plantes aquatiques. La croissance de la végétation aquatique permet, alors, une photosynthèse accrue: les végétaux verts participent ainsi à l'autoépuration en absorbant les produits de la biodégradation et en fournissant de l'oxygène au milieu. Bien entendu, l'efficacité du phénomène dépend de l'importance des rejets ainsi que de la nature et de la taille de la rivière réceptrice: si la capacité autoépuratrice de cette dernière est dépassée, la pollution peut persister sur des dizaines de kilomètres.

De plus, la biodégradation d'une pollution organique, relativement importante, est susceptible d'entraîner un enrichissement excessif des eaux en nutriments (surtout les nitrates et les phosphates) : c'est le phénomène d'eutrophisation, qui se manifeste notamment par une croissance excessive de la végétation aquatique.

La pollution organique n'est pas la seule cause de l'eutrophisation des eaux : Le lessivage des terres agricoles par la pluie et les phosphates additionnés aux détergents y concourent pour une part importante. Dans un écosystème lotique, cette situation peut entraîner des inconvénients plus ou moins graves, tels que l'obstruction mécanique du lit (risque d'inondations, obstacle à la pêche...), une pollution organique différée à la mort des végétaux, ainsi que des variations journalières importantes des qualités physico-chimiques de l'eau (O, pH, NH), parfois responsables de mortalités massives des poissons.

La pollution organique des eaux s'accompagne souvent d'une pollution microbiologique, qui consiste dans la prolifération de germes pathogènes (bactéries, virus...), d'origine humaine ou animale, présents dans les rejets. Ces microbes peuvent causer chez l'homme des maladies infectieuses, telles que le choléra, la poliomyélite, l'hépatite virale ou le typhus. Les risques épidémiologiques sont évidemment liés à la

consommation d'eau contaminée ou improprement traitée ainsi qu'à la baignade dans une eau douteuse.

Les micropolluants organiques constituent une catégorie particulière du fait qu'ils sont peu biodégradables, hautement toxiques pour certains organismes et susceptibles d'être accumulés par ceux-ci jusqu'à atteindre une concentration nocive ou même mortelle.

L'Algérie se caractérise par la rareté des ressources en eau, rejoignant ainsi l'ensemble des pays arides et semi-arides. La pollution de ces ressources par les effluents domestiques et industrielles due à l'accroissement démographique et les activités industrielles favorise la dégradation de sa qualité et compromet le déséquilibre du milieu récepteur. La plupart des eaux usées domestiques et industrielles évacuent leurs effluents dans les proches cours d'eaux, pensant les diluer ainsi. La solution de la pollution ne doit pas être la dilution. Dans le même ordre d'idées, déplacer les déchets liquides d'un lieu à un autre ne saurait résoudre le problème. L'évacuation non contrôlée de ces déchets liquides par manque de stations d'épuration ou par manque de stations opérationnelles, le cas de fonctionnement des stations d'épuration en Algérie, aboutit à la pollution rapide des eaux de surface et des eaux souterraines et qui seront favorisées par l'augmentation de l'érosion et de transport des sédiments, véritable danger pour la flore, la faune. Les rejets d'eaux usées dans les cours d'eau constituent donc un élément fondamental en matière de pollution car il constitue un lieu de nombreuses réactions chimiques et de la reproduction de nombreux vecteurs de maladie.

Les programmes d'approvisionnement en eau dans les villes algériennes ont surtout visé actuellement à développer les sources de stockage (barrages et transferts hydrauliques) ce qui nécessite à modifier les cours d'eau des oueds mais malheureusement sans tenir compte à la gestion des eaux usées domestiques et industrielles déversées dans les cours d'eau des bassins. La protection des bassins de drainage par aménagement contre le transport des sédiments est indispensable pour éviter, l'envasement rapide des retenues. Le bassin étudié a permis de réaliser le plus grand barrage en Algérie (Béni-Haroun), il permet de mobiliser les eaux de l'oued Kebir-Rhumel avec une capacité de retenue normale de 960 millions de m³/an. La majorité des rejets domestiques et industriels de la région se déverse dans ce bassin (ANBT, 2003). Ces rejets industriels et domestiques dans les cours d'eau du bassin et dans la retenue du barrage favorisent l'enrichissement de l'eau en éléments nutritifs, phosphore et azote et notamment l'augmentation corrélative de la production végétale aquatique, principalement les algues planctoniques ou fixées ce qui altère les propriétés physiques et chimiques de l'eau de la retenue (Carplancq et al., 2002).

Plusieurs études menées sur les lacs ont mis en relation la quantité de phosphore disponible, la typologie des plans d'eau et la biomasse des algues du plancton. Ces résultats ont accrédité l'idée qu'on pouvait limiter le développement des algues en réduisant les apports de phosphore (Caplancq, et al., 2002 ; Deceballos et al., 1998), C'est pour cela, il est indispensable d'adopter, les démarches nécessaires pour

protéger nos cours d'eau et de réagir rapidement pour faire le recyclage et la récupération des eaux polluantes avant de les rejetées aux oueds et d'éviter tous risque de contamination des eaux de la retenue du barrage.

CONCLUSION

A travers ce modeste travail de recherche bibliographique, on peut conclure que :

Les actions de la gravité et de l'énergie solaire, facteurs essentiels et déterminants de l'érosion conduisent à la sédimentation dans les points bas des matériaux arrachés des points hauts, le résultat est l'aplanissement des reliefs, l'amplitude thermique, les vents, l'eau en état liquide ou solide sont les principaux agents de dégradations, et il est extrêmement difficile de dissocier leurs interactions.

L'eau reste à la fois un agent d'altération, de transport et milieu de sédimentation.

- Deux étapes essentielles caractérisent le transport solide (par charriage et en suspension) qui définissent les progressions et les envols des particules des granulats dans le sens du courant. Les critères d'apparition de ce phénomène, est la forme critique du courant susceptible d'amorcer le transport et la tension tangentielle critique qui provoque le début d'entraînement.
- Il existe plusieurs formules d'évaluation du transport solide mais leur utilisation nécessite une grande précision et précaution.
- Les conséquences de l'érosion et du transport solide sur les rives et les ouvrages hydrauliques s'avère inquiétantes, c'est pour cela, il est indispensable d'agir sérieusement pour délimiter le phénomène.
- La surveillance de l'environnement aquatique par la mesure de la pollution dans les eaux de surface et les sédiments fins, suppose la connaissance précise des mécanismes hydrosédimentaires, de la circulation et de la localisation des sédiments dans cours d'eau
- Les mesures dans les cours d'eau du bassin et le contrôle nécessaire du milieu aquatique naturel pourront être très fortement améliorées tous en tenant compte le rapprochement entre les différentes disciplines.

CHAPITRE II

CARACTERISTIQUES DU BARRAGE DE BENI-HAROUN (CARACTERISTIQUES DE L'AMENAGEMENT)

INTRODUCTION

La tranche du nord Algérien présente une largeur de 100 Km environ, la demande en eau dans cette région est généralement faible alors que les ressources y sont importantes, par contre plus au sud, sur les hauts plateaux, les ressources sont réduits alors que la demande en eau potable est en forte croissance et qu'on y trouve de grandes superficies agricoles à irriguer.

Un grand projet de transfert à été élaboré depuis l'année 1970 jusqu'à maintenant, celui-ci prévoit la mobilisation de plus de 960 millions de m³ dans la retenue de Beni-Haroun et leurs refoulements sur les hauts plateaux du sud.

Le barrage de Beni-Haroun, ouvrage clé du transfert, a été achevé en mai 2001. La construction de cet ouvrage, qui actuellement le plus grand barrage d'Algérie a été financé conjointement par le Fades- Fonds Saoudiens et le Fonds d'Abu-Dhabi. Il permet de mobiliser les eaux de l'oued Kébir-Rhumel qui est la principale ressource hydrique de la région. La retenue est créée par la réalisation du barrage de Beni-Haroun dont la hauteur est voisine à 120m, elle est caractérisée par une surface de 3700ha à la cote 200m, Le volume régularisé est de 435Hm³.

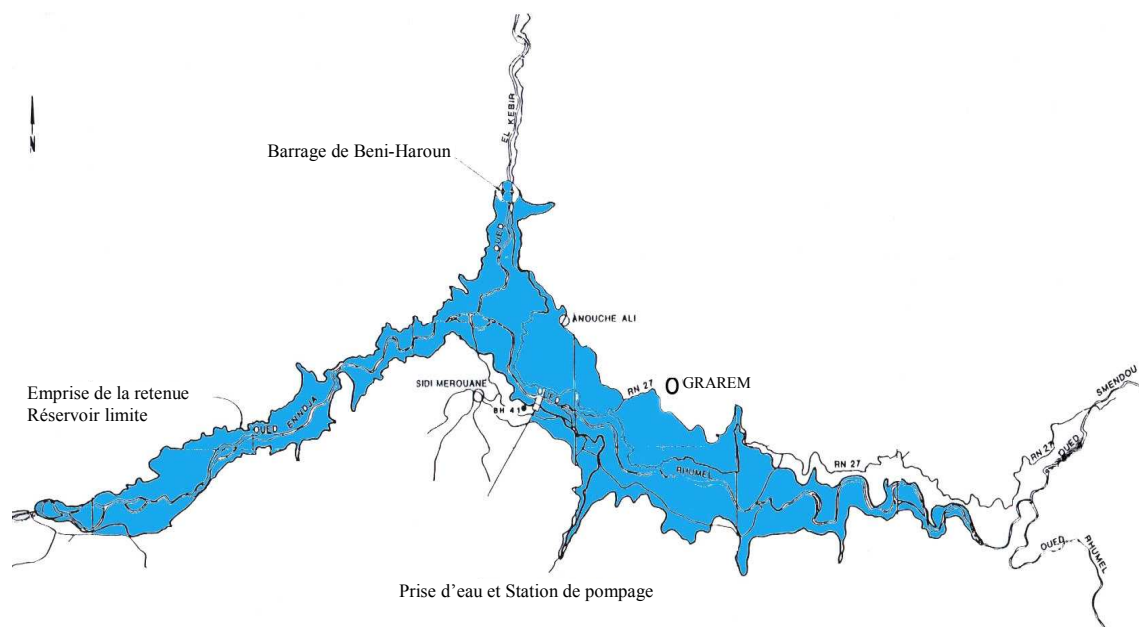


Figure II.1 Retenue du barrage de Beni-Haroun

Le barrage de Beni-Haroun constitue donc un élément clé du transfert, sa réalisation qui a débuté en 1980 et s'est achevé en mai 2001 après divers aléas.

II.1 LOCALISATION

Le site du barrage de Beni-Haroun est situé dans le nord de l'Algérie sur l'oued kébir à une quarantaine de kilomètre de son embouchure dans la mer méditerranée. La retenue créée par le barrage se trouve au sud de se dernier, elle est située à environ 40km au niveau NNW de la ville de Constantine et à 350 km à l'Est d'Alger.

Le barrage est situé à l'extrémité amont de la gorge calcaire marneuse de Beni-Haroun et à environ 4km du confluent de l'oued Rhumel et de l'oued Endja.

Le bassin total de l'oued kébir au site du barrage couvre une superficie voisine de 7.725km². Tenant compte qu'une partie du bassin du Rhumel est mobilisée par le barrage de Hammam Grouz, la superficie intéressante le barrage de Beni-Haroun est de 6.595 km². L'apport annuel régularisé est estimé à 435 millions de m³, et le volume de la tranche utile situé entre les niveaux 172 et 200 m est de 723 millions de m³.

II.2 PRINCIPALES MODIFICATIONS APPORTEES AU PROJET DURANT LES TRAVAUX.

II.2.1 Modification de la cote de retenue normale

Entre 1986 et 1996, les modifications ont été sérieuses, puisque les travaux ont été entamés sur la base d'un projet de digue zonée en enrochements avec une cote de retenue à la côte 195m et se sont achevé par la réalisation d'un barrage en BCR avec une cote de retenue normale à la cote 200m.

Ces deux modifications majeures ont été décidées pour:

- Accroître la capacité de la retenue de manière à compenser des apports naturels plus faibles qu'initialement prévu dans les études de 1980.
- Permettre la réalisation du barrage dont les travaux entamés en 1988 n'avaient toujours pas démarré en 1996, sauf l'intermède chinois avec la réalisation des excavations des deux dérivations.

L'étude d'avant projet détaillée du barrage de Beni-Haroun menée en 1984 par Harza Engineering Company avait conduit à:

- Un apport moyen non régularisé de 730 Hm³/an
- Un volume régularisé de 625 Hm³/an pour un barrage à la route nationale n°195, y inclus la réutilisation à concurrence de 44 Hm³ des volumes livrés à Constantine.

Les nouvelles estimations effectuées par la Direction des Grands Aménagements et des Infrastructures Hydrauliques (DGAIH), dans le cadre du plan national de l'eau, 1997 ont montré que les apports avaient été nettement surévalués dans les études précédentes et qu'ils devaient réduire de notables proportions. Les valeurs Harza Engineering Company étaient exagérément élevées. En effet, il avait estimé les apports de Beni-Haroun à partir de trois stations hydrométriques: Grarem, Tassadanne

et El-Ancer. Cette dernière station située à l'aval de Beni-Haroun draine un bassin versant total de 8735 Km². Un examen attentif des valeurs obtenues à Beni-Haroun à partir de la station El Ancer montre qu'il y a eu sous-estimation des apports du bassin intermédiaire entre les deux sites, région où la pluviométrie est particulièrement élevée, ce qui a conduit à une surestimation des apports de Beni-Haroun.

Compte tenu de cette réduction significative des apports qui risquaient de pénaliser grandement l'économie globale du transfert de Beni-Haroun, les possibilités de maximiser le volume régularisé ont été recherchées:

- Maximiser le volume régularisé par la retenue de Beni-Haroun en portant la cote de retenue normale de la cote 195m à la cote 200m.
- Revoir la planification de réalisation du barrage de Boussiaba qui intervient également dans les apports du transfert.

II.2.2 Adoption d'une solution de barrage BCR

En 1996, les progrès réalisés au cours de la dernière décennie avec la technique du béton compacté au rouleau (BCR) permettaient d'envisager la réalisation d'un barrage en BCR à Beni-Haroun à la place du barrage en enrochements initialement prévu. Une telle solution alternative n'avait pu être considérée par Harza Engineering Company, lors de son étude d'Avant Projet Détaillé (APD), en 1984. En effet à cette époque, il n'y avait:

En 1983, que deux barrages en BCR terminés dans le monde

En 1986, qu'une quinzaine de barrages terminés mais les plus grands ne représentent que des hauteurs modestes par rapport à Beni-Haroun.

En 1996, la situation est très différente. Après les premières expériences, forcément soumises à certains aléas. La technique du béton compacté a acquis une maturité qui permet de garantir une fiabilité équivalente à celle des bétons classiques vibrés (BCV). Les statistiques de réalisation montrent qu'en 1996, 157 barrages ont été achevés et 27 barrages présentant une hauteur de plus de 90m, le plus haut barrage actuellement est celui de Logtan en chine (ANBT, BG., 2002) dont la hauteur atteindra les 217m.

II.3 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU BARRAGE

Le barrage est de type poids rectiligne en béton compacté au rouleau s'appuyant sur une fondation rocheuse calcaire. Le niveau de retenue normale (RN) qui est aussi la crête de l'évacuateur à seuil libre est à la cote 200m. Il y correspond un ouvrage d'une hauteur maximale sur fondation de 118m et une longueur en crête de 710m. (Voir Figure 02)

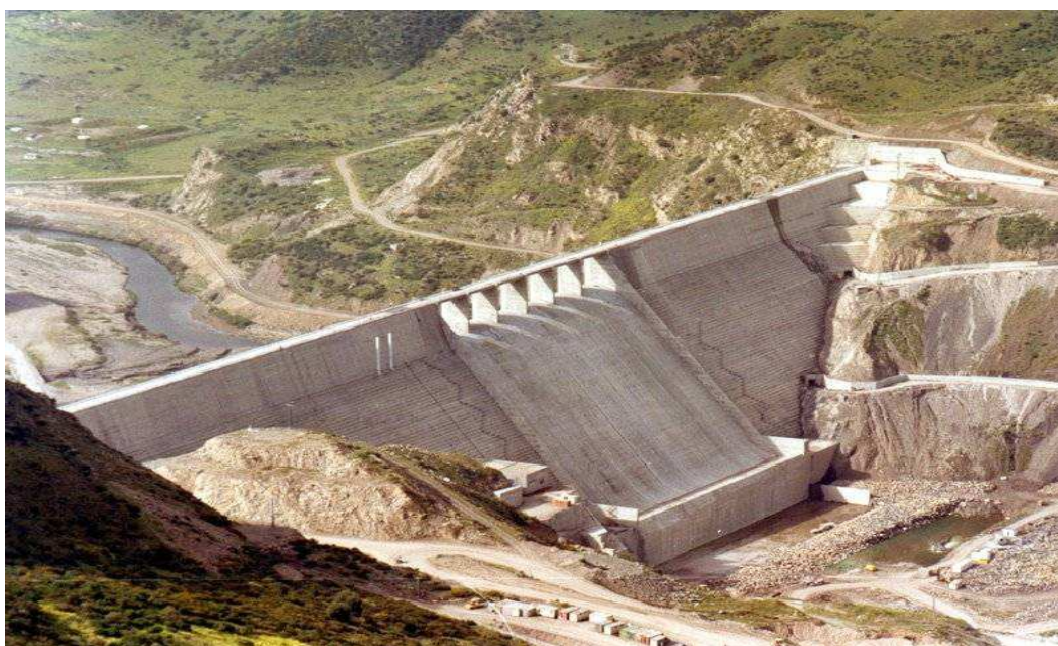


Figure II.2 Vue du barrage de Beni-Haroun (ANBT, 2002)

La conception du barrage et de ses ouvrages annexes a été dictée par le souci:

- ✓ de minimiser les quantités de béton conventionnel
- ✓ de garantir une bonne continuité du chantier BCR
- ✓ de concentrer les ouvrages nécessitant l'usage d'un béton traditionnel.

Le profil de base du barrage est un triangle qui a les caractéristiques ci-dessous:

- Sommet à la cote 214,80m niveau maximum de crue (P.H.E)
- Parement amont vertical
- Parement aval incliné à 0.8 H pour 1V

La section non déversante possède une crête d'une largeur de 8 m arasée à la cote 216,30mce qui laisse une revanche de 1,5m au-dessous des plus hautes eaux.

L'évacuateur de surface, de type section change de pente au-dessous de la cote 196m, ce qui renforce la résistance aux séismes et permet l'installation d'une voie de circulation (figure 03).



Figure II.3 Vue de l'évacuateur de crue du barrage de Beni-Haroun

Le seuil de l'évacuateur est prolongé par un coursier raccordé à un saut de ski, calé, au dessus des plus hautes eaux. La capacité de l'évacuateur est de $13.230 \text{ m}^3/\text{sec}$. Pour un niveau d'eau de 214,74m, ce qui correspond au débit maximal restitué après laminage de la crue maximale probable (CPM) de $16,640 \text{ m}^3/\text{s}$ (ANBT, BG., 2002).

Le fond de la vallée est élargi entaillant la rive droite sur une centaine de mètres afin d'assurer une bonne assise de la zone du barrage concentrée par l'évacuateur de crue et la vidange de fond.

La vidange de fond contiguë à l'évacuateur est implantée en rive droite au niveau 140m. Elle est constituée de deux pertuis dimensionnés pour évacuer un débit de $670 \text{ m}^3/\text{sec}$ (335 m^3 par pertuis) sous le niveau de retenue normale et terminant un saut de ski.

Durant les travaux réalisés, la dérivation de la rivière a été assurée en saison sèche (mai- octobre) par les deux galeries de dérivation de la rive gauche prévues dans la solution de base en enrochement. Pendant la saison des pluies, ces galeries ont également été suffisante et le passage éventuel de plus fortes crues, bien que possible par déversement par-dessus la partie centrale du barrage n'a pas été nécessaire.

Trois galeries réparties sur 3 niveaux sont situées à proximité du parement amont du barrage, permettant la réalisation et le contrôle des opérations d'injection et de drainage dans le corps du barrage et dans la fondation. Calées respectivement aux cotes 100 m, 140 m et 175.10 m, elles sont implantées à une distance du parement amont égale à 4.00 m pour la galerie inférieure et 6.50 m pour les deux supérieures.

Ces galeries se prolongent dans les appuis sur des distances variant de 70 à 130m.

Une galerie en rocher complémentaire, au niveau 120.00, renforce le drainage de la rive droite.



Figure II.4 Galeries de dérivation du barrage

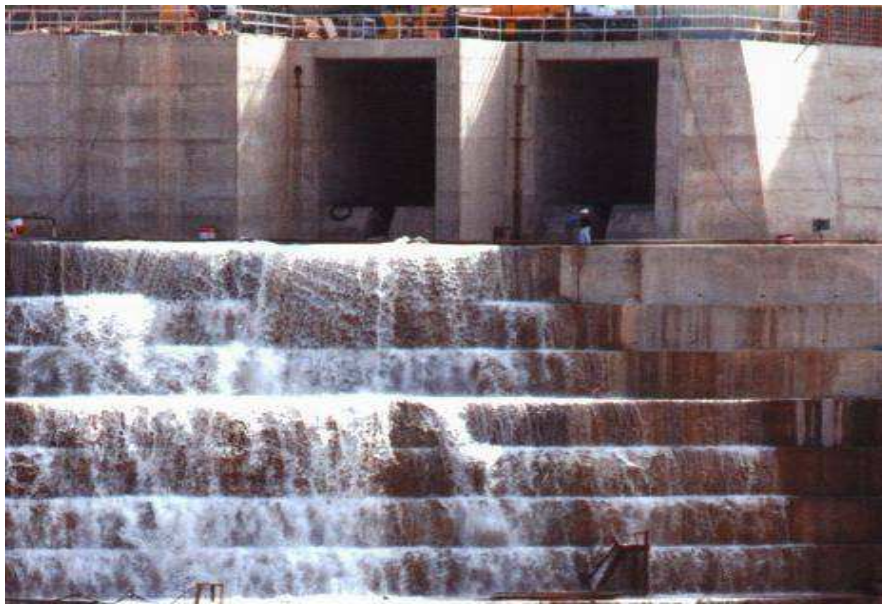
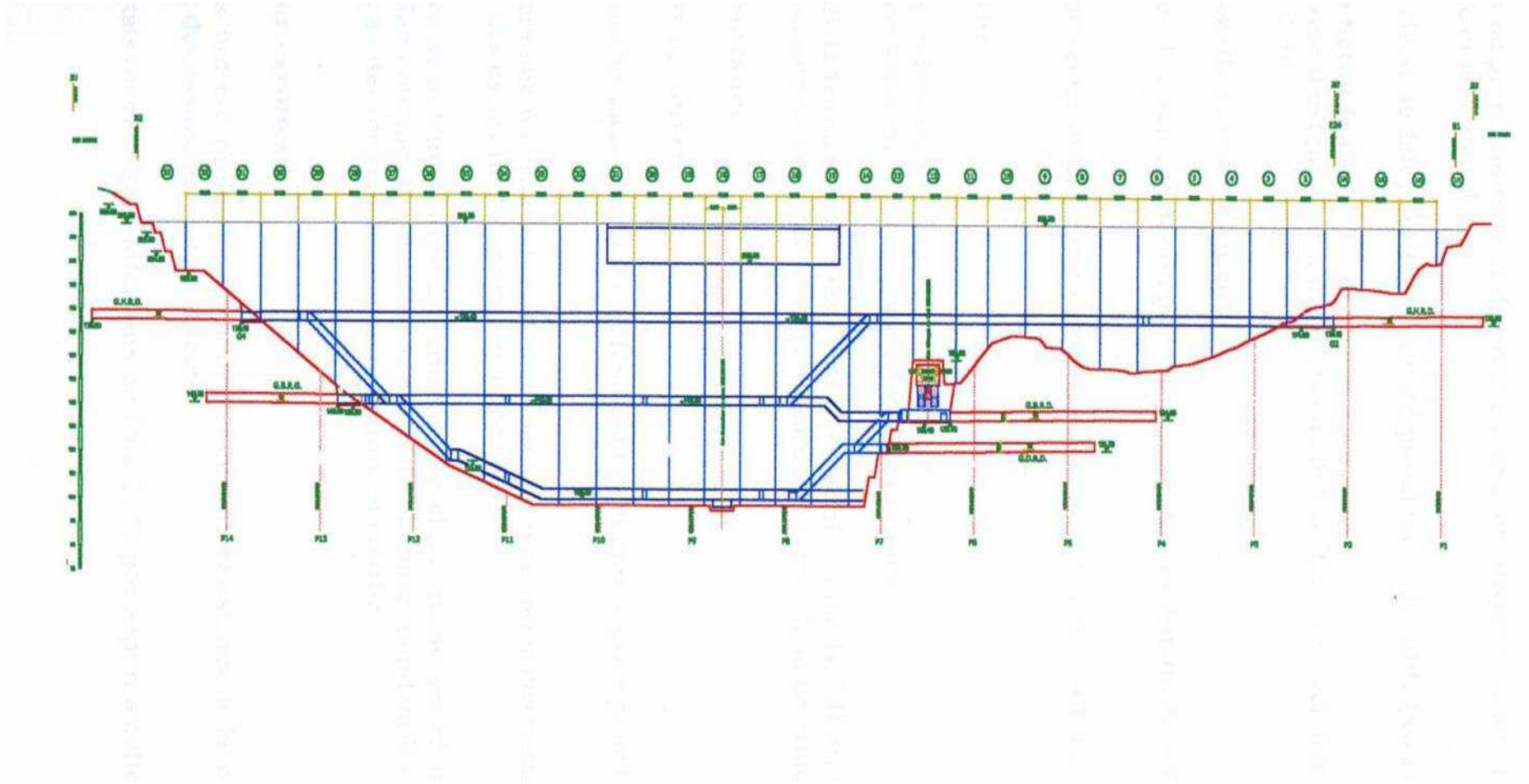


Figure II.5 Vidange de demi-fond du barrage

Figure II.6 Profil longitudinal du barrage



Le système de galeries décrit ci-dessus permet de collecter les eaux de drainage provenant du corps du barrage, de la fondation et des versants. Il permet également le contrôle du comportement de l'ouvrage et les opérations de maintenance et de réparation éventuellement nécessaires.

Sous le barrage, l'écran d'étanchéité est constitué d'un rideau d'injection multifilaire (en principe 3 files) d'une profondeur de 40 à 120 m. des contrôles plus profonds ont également été effectués.

Des injections de consolidation du rocher de fondation ont été effectuées sur toute l'emprise du barrage sur une profondeur de 8 m et suivant une maille carrée de 4 m de côté.

Un rideau de drainage, d'une profondeur maximale de 40 m est réalisé à partir de la galerie de pied amont.

Les agrégats pour le BCR proviennent du traitement d'alluvions de l'oued proche du barrage.

II.3.1 Caractéristiques principales de l'aménagement

Les différentes caractéristiques principales de l'aménagement de Beni-Haroun ont été présentées dans le tableau suivant.

Tableau II.1 Caractéristiques principales de l'aménagement

<u>Retenue du barrage</u>	
Niveau normal (RN)	200,00 m
Niveau des plus hautes eaux (PHE)	214,00 m
Niveau minimum d'exploitation	172,00 m
Volume de la tranche morte (110-173)	240 10 ⁶ m ³
Volume utile (172-200)	723 10 ⁶ m ³
Volume total (110-200)	963 10 ⁶ m ³

<u>Barrage</u> Type : Barrage poids en béton compacté au rouleau (BCR)	
Hauteur maximale :	
- au dessus du terrain naturel	107 m
- au dessus des fondations	118 m
Longueur en crête	710 m
Largeur en crête	8 m
Largeur maximale au niveau des fondations	93 m
Fruit du parement amont	Vertical

Fruit du parement aval Vertical Cote de la crête	08H/1V 216,30
<u>Evacuateur de crue</u>	
Type	Déversoir de surface à seuil libre - coursier et saut de ski
Localisation Cote de la crête Cote du bec aval du saut de ski Longueur totale de l'évacuateur en crête Longueur utile de l'évacuateur en crête Longueur de la cuillère Débit maximal	partie centrale du barrage 200 m variable de 124 à 126,00m 124 m 114 m répartis en 6 passes de 19 m 130 m 1320 m ³ /s pour PHE à 214,74m

<u>Vidange de demi-fond</u>	
Type	2 pertuis blindés dans corps du barrage avec saut de ski
Localisation Calage de l'entrée Section des pertuis Vannes Débit maximal	Rive droite 140,00 (3,00m x 4,10m) x 2 2 vannes wagon à l'amont 2 vannes segment à l'aval 670 m ³ /s sous RN 200 > 700 m ³ /s sous RN > 200m

<u>Injection et drainage de la fondation</u>	
Voile d'injection Rideau de drainage	Vertical multifilaire axé sur galerie de pied amont, profondeur de 40 à 120 m 1 rideau forcé à partir de la galerie de pied amont
<u>Ouvrage de dérivation</u>	
2 galeries souterraines	Ø 8 m

II.4 GEOLOGIE ET GEOTECHNIQUE DU BARRAGE

Une étude géologique, géotechnique du site du barrage a été faite par l'entreprise Tractebel Engineering est basée principalement sur les rapports des études antérieures réalisées par Harza Engineering Company en 1984-1986, par Promon en 1990, sur les résultats des reconnaissances réalisées par l'entreprise étrangère Dragados en 1998 et sur diverses informations complémentaires obtenues durant les travaux.

Le projet est implanté dans une région dont le cadre géologique est caractérisé par la présence de nappes de charriage. Ces nappes de charriage constituent de vastes ensembles de terrains d'âge antécambrien à miocène inférieur qui se sont déplacés sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres et qui se sont superposés mécaniquement suivant des modalités variées et complexes.

II.4.1 Géologie de site de barrage

Le substratum de la zone de la cuvette du site du barrage située à la limite nord de la province géomorphologique connue sous le nom de dépression miocène de Constantine est principalement constituée de dépôts alluvions sablo-graveleux dans le lit des oueds et sur plusieurs niveaux de terrasses, de colluvions provenant en grande partie de l'érosion des argiles miocènes assez répandues et d'écoulement au pied des formations rocheuses. Les principaux traits structuraux dans la zone de la retenue sont liés aux plissements et aux failles.

Le site du barrage est caractérisé par une barre calcaire éocène d'environ 100 m d'épaisseur d'orientation globale Est-ouest, reposant sur les marnes noires paléocènes à l'aval et surmonté par des marnes éocènes à l'amont (figure II.7).

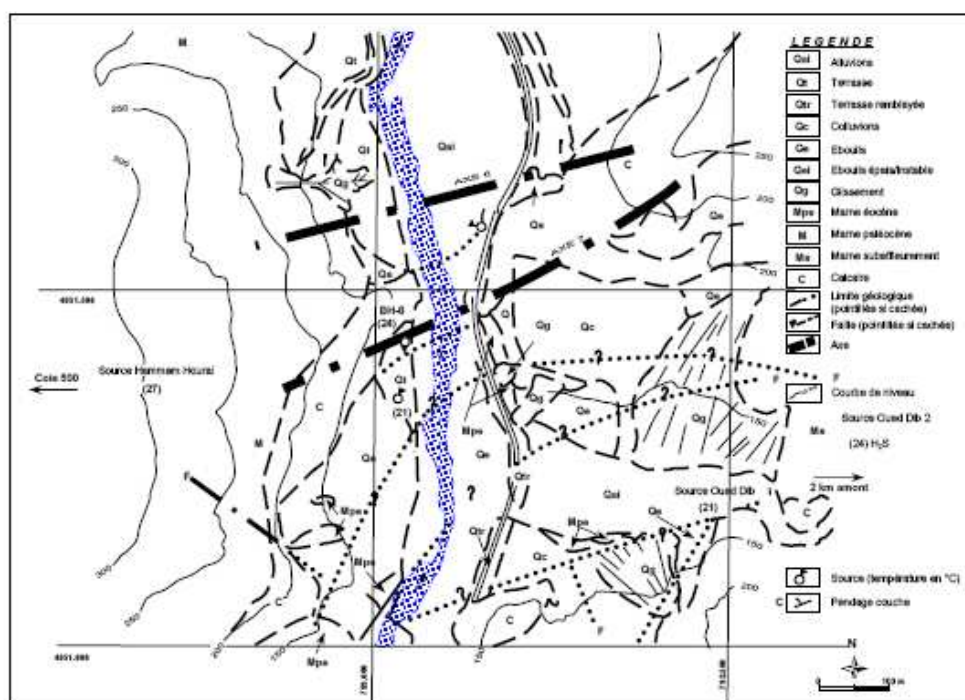


Figure II.7 Contexte géologique du site du barrage de Beni-Haroun (ANBT, T.I., 2001)

Cette barre subit une orientation d'est en ouest. En rive droite, elle présente un pendage sud de 32° à 40° au sommet de l'appui et se redresse progressivement pour atteindre 70 à 75° à proximité de l'Oued El Kébir. En rive gauche, elle continue à se redresser jusqu'à se renverser en sommet de versant où elle montre un pendage vers l'aval très redressé et un pivotement progressif des bancs vers le Sud-Ouest. Cette barre prend ensuite une orientation Nord-Sud et remonte parallèlement au versant dans la cuvette sur quelques centaines de mètres (ANBT, T.E., 2002).

Ce redressement de la barre calcaire a pour conséquence de diminuer la surface d'affleurement de la rive droite vers la rive gauche.

La direction de la stratification pivote de N80° à 90°E sur la rive droite, à N35°E sur la rive gauche.

En amont de ce banc calcaire, on détecte des marnes de l'éocène (Em) situées sur le calcaire tandis qu'en aval, sous les calcaires, on distingue des marnes foncées du paléocène (Pm), plus ou moins fracturées. Dans les marnes, apparaissent des stries de gypses et un peu de pyrite, en particulier dans les couches supérieures.

En fond de vallée et en rive droite, le contact entre les marnes paléocènes à l'aval et les calcaires éocènes est concordant. Le passage se fait progressivement par une augmentation en nombre et en épaisseur des bancs calcaires. Cette zone de transition a une épaisseur de 5 à 15 mètres.

Le contact à l'amont de la barre calcaire avec les marnes éocènes est plus tectonisé. Il se marque le passage d'un marno-calcaire à des marnes schisteuses noires avec une zone de transition d'environ 15 mètres d'épaisseur alternant des bancs calcaires jaunâtres (20 à 40 cm d'épaisseur) et des bancs de marnes noirâtres. Le pendage des couches de marne montre des plissements assez serrés avec des pendages quasiment verticaux. Dans cette zone, plusieurs blocs à surfaces lustrées, soulignant des cisaillements de ces couches, sont visibles et il est possible que des lentilles importantes de calcaire y soient observées.

En rive gauche, bien que cette zone soit intensivement tectonisée, le contact entre les marnes paléocènes et les calcaires éocènes à l'aval du barrage semblent plutôt perturbé par des remaniements formés lors de la phase de plissement. Le passage se fait progressivement par une augmentation en nombre et en épaisseur de bancs calcaires se présentant en lentilles irrégulières.

De même, le contact amont de la barre calcaire avec les marnes éocènes, observé en plusieurs endroits, ne paraît pas faillé.

La barre calcaire elle-même est parcourue par de nombreuses diaclases et infrastructures, soit à remplissage argileux et traces de cisaillement ou glissement, soit à remplissage de calcite et de dissolutions karstiques. Celles-ci se sont développées principalement le long de certaines diaclases proches de la verticale. L'épaisseur de ses zones karstifiées peut atteindre 30 à 50 centimètres d'épaisseur et se présente sous forme d'un remplissage argileux ou bréchiq ue recimenté par de calcite.

Dans les calcaires, trois faciès ont été distingués: un tronçon supérieur de calcaires marneux d'environ 30 à 40 m, un autre intermédiaire de calcaires à nodules de silex d'environ 30 m et un autre tronçon inférieur de calcaires noirs d'une épaisseur de 70 à 100 m.

II.4.2 Lithologie du site du barrage

Les différents terrains observés dans la zone du barrage sont du plus anciens au plus récents.

➤ Marnes du paléocène

Elles affleurent sur les versants et dans les excavations en aval du site. Elles ont été reconnues par plusieurs forages lors des premiers objets.

Ce sont des schistes gris foncés à noirs avec des lentilles et des couches minces de calcaires aphanitiques noirs (épaisseur de 10 à 45 cm). Les sondages carottés ont montré que l'altération ne se poursuit que jusqu'à une profondeur assez limitée, c'est-à-dire entre 0 et 4m de profondeur maximale dans le lit de l'oued et 4 et 5 m de profondeur dans les appuis.

Ces marnes sont plus ou moins calcaires et légèrement pyriteuses. Elles montrent localement des traces de gypse et de calcite en remplissage de joints. On y trouve fréquemment des septarias.

Dans leur partie supérieure, on trouve sur 5 m une alternance de marnes et de bancs calcaires constituant la transition avec les couches supérieures.

➤ Calcaires de l'Eocènes attribués à l'Yprésien

La cartographie géologique (ANBT, T.E., 2002) détaillée du site a permis de différencier 3 subdivisions de la barre de calcaires représentant avec les couches supérieures.

- ✓ Calcaires marneux (Ecm)
- ✓ Calcaires à silex (Ecs)
- ✓ Calcaires de base (Ecb)

Dans l'ensemble, ces roches se présentent sous forme de couches décimétriques à métriques de calcaire à grain fin, gris foncé à noir, dur et résistant. Certains lits calcaires sont très durs, cas dolomitiques voire siliceux alors que d'autres contiennent du silex noir. Ce silex prend la forme de petits nodules (de diamètre 1-3cm) et de minces (épaisseurs de 2 à 15cm). On trouve également des couches intercalaires minces de schiste calcaire (jusqu'à 30 cm).

Ces forages présentent, en forage, de nombreux joints remplis de calcite. Certains joints, en général oxydés, sont fermés mais ils peuvent être également

ouverts ou remplis de matériaux meubles. Dans certains forages, de petites cavités de dissolution (max: 30cm) ont été observées.

Les calcaires présentent localement en forage des zones visibles de cisaillement et de bréchification à mettre éventuellement en relation avec le passage de petites failles. Ce type de phénomènes est visible dans les marnes.

Les formations calcaires sont relativement résistantes à l'altération et à l'érosion mais elles présentent toutefois localement des indices de dissolution.

Les calcaires en s'altérant deviennent typiquement une pâte grise à beige.

➤ **Marnes de l'Eocène (d'âge Lutétien)**

Les affleurements limités de cette formation montrent des schistes de compaction, gris foncé à noirs, dont la lithologie semble presque identique à celle du faciès des marnes du Paléocènes. La présence de petits septarias permettant de les différencier.

Dans la plupart des affleurements, la marne est hautement déformée par la tectonique et a ensuite été altérée superficiellement.

➤ **Colluvions et Eboulis**

Sur l'appui droit, on détecte des dépôts de versants ou colluvions formés par des pierres anguleuses de calcaire, parfois légèrement cimentées ou comportant une matrice argileuse. Leurs épaisseurs peuvent atteindre les 20 m.

Sur la rive gauche, on détecte des dépôts colluviaux de pierres, de blocs calcaires et de marnes.

II.4.3 Terrasse alluviale

Dans la partie basse de la rive droite, on trouve une terrasse alluviale dont la base se situe vers les cotes 138-140. Elle est formée de graviers et gros blocs dans une matrice sableuse passant à des galets dans une matrice plus argileuse vers l'intérieur du versant.

L'épaisseur peut atteindre 20 m et diminuer vers l'aval et vers la culée droite. Cette terrasse présente plusieurs niveaux intermédiaires.

II.4.4 Alluvions

Ce sont principalement des graviers, gros blocs et sables alluviaux du lit de l'oued.

II.4.5 Remblais

Les principaux remblais sont ceux des batardeaux et des ouvrages du lit de l'oued et ceux qui recouvrent l'ancien thalweg de la culée droite; ils ont plus de 20 m d'épaisseur entre la culée du barrage et celle du viaduc.

II.4.6 Structure

La barre calcaire servant d'appui du barrage traverse l'oued en oblique et présente un pendage amont en rive droite se redressant progressivement jusqu'à s'inverser en rive gauche.

Le pendage évolue de 32° amont du large en rive droite à $\pm 70^\circ$ au niveau de l'oued et 90° à 80° aval au large en rive gauche.

La direction des couches pivote de $N80^\circ$ à $90^\circ E$ sur la rive droite à $N35^\circ E$ sur la rive gauche.

D'une manière générale, le calcaire est sain et se présente sous forme de bancs massifs compétents sur une grande partie de la surface du fond de fouille.

En fond de fouille, 17 zones de fracturation avec remplissage d'argiles et/ou de calcite ont été repérées sur la face amont de l'excavation. Ces zones de fractures pseudo-verticales orientées Nord - Sud semblent correspondre à un éventail de fractures dues à la flexure des bancs de calcaires entre la rive droite et la rive gauche.

Une zone karstifiée pseudo-verticale à remplissage argileux recoupe toute la vallée entre la rive droite et la rive gauche à environ 50m à l'aval de l'axe du barrage. Un nettoyage particulier de cette zone (avec parfois surcreusement de 6 à 7 mètres de profondeur) a été effectué au droit des plots qui la recoupent et l'ensemble de cette zone a été cartographiée.

Sous l'emprise même du barrage, les forages réalisés n'ont pas détecté de failles majeures parallèles à la tectonique régionale. Toutefois, l'existence de failles sous le lit de l'oued n'est pas exclue. On retrouve en forage dans le fond de l'oued des zones cisailées. Cependant, il n'y a pas de décrochements importants entre les deux rives mais plutôt un phénomène de flexure.

Plusieurs petites failles ou éventuelles ont également été cartographiées dans la zone du projet.

Les calcaires présentent plusieurs orientations de joints, fractures ou diaclases.

L'espacement moyen des fractures, en général, varie de 0,1 à 1m, les valeurs les plus fréquentes tournant autour de 0,4m. Les niveaux les plus fracturés sont ceux de la base des calcaires.

Deux systèmes principaux assez réguliers de fracturation ou diaclases sont bien visibles en rive droite. Une dispersion plus importante de mesures est constatée en rive gauche. Celle-ci est liée notamment au redressement et à la flexure des bancs. Les directions moyennes des deux systèmes de diaclases en rive droite sont $N300^\circ E/50^\circ S$ et $N190^\circ E/70^\circ W$.

II.5 HYDROGEOLOGIE

II.5.1 Hydrogéologie du site

Le cadre hydrogéologique du site du barrage est caractérisé par la présence de deux nappes bien différenciées: une nappe située dans les terrains calcaires et une nappe perchée, située dans les terrains marneux moins perméables.

Dans les terrains calcaires, la cote de la nappe varie de +105 à 120m. Elle est au niveau de l'oued, ce qui peut être expliqué par un développement karstique.

Les indices de karstifications observés sur les affleurements de calcaires, notamment sur l'appui gauche au-dessous de la cote 200m et jusqu'à la cote 400-500m. Les données de sondages montrant la présence de petites cavités (de l'ordre de 10 à 30 cm) ouvertes ou remplis d'argile ont été confirmés lors de l'ouverture des fouilles, cette karstification est surtout développée le long des diaclases pseudo-verticales orientées Nord-Sud.

Dans les terrains marneux moins perméables, la cote de la nappe est régulée par la cote naturelle du terrain et varie de +155 à +185m.

En aval et en amont de l'axe, on observe aussi de nombreux points de suintement dans les marnes dont les cotes se situent entre +100 et +120m. On remarque également la présence de sources thermales sulfureuses à l'Est, à l'Ouest et en aval du barrage. Celles-ci sont souvent l'indice de décharge de la nappe profonde liée à une zone de faille.

II.5.2 Perméabilité en forage

Des essais de perméabilité type Lugeon ont été réalisés en forage par une entreprise étrangère.

La majorité de valeurs de perméabilité calculées ou extrapolées d'après les essais réalisée en forage de type Lugeon est inférieure à 40 U.L, ce qui correspond à des terrains à perméabilités faibles à moyennes. Quelques essais ont donné, en général par extrapolation, des perméabilités atteignant 60 U.L.

Les perméabilités déterminées pour les marnes sont, en général, faibles < 10 U.L.

II.6 CARACTERISTIQUES MECANIKES DES TERRAINS DE FONDATION

II.6.1 Nature des terrains

Le barrage est entièrement fondé sur les calcaires de l'Eocène. Trois faciès lithologiques ont été observés en surface, à savoir, de l'amont vers l'aval:

- ✓ des calcaires plus ou moins marneux.
- ✓ des calcaires à silex.
- ✓ des calcaires au sens strict du terme qui forment la base de l'entité.

Les essais mécaniques n'ont pas mis en évidence de différences qui caractérisent entre ces faciès.

II.7 SEISMISITE REGIONALE

Une phase tectonique particulièrement importante s'est développée au Miocène inférieur. Elle est caractérisée par une période de distension suivie d'une période de compression qui est apparue le long de la marge du bassin constantinois, une série de failles de sens inverse N60°-N110°. Le chevauchement de Sidi Merouane, identifié à l'ouest El kébir, est lié à cette période de compression.

Il semble évoluer d'est en ouest en zone de flexure. Ce chevauchement forme la structure géologique la plus importante à proximité du site dans la région du projet.

En relation avec cette structure, un décrochement important a été identifié à une centaine de mètres en amont du site. Cette faille de chevauchement traverse la zone d'affleurement des marnes, au niveau de l'oued El Dib et montre une direction plus ou moins parallèle aux couches avec un pendage vers le Nord-Ouest. Elle est associée à des remontées de terrains triasiques mais ne montre aucun signe de déplacement au cours des 10.000 à 12.000 années.

La région de Beni-Haroun est située dans une région sismique classée, d'après Bochel, comme pouvant subir d'intensité VI à VII. Cette zone est bordée au nord-ouest et au sud-est par deux zones sismiquement plus actives d'intensité possible supérieure à VIII.

Parmi les épicentres localisés dans un rayon de 30Km du site, les séismes le plus importants pour le site sont:

- 23 Aout 1978 :
 - Magnitude non déterminée (probablement inférieure à 3,5)
 - Distance au site 16 Km
 - Zone de chevauchement de Sidi-Merouane.
- 20 Décembre 1983 :
 - Magnitude 4,6
 - Distance au site 27 Km
 - Proche d'une limite de nappe du charriage (Massif de Sidi-Merouane.

Le séisme répertorié le plus important dans un rayon de 50 km autour du site est celui du 27 Octobre 1985 de magnitude 5,9 et dont l'épicentre est situé au nord-est de Constantine à environ 40 Km du site de Beni-Haroun.

Les séismes dans la région de Beni-Haroun peuvent être regroupés en trois zones sismotectoniques:

- le massif de la petite Kabylie (Zone des Bibans et des Babors) ;
- le plateau de Constantine ;
- les failles de charriage du type de chevauchement de Sidi Merouane.

Les structures tectoniques dimensionnantes pour le site sont situées dans le bassin de Constantine est limité (ANBT, T.E., 2002) aux failles bordières du massif et les failles de charriage.

II.8 TRANSFERT DE BENI-HAROUN

INTRODUCTION

Le transfert des eaux à partir du barrage Beni-Haroun sert à combler le déficit de six (06) wilayas situées dans les hautes plaines constantinoises (Mila, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna, Jijel "la région d'El Milia" et Khenchela). La consistance physique de cet aménagement composé d'ouvrages de mobilisation, de transfert, de traitement, d'adduction et de réseaux d'irrigation, comprend globalement :

- **Deux barrages principaux**: Beni-Haroun et Boussiaba d'une capacité respective de 960 et 120 millions de m³.
- **Trois barrages réservoirs** ; Oued Athmania 35 Mm³, Koudiat Medouar 62 Mm³ et Ourkis 65Mm³.
- **Trois stations de pompage d'eau brute** de grande capacité dont la plus importante est celle de Beni-Haroun d'une puissance de 180 mégawatts refoulant 23 m³/seconde sur une hauteur de 800 m.
- **200 Km de conduites de gros diamètre** de transfert d'eau brute dont 7 Km de tunnel.
- **Six couloirs d'alimentation en eau potable** comprenant 3 stations de traitement, 490 Km de conduites d'adduction, 25 réservoirs et 15 stations de pompage.
- **Quatre périmètres d'irrigation** ; Teleghma, Remila, Ouled Fadel, Chemora et Batna-Ain Touta d'une superficie totale d'environ 42.000 ha.

II.8.1 Mobilisation et transfert

A- Barrage de Beni-Haroun : le barrage de Beni-Haroun a été achevé et réceptionné au courant de l'année 2003. Il a une capacité de 963 Hm³, il n'a été mis en eau qu'en Décembre 2005 suite à des désordres décelés au niveau du soubassement de l'ouvrage maintenant résorbés. Son remplissage actuel a atteint 700 Mm³.

B- Station de pompage : la station est installée en bordure de barrage de Beni-Haroun. L'entreprise de réalisation: groupement Franco-Espagne "ALSTOM-DRAGADOS". La station est équipée et testée à sec, elle est maintenant opérationnelle.

C- Lot conduites :

- ✓ Transfert du Barrage de Beni-Haroun vers le Barrage de Oued Athmania.
- ✓ Transfert du Barrage d'Oued Athmania vers le Barrage de Koudiat Medaour.

D- Barrage Réservoir de Oued Athmania : le barrage de Oued Athmania est d'une capacité de 35 Mm³ et a pour objectif de stocker les eaux en provenance du Barrage de Beni-Haroun pour ensuite, les transférer en direction de la retenue de Koudiat M'daour déjà réalisée et la retenue de Ourkis dont les travaux sont en cours.

E- Barrage Ourkis : le barrage de Ourkis est d'une capacité de 65Mm³ et situé à 20 Km à l'ouest d'Oum El Bouaghi.

Le rôle de cet ouvrage est de stocker et de réguler les eaux en provenance du barrage Beni-Haroun via le barrage réservoir de Oued Athmania et ce pour assurer l'irrigation de périmètres de Teleghma et Chemora et améliorer l'AEP de la wilaya d'Oum El Bouaghi.

F- Barrage de Koudiat M'daour : le Barrage de Koudiat M'daour a été achevé au courant de l'année 2000. La capacité de cet ouvrage est de 57 Hm³.

Il est destiné à stocker et réguler les apports propres à son bassin versant, ainsi qu'à ceux en provenance du Barrage Beni-Haroun pour assurer l'AEP des couloirs de Batna, Arris, Ain Yagout et Kaïs et l'irrigation des périmètres de Batna et Touffana.

G-Barrage de Boussiaba : le site du barrage est situé à 3 Km en amont de la confluence entre l'oued Boussiaba et son affluent rive droite, l'oued M'chat dans la wilaya de Jijel. Ce Barrage permettra le stockage des eaux de l'oued Boussiaba (120Hm³).

Les ouvrages constituant le transfert permettront de dériver les eaux stockés dans la retenue de Beni-Haroun.



Figure II.8 Schéma de transfert hydraulique de Beni-Haroun (ANBT)

Pour compléter le système de Beni-Haroun, le secteur est en voie de lancer les projets suivants :

1. Le transfert Boussiaba –Beni Haroun : pour participer au remplissage de la retenue de Beni- Haroun pour un volume de 69 Mm³.
2. Le transfert Oued Athmania –Ain Kercha : cette continuation de la dorsale principale du projet.
3. Le transfert Ain Kercha – Barrage Ourkis.
4. Le transfert Ain Kercha – Barrage Koudiat Medouar.
5. Le renforcement de l'alimentation en eau potable d'El Milia et de sa zone d'activité à partir du Boussiaba.
6. Le renforcement de l'alimentation en eau potable des villes d'Oum El Bouaghi, Ain El Beida, Ain M'lila, Ain Kercha et Ain Fekroun à partir du barrage Ourkis.

II.8.2 Le tracé de l'ensemble du transfert

Les principales composantes hydrauliques du transfert sont illustrées par le schéma synoptique de la figure II.9 et le profil longitudinal de la figure (II.10), met en évidence l'importance des hauteurs de refoulement d'eau du Nord vers le Sud imposée par la configuration du relief.

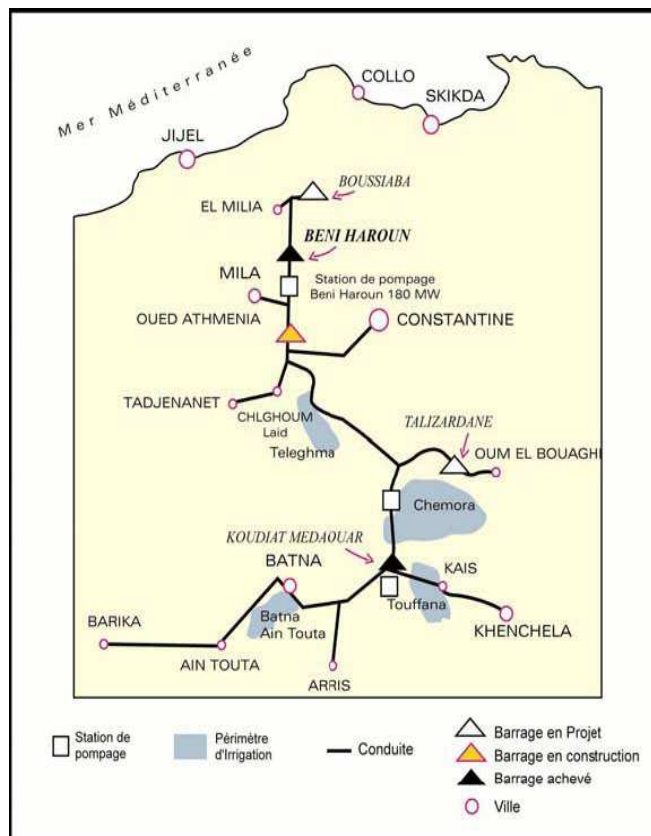


Figure II.9 Schéma régional du transfert de Beni-Haroun

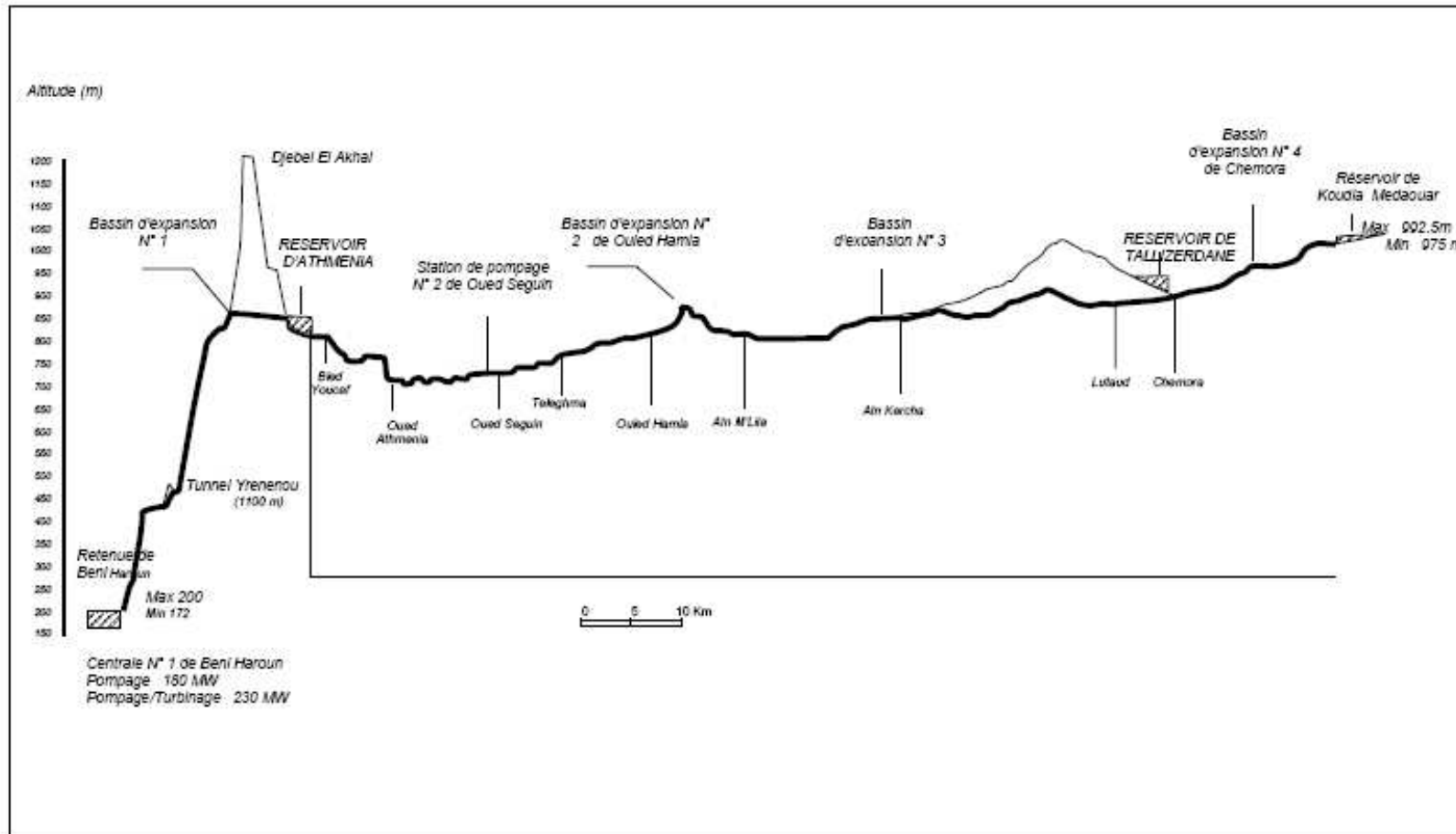


Figure II.10 Profil longitudinal du transfert de Beni-Haroun (d'après ANBT; T.I., 1999)

Le transfert des eaux de Beni-Haroun vers la retenue de Oued Athmania (bassin de l'oued Kaim) s'effectuera par le biais de la station de pompage, située en bordure du lac du barrage (rive gauche du Rhumel). Cette gigantesque station, d'une puissance de 180 Mégawatts, a la possibilité de refouler, sur une hauteur de 702 m, un débit de 23 m³/s. Son installation par le groupement Franco-Espagnol ALSTOM-DRAGADOS a nécessité l'aménagement d'un puits cylindrique semi-enterré de 85 m de profondeur et de 30 m de diamètre.

A l'aide d'une conduite métallique déployée sur une longueur de 11,4 km (diamètre variant entre 1,9 et 2,6 m), l'eau de la retenue de Beni-Haroun, d'une cote minimale d'exploitation de 172 m, sera relevée par pompage vers le bassin de compensation d'Ain Tinn, situé à 850 m d'altitude (soit une dénivellation de 678 m). C'est à travers ce bassin d'une capacité de 20.000 m³ que transitera l'eau brute pompée pour être acheminée :

En direction des centres urbains au Nord de la wilaya de Mila (*couloir 1*). La station de traitement à Ain Tinn est susceptible de produire un volume de 90.000 m³ par jour (près de 33 hm³ par an) ;

- Vers le réservoir de Oued Athmania, qui est réalisé par la société turque ENKA. Ce réservoir formé par une digue de 35 m barrant l'oued Kaim, a une capacité totale de 33,6 hm³ et un volume utile de 25 hm³, compris entre les cotes 821 et 840 m.

Un tunnel d'une longueur de 6,4 km et d'un diamètre fini de 3,9 m est nécessaire pour traverser le Djebel El Akhal (culminant à 1.200 m) et transporter l'eau d'une façon gravitaire, du bassin de compensation d'Ain Tinn vers le réservoir de Oued Athmania.

La construction d'une importante station de traitement à la cote 795 m, à proximité de la retenue de Oued Athmania, est en vue de produire un volume de 330.000 m³ par jour (plus de 120 hm³ par an). Les conduites qui partiront de cette station vont acheminer l'eau traitée, par pompage vers les agglomérations du Sud de la wilaya de Mila (*couloir 2*), et par gravité vers Constantine et ses environs (*couloir 3*).

Le tracé du transfert vers les Hautes Plaines, au Sud, est commun jusqu'aux environs d'Ain Kercha. Partant du réservoir de Oued Athmania et sur une longueur de 19,6 km, l'eau sera acheminée de façon gravitaire vers la station de pompage de Oued Seguin, située à la cote 724,6 m.

Le prélèvement d'eau au profit du périmètre d'irrigation de Télèghma (8.000 ha) s'effectuera à l'extrémité du tronçon, à partir d'un réservoir tampon.

La station de pompage de Oued Seguin (36 MW) relèvera l'eau vers le bassin d'expansion de Ouled Hamla, distant de 21,6 km. Partant de ce bassin, l'eau sera envoyée par gravité, sur une longueur de 21,1 km, vers la station de pompage de Ain Kercha (36 MW).

À partir d'Ain Kercha, la conduite de transfert par refoulement se divisera en deux branches, vers les réservoirs d'extrémité :

En direction du Sud-Est, pompage d'eau brute à destination de la retenue Ourkis, à construire dans la région d'Oum El Bouaghi. L'eau sera amenée au réservoir, par refoulement sur une longueur de 19,9 km jusqu'au point culminant de 990 m, puis par gravité sur une distance de 7,1 km.

Le réservoir de Ourkis (capacité : 70 hm³ ; volume utile : 65 hm³, compris entre les cotes 881 et 902,5 m), prévu dans une cuvette très évasée, nécessitera la construction de deux digues de col, au Nord et au Sud de la retenue (45 m de hauteur maximale). Il régularise l'apport d'eau nécessaire à l'irrigation de deux périmètres (Chemora et Touffna-Remila).

En direction du Sud-Ouest, pompage d'eau brute sur une distance de 49,4 km à destination du barrage de Koudiat Medaour (capacité : 82 hm³).

Ce barrage-tampon fournira un volume utile de 62,5 hm³ entre les cotes 975 et 992,5 m. Il est en cours d'exploitation et reçoit un apport propre (bassin de l'oued Reboa) estimé en moyenne interannuelle à 18 hm³ par an.

Le système de distribution projeté prendra naissance à partir des 2 stations de pompage (cotes: 954 m et 1.078 m) disposées en série au pied de la station de traitement de Koudiat Medaour.

Cette dernière comportera 4 lignes de traitement pour la production de 119.000 m³ par jour (plus de 43 hm³ par an) en première phase, et de 178.000 m³ par jour (65 hm³ par an) en phase finale. Le pompage de l'eau traitée s'effectuera vers un réservoir de mise en charge ensuite vers le *couloir 1* composé des villes de Batna, Tazoult, Ain Touta et Barika..

Quatre autres stations de pompage seront disposées en série (cotes 954, 970, 1039,77 et 1120 m) pour assurer le refoulement de l'eau traitée vers le *couloir 2* comportant les centres urbains de Khenchela, Kais, El Mahmel et Ouled Rechache.

Toujours à partir de la station de traitement de Koudiat Medaour, *le couloir 3* (adduction de 36 km et 5 stations de pompage) est en cours d'étude en vue d'alimenter la ville d'Arris, au cœur du massif de l'Aurès.

Il est également envisagé de fournir à partir de la retenue de Koudiat Medaour, l'eau d'irrigation nécessaire au périmètre en projet de Batna-Ain Touta (6.000ha). Ce réservoir assurera probablement un complément d'eau au périmètre d'irrigation de Chemora.

8.2.1 Transfert de Beni-Haroun au profit de l'A.E.P. de Mila-Constantine

La première tranche de l'aménagement concernant l'A.E.P. des deux wilayas de Mila et Constantine est déjà opérationnelle à partir de l'année 2006.

Pour les trois couloirs du système de transfert de Beni-Haroun vers Mila-Constantine, la population concernée, répartie entre 19 agglomérations, atteindra plus de 2 millions d'habitants en 2030.

Il est envisagé d'affecter un volume annuel de 24,8 hm³ au profit des 10 agglomérations du *couloir 1*, 21,8 hm³ aux cinq agglomérations composant le *couloir 2* et 74,6 hm³ au profit du *couloir 3*, le plus important par le volume de ses besoins en eau car regroupant la ville de Constantine, la ville nouvelle d'Ali Mendjli (plateau d'Ain El Bey) et la ville d'El Khroub (figure II.11).

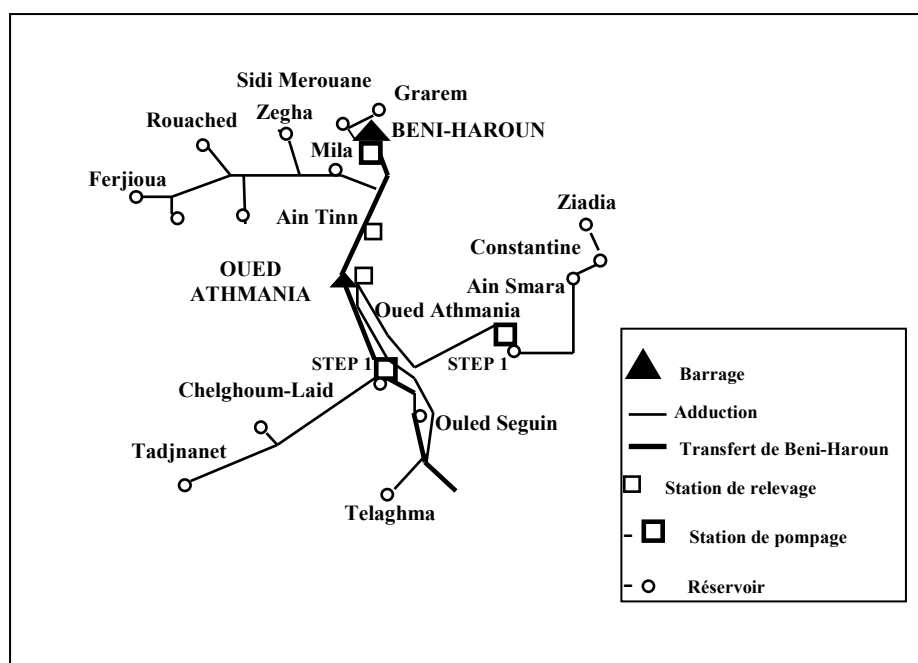


Figure II.11 Schéma de transfert de Beni- Haroun au profit de l'A.E.P. de Mila-Constantine

Les conduites d'adduction se développeront sur une longueur totale de 208 km, avec un diamètre variant entre Ø250 à Ø1.600 mm. Les installations de traitement sont prévues pour produire un total de 420.000 m³/jour d'eau potable.

Le refoulement des volumes traités sera assuré par 7 stations de pompage et 9 brises-charge.

La capacité de stockage devra atteindre les 54.000 m³, répartis entre 17 réservoirs dont la capacité de chacun varie entre 500 et 20.000 m³.

8.2.2 Transfert de Beni-Haroun au profit de l'A.E.P. de Khenchela-Batna

Le projet de transfert relatif à l'A.E.P. des *couloirs 1* (Batna-Barika) et 2 (Khenchela) est en cours de réalisation. Il est confiée à un groupement d'entreprises algériennes (Cosider, HydroAménagement, HydroTechnique et GTH) .Grâce au transfert par refoulement des eaux de Beni-Haroun vers le réservoir de Koudiat Medaour, près de 60 millions de m³ par an d'eau potable seront fournis à 8 agglomérations abritant autour de 1,5 millions d'habitants à l'horizon 2030 (figure II.11). A partir de la station de traitement prévue au site de Koudiat Medaour, les conduites d'adduction se développeront dans les Hautes Plaines sur une longueur

totale de 244 km avec des diamètres variant entre 300 et 1.000 mm. La capacité de stockage prévue est de 15.500 m³ et six (6) stations de pompage sont nécessaires pour assurer le refoulement de l'eau, le long des deux tracés Est et Ouest. Un troisième couloir déployé vers les hauteurs Sud (adduction de 36 km, 5 stations de pompage et 2 réservoirs de 5.000 m³ chacun) est en cours d'étude en vue d'alimenter le centre d'Arris, situé au cœur du massif de l'Aurès.

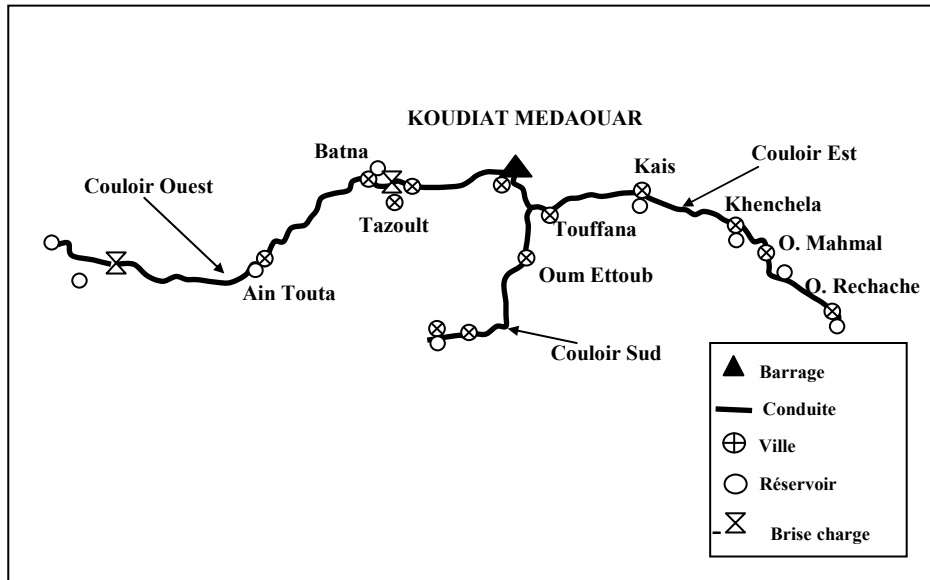


Figure II.12 Schéma de transfert de Beni- Haroun au profit de l'A.E.P. de Khenchla-Batna

8.2.3 Transfert de Beni-Haroun au profit de l'A.E.P. d'Oum-El-Bouaghi

Le transfert relatif à l'A.E.P. de couloir d'Oum El Bouaghi sera alimenté à partir du barrage d'Ourkiss. Ce barrage est situé sur la wilaya d'Oum El Bouaghi à 14km au sud d'Ain Fakroun directement en aval du confluent des Oueds d'El Kébir et d'Ourkis, il est en cours de construction. Le barrage est alimenté par le barrage réservoir de Oued Athmania via une conduite de longueur 86 km et d'un diamètre variant de Ø1.300 à Ø3.000. Le transfert se fait par pompage moyennant deux (2) stations de pompes (Oued Seguin d'un débit $Q = 19,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et Ain Kercha d'un débit $Q = 15,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

L'étude d'alimentation en eau potable des villes d'Oum El Bouaghi, Ain Beida, Ain M'lila et Ain Fakroun à partir de barrage de Ourkiss et pour des besoins en eau d'environ 51 million de m³ par an, est confié au groupement du bureau d'études BRLI-TASSILI ENGINEERING. (ANBT, 2008).

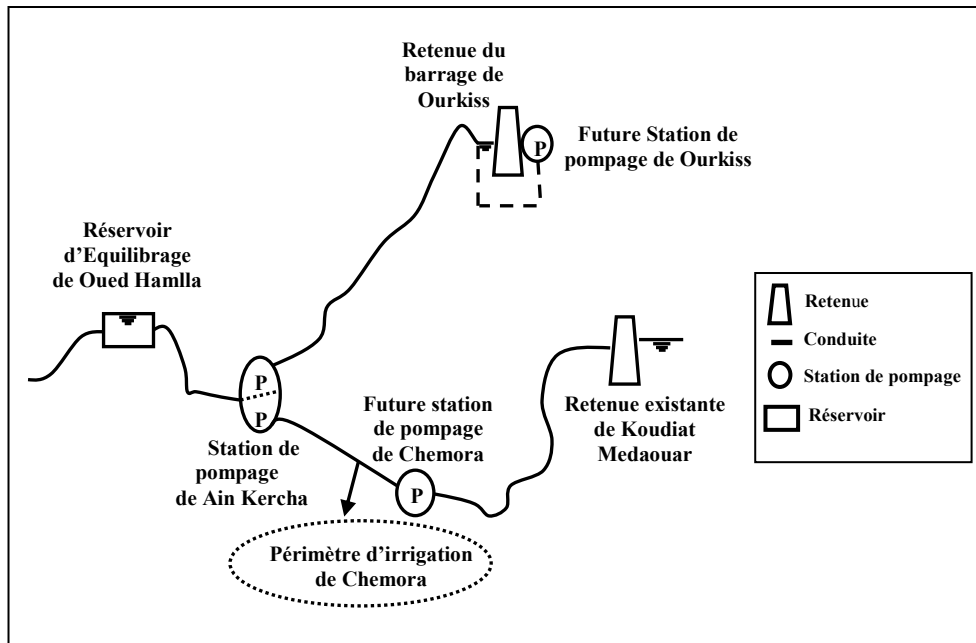


Figure II.13 Schéma de transfert de Beni- Haroun au profit de l'A.E.P. d'Oum El Bouaghi

II.8.3 Les projets de périmètres d'irrigation alimentés par « Beni-Haroun »

1. Le périmètre de Teleghma

(8.000 ha) s'étend le long des vallées du haut Rhumel et son affluent l'oued Seguin, dans une zone comprise entre les centres de Ouled Hamla au Sud et Oued Seguin au Nord. Cette zone semi-aride de la frange Nord des Hautes plaines (autour de 400mm de pluie par an), vouée principalement à la céréaliculture sèche, recèle des sols argilo-limoneux qui se prêtent bien à l'irrigation.

2. Le périmètre de Chemora

(15.000 ha), localisé entre les wilayates d'Oum El Bouaghi et Batna, se trouve dans un milieu fortement marqué par l'endoréisme, au cœur des Hautes plaines où le déficit hydrique est plus marqué qu'à Teleghma.

L'oued Chemora qui prend sa source sur le versant de l'Aurès s'écoule dans un étroit couloir, entre les djebels Bou Arif et Fedjoudj, pour atteindre la plaine de Boulhilet au Nord. A l'issue de ce « foug », l'oued contourne son propre cône de déjection qui a causé le refoulement des deux sebkhas, Garaet Ank El Djemel à l'Est et Garaet Djendli à l'Ouest.

3. Le périmètre de Touffana-Remila (11.000 ha)

Il est réparti entre 2.000 ha dans la zone de Touffana (Ouled Fadhel) et 9.000 ha choisis parmi les 21.000 ha de sols de la plaine de Remila ayant déjà fait l'objet d'études agro-pédologiques en (1971 et 1973). La sélection des terres aptes à l'irrigation tient compte des deux principales contraintes à mettre en valeur dans la région : la salinité et la profondeur des sols.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, la description du grand projet du transfert a été faite en se basant sur l'étude élaborée par le bureau internationale "Tractebel Engineering" en montrant les différentes caractéristiques du barrage, caractéristiques de la retenue, type de barrage et les ouvrages annexes.

La construction de cet ouvrage qui représente actuellement le plus grand barrage en Algérie. Il permet de mobiliser les eaux de l'oued Kébir-Rhumel qui est la principale ressource hydrique de la région.

La retenue est créée par la réalisation du barrage de Beni-Haroun dont la hauteur est proche de 120m. La retenue est caractérisée par une surface de 3.700 ha à la cote 200m, Le volume régularisé est de 435 Hm³.

Le projet est implanté dans une région dont le cadre géologique est caractérisé par la présence de nappes de charriage. Ces nappes de charriage constituent de vastes ensembles de terrains d'âge antécambrien à miocène inférieur qui se sont déplacés sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres et qui se sont superposés mécaniquement suivant des modalités variées et complexes.

Le site du barrage est caractérisé par une barre calcaire éocène d'environ 100 m d'épaisseur d'orientation globale Est-ouest, reposant sur les marnes noires paléocènes à l'aval et surmonté par des marnes éocènes à l'amont.

Le cadre hydrogéologique du site du barrage de Beni-Haroun est caractérisé par la présence de deux nappes bien différenciées: une nappe située dans les terrains calcaires varie de 105m à 120m et une nappe perchée, située dans les terrains marneux moins perméables varie de 155m à 185m.

Le grand transfert hydraulique à partir du barrage de Beni-Haroun sert à combler les besoins en eau vers les six (06) wilayas qui sont situées dans les hautes plaines constantinoises (Mila, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna, Jijel "la région de El Milia" et Khenchela). La consistance physique de cet aménagement composé d'ouvrages de mobilisation, de transfert, de traitement, d'adduction et de réseaux d'irrigation.

CHAPITRE III

CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT KEBIR-RHUMEL

III.1 CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN

Le bassin de l'oued El Kébir est situé à l'Est de l'Algérie. Il est bordé au Sud par les hauts plateaux telliens, à l'Ouest par la montagne de la petite Kabylie, au Nord par la frontière de partage des eaux que forme l'Atlas Tellien, et à l'Est par le bassin du Seybouse (figure III.1).

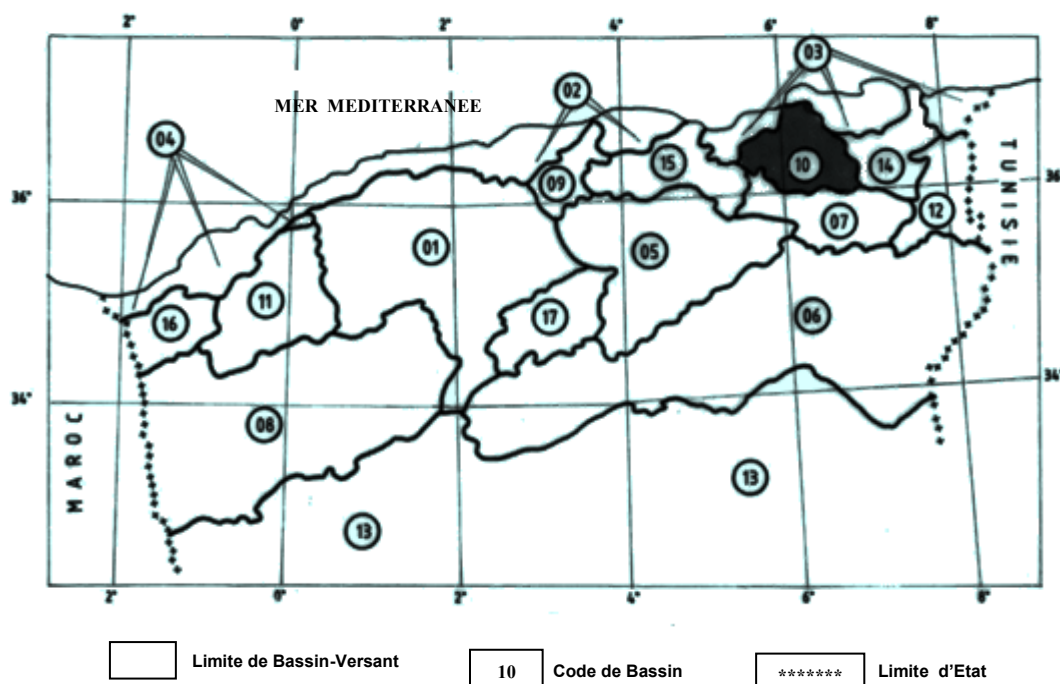
Le bassin Kébir-Rhumel s'étend sur une surface totale de 8.825 Km². Il se divise en deux grandes parties distinctes. La partie occidentale, constituée par le bassin de l'oued Enndja d'une superficie de 2.169 km², et se caractérise par des précipitations relativement élevées (644 mm/an en moyenne) et une topographie montagneuse. Les cotes atteignent 1.400 m ou davantage (Figure III.2).

La partie orientale, constituée par le bassin de l'oued Rhumel, se caractérise par une topographie plus douce et des précipitations modérées (460 mm/an en moyenne). La superficie de ce bassin est de 5.490 Km². dans ce bassin, le terrain s'élève jusqu'à 1.300 m ou davantage.

Les deux rivières l'Endja et le Rhumel confluent près de l'extrémité amont de la gorge de Beni Haroun pour former l'oued El Kebir. La confluence se situe à environ 3 kilomètres au sud de l'extrémité amont de la gorge. La superficie drainée par le barrage de Beni-Haroun est de 7.725 Km²

Les débits des oueds Enndja et Rhumel à leur confluence ne sont pas proportionnels à leurs surfaces drainantes respectives. Dus à des caractéristiques hydroclimatologiques et géologiques différentes, les apports de l'oued Enndja sont plus grands que ceux de l'oued Rhumel.

Les températures moyennes dans le bassin varient d'environ 5°C en Janvier à environ 25° en Août. La précipitation moyenne du centre du bassin varie d'environ 7mm/mois en juillet et à environ 80mm/mois en Décembre (Mébarki, A., 1984). L'humidité relative varie entre 50% environ en Août et à 70% environ entre Novembre et Mars.



01- CHELIF, 02- COTIERS ALGEROIS, 03- COTIERS CONSTANTINOIS, 04- COTIERS ORANAIS, 05 CHOTT HODNA, 06- CHOTT MELRHIR, 07- HAUTS PLATAUX CONSTANTINOIS, 08- HAUTS PLATAUX ORANAIS, 09- ISSER, 10- KEBIR-RHUMEL, 11- MACTA, 12- MEDJEDA

Figure III.1 Situation géographique et limites du bassin

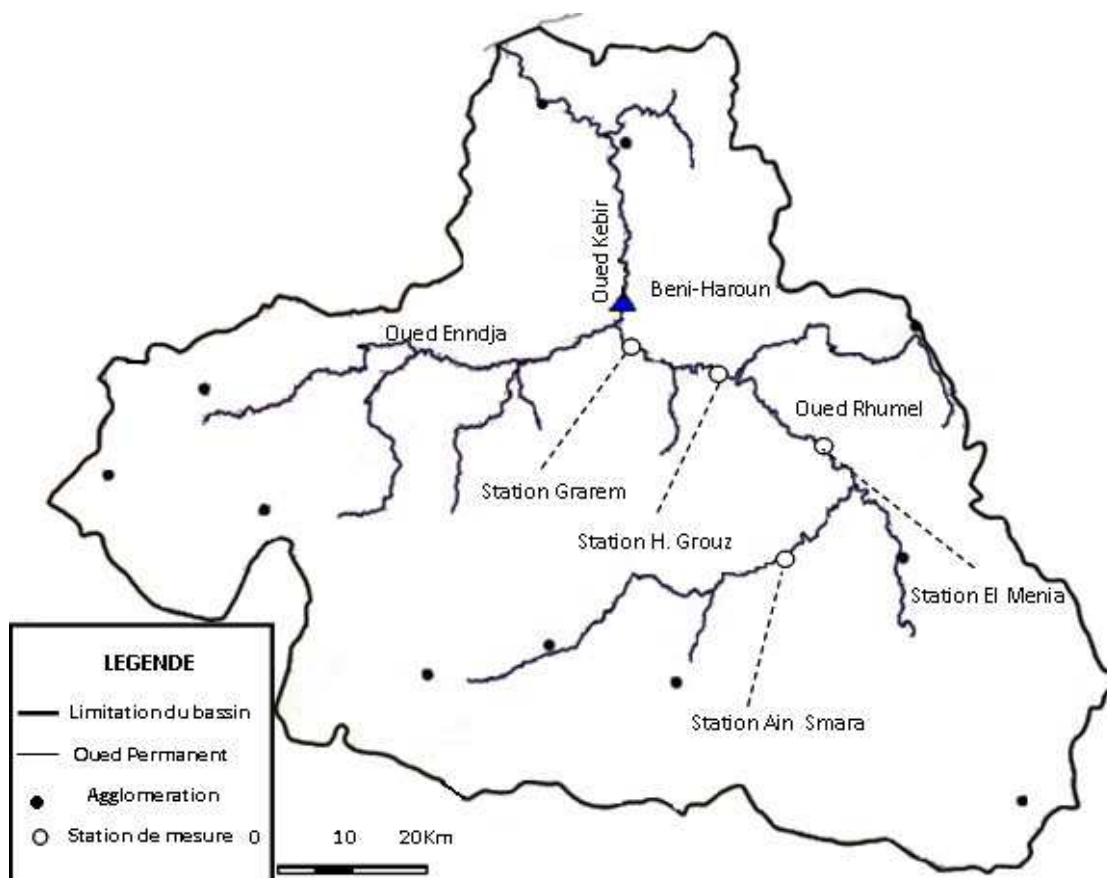


Figure III.2 Réseau hydrographique du bassin Kébir-Rhumel

Les surfaces drainées en différents points caractéristiques du bassin sont données au tableau ci-dessous.

Tableau III.1 Superficies drainées aux points caractéristiques du bassin

Sites	Superficies (Km ²)
OUED ENDJA	
- Station de jaugeage Tassaadane	937
- Confluence avec Oued Rhumel	2169
OUED RHUMEL	
- Barrage Hamam Grouz	1130
- Station de jaugeage Grarem	5400
- Confluence avec Oued Endja (avec Hammam Grouz)	5490
OUED EL KEBIR	
- Confluence Oued Rhumel et Oued Endja	7659
- Entre confluence et Beni Haroun	66
➤ Site du barrage	
- Avec Hammam Grouz	7725
- Sans Hammam Grouz	6595
- Station de jaugeage El Ancer (avec Hammam Grouz)	8735

III.1.1 Liste des sous bassins : Les différentes surfaces des sous bassins du bassin versant kébir-Rhumel sont présentées dans le tableau ci-après

Tableau III.2 Différentes surfaces des sous bassins de Kébir-Rhumel

Code	Nom de sous bassin	Superficie (km ²)	Nombre de postes
10-01	Oued Dehamecha	1067	4
10-02	Oued kébir Ennjda	1102	6
10-03	Oued Rhumel Amont	1241	8
10-04	Oued Rhumel Seguin	1150	5
10-05	Oued Merzoug	1835	10
10-06	Oued Rhumel Smedou	1091	4
10-07	Oued Kebir Marithine	1339	6

III.1.2 Caractéristiques des stations étudiées : Les caractéristiques des stations à prendre en considération dans cette étude sont illustrées dans le tableau III.3.

Tableau III.3 Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin

Code	Nom des stations	Coordonnées des stations		
		X	Y	Z
100403	Ain Smara	841.94	335.80	602
100601	Grarem	821.55	363.35	173
100701	El Ancer	807.60	395.45	15
100109	Tassaadane	78570	359.4	436

III.2 LA GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT

Le bassin Kébir-Rhumel, présente une opposition structurale qui se traduit par un substratum relativement simple au sud formé par de vastes étendues sédimentaires d'où émergent des massifs calcaires isolés et un édifice beaucoup plus complexe au Nord constitué de nombreuses séries hétérogènes empilées au cours de phases tectoniques successives.

On distingue de l'amont à l'aval du bassin: les hautes plaines, le piémont Sud-tellien et les massifs telliens du nord (Figure III.3).

1- Le domaine des hautes plaines présente des massifs calcaires créacés émergeant en horsts d'un ensemble de terrains à dominante marneuse. Les phénomènes karstiques sont très développés dans la partie sud de ces massifs calcaires : il s'agit d'un karst vadose important (lapiés, avens notamment des djebels Nif en Nser, Fortas, Gueriou...), favorisé par le climat de haute altitude régnant sur les massifs en question et par l'ampleur des perturbations tectoniques. Les massifs septentrionaux (Dj. Zouaoui, Karkara, etc.) possèdent, quant à eux, un karst phréatique profond.

2 – Le piémont Sud-tellien correspond au bassin néogène de Constantine qui se prolonge à l'ouest par la nappe de Djemila. Le bassin néogène de Constantine présente une grande dépression miopliocène s'étend de Ferjioua à l'ouest jusqu'à Zigoud Youcef à l'est et est limitée par les hautes plaines, au sud. Il s'agit de basses collines où un réseau de ravins dense donne au relief un aspect très disséqué. Ce vaste bassin lacustre comporte quelques reliefs calcaires isolés (Dj Akhal, massifs d'Ahmed Rachedi, Dj. Bou Cherf, Dj. Ouakissène...) correspondant à des séries telliennes charriées vers le sud pendant la phase alpine. Les puissants dépôts continentaux accumulés dans cette dépression sont composés, dans l'ensemble, d'argiles où affleurent parfois des niveaux conglomératiques rouges et de calcaires lacustres.

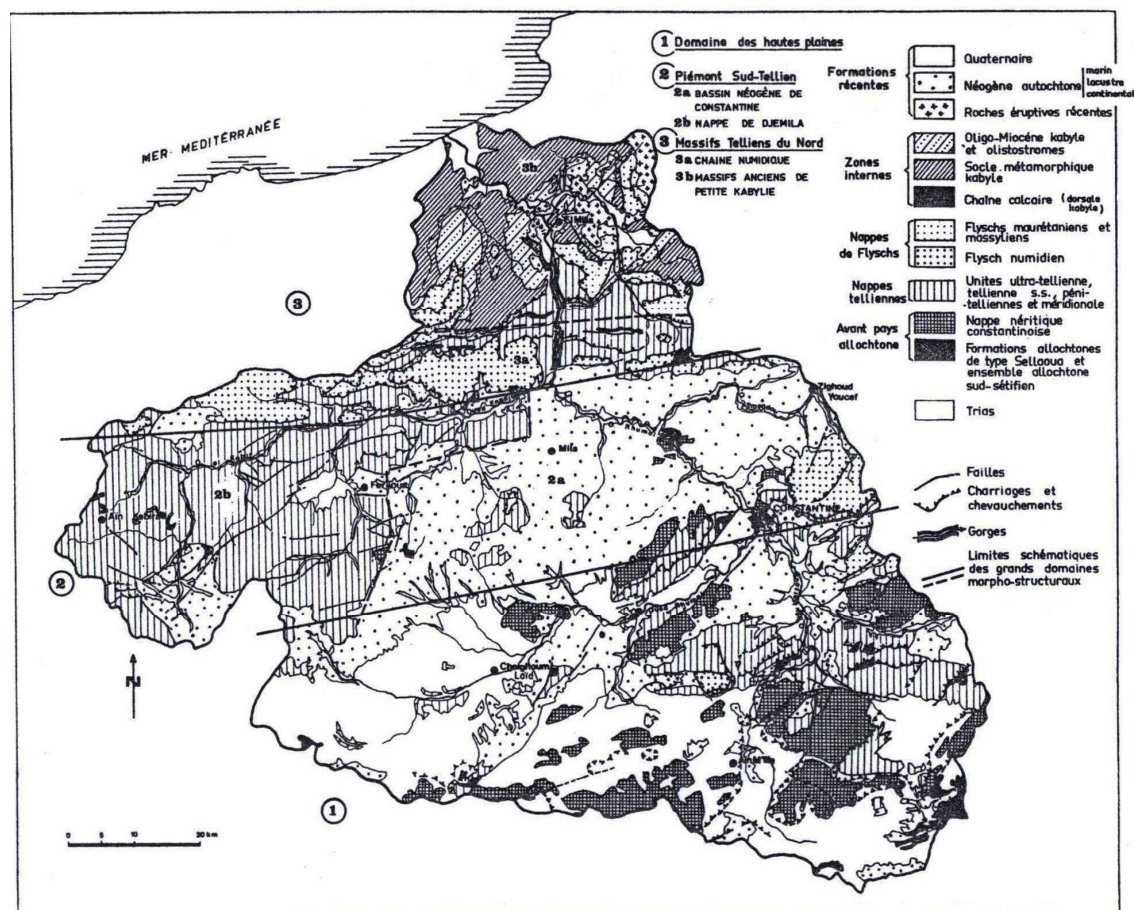


Figure III.3 Carte de la morphologie du bassin Kébir-Rhumel (Mébarki, 1984)

Dans la nappe de Djemila, le bassin néogène est relayé à l'ouest par des collines dont l'ossature est constituée de séries telliennes comporte des formations marneuses ou argileuses d'âge Crétacé supérieur-Eocène dominées par endroits par des séries de calcaires ou de calcaires-marneux (Dj. El Halfa, Chouf Aissa, Sidi Mimoun, Médjounès....).

3- Les massifs telliens du Nord qui présentent la chaîne numédique et les massifs anciens de la petite Kabylie au Nord : la chaîne numédique est composée essentiellement de massifs calcaires jurassiques (Dj. M'sid Aicha, Sidi Driss etc.) et de massifs gréseux oligocènes (chaînon de Zouagha, Mouïas, Bou Affroun et Tamesguida). Ces reliefs forment une importante barrière rocheuse qui partage la petite Kabylie d'El Milia au nord et le pays constantinois au sud. Les massifs calcaires, affectés par une tectonique complexe, percent en forme d'écailles d'épaisses couches à dominante marneuse.

Ils sont recouverts par endroits par le charriage du socle Kabylie (ex Dj. Sidi Driss). La liaison de ces massifs jurassiques de la chaîne numédique avec ceux des Babors, plutôt à l'ouest, se fait par une bande de Trias diapir qui jalonne le chevauchement bordier Kabylie sur plusieurs kilomètres.

Les massifs gréseux d'âge oligocène sont plaqués sur un complexe marneux sénonien éocène assez tectonisé. Ils ont un aspect stable mais sont impliqués à leurs bordures dans des plis violents.

Les massifs anciens de la petite Kabylie sont formés de terrains métamorphiques (micashistes, gneiss, phyllades) recouverts de lambeaux oligomiocènes (argilo-gréseux) et traversés par des roches éruptives d'âge Miocène (granite). Dans la zone côtière, la vallée de l'oued El Kébir, très élargie, présente un vaste dépôt alluvial récent.

Un trait orographique important limite au Sud le massif ancien : une étroite chaîne bordière recoupe transversalement la vallée d'El Kébir et tronquée dans le massif de Mouloud demamène ; elle correspond au chevauchement bordier Kabylie, formé essentiellement de flysch (Durant, 1952).

III.3 LITHO-STRATIGRAPHIE DU BASSIN

Les bassins intérieurs en particulier de Grarem, Mila, Ibn Ziad sont des bassins sédimentaires autochtones de la fin du Tertiaire correspondant à un empliment de séries sédimentaires sur les nappes telliennes (Rullan-Perchirin, 1985).

Le substratum tellien peut affleurer à la faveur de l'érosion. Ainsi les marnes noires à boules jaunes apparaissent sur la rive gauche de l'oued Inkala à 2 km de sa confluence avec l'oued Rhumel (Carte III.4).

Les séries les plus profondes des nappes telliennes peuvent percer l'ensemble des séries mio-pliocènes. Les massifs ou djebels du Kheneg, Beni-Hamza, El Akra, Boucharev, sont des massifs calcaires dont la surrection est due à d'importantes failles,

Ces bassins mio-pliocènes sont tous à dominance argileuses, argiles, grès et conglomérats, calcaires travertineux ou lacustres constituant la trilogie lithologie.

La trilogie de formations lithologiques mais une diversité de paysages et modes d'érosion caractérisent ces bassins. La diversité, est surtout liée à une très grande variété, tant des séries argileuses et conglomératiques. Ainsi dans les bassins de Mila et d'Ibn Ziad, les argileuses grises miocènes sont, sur la carte de E. Ficheur (Mébarki, 1986), spatialement très étendues, mais elles sont différentes par leurs propositions de gypse ou de sable ainsi que par la première phase, s'ils sont massifs au Kef en N'sour, le sont beaucoup moins à la base du Djebel Kranga, et leur composition granulométrique est fort variable.

Les conglomérats rouges de la deuxième phase offrent une diversité encore plus grande en fonction de leur forte hétérométrie, de leur cimentation et de leur texture. Or l'hétérométrie et la non massivité sont deux critères de vulnérabilité.

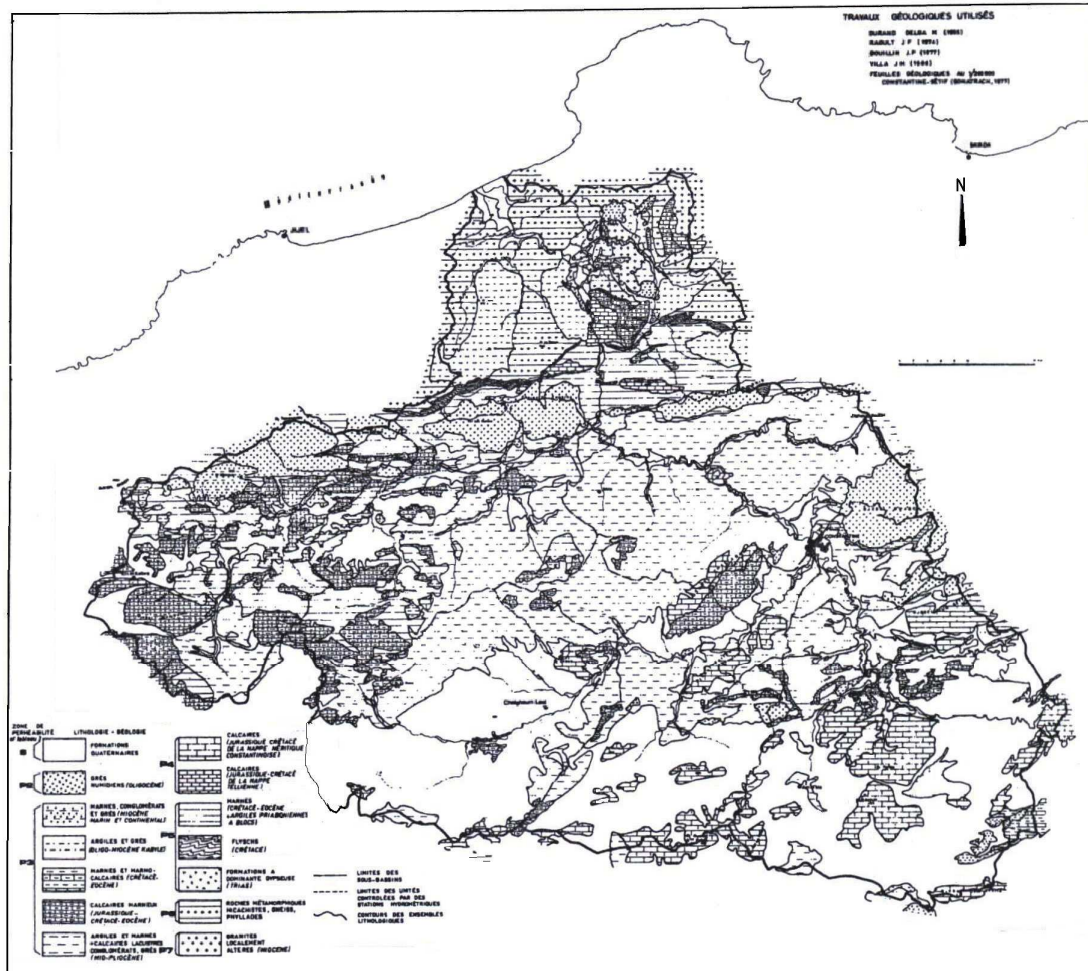


Figure III.4 Carte de lithologie du bassin Kébir-Rhumel (Mébarki, 1984)

Les changements rapides de faciès dans une même série lithologie, dus à leur mise en place et mouvements tectoniques excluent en grande partie, toute généralisation de comportements d'une formation face à l'eau. L'hétérogénéité des matériaux est accrue par la présence de formations superficielles plus ou moins étendues et épaisses, physiquement et chimiquement différentes.

III.4 CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES GENERALES DU BASSIN

Les différents paramètres morphométriques du bassin (forme altitude, pente relief, etc.) interviennent, souvent, de façon combinée dans les mobilités de l'écoulement.

Ils ont l'avantage de se prêter à une analyse quantifiée mais l'emploi des méthodes de mesures correspondantes doit être mené avec prudence vu l'extrême interférence des facteurs physiques et l'influence, parfois prononcée, de certains paramètres qu'il est difficile d'exprimer par des méthodes précises et définies.

Aussi, pour que la quantification de cet aspect du milieu physique par le biais de la morphométrie soit rigoureuse et valable. Il faut que cette dernière soit appliquée à des bassins de tailles réduites et homogènes du point de vue géologique.

La morphométrie, écrivait Baulig, H., (1969), peut rendre des services appréciables à condition qu'elle se propose des interrogations simples et bien définis.

Elle choisira, alors, comme terrain d'étude de très petites étendues aussi homogènes que possible quant à la structure, aux processus en jeu, aux stades d'évolution. Des mesures répétées en monde suffisant pourront se prêter à un traitement statistique, susceptible d'éliminer les erreurs d'observation et de dégager peut être quelque facteurs dominants.

Dans le cas du Kébir-Rhumel, la taille importante du bassin (8825 Km²) et même celle des bassins partiels contrôlés par des stations hydrométriques partie nord, rendent une telle étude fort délicate. Aussi, l'échelle de travail adoptée correspondant au 1/200.000 ne permet pas d'affiner les mesures des paramètres très morphométrie en question. De cet ensemble, il est possible de délimiter trois grandes parties du bassin s'identifiant plus ou moins aux grands domaines morphostructures (Mébarki, 1984) dont il été déjà question (figure III.5).

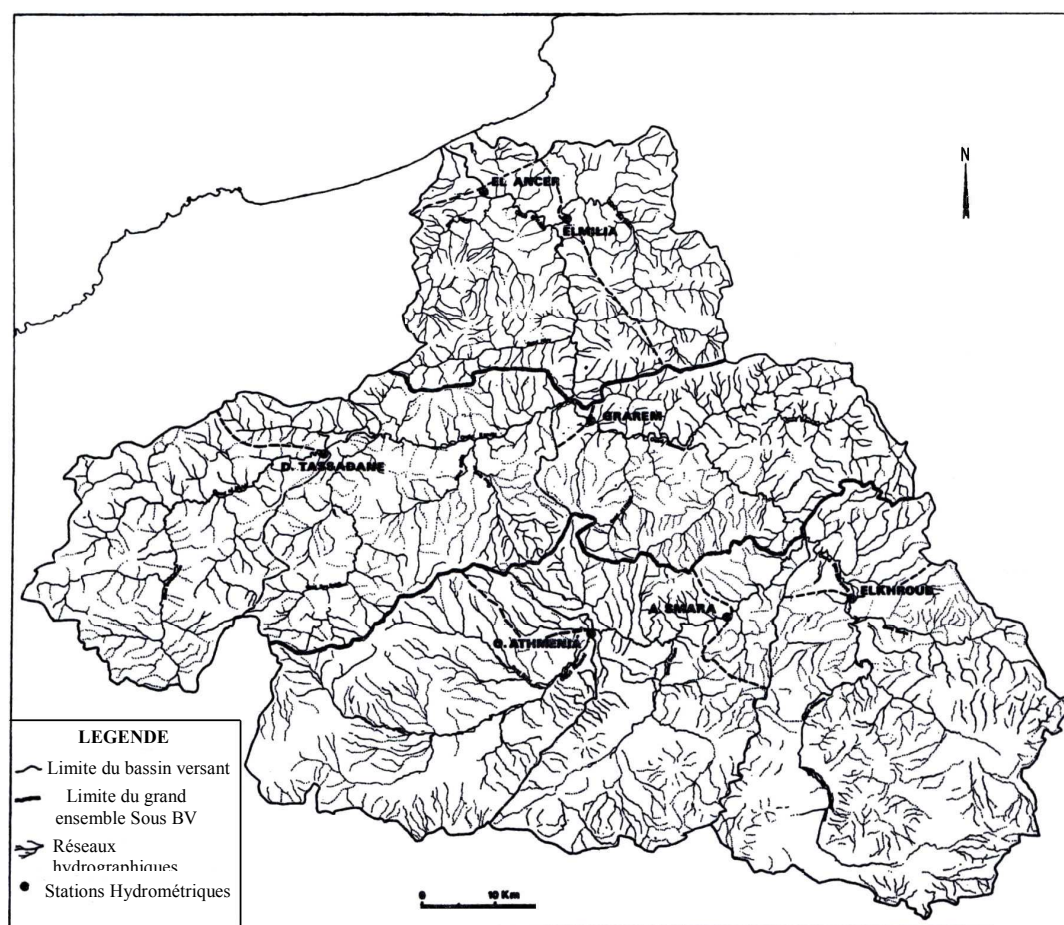


Figure III.5 Chevelu hydrographique (délimitation du bassin d'après Mébarki, 1982 et 1984)

- *le bassin supérieur* : correspond à l'oued Rhumel et l'oued Boumerzoug jusqu'à leur confluence à l'amont de Constantine,
- *le bassin moyen* : formé par l'oued Enndja et l'oued Rhumel inférieur -à l'aval de Constantine- jusqu'à leur confluence aux environs de Sidi Mériouane,
- *le bassin inférieur* : correspond à l'oued El Kébir, à l'aval de la confluence Enndja-Rhumel

Nous nous limiterons, dans ce cas, à quelques caractéristiques morphométriques susceptibles d'identifier le bassin et ses diverses unités et de comparer ces dernières entre elles, sans pour autant prétendre en tirer des conclusions exhaustives.

III.4.1 Etude morphométrique du bassin versant Kébir-Rhumel

Les différentes caractéristiques de formes du bassin Kébir-Rhumel ont été présentées dans les tableaux (III.4 et III.5).

Tableau III.4 Caractéristiques morphométriques du bassin versant Kébir-Rhumel

Paramètres	Symboles	valeurs	Unité
La surface	A	8825	Km ²
Le périmètre	P	498,5	Km
L'indice de compacité de Gravelus	K _C	1,48	-
L'altitude à 95 %	H _{95 %}	400	M
L'altitude à 5 %	H _{5%}	1400	M
L'altitude à 50 %	H _{50%}	1075	M
L'altitude moyenne	H _{moy}	742,2	M
La longueur du rectangle équivalent	L	203,05	M
La largeur du rectangle équivalent	l	43,46	M
L'indice de pente de roche	I _p	0,056	M / m
L'indice de pente globale	I _g	2,5	M / m
L'indice de pente moyenne	I _M	5,35	M / m
Dénivelée spécifique	D _s	275,26	M
Type de relief	Fort	-	-
La densité de drainage	D _d	0,74	Km / Km ²
Densité de talwegs élémentaire	F1	0,30	-
Coefficient de torrentialité	C _t	0,09	-
Temps de concentration	T _c	17,32	Heures

III.4.2 Le Climat : le bassin de Kébir-Rhumel est caractérisé par un climat méditerranéen, il comporte :

- **Un régime monomodal (maritime) :** caractérisé par une forte proportion de pluie d'Hiver, puis une décroissance régulière jusqu'à un minimum estival. Ce régime correspond à un étage bioclimatique subhumide au nord du bassin.
- **Un régime de transition Tellien :** avec un maximum pluviométrique principal en Décembre, et un décroissement à partir de Mars et Avril. Il correspond aux stations situées dans la zone médiane du bassin.
- **Un régime continental :** caractérisé par l'abondance relative des pluies du Printemps-Eté et la présence de deux maximum, l'un en Hiver (Décembre, Janvier) et l'autre au printemps (Mars et Avril). Ce régime s'identifie au secteur des hautes plaines, donc un bioclimat exclusivement semi-aride.

III.4.3 La courbe hypsométrique

Le tableau III.5 présente la répartition altimétrique dans le bassin de Kébir-Rhumel.

Tableau III.5 Répartition altimétrique dans le bassin Kébir-Rhumel

L'élévation (m)	Bornes sup (m)	Superficie entre courbes		Surfaces cumulée	
		A _i (Km ²)	%	A _i (Km ²)	%
0-200	200	373,3	4,23	373,3	4,23
200-400	400	757,08	8,58	1130,38	12,81
400-600	600	1186,08	13,44	2316,46	26,25
600-800	800	2172,71	24,62	4489,17	50,87
800-1000	1000	3192,89	36,18	7682,06	87,05
1000-1200	1200	961,04	10,89	8643,1	97,94
1200-1400	1400	163,26	1,85	8806,36	99,79
1400-1600	1600	15,89	0,18	8822,25	99,97
1729>1600		2,65	0,03	8824,9	100

La figure de la courbe hypsométrique du bassin est montrée ci-dessous.

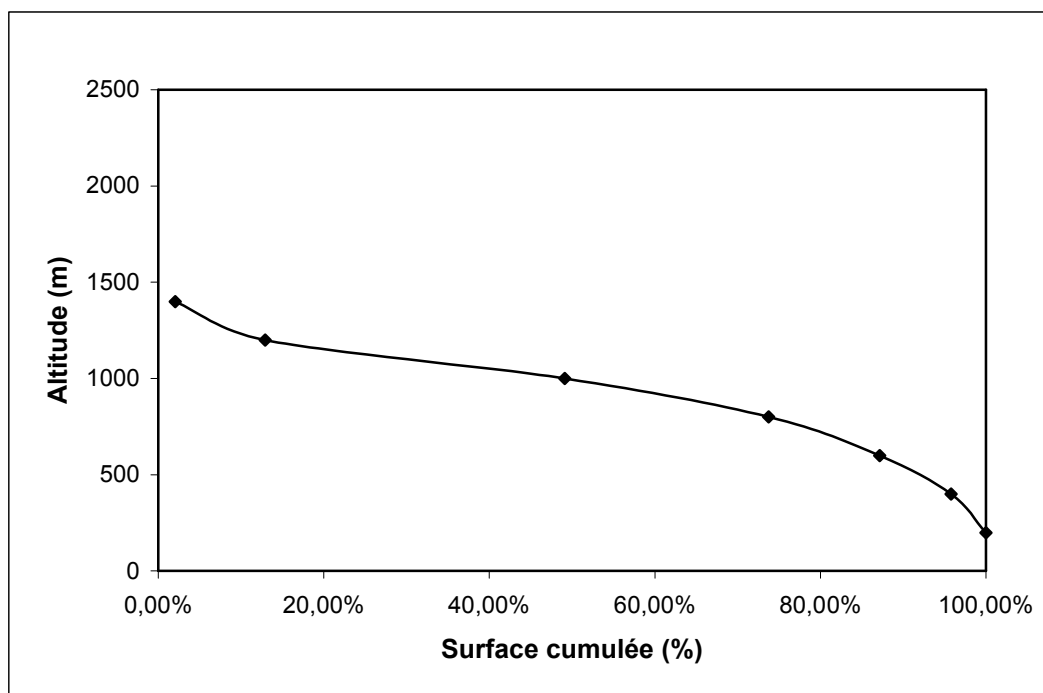


Figure III.6 Courbe hypsométrique du bassin Kébir-Rhumel

Pour plus de détails, les caractéristiques morphométriques des grands sous bassins (Kébir et Rhumel) contrôlées par des stations hydrométriques principales (Tableau III.6).

Tableau III6 Caractéristiques morphométriques des grands sous bassins contrôlés par des stations hydrométriques principales

Bassin/Station	Surface A (km²)	Périmètre P (km)	Altitude moyenne (m)	Altitude maximale (m)	Longueur de rectangle équivalent (Km)	Longueur de talweg Principal (Km)	Indice de compacité Kp	Indice de pente de Roche (m/km)	Densité de drainage Km/Km²	Pente de l'oued
Sou bassin Dhamcha (Station Tassadane)	960	150	929	1462	46,1	64	1,35	0,16	0,77	0,0041
Sou bassin Rhumel Semdou (Station Grarem)	5320	374	806	1443	123	157	1,43	0,09	0,70	0,006
Sou bassin Kébir Rhumel (Station El Ancer)	8735	532	767	1729	101	203	1,59	0,12	0,74	0,0013

III.5 PROFILS EN LONG

Les profils en long relatifs au cours principal du Kébir-Rhumel et de ses principaux affluents permettent d'apporter des éléments complémentaires à la densité de drainage, au vu du rôle déterminant des pentes des thalwegs sur le ruissellement superficiel et surtout sur les vitesses d'écoulement lors des crues (figure III.7).

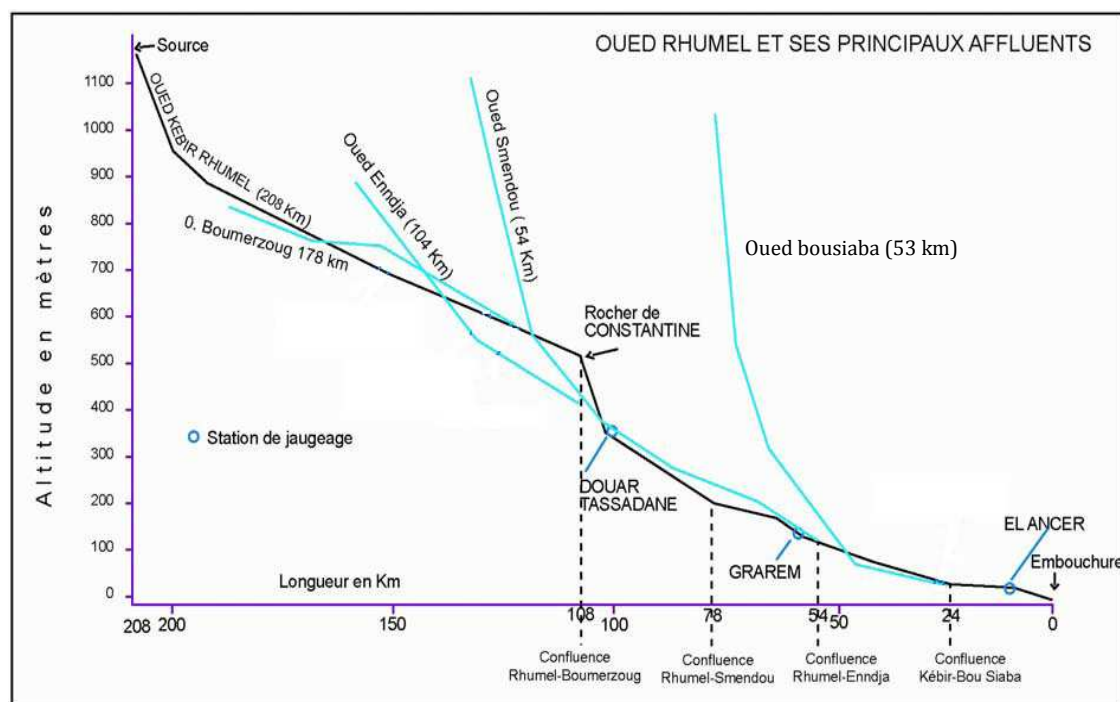


Figure III.7 Profil en long au cours principal et ses effluents du Bassin versant Kébir-Rhumel (Mébarki, 1982 et 1984)

Les profils en long relatifs au cours principal du Kébir-Rhumel et de ses principaux affluents permettent d'apporter des éléments complémentaires à la densité de drainage, au vu du rôle déterminant des pentes des thalwegs sur le ruissellement superficiel et surtout sur les vitesses d'écoulement lors des crues.

Les grands traits qui résultent de ces profils comportant, une faible pente de cours d'eau dans les cours d'eau des hautes plaines (Oued Rhumel à Constantine 6.5%, oued Boumezoug à Constantine 4%) et les fortes pentes des effluents de oued Bousiaba (16,5%) en confluence avec l'oued kébir en aval de la région de Grarem et aussi l'oued Semdou (18,5%) en confluence avec oued Rhumel.

L'importante rupture de pente au niveau des gorges de Constantine et l'encaissement profond du lit de l'oued permet d'augmenter la vitesse de propagation de crues, à l'aval du rocher de Constantine ce qui provoque un transport considérable de sédiments en aval vers la retenue de Beni-Haroun. Ce phénomène permet d'avoir la création d'un courant de densité dans la retenue du barrage de Beni-Haroun.

Comme il est déjà décrit par Duquennois, H., la formation de courant de densité dans une retenue est conditionnée par deux paramètres (Remini, B., 1996) :

- Un apport solide important (concentration élevée) dans la retenue.
- Un écoulement torrentiel à l'entrée de la retenue, c'est-à-dire que le cours d'eau principal présente une forte pente.

III.6 LA VEGETATION ET LEURS REPARTITIONS GEOGRAPHIQUES

Le couvert végétal est d'autant plus efficace contre l'érosion car il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie, diminue la formation d'une croûte de battance et contribue à réduire la vitesse du ruissellement à la surface du sol en le recouvrant de débris végétaux (feuilles, brindilles...). Son rôle est d'autant plus efficace qu'il couvre une forte couverture du sol supérieure à 60 % et assure une très bonne protection (Viguier, 1993).

III.6.1 Classification des types de végétation

Dans une optique hydrologique, la végétation n'est pas à considérer sous son aspect botanique ou phytogéographique mais sous son aspect de couverture du sol, plus ou moins modifiée par l'homme.

C'est en fait, la densité d'occupation du sol qui intervient comme élément différenciateurs au niveau de la dégradation des sols. Il a semblé, par conséquent, utile d'adopter une classification des types de végétation par ordre de densité ou d'efficacité décroissante, proposée par Tricart, J (1963 et 1968). Son application au bassin Kébir-Rhumel a permis de distinguer les grandes catégories suivantes: (Figure III.8).

1. Surfaces bien protégées en permanence, donc défavorable au ruissellement et à l'érosion hydrique : forêts (en partie dégradées, prairies naturelles et artificielles permanentes).
2. Surfaces protégées incomplètement par la couverture végétale ou les averses tombent sur les parties du sol non protégées et peuvent engendrer un ruissellement plus ou moins violent et exercer une érosion plus ou moins importante.
3. Surfaces mal protégées ou nulles où le ruissellement et l'érosion hydrique sont largement favorisés.

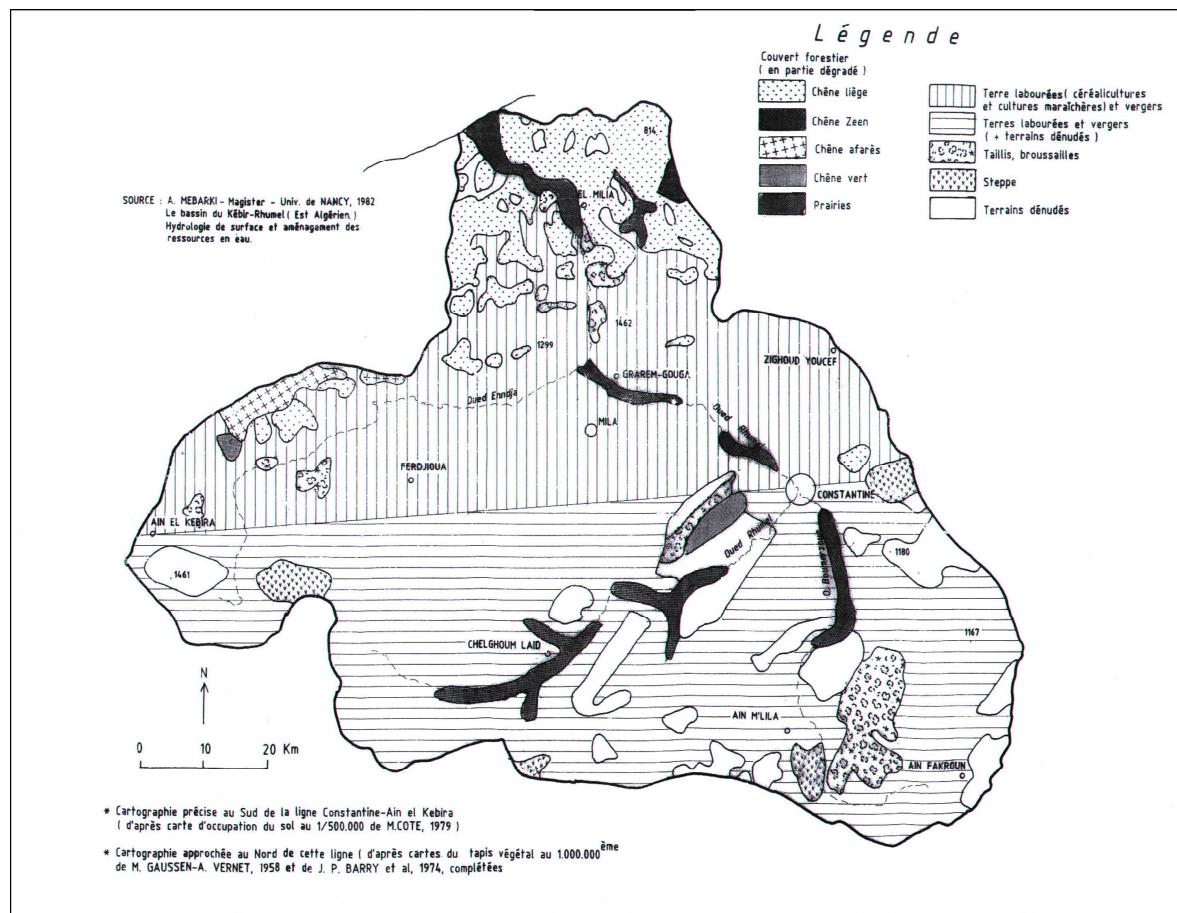


Figure III.8 Carte de Végétation dans le bassin Kébir-Rhumel

L'extension de la couverture végétale dans le bassin est limitée. Sa principale localisation est dans les massifs côtiers de la petite Kabylie qui forment de belles forêts surtout de chêne liège (*Quercus suber*). Chêne liège est relayé par le chêne Zeen (*Quercus mirbeki*) ou par le chêne afarès (*Quercus afarès*) au sud. C'est le chêne vert qui apparaît (*quercus îles* du massif du chettabah) avec quelques formations de pin d'Alep (*Quercus halepensis*) qui a une faible extension. (Figure III.8).

Dans les marges semi arides, les forêts disparaissent et laissent place à une marge matorrale sur les massifs calcaires.

CONCLUSION

Une superficie étendue du bassin Kébir-Rhumel de l'ordre de 8825 Km² s'étend à l'Est Algérien à une forme allongée, un relief faible et un temps de concentration de l'ordre de 18 heures.

Des ensembles morphostructuraux bien tranchés, des caractères morphométriques déterminant des différences sensibles dans l'aptitude des terrains au ruissellement, des facteurs lithologiques donnant lieu à des possibilités d'infiltration très nuancés sur le plan géographique, un climat méditerranéen à forte variabilité spatiale et surtout temporelle est marqué par une influence élevée de l'évapotranspiration, un couvert végétal très discontinu, essentiellement dans l'espace et secondairement dans le temps.

Telles sont les principales conditions physico-géographiques caractérisant le bassin Kébir-Rhumel et dont la combinaison est déterminante dans le comportement hydrologique des diverses unités du bassin.

CHAPITRE IV

LA POLLUTION DES EAUX DE SURFACE DANS LE BASSIN

VERSANT KEBIR RHUMEL

INTRODUCTION

L'Algérie, se caractérise par la rareté des ressources en eau, rejoignant ainsi l'ensemble des pays arides et semi-arides. La pollution de ces ressources par les effluents domestiques et industriels due à l'accroissement démographique et les activités industrielles favorise la dégradation de la qualité de l'eau et compromet le déséquilibre du milieu récepteur (Smith, 2001).

Les caractéristiques morphologiques du bassin Kébir-Rhumel ont permis de réaliser, le plus grand barrage en Algérie (le barrage de Beni-Haroun). Il permet de mobiliser les eaux de l'oued Kébir-Rhumel qui est la principale ressource hydrique de la région. Le barrage de Beni-Haroun est destiné à desservir l'alimentation en eau potable à plus de deux millions d'habitants en l'an 2030 et à l'irrigation de Quatre périmètres (Teleghma, Remila, Ouled Fadel, Chemora et Batna-Ain Touta) d'une superficie totale d'environ 42.000 ha.

La majorité des rejets domestiques et industriels de la région se déversent dans les cours d'eau du bassin (ANBT, 2003). Ces rejets industriels et domestiques dans les cours d'eau du bassin et dans la retenue du barrage favorisent l'enrichissement de l'eau en éléments nutritifs, phosphore et azote et notamment l'augmentation corrélative de la production végétale aquatique, principalement des algues planctoniques ou fixées, ce qui altère les propriétés physiques et chimiques de l'eau (Cablanq et Decamps, 2002).

Plusieurs études menées sur les lacs ont mis en relation la quantité de phosphore disponible, la typologie des plans d'eau et la biomasse des algues du plancton. Ces résultats ont accrédité l'idée qu'on pouvait limiter le développement d'algues en réduisant les apports de phosphores (Cablanq et Decamps, 2002 ; Deceballos et al., 1998). C'est pour cela, il est indispensable d'adopter, les démarches nécessaires pour protéger les cours d'eau du bassin et de réagir rapidement pour faire le recyclage et la récupération des eaux polluantes avant de les rejeter dans les oueds, pour éviter tout risque de contamination des eaux de la retenue du barrage.

IV.1 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin "Kébir-Rhumel" qui s'étend sur une superficie totale d'environ 8800 km² déborde largement les limites géographiques du constantinois (figure IV.1). Il s'étend des marges septentrionales des hautes plaines, des sebkhas au Sud et à la mer méditerranée au Nord. Le bassin est drainé par deux cours d'eau principaux. Dans la

partie sud ; L'oued Rhumel et dans la partie ouest ; l'oued Enndja. Leur confluence à l'aval de Grarem donne l'Oued el Kébir, lequel rejoint plus au Nord méditerrané.

Ces principaux oueds présentent de l'amont à l'aval des aspects nettement contrastés : au relief plat et dénudé et au chevelu hydrographique assez lâche des hautes plaines, succèdent de basses collines telliennes aux vallées encaissées, lesquelles se prolongent au nord par des massifs montagneux affectés par une densité de drainage importante (Mébarki, 1986).

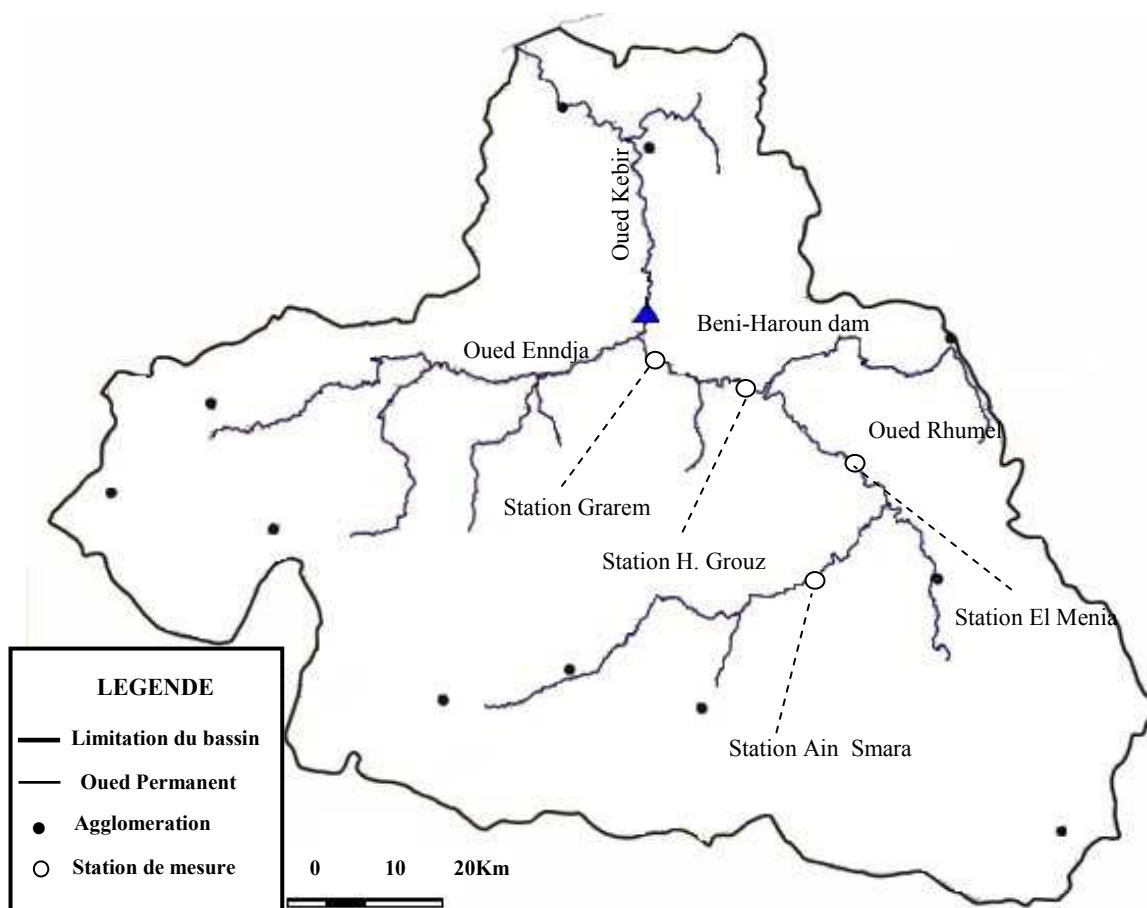


Figure IV.1 Situation géographique des stations de mesures dans le bassin Kébir-Rhumel

IV.2 DONNEES ET PRELEVEMENTS DES ECHANTILLONS

Le présent chapitre est conduit sur le contrôle des différents paramètres indicateurs de pollution dans quatre stations hydrométriques sur le bassin Kébir-Rhumel et l'analyse des paramètres physicochimiques et bactériologiques au bord de la retenue du barrage de Beni-Haroun.

- Des analyses journalières effectuées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) de Constantine durant la période (1984-2005) dans quatre stations

hydrométriques (Ain Smara, Hammam.Grouz, Grarem et Menia). D'autres prélèvements on les a élaborés durant l'année 2006-2007 au pied du barrage.

- Les flacons destinés au prélèvement sont traités pendant 24h à l'acide nitrique HNO_3 dilué à 1/20, égouttés puis rincer à l'eau distillée, un deuxième lavage est élaboré aussi avec de l'acide nitrique à 1/3, il est suivi d'un rinçage à l'eau distillée jusqu'à cessation de toute acidité au papier tournesol. Un dernier rinçage à l'eau distillée fraîchement préparée est effectué (Franck, 2002 ; Rodier, 1996).

- Au moment du prélèvement, les flacons seront rincés 3 fois avec de l'eau à analyser, puis remplis jusqu'au bord. Le bouchon est placé de telle façon qu'il n'y ait aucune bulle d'air et qu'il ne soit pas éjecté au cours du transport (Rodier, 1996).

- L'échantillonnage pour l'analyse bactériologique a été placé dans des bouteilles en verre étuvées à 220°C. Les échantillons ont été transportés à basse température (4°C) depuis le terrain jusqu'au laboratoire. Le pH, l'Oxygène dissous, Conductivité électrique et Température, ont été mesurés in situ.

IV.3 RESULTATS ET DISCUSSION

IV.3.1 Paramètres indicateurs de pollution

L'analyse des paramètres indicateurs de pollution a été effectuée en se basant sur des données mesurées dans les stations hydrométriques (Ain Smara (W. Constantine), Grarem, Menia et Hammam Grouze (W. Mila)) durant la période (1984-2005).

3.1.1. Etude du paramètre NH_4^+

Les variations annuelles du paramètre NH_4^+ durant la période 1984-2005, (figure IV.2) montrent que les teneurs les plus élevées sont observées dans les stations de Ain Smara et Menia et avec des concentrations qui varient entre (4,5 et 27 mg/l). Ces teneurs proviennent essentiellement des rejets domestiques et de l'industrie chimique, notamment de la fabrication des engrais (l'industrie de la wilaya de Constantine, ses rejets allant à Ain Smara (ANBT, 2003 ; ANRH.a, 1999), en présence du chlore, les concentrations élevées de NH_4^+ favorisent la formation des chloramines qui sont très toxiques, ce qui affecte la qualité des eaux traitées, (Potelon, 1998). Les faibles teneurs ont été obtenues dans les stations de Grarem et Hamam Grouze (< 2 mg/l).

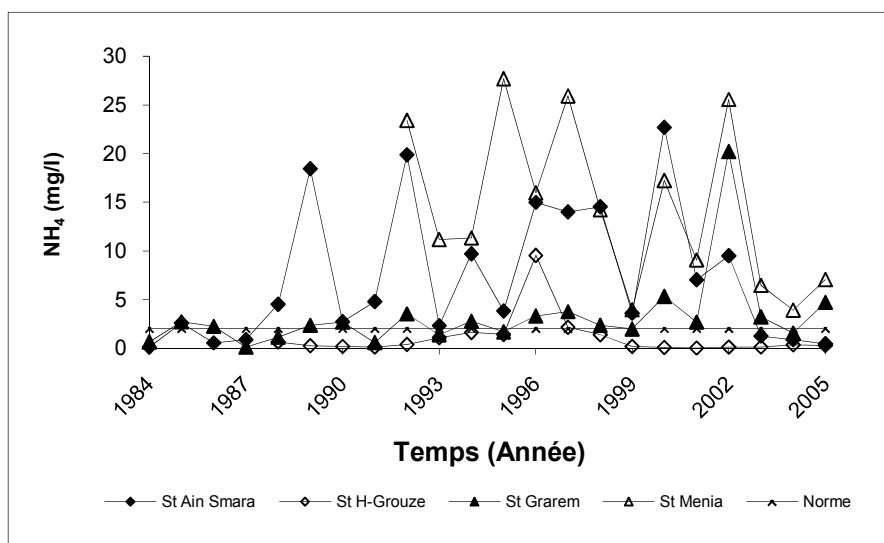


Figure IV.2 Variation moyenne annuelle du paramètre NH₄⁺ durant la période (1984-2005)

3.1.2 Variation de paramètre NO₂⁻

Les teneurs maximales du NO₂⁻ sont obtenues dans les stations Grarem, Menia, et Ain Smara et avec des concentrations qui dépassent largement la norme (1 mg/L).

Ces concentrations élevées proviennent essentiellement de la mauvaise utilisation des engrais, des rejets industriels et domestiques (ANBT, 2003 ; ANBH, 2005). Ces teneurs élevées peuvent être mortelles, puisqu'elles empêchent l'oxygène de se lier à l'hémoglobine dans le sang. (Franck, 2006 ; Potelon et Zysman, 1998).

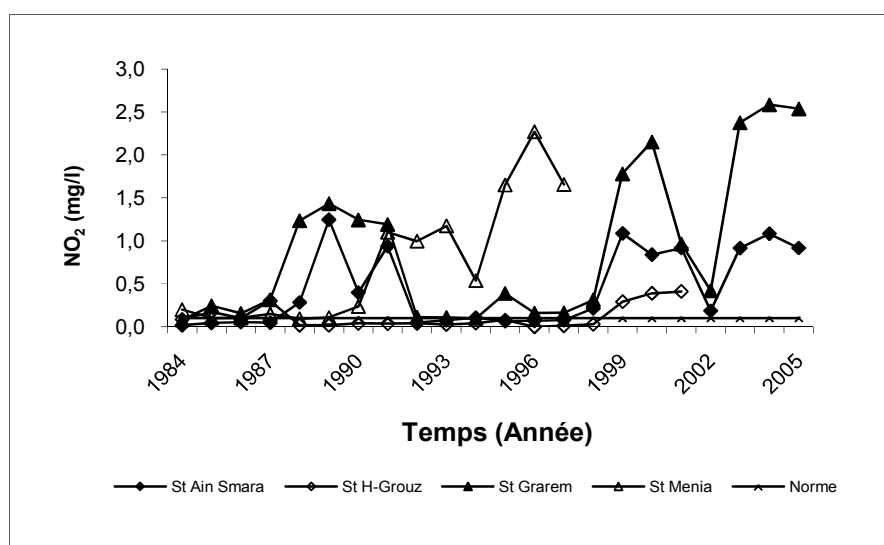


Figure IV.3 Variation moyenne annuelle du paramètre NO₂⁻ durant la période (1984-2005)

3.1.3 Variation du paramètre O_2 dissous

L'oxygène est un facteur essentiel dans la vie aquatique, en particulier aux organismes assurant l'autoépuration des rivières, ce qui constitue un bon indicateur de pollution d'un cours d'eau et du suivi de son autoépuration. La majorité des résultats d'analyse de l'Oxygène dissous obtenus (figure IV.4) pour les stations d'Ain Smara et Menia sont de faibles concentrations (< à 70 mgO₂/l), elles varient entre 21 à 57 mg O₂/l.

Cette diminution de la concentration en Oxygène dissous est due essentiellement à leur consommation par les micro-organismes qui oxydent les matières organiques ou minérales (Neal, 2002).

Seulement les valeurs de l'Oxygène dissous observées dans les stations Grarem et Hammam Grouz montrent la bonne qualité des eaux.

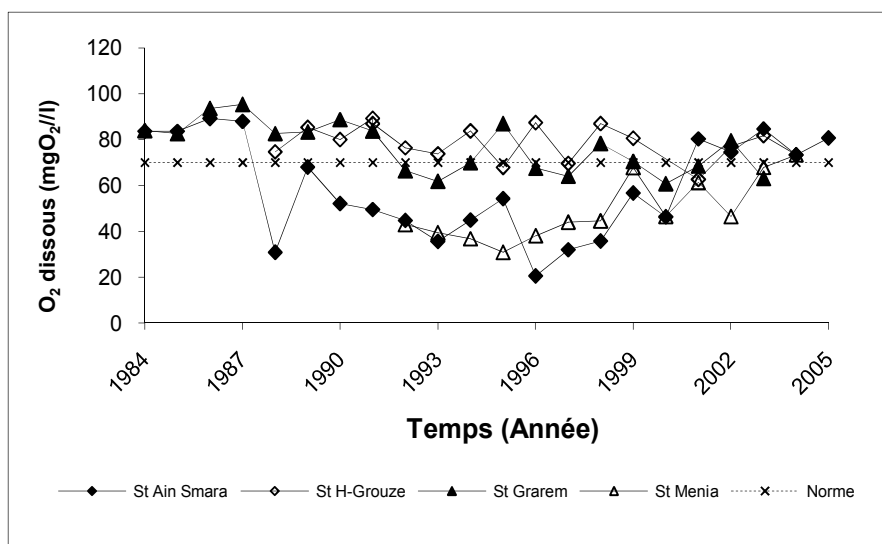


Figure IV.4 Variation moyenne annuelle du paramètre $O_{2dissous}$ durant la période (1984 -2005)

3.1.4 Variation du paramètre NO_3^-

Les résultats obtenus montrent une pollution azotique dans la station de Grarem. Les concentrations moyennes du NO_3^- est de l'ordre de 32 mg/l et qui dépassent les 25 mg/l (figure IV.5). L'ensemble des teneurs observées dans les autres stations sont considérées faibles. Les concentrations du paramètre observé dans ces différentes stations sont d'origine agricole et domestique (ANBH, 1999, 2004 ; ANBH, 2005).

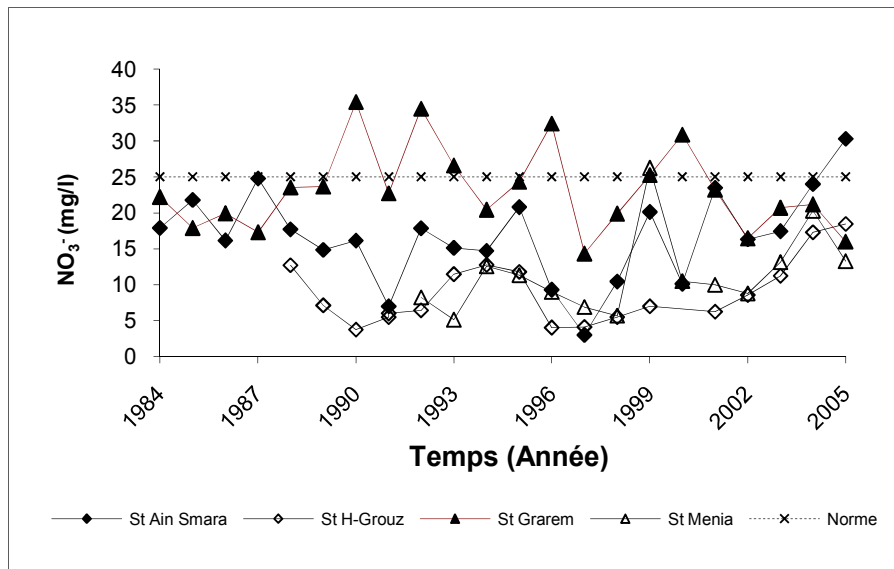


Figure IV.5 Variation moyenne annuelle du paramètre NO_3^- durant la période (1984 - 2005)

3.1.5 Variation du paramètre SO_4^-

Les valeurs de SO_4^- dans la station d'Ain Smara sont élevées et dépassent les 250 mg/L (figure IV.6). Ces concentrations accrues ne sont pas dangereuses mais comportant un risque de troubles diarrhéiques notamment chez les enfants (Potelon et Zysman, 1998).

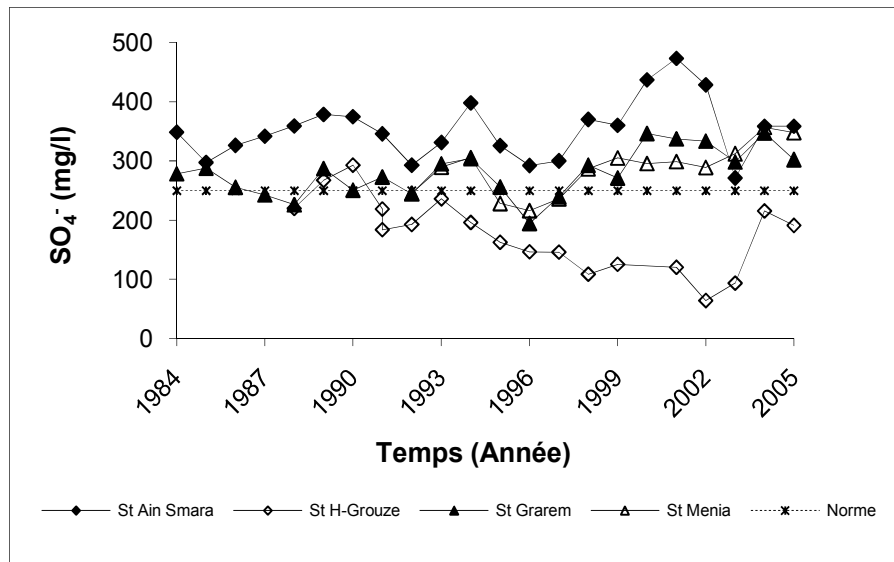


Figure IV.6 Variation moyenne annuelle du paramètre SO_4^- durant la période (1984 - 2005)

Concernant les stations Grarem et Menia, des valeurs de SO_4^- obtenues durant la période (2000-2005) dépassent les 300 mg/L. Cette présence de sulfates peut être liée

à la nature des terrains traversés et les rejets industriels. (Satin, 1995 ; Potelon et Zysman, 1998).

3.1.6 Variation de la turbidité

Les résultats de mesure de la turbidité dépassent largement les 2 FTU. Les concentrations élevées obtenues dans ces stations dépassent les 50 FTU (figure IV.7). Cette augmentation de la turbidité est due essentiellement à la présence d'une quantité importante de matières en suspension dans l'eau à cause de l'érosion des sols dans le bassin versant et l'instabilité des berges des oueds, les matériaux exportés présentent un pouvoir élevé d'adsorption et constituent des supports aux bactéries (Cablanq et Decamps, 2002 ; Neal et Whitehead, 2002). Ce paramètre présente certainement un risque sanitaire, il peut diminuer l'efficacité des traitements de désinfections (la turbidité accroît la consommation de chlore) et génère aussi des risques microbiologiques.

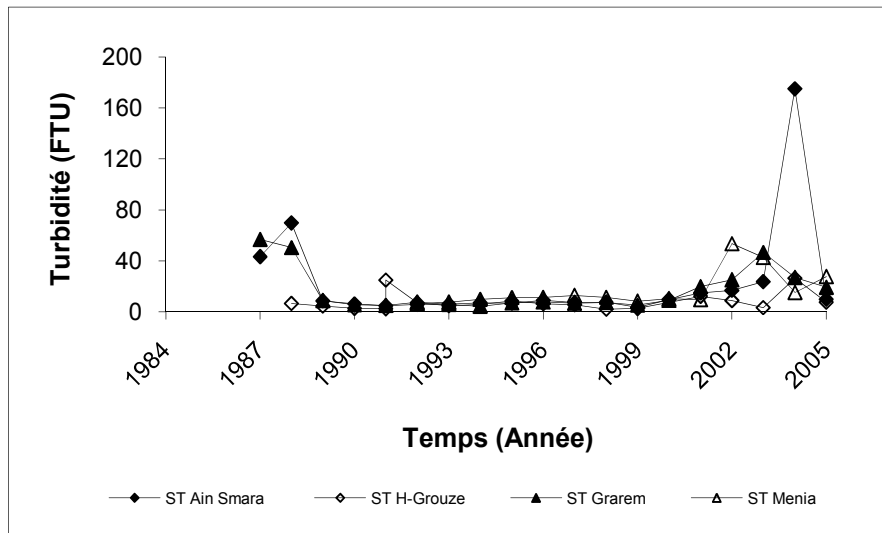


Figure IV.7 Variation moyenne annuelle de la turbidité durant la période (1984-2005)

3.1.7 Variation du paramètre PO_4^-

Les teneurs de PO_4^- observées (figure IV.8) s'accroissent brusquement durant la période d'analyse et présentent des concentrations dépassant largement la norme (1mg/l). Les stations les plus touchées en concentration élevées du PO_4^- dans ce bassin sont: les stations d'Ain Smara, Menia et Grarem avec des valeurs maximales atteignent respectivement les (9,5 mg/l, 9 mg/l et 5 mg/l). Ces résultats indiquent certainement la contamination des eaux de ces cours d'eau par les phosphates.

Cette augmentation des teneurs en PO_4^- provient essentiellement des rejets domestiques (en particulier en raison de l'utilisation des lessives phosphatés) et industriels, confirment le développement important des algues planctoniques qui caractérisent le phénomène d'eutrophisation. (Caplanq et Decamps, 2002 ; Deceballos et al., 1998). La couleur verdâtre observée dans plusieurs cours d'eau du

bassin et en particulier dans la retenue de Beni-Haroun, près de la digue du barrage justifient les résultats d'analyse obtenue et montre la gravité de la situation.

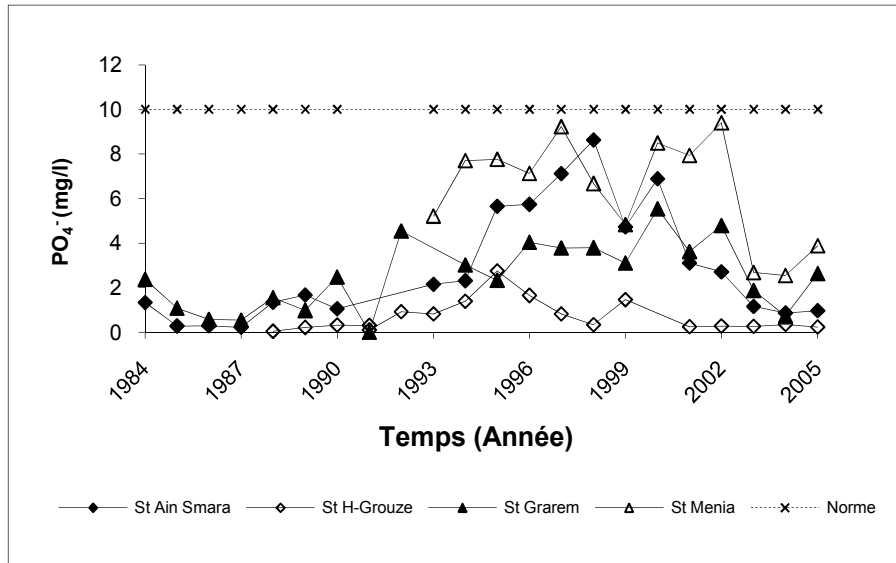


Figure IV.8 Variation moyenne annuelle du paramètre PO_4^- durant la période (1984 - 2005)

3.1.8 Variation du paramètre DCO

La majorité des valeurs de la Demande Chimique en Oxygène dans les quatre stations hydrométriques étudiées (figure IV.9) dépassent largement les (40 mgO_2/l). Cette augmentation indique la grande consommation d'oxygène dans les cours d'eau et les effluents du bassin. Elle est traduite par la dégradation naturelle des matières organiques contenues dans l'eau (développement des micro-organismes aquatiques, ces micro-organismes ne sont pas dangereux mais comportent un risque sanitaire).

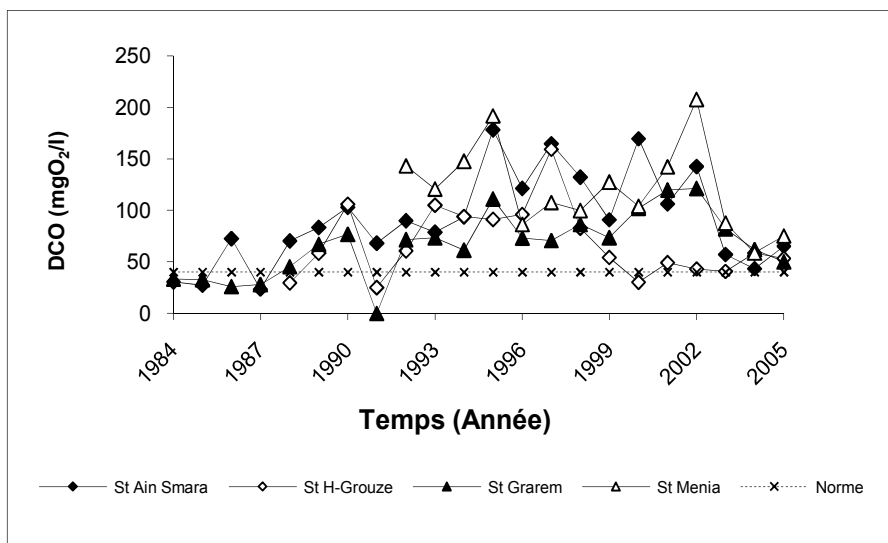


Figure IV.9 Variation annuelle du DCO durant la période (1984-2005)

3.1.9 Variation du paramètre DBO₅

Des concentrations élevées de la Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅) ont été observées dans les différentes stations de mesure (figure IV.10), en plusieurs périodes. Les concentrations dépassent les 30 mgO₂/l. Il s'agit donc d'une consommation potentielle de l'oxygène par voie biologique (toutes matières organiques biodégradables polluantes vont entraîner une consommation d'eau).

Les résultats obtenus montrent une forte pollution de ces eaux par les matières organiques dus à l'accroissement des rejets des eaux usées et industrielles dans la région d'étude. Cette pollution organique est plus importante en saison sèche.

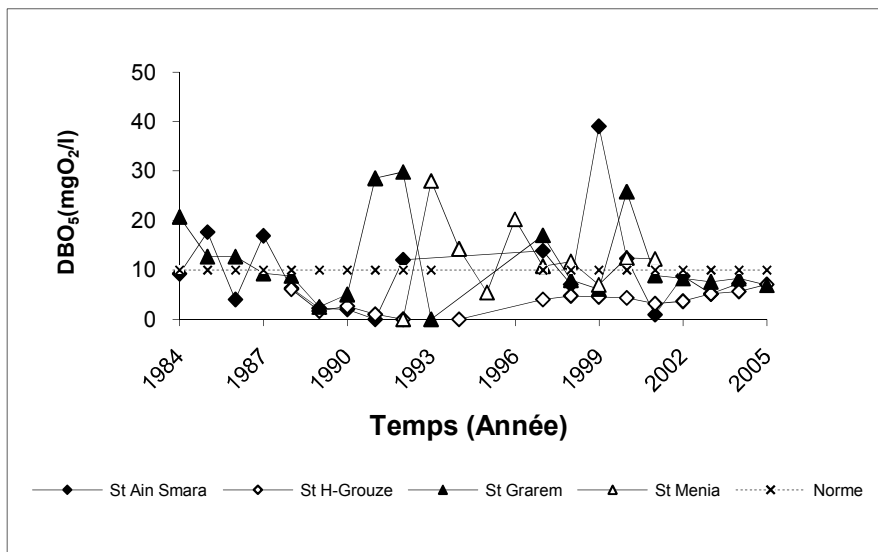


Figure IV.10 Variation moyenne annuelle du DBO₅ durant la période (1984-2005)

IV.3.2 La qualité des cours d'eau du bassin Kébir-Rhumel (1984-2005)

D'après les différentes analyses élaborées, l'ensemble des eaux dans le bassin versant présente des concentrations acceptables en nitrates (NO₃⁻) mais en ce qui concerne les nitrites (NO₂⁻), les stations Grarem et Menia présentent des concentrations importantes (pollution excessive). La turbidité et les phosphates montrent la mauvaise qualité des eaux dans la majorité des stations hydrométriques étudiées. Les concentrations des eaux en sulfates (SO₄⁻) sont très remarquables. Les paramètres indicateurs de pollution tels que ; l'oxygène dissous, la demande biologique et chimique en oxygène (DBO₅ et DCO) confirment la qualité médiocre des eaux dans le bassin kébir-Rhumel et en particuliers, les stations de Ain Smara, et Menia (région de Constantine).

IV.3.3 Résultats organoleptiques et physico-chimiques des eaux du barrage de Beni-Haroun

L'analyse organoleptique et physico-chimique des eaux de la retenue du barrage de Beni-Haroun montrent les résultats suivants:

Les eaux analysées sont alcalines ou basiques, le pH varie entre 7,33 et 8,33 et les mesures d'alcalinité sont comprises entre 7,28 et 10,40. La conductivité et la salinité atteignent des valeurs maximales de 800 $\mu\text{s/cm}$ et qui dépassent largement la concentration préconisée par la réglementation (400 $\mu\text{s/cm}$) (ANBH, 2005., Franck, 2002). Ces résultats sont proportionnels aux sels dissous traduisant ainsi une forte minéralisation des eaux de la région d'étude. Ces valeurs sont probablement liées à l'érosion mécanique et l'apport des rejets industriels (Nouar et al., 2005). La dureté aussi présente des teneurs moyennes dépassent les 15 mg/l (figure 15). Les concentrations en chlorures obtenues atteignent une valeur moyenne de 170 mg/l (< 200 mg/l). Les chlorures n'ont pas de conséquences toxiques sur l'homme, des teneurs élevées attaquent les canalisations métalliques. Cette teneur montre la possibilité d'une pollution par les eaux usées ou par l'industrie (Franck, 2002). La turbidité s'accroît proportionnellement avec les matières en suspension (MES), des valeurs maximales de MES dépassent les 260 mg/L au bord de la digue du barrage (figure IV.11) et des teneurs de la turbidité atteignent les (16 FTU). L'enrichissement des stations en matières en suspension est en relation d'une part avec l'érosion des terres et d'autre part avec l'apport des rejets des unités industrielles situées dans le bassin, tels que, les unités de céramique, marbre et briqueterie qui déversent des particules des matières minérales sous forme de particules argileuses et par conséquent vont engendrer des duretés importantes des eaux.

Pour le cas des phosphates, la figure IV.12, montre que le paramètre PO_4^- s'accroît progressivement durant la période d'analyse et présente des concentrations importantes qui varient entre (0,2 mg/l et 4,2 mg/l). La grande quantité des polluants industriels et domestiques rejetés au voisinage de la retenue peut expliquer les résultats obtenus (Industrie agro alimentaire, atelier de traitement de surface, laverie et lessivage des terres cultivées renfermant des engrais phosphatés ou traités par certains pesticides (ANBH.a, 1999)). Les eaux analysées présentent aussi des concentrations en ions sulfates supérieurs à 240 mg/l (figure IV.13), cela signifie que les terrains avoisinants contiennent des proportions importantes de sulfate réductrice qui peuvent former des sulfates de fer. La présence des sulfates en qualité (> 300 mg/l), peut aussi entraîner dans certaines conditions, une attaque de béton et accélérer la corrosion du fer (exemple attaque du béton de la digue du barrage de Beni-Haroun). Une relation inversement proportionnelle est montrée dans la figure IV.14 entre l'Ammonium (NH_4^+), et le Nitrate (NO_3^-). La majorité des valeurs mesurées sont inférieures à 25mg/l, la diminution de NH_4^+ observée est expliquée par la dilution des eaux de la retenue lors du remplissage du barrage et durant les apports pluvieux. Cette diminution peut être expliquée aussi par la transformation de l'ammonium (NH_4^+) en nitrite (NO_2^-) par les bactéries (Decebalos et al., 1998 ; Ryding et al., 1994).

Les teneurs d'oxygène dissous dans la majorité sont faibles, même comparant aux analyses effectuées dans les cours d'eau du bassin (figure IV.15). La concentration moyenne est de l'ordre de 3,17 mg/l. Cette diminution d'oxygène est due principalement à leur consommation par les micro-organismes pendant les réactions d'oxydation, et en plus à l'augmentation de la turbidité qui perturbe la perméabilité d'oxygène atmosphérique dans l'eau. Les concentrations de DBO₅ sont supérieures à 10 mgO₂/l. Les teneurs maximales de DBO₅ sont obtenues au bord de la digue du barrage, elle est de l'ordre de 18mgO₂/l. Cela explique la dégradation des charges organiques polluantes dans ces eaux, sous l'action des micro-organismes. Les teneurs obtenues de DCO dépassent aussi largement les 40 mgO₂/l, avec des concentrations maximales qui dépassent les 100 mgO₂/l (figure IV.16).

IV.3.4 Analyses bactériologiques des eaux du barrage de Beni-Haroun

L'ensemble des analyses bactériologiques effectuées sur plusieurs échantillons des eaux du barrage de Beni-Haroun montrent la présence de germes totaux, les germes pathogènes et l'existence des streptocoques et Echerichia colie. Les concentrations des germes observées au bord de la digue du barrage et près de la station de pompage sont données respectivement avec les valeurs moyennes de (95 c/100ml, 216 c/100ml) pour les germes totaux, (205 c/100ml, 250 c/100ml) pour les germes pathogène et l'existence des streptocoques et Escherichia collie par un teste confirmatif. Ces résultats d'analyse mettre en évidence la contamination récente par les eaux d'égouts riches en matières fécales ou par le déversement direct d'excréments humains ou animaux.

De ce fait les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux sont considérés comme des germes témoins de contamination fécale les plus faibles. Leur présence dans l'eau de consommation est un indicateur formel d'une contamination récente, et donc de la présence de certains germes pathogènes. Les exigences réglementaires sont formulées dans le décret exécutif N° 93-164 du 10 juillet 1993, définissant la qualité des eaux, les exigences portent essentiellement sur les indicateurs de pollution.

La concentration de coliformes fécaux ne doit pas dépasser 10 c/100ml, celle en coliformes totaux et de 10 c/100ml, l'exigence des germes pathogènes non décelables dans 450ml pour le vibrio chlorique, non décelable dans 1 L pour salmonella.

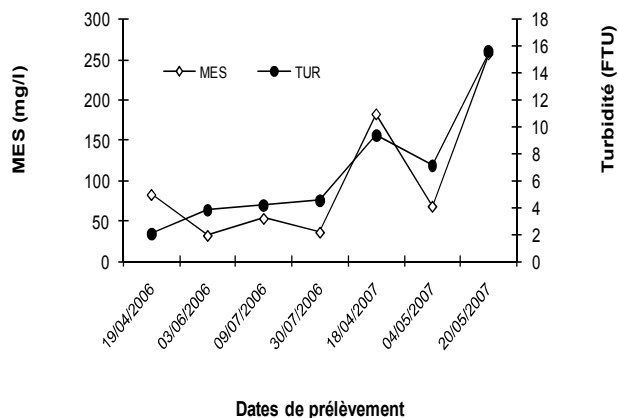


Figure IV.11 Variation de MES et TUR dans la retenue

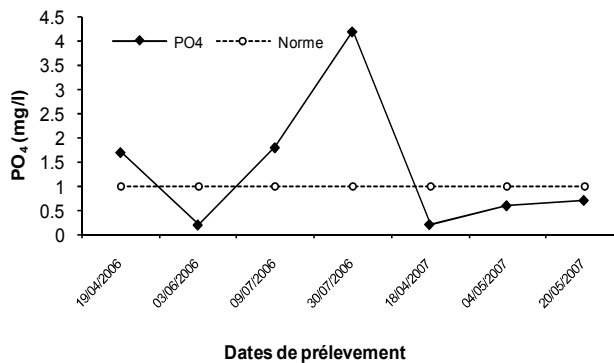


Figure IV.12 Variation de PO4 au dans la retenue

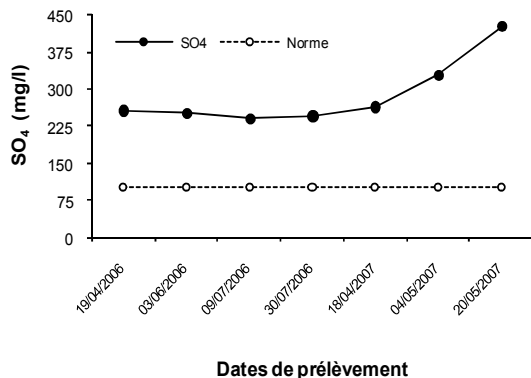


Figure IV.13 Variation de sulfate au niveau de la retenue

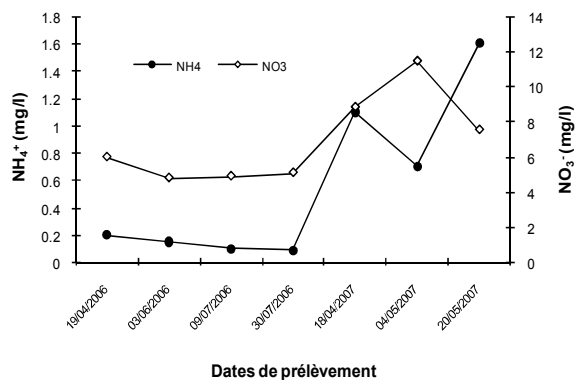


Figure IV.14 Variation de NH4+ et NO3- au niveau de retenue

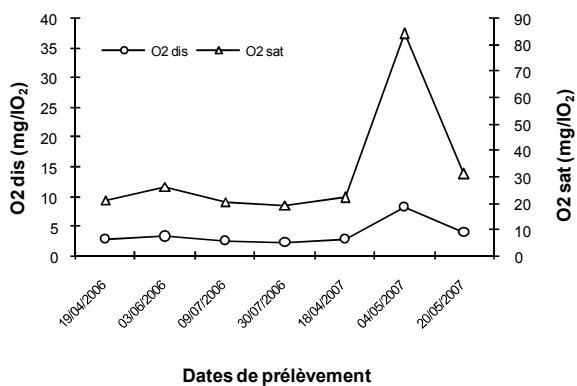


Figure IV.15 Variation de L'O2 saturé et L'O2 dissous

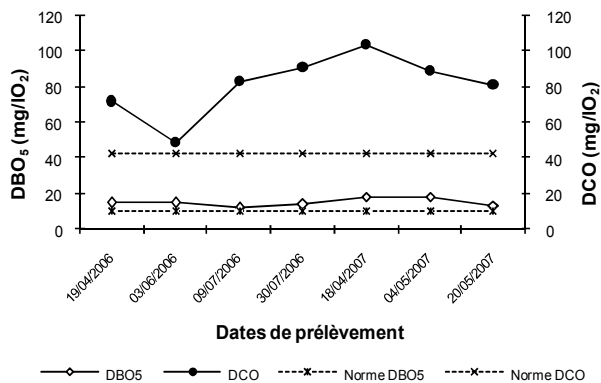


Figure IV.16 Variation de DBO5 et de DCO

CONCLUSION

Ce chapitre a pour objectif, le contrôle des paramètres de pollution des cours d'eau du bassin Kébir-Rhumel pour une période de dix ans (1984 - 2005) et l'analyses physico-chimiques, organoleptiques et bactériologiques des eaux de la retenue du barrage de Beni-Haroun durant l'année 2006-2007.

Certains paramètres analysés sont en relation avec la structure naturelle des eaux tels que le pH, la conductivité, la turbidité, les ions chlorures, les ions sulfates etc. Et d'autres concernant les substances indésirables tels que la teneur en nitrates (NO_3^-), en phosphates (PO_4^{3-}) et qui sont les principaux facteurs responsables de la prolifération des algues et l'accélération du phénomène d'eutrophisation. Ainsi les paramètres indicateurs de la pollution tels que, le DCO, le DBO_5 , l' O_2 dissous et l' O_2 saturé.

Ce chapitre élaboré nous a permis de tirer les conclusions suivantes:

- La turbidité et les matières en suspension présentent des concentrations élevées et indiquent la dégradation de la qualité des eaux du barrage de Beni-Haroun en particulier près de la digue du barrage.
- La qualité moyenne des eaux de la retenue du barrage constatée d'après les analyses effectuées sur les deux paramètres, nitrates et phosphate (NO_3^- , PO_4^{3-}), est justifiée par le remplissage périodique du barrage, avant la mise en marche du grand transfert hydraulique de Beni-Haroun qui sert à alimenter les wilayates intérieures de l'Est Algérien. Les teneurs observées dans les cours d'eau du bassin Kébir Rhumel représentent un véritable risque de pollution et peuvent déclencher expéditivement le phénomène de l'eutrophisation.
- Les concentrations des eaux en sulfates (SO_4^{2-}) sont très remarquables dans les différents prélèvements élaborés (au niveau des cours d'eau du bassin et la retenue du barrage).
- La DBO_5 , la DCO, l'oxygène dissous et l'oxygène saturé indiquent la contamination chimique des eaux des cours d'eau du bassin et de la retenue et qui est confirmée ainsi par l'analyse microbiologique (Escherichia-collie, streptocoques, les germes pathogène), ce qui favorise la prolifération des algues et accélère le phénomène d'eutrophisation (la couleur verdâtre observée dans la majorité des cours d'eau et en particulier les stations de Menia et de Ain Smara dans la région de Constantine justifie les résultats obtenus).
- La dégradation de la qualité des eaux du barrage de Beni-Haroun montre la saturation de l'autoépuration des oueds du bassin d'étude par la pollution excessive.
- On peut dire qu'une meilleure connaissance de l'importance de différentes sources de pollution et leurs impacts sur l'écosystème aquatique est indispensable à la bonne gestion de l'eutrophisation et des autres formes de pollution des lacs et des réservoirs.

CHAPITRE V ANALYSE DES PLUIES

V.1 PLUVIOMETRIE DANS LE BASSIN KEBIR RHUMEL

Les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau (Roche 1963 ; Cosandy, 2001), ce sont les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- Leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance fluviale,
- Leur répartition mensuelle et saisonnière qui influent directement sur les régimes hydrologiques,
- Leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

Les précipitations et les facteurs climatiques (températures et évapotranspiration) dans l'ensemble, variables aléatoires dans le temps et l'espace permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large.

Nous consacrons dans ce chapitre l'étude des précipitations au niveau du bassin versant Kébir-Rhumel.

L'équipement climatologique du bassin et cependant loin d'être satisfaisant. Le manque de documentation est flagrant, les longues séries d'observations sont rares. Toutefois, nous allons tenter de faire ressortir les caractères généraux du climat méditerranéen du bassin, les nuances spatiales et ses irrégularités temporelles à partir de la documentation disponible.

Les séries pluviométriques qui présentaient des lacunes ont été largement homogénéisées avant leurs utilisations ; cela est essentiel pour arriver à une série longue et continue. Il reste qu'en dépit des données limitées, il est possible de saisir l'importance et la variabilité des précipitations sur l'alimentation des oueds du bassin.

V.2 APERÇU SUR LE CLIMAT DE L'AFRIQUE DU NORD

Par sa position en Afrique du Nord, donc en latitude, l'Algérie correspond à la zone de contact entre les masses d'air d'origine ou d'affinités polaires et arctiques d'une part et les masses tropicales d'autre part (Seltzer, 1946).

L'avancée des masses d'air froides vers le Sud peut être enregistrée à tout moment de l'année mais l'observation a montré qu'elles n'influent pas avec efficacité sur l'évolution du temps qu'entre le début de l'Automne et la fin du Printemps.

Les masses d'air tropicales peuvent provenir de l'Atlantique ou du continent Africain par des courants dirigés vers le Nord, le Nord-Ouest ou le Nord-Est.

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

Le climat de la Méditerranée euro-africaine est étroitement bloqué entre un domaine tempéré plus frais au Nord et le désert au Sud. Excepté sur les côtes de la mer où l'on n'observe pas un véritable climat maritime mais plutôt un climat contrasté traduisant plus d'influences continentales qu'océaniques et reflétant avant tout leur double appartenance aux franges de la zone tempérée et de la zone tropicale.

V.2.1 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 Eté sec et ensoleillé.

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

Le climat de l'Atlas tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques.

V.3 ETUDE DES PRECIPITATIONS

La Pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs, (Seltzer, 1913-1938 ; Gaussien, 1918-1947 ; Medinger, 1913-1953 ; Chaumont et Paquin, 1913-1963).

La plupart des stations du bassin ont été arrêtées pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreurs et le nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle. D'autre part, le bon nombre de stations ont été installées lors de la restructuration du réseau pluviométrique algérien et leurs données sont très utiles pour l'établissement d'une série pluviométrique récente (1970-2000).

L'intérêt et le but de cette série est de permettre la confrontation avec l'écoulement correspondant afin de dégager une étude hydropluviométrique et d'estimer la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin.

Le réseau pluviométrique du bassin versant de l'oued Kébir Rhumel comporte actuellement 22 stations pluviométriques, et vu l'hétérogénéité générale des séries d'observations et les grandes lacunes observées, seulement 9 stations pluviométriques ont été prise en considération dans cette étude, leurs identifications sont données dans le tableau (V.1; valeurs en Lambert).

Tableau V.1 Identification des stations pluviométriques

N°	Nom de station	Code	X (Km)	Y (Km)	Z (Km)	Equipement
01	Chebabta	100110	763,078	338,802	680	PV
02	Boumalek	100401	817,15	336,80	805	PV
03	Mechtat Melha	100404	822,25	314,30	785	PV
04	Constantine	100410	850,35	344,695	590	PV
05	Ain Fakroun	100503	877,599	304,694	921	PV
06	Hamma Bouziane	100603	848,579	352,615	460	PV
07	Hamala	100703	825,582	369,71	660	PV
08	Oued Meassouda	100708	802,042	384,487	180	PV
09	Starra	100711	824,86	385,743	280	PV, PG

PV : pluviométrie

et PG : pluviographe

ANRH, année

Tableau V.2 Précipitations annuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques (n =30 ans)

Nom de ST	Chebabta	Boumalek	Machtat Melha	Constantine	Ain Fakroun	Hamma. Bouziane	Hamala	Oued Meassouda	Starra
N°	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Stations (Codes)	100110	100401	100404	100410	100503	100603	100703	100708	100711
70/71	504,53	449,20	160,86	431,18	150,20	378,80	883,40	1422,50	1063,60
71/72	422,64	604,50	557,19	730,31	741,60	686,20	987,50	1751,50	697,30
72/73	267,60	437,30	558,94	681,07	604,60	554,00	1 073,00	1268,61	753,70
73/74	384,70	404,00	262,66	495,40	206,80	386,70	792,50	1472,60	1006,10
74/75	538,30	844,90	281,22	531,34	376,90	380,70	719,00	1289,70	837,10
75/76	443,70	761,80	428,74	728,22	480,30	666,90	968,60	1416,50	718,70
76/77	279,40	570,59	261,66	533,12	462,80	527,50	775,50	1295,40	1112,90
77/78	290,30	473,30	240,30	496,50	284,00	483,00	664,80	1186,90	893,20
78/79	348,38	512,90	378,21	512,92	295,10	524,30	880,60	1363,50	1084,90
79/80	237,60	485,00	346,38	530,45	334,28	491,20	819,00	1232,00	869,70
80/81	573,60	593,10	310,80	594,67	301,70	475,90	932,10	1512,90	735,70
81/82	333,60	562,00	273,30	574,47	302,50	600,80	806,60	1263,22	863,70
82/83	420,70	417,80	366,43	460,98	184,10	508,40	648,80	1011,40	1002,00
83/84	621,40	473,60	151,15	556,01	157,40	544,50	944,40	1706,66	636,20
84/85	386,70	785,00	399,28	774,61	415,20	941,38	1 400,80	2107,70	1047,50
85/86	533,10	396,70	259,78	476,80	184,13	426,02	689,20	1308,70	560,30
86/87	259,03	397,40	253,00	669,20	410,83	597,14	1 034,10	1470,40	753,90
87/88	464,52	374,10	232,09	423,90	279,95	321,20	540,10	933,80	658,50
88/89	373,35	291,60	235,00	527,50	329,53	449,90	681,87	1237,60	1099,00
89/90	382,13	225,80	294,43	389,60	310,70	359,40	545,60	892,70	827,10

90/91	420,70	471,74	406,30	531,60	330,61	516,70	831,60	1602,40	772,60
91/92	373,20	491,20	375,30	505,22	442,28	604,70	727,30	1150,00	873,75
92/93	237,90	370,20	286,60	565,00	412,83	478,80	734,70	1054,60	994,70
93/94	429,50	204,60	182,20	427,30	238,55	379,80	722,50	1109,37	909,10
94/95	460,97	581,70	298,15	546,91	384,06	570,10	757,80	1248,50	599,50
95/96	227,40	496,30	506,91	637,00	668,70	575,10	850,80	1306,80	1076,50
96/97	399,70	337,00	161,16	333,25	266,06	299,90	477,30	959,20	919,70
97/98	409,53	627,00	350,27	603,60	379,47	593,60	912,91	1840,00	645,10
98/99	264,70	599,10	245,00	552,28	332,78	538,90	366,86	1296,20	736,40
99/2000	359,62	639,00	279,20	534,10	441,63	481,80	348,36	1049,00	568,94
2000/01	375,24	501,50	196,85	420,00	303,46	434,40	568,70	1107,60	572,12
Moyenne	387,86	496,13	307,72	541,11	355,26	508,96	776,98	1318,32	835,15
Médiane	384,70	485,00	281,22	531,60	330,61	508,40	775,50	1289,70	837,10
Ecart type	174,56	148,34	106,77	102,68	138,33	125,81	214,42	275,44	174,56
Coef de vari	0,45	0,30	0,35	0,19	0,39	0,25	0,28	0,21	0,21
v de l'eche	9709,08	20633,02	10709,39	9886,34	17958,70	14838,52	43104,65	71152,37	28566,60
Kurstosis	-0,28	0,35	0,41	0,13	1,36	3,45	1,44	1,10	-1,20
coef d'assy	0,31	0,33	0,83	0,41	1,02	1,17	0,37	0,92	0,05
Min	227,40	204,60	151,15	333,25	150,20	299,90	348,36	892,70	560,30
Max	621,40	844,90	558,94	774,61	741,60	941,38	1400,80	2107,70	1112,90
Somme	12023,73	15379,93	9539,35	16774,51	11013,03	15777,75	24086,30	40867,96	25889,51

Le phénomène de variabilité interannuelle des modules pluviométriques est bien exprimé par le coefficient de variation traduisant la dispersion relative des pluies. Les valeurs de coefficient de variation relative des pluies comprises entre 0,19 et 0,45. Ce qui implique une variabilité un peu faible dans l'ensemble. Cette variabilité est légèrement plus forte dans les stations de Sud du bassin que dans celles situées au Nord (Chebabta, Boumelek, Machtat-Melha, et Ain Fakroun). On a remarqué une grande dispersion concernant les différentes stations étudiées. On note aussi une asymétrie à droite au niveau des stations Ain Fakroun et Hamma Bouziane. Avec des valeurs successives de coefficient d'asymétrie (1,02 et 1,17). Le reste des stations présentent des coefficients d'asymétrie inférieure à 1.

Les coefficients d'aplatissement sont positives dans les stations (Constantine, Ain Fakroun, Hamma Bouziane, Hammala et Messouda) mais négative dans les deux stations de (Chebabta et Starra).

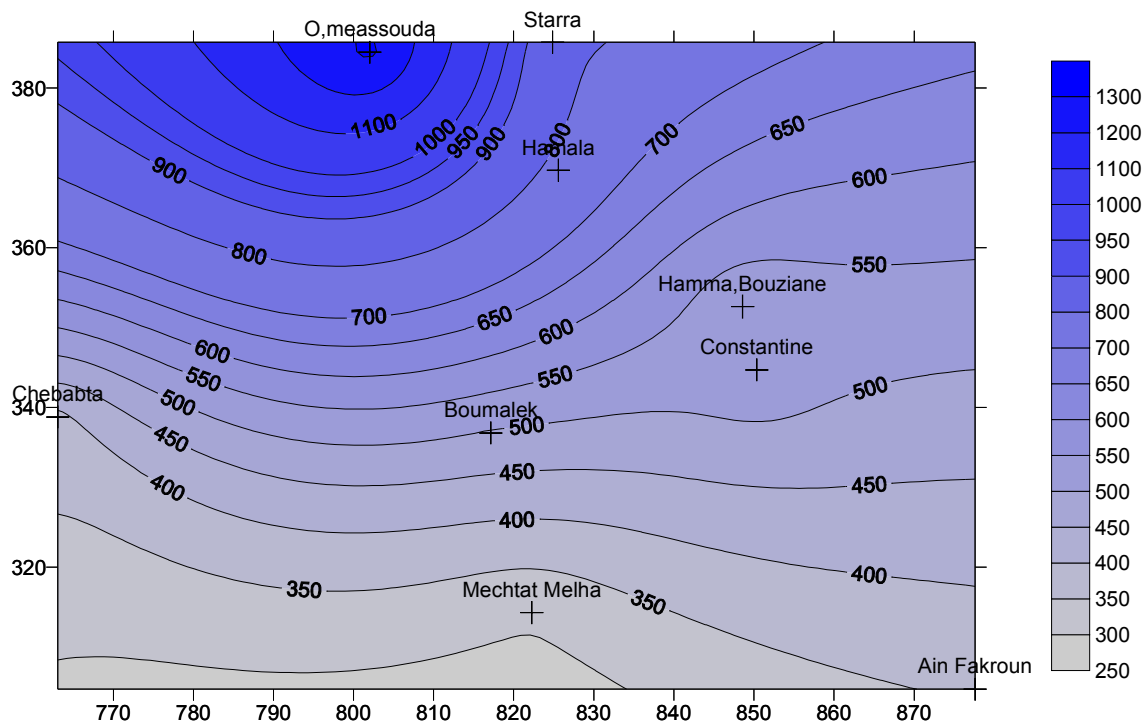


Figure V.1 Carte des précipitations annuelles dans le bassin Kébir-Rhumel

La figure ci-dessus, montre la répartition des précipitations moyennes annuelles dans les stations pluviométriques étudiées du bassin Kébir-Rhumel (Tableau V.2). On observe une disposition longitudinale plus au moins parallèle et valeurs décroissantes des précipitations du Nord au Sud. Les précipitations sont fortes au nord du bassin (plus de 700 mm), moyennes au centre, comprises entre 450 et 600 mm et faibles au sud (moins de 450 mm). Dans cette région, le climat semi-aride est particulièrement développé et l'espacement des isohyètes est important. C'est là où l'effet de la latitude est très sensible : les perturbations cycloniques arrivent appauvries en vapeur d'eau suite à leurs passages sur l'écran montagneux du Tell ; le rôle de l'abri aérologique est, par ailleurs, déterminant (Mébarki, 1984).

V.3.1 Homogénéisation des données pluviométriques

Afin d'obtenir des séries pluviométriques homogènes, le comblement des lacunes c'est avéré indispensable.

3.1.1 Méthode des rapports

Cette méthode utilise le rapport entre la somme des précipitations pendant une période homogène de la station à ajuster et la somme des précipitations pour la période correspondante à la station de comparaison.

$$Y = b \cdot X$$

Avec :

Y : Valeur pluviométrique pendant une période homogène de la station à ajuster

X : Valeur correspondante à la station de référence

b : constante d'ajustement

$$b = V/U$$

V : Somme des précipitations pendant une période homogène de la station à ajuster.

U : Somme des précipitations pour la période correspondante à la station de comparaison

3.1.2 Méthode de la régression linéaire

Elle permet de compléter les lacunes d'observation par rapport à une station de référence, cette dernière doit être proche d'une station à corriger.

Le facteur qui lie cette régression est le coefficient de corrélation "r" estimé à partir de "n" couples de valeurs observées simultanément. Sa formule est :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Avec :

X_i : Variable connue de la station de référence à partir de la quelle est estimée la variable inconnue de la station incomplète.

Y_i : Variable de la station incomplète

\bar{X} : Moyenne de la série d'observation de référence

\bar{Y} : Moyenne de la série incomplète

Cette méthode a été utilisée pour combler les lacunes à l'échelle annuelle.

3.1.3 Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composantes principales permet de visualiser l'information contenue dans un tableau de données quantitatives et de concentrer l'information dans un nombre réduit de nouvelles variables (Laborde, 1998).

- Les étapes de l'analyse en composantes principales sont :
 - Création de la matrice de données brutes,
 - Calcul des paramètres statistiques
 - Transformation des données brutes en données centrées réduites.
 - Détermination de la matrice de corrélation des données centrées réduites
 - Détermination des valeurs propres et des vecteurs propres à partir de la matrice de corrélation des données centrées réduites,
 - Détermination des composantes principales (CP)
 - Détermination des composantes principales (CP')
 - Détermination du coefficient de régression.

1.3.1 Analyse en composante principale (ACP) des précipitations annuelles

Les données des précipitations annuelles sont disposées en formant une matrice initiale rectangulaire avec, en ligne, les codes des 9 stations pluviométriques étudiées et en colonne, les 30 valeurs d'observations annuelles. (Tableau V.2).

On constate également que les valeurs positives des valeurs propres sont observées dans les trois composantes.

Les résultats obtenus par l'analyse en composantes principales sont résumés dans les tableaux (V.3, V.4, V.5, V.6 et V.7).

Tableau V.3 Vecteurs régionaux de l'analyse en composantes principales

Composantes principales	C ₁	C ₂	C ₃
Valeurs propres	4,42	1,75	1,19
Variances expliquées	49%	19%	13%
Variances cumulées	49%	68%	81%

Tableau V.4 Moyenne, écart type des variables initiales

Station	100404	100401	100410	100503	100603	100708	100703	100711	100110
Moyenne	307,72	496,13	541,11	355,26	508,96	1318,32	776,98	835,15	387,86
Ecart-type	106,77	148,34	102,68	138,33	125,81	275,44	214,42	174,56	174,56

Tableau V.5 Matrice des coefficients de corrélation entre les variables

Stations	100404	100401	100410	100503	100603	100708	100703	100711	100110
100404	1,00	0,34	0,67	0,78	0,58	0,32	0,48	0,04	-0,29
100401	0,34	1,00	0,60	0,36	0,58	0,52	0,33	-0,18	0,14
100410	0,67	0,60	1,00	0,67	0,86	0,69	0,73	-0,06	-0,18
100503	0,78	0,36	0,67	1,00	0,51	0,19	0,30	-0,03	-0,45
100603	0,58	0,58	0,86	0,51	1,00	0,70	0,69	0,02	-0,19
100708	0,32	0,52	0,69	0,19	0,70	1,00	0,78	-0,02	0,23
100703	0,48	0,33	0,73	0,30	0,69	0,78	1,00	0,20	0,07
100711	0,04	-0,18	-0,06	-0,03	0,02	-0,02	0,20	1,00	-0,36
100110	-0,29	0,14	-0,18	-0,45	-0,19	0,23	0,07	-0,36	1,00

Tableau V.6 Projections des variables actives

Stations	C ₁	C ₂	C ₃
100404	0,76	-0,36	-0,21
100401	0,65	0,33	-0,28
100410	0,96	0,00	-0,05
100503	0,69	-0,50	-0,38
100603	0,90	0,04	0,07
100708	0,75	0,48	0,28
100703	0,79	0,20	0,45
100711	0,02	-0,47	0,80
100110	-0,16	0,88	-0,04

Tableau V.7 Projections des observations actives

Années	C ₁	C ₂	C ₃
70/71	-0,84	1,02	1,89
71/72	2,06	-0,19	-1,26
72/73	1,25	-1,43	-0,73
73/74	-0,51	0,14	1,34
74/75	-0,02	1,11	-0,78
75/76	1,45	0,53	-0,95
76/77	0,16	-1,02	0,80
77/78	-0,49	-0,52	0,26
78/79	0,16	-0,46	1,21
79/80	0,01	-0,91	0,18
80/81	0,28	1,57	-0,07
81/82	0,18	-0,08	0,24

82/83	-0,65	-0,33	0,60
83/84	-0,12	2,62	0,55
84/85	2,71	0,93	1,96
85/86	-0,78	1,38	-0,65
86/87	0,64	-0,34	0,41
87/88	-1,35	0,25	-1,00
88/89	-0,59	-0,68	1,25
89/90	-1,36	-0,82	-0,26
90/91	0,31	0,40	0,03
91/92	0,14	-0,63	-0,32
92/93	-0,23	-1,51	0,43
93/94	-1,26	-0,05	0,91
94/95	0,12	0,72	-1,18
95/96	1,10	-2,15	0,04
96/97	-1,75	-0,36	0,16
97/98	0,92	1,04	-0,36
98/99	-0,26	-0,40	-1,07
99/2000	-0,38	-0,18	-2,38
2000/01	-0,91	0,33	-1,24

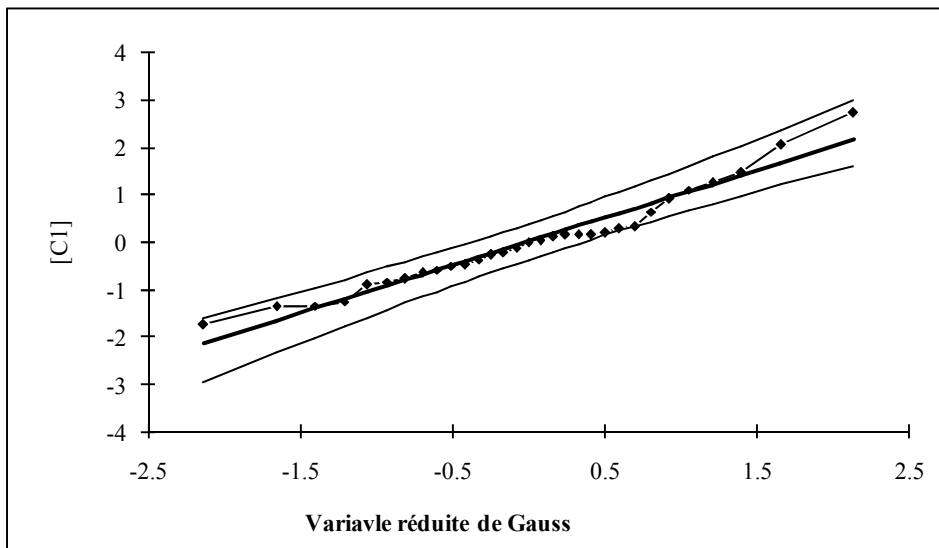


Figure V.2 Ajustement du vecteur régional C_1 à une loi normale

3.1.1 Stations représentatives des différents sous bassins

Les résultats d'ACP des précipitations annuelles des stations étudiées montrent les différentes stations représentatives du bassin. Les stations de Constantine et Hamma Bouziane représentent successivement, les plus grands variables actives (0,96 et 0,90).

Tableau V.8 Stations représentatives du bassin d'étude

N° du sous bassin	Nom de station	Code de station
04	Constantine	100410
06	Hamma Bouziane	100603
07	Oued Meassouda	100708
07	Hamala	100703
07	Starra	100711

L'analyse de la corrélation montre une régionalisation des précipitations au niveau de notre bassin d'étude. Les stations pluviométriques présentées dans les figures (V.3, V.4 et V.5) s'organisent en quatre groupes.

- Le premier groupe est composé des stations (2, 4, 6, 7 et 8), lui-même subdivisé en deux sous groupes distincts.
 - o Le premier sous groupe composé des stations (7 et 8) regroupe sous l'effet de la proximité de la mer par rapport à eux.
 - o Les autres stations (2, 4 et 6) se situent dans le centre du bassin incluses dans le deuxième sous regroupe sous l'effet de leurs moyennes et présentent une pluviométrie moyenne de l'ordre de 500 mm.
- Le deuxième groupe est composé des stations pluviométriques (3, 5) situées dans la partie sud du bassin versant et présentent une précipitation moyenne de l'ordre de 350 mm.
- Le troisième groupe est composé d'une seule station (Station Chebabta, code 100110) qui présente une pluviométrie moyenne de 388 mm et se trouve dans la partie sud ouest du bassin Kébir Rhumel plus proche du bassin soummam.
- Le quatrième groupe est composé aussi d'une seule station (Station Starra, code 100711) se trouve au nord du bassin et qui présente une pluviométrie moyenne de 835mm et

L'analyse en composantes principales a permis de dégager les stations représentatives des sous bassins, ainsi que, la station représentative du bassin versant Kébir-Rhumel.

1.3.2 Analyse des composantes principales des précipitations mensuelles

L'analyse en composantes principales permet de visualiser aussi l'information des précipitations à l'échelle mensuelle.

Les données de précipitations mensuelles sont disposées de telle façon à former une matrice initiale rectangulaire avec, en ligne, les codes des stations et en colonne les 12 observations mensuelles (Tableau V.9).

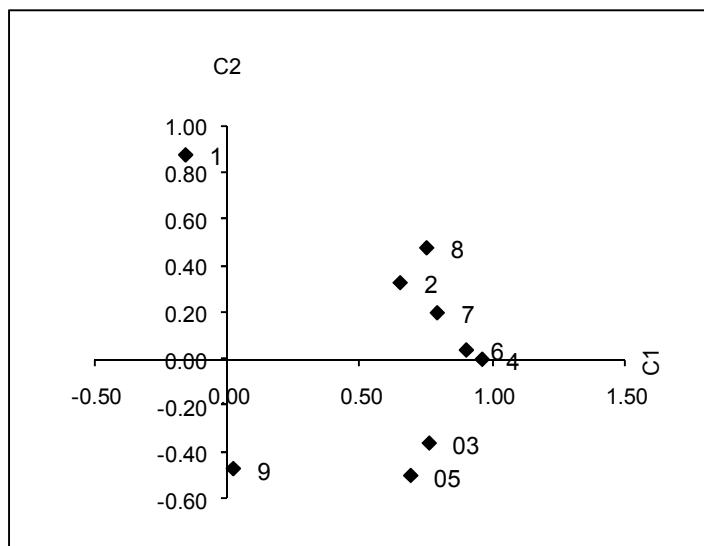


Figure V.3 Projection des variables sur le plan 1-2

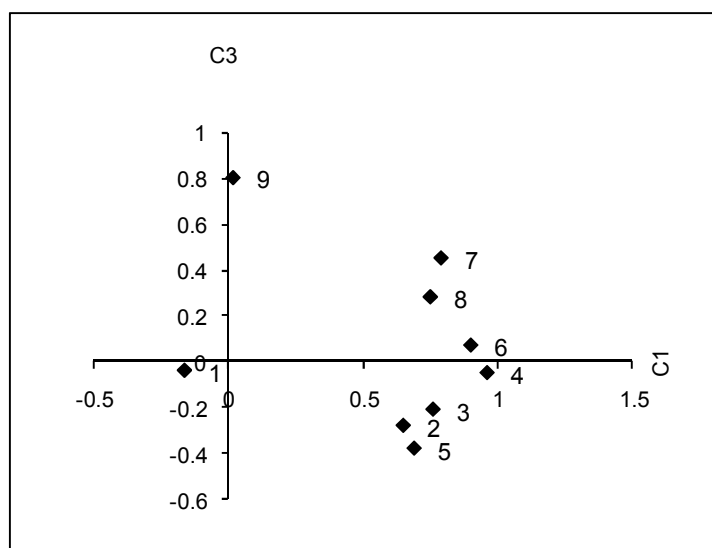


Figure V.4 Projection des variables sur le plan 1-3

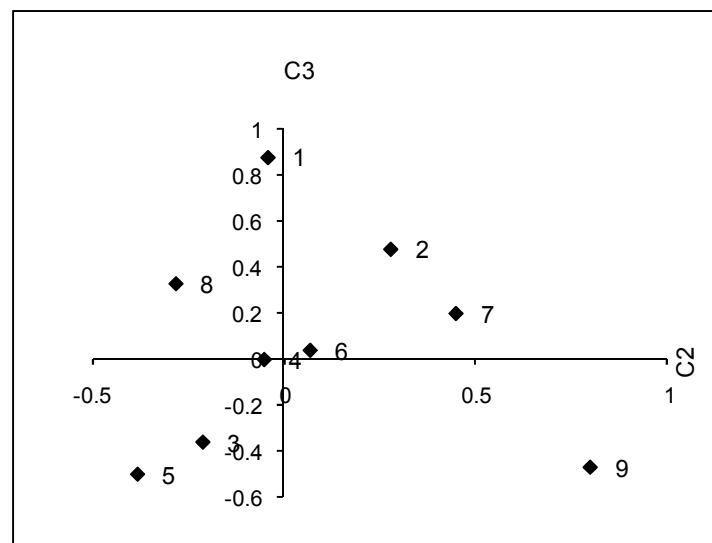


Figure V.5 Projection des variables sur le plan 2-3

Tableau V.9 Précipitations mensuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques

Nom de ST	Chebabta	Boumalek	Machtat Melha	Constantine	Ain Fakroun	Hamma. Bouziane	Hamala	Oued Meassouda	Starra
N°	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Stations (Codes)	100110	100401	100404	100410	100503	100603	100703	100708	100711
Septembre	28,04	34,75	24,19	39,94	33,93	35,37	34,85	57,01	28,64
Octobre	33,17	36,02	45,34	29,43	21,70	46,33	65,20	145,61	81,48
Novembre	32,12	47,27	20,93	59,02	29,44	49,40	68,71	161,17	102,37
Décembre	56,88	64,98	28,69	77,79	43,00	70,24	122,77	219,70	143,06
Janvier	50,14	71,97	29,92	78,24	37,78	71,48	131,86	183,95	126,32
Février	42,57	56,31	26,74	66,36	31,03	57,19	110,59	157,19	108,93
Mars	44,34	57,86	34,23	2	37,27	58,14	100,46	163,17	99,74
Avril	38,79	52,15	31,09	48,51	32,88	50,93	66,40	129,03	81,36
Mai	34,59	41,31	30,87	43,77	44,87	41,56	43,30	71,32	43,57
Juin	15,86	15,57	16,60	20,69	17,63	15,64	12,96	15,43	12,53
Juillet	4,10	4,52	5,66	4,94	10,38	4,07	3,14	4,47	2,22
Aout	7,27	13,42	13,28	8,42	15,36	7,96	9,15	9,56	4,92
Moyenne	32,32	41,34	25,63	45,09	29,61	42,36	64,12	109,80	69,60
Médiane	33,88	44,29	27,72	46,14	31,955	47,865	65,8	137,32	81,42
Ecart Type	16,32	21,36	10,47	25,24	11,07	22,66	44,91	74,64	49,32
Min	4,1	4,52	5,66	4,94	10,38	4,07	3,14	4,47	2,22
Max	56,88	71,97	45,34	78,24	44,87	71,48	131,86	219,70	143,06

On constate également que les valeurs positives des valeurs propres sont observées dans les trois composantes. Mais la valeur de la 3^{ème} composante est inférieure à 1.

Les résultats sont présentés dans les tableaux (V.10, V.11, V.12, V.13 et V.14).

Tableau V.10 Vecteurs régionaux de l'analyse en composantes principales

Composantes principales	C ₁	C ₂	C ₃
Valeurs propres	8,72	2,09	0,74
Variations expliquées	73%	17%	6%
Variations cumulées	73%	90%	96%

Tableau V.11 Moyenne, écart type des variables initiales

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout
Moyennes des observations actives	35,19	56,03	63,38	91,90	86,85	72,99	73,25	59,02	43,91	15,88	4,83	9,93
Ecart-types des observations actives	9,46	38,36	44,04	60,11	50,67	43,58	41,43	30,72	11,30	2,42	2,31	3,39

Tableau V.12 Matrice des coefficients de corrélation entre les variables

Mois	Sept	Oct	Nov	Déce	Janv	Févr	Mar	Avri	Mai	Juin	Juill	Août
Septembre	1,00	0,69	0,78	0,75	0,72	0,71	0,77	0,78	0,95	0,14	0,00	-0,03
Octobre	0,69	1,00	0,94	0,94	0,90	0,90	0,94	0,96	0,82	-0,46	-0,40	-0,33
Novembre	0,78	0,94	1,00	0,99	0,95	0,96	0,98	0,99	0,89	-0,34	-0,41	-0,42
Décembre	0,75	0,94	0,99	1,00	0,98	0,99	0,99	0,99	0,86	-0,43	-0,46	-0,45
Janvier	0,72	0,90	0,95	0,98	1,00	1,00	0,99	0,96	0,82	-0,48	-0,53	-0,46
Février	0,71	0,90	0,96	0,99	1,00	1,00	0,99	0,96	0,81	-0,47	-0,52	-0,47
Mars	0,77	0,94	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00	0,98	0,87	-0,42	-0,45	-0,40
Avril	0,78	0,96	0,99	0,99	0,96	0,96	0,98	1,00	0,89	-0,40	-0,43	-0,38
Mai	0,95	0,82	0,89	0,86	0,82	0,81	0,87	0,89	1,00	-0,07	-0,02	-0,08
Juin	0,14	-0,46	-0,34	-0,43	-0,48	-0,47	-0,42	-0,40	-0,07	1,00	0,56	0,36
Juillet	0,00	-0,40	-0,41	-0,46	-0,53	-0,52	-0,45	-0,43	-0,02	0,56	1,00	0,79
Août	-0,03	-0,33	-0,42	-0,45	-0,46	-0,47	-0,40	-0,38	-0,08	0,36	0,79	1,00

Tableau V.13 Projections des variables actives

Mois	C ₁	C ₂	C ₃
Sept	0,76	0,57	-0,21
Oct	0,94	0,04	0,16
Nov	0,98	0,08	-0,04
Déc	1,00	0,01	0,01
Janv	0,98	-0,06	0,02
Févr	0,99	-0,06	0,02
Mars	1,00	0,04	0,03
Avril	0,99	0,07	0,04
Mai	0,86	0,49	-0,01
Juin	-0,43	0,64	-0,62
Juill	-0,49	0,79	0,21
Aout	-0,45	0,69	0,50

Tableau V.14 Projections des observations actives

Station	C ₁	C ₂	C ₃
100404	-1,02	-0,06	0,68
100503	-0,95	1,61	0,90
100703	0,50	-0,76	0,79
100711	0,75	-1,50	0,24
100401	-0,36	0,17	0,63
100410	-0,25	0,59	-2,25
100603	-0,22	-0,40	-0,49
100708	2,15	1,18	0,08
100110	-0,62	-0,81	-0,58

On constate que presque toutes les variables (actives) sont corrélées fortement et positivement avec la première composante sauf la saison d'Eté (figure V.6). Il est évident que le vecteur (C₁) représente aussi, la répartition moyenne des précipitations dans le bassin Kébir Rhumel. Dans ce bassin, les précipitations se répartissent mensuellement, comme l'indique le graphique construit à partir des projections des observations sur la première composante (figure V.7). De Septembre à Mai, les précipitations sont sensiblement constantes, succèdent ensuite une saison sèche de Juin à Août.

D'un point de vu spatial, les plus fortes corrélations avec C₁ se rencontrent dans la zone Nord du domaine d'étude. Ceci était prévisible puisque C₁ représente l'évolution moyenne spatiale des précipitations. Par contre allant au Sud, le coefficient de corrélation avec C₁ diminue. Il est donc prévisible d'apparaître une différenciation Nord-Sud dans les composantes supérieures (voir figure V.7).

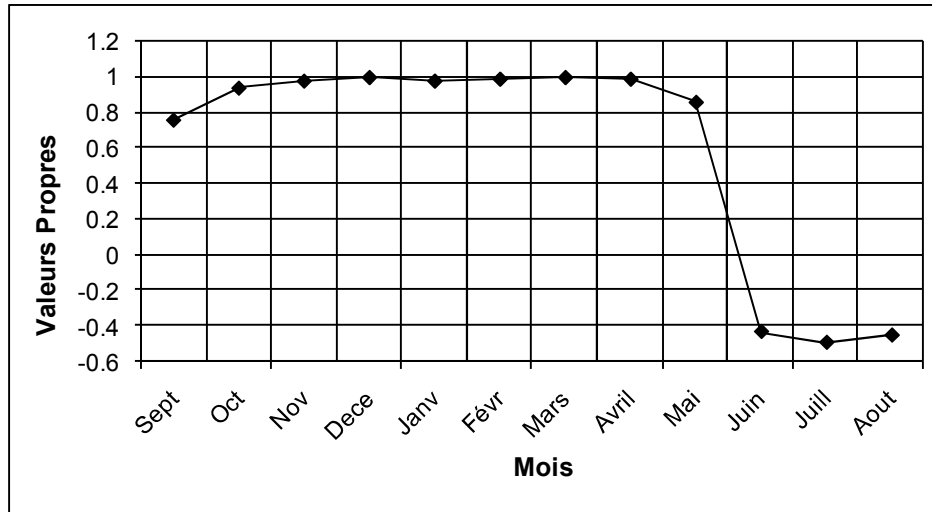


Figure V.6 Projection des variables actives

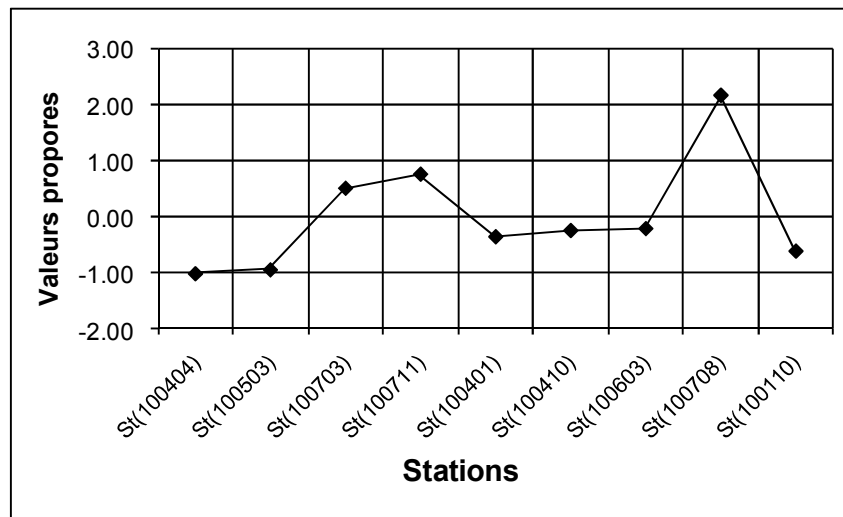


Figure V.7 Projection des observations actives

V.3.2 Ajustement des précipitations à une loi de probabilité

L'analyse de la variabilité des précipitations mérite d'être complétée par une étude fréquentielle: c'est-à-dire l'estimation des valeurs limites atteintes ou dépassées pendant une période donnée. Ceci suppose la recherche, au préalable d'une loi d'ajustement la mieux adaptée à la distribution des pluies annuelles ou mensuelles pour ensuite estimer les paramètres d'ajustement suivant cette loi.

L'analyse statistique des précipitations est réalisée à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière. Elle est portée uniquement sur les stations représentatives du bassin d'étude.

3.2.1 A l'échelle annuelle

L'analyse statistique des précipitations a permis d'ajuster les séries d'observations des stations représentatives à la loi log-normal, la figure (V.8) montre l'ajustement des précipitations annuelles de la station de Constantine (Code 100410) et les résultats des autres ajustements sont donnés en annexe.

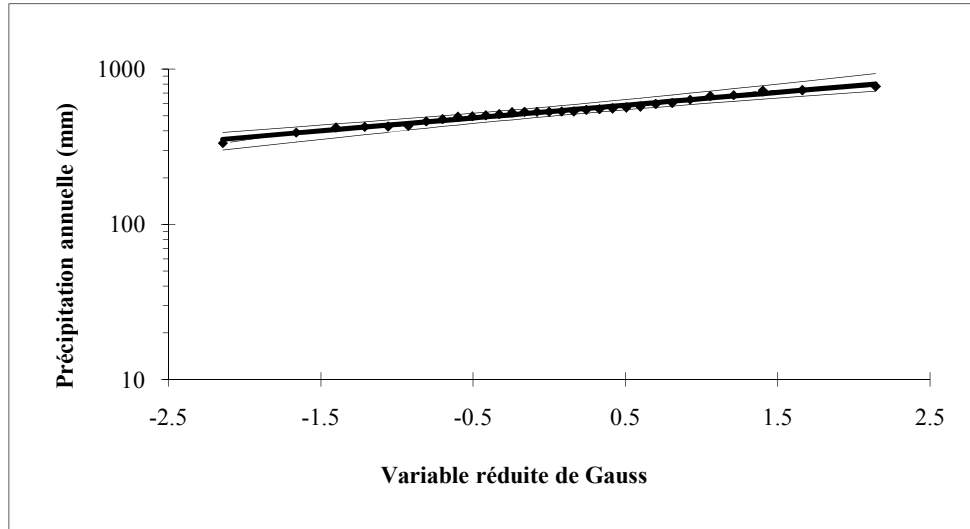


Figure V.8 Ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normal : Station de Constantine (Code 100410)

Les équations d'ajustements dans des différentes stations étudiées ont été montrées dans le tableau ci-dessous.

Tableau V.15 Equations d'ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normale

Stations	Droite de Galton
100404	$X_{p\%} = 2,46 + 0,15.U_{p\%}$
100401	$X_{p\%} = 2,67 + 0,14.U_{p\%}$
100410	$X_{p\%} = 2,73 + 0,083.U_{p\%}$
100503	$X_{p\%} = 2,52 + 0,17.U_{p\%}$
100603	$X_{p\%} = 2,69 + 0,10.U_{p\%}$
100708	$X_{p\%} = 3,11 + 0,09.U_{p\%}$
100703	$X_{p\%} = 2,87 + 0,13.U_{p\%}$
100711	$X_{p\%} = 2,91 + 0,09.U_{p\%}$
100109	$X_{p\%} = 2,58 + 0,12.U_{p\%}$

Les quantiles sont calculés à partir des équations citées ci-dessus et sont présentés dans le tableau V.16.

Tableau V.16 Précipitations annuelles (mm) pour différentes périodes de retour

Stations/périodes de retour (ans)	10	20	50	100	500	1000
100404	450,65	510,22	586,71	643,96	777,51	835,90
100401	714,96	803,62	916,59	1057,00	1194,83	1279,15
100410	678,94	727,65	786,65	828,61	920,50	958,47
100503	542,64	624,33	731,03	812,10	1004,73	1090,36
100603	671,69	732,42	807,33	861,47	982,41	1033,28
100708	1671,69	1798,28	1952,21	2062,06	2303,66	2403,86
100703	1092,24	1216,68	1373,72	1489,49	1754,53	1868,49
100711	1075,72	1162,97	1269,62	1346,09	1515,24	1585,76
100110	529,40	583,88	651,91	701,60	814,06	861,93

3.2.2 A l'échelle mensuelle

Dans le but de mettre en exergue la variation des précipitations à l'échelle mensuelle, nous avons dès le départ déterminé les paramètres statistiques des stations représentatives des sous bassins et l'ajustement des données mensuelles à une loi de probabilités. Il est à noter que les précipitations mensuelles s'ajustent beaucoup mieux à la loi log normale (voir tableau V.9).

Le tableau V.17, donne les équations de Galton pour les stations de référence (100410, 100703 et 100603).

Tableau V.17 Equation d'ajustement des précipitations mensuelles à la loi log-normale: Stations de Constantine, Hamala et Hamma Bouziane (Codes ; 100410, 100703 et 100603)

Code de Station	100410	100703	100603
Nom de Station	Constantine	Hamala	Hamma Bouziane
Mois	Equation de la droite de Galton	Equation de la droite de Galton	Equation de la droite de Galton
Septembre	$Xp\% = 1,55 + 0,27.Up\%$	$Xp\% = 1,44 + 0,38.Up\%$	$Xp\% = 1,49 + 0,39.Up\%$
Octobre	$Xp\% = 1,37 + 0,33.Up\%$	$Xp\% = 1,70 + 0,39.Up\%$	$Xp\% = 1,54 + 0,37.Up\%$
Novembre	$Xp\% = 1,69 + 0,33.Up\%$	$Xp\% = 1,77 + 0,32.Up\%$	$Xp\% = 1,61 + 0,33.Up\%$
Décembre	$Xp\% = 1,78 + 0,36.Up\%$	$Xp\% = 1,95 + 0,37.Up\%$	$Xp\% = 1,68 + 0,42.Up\%$

Janvier	$Xp\% = 1,83 + 0,26.Up\%$	$Xp\% = 2,09 + 0,23.Up\%$	$Xp\% = 1,78 + 0,29.Up\%$
Février	$Xp\% = 1,74 + 0,31.Up\%$	$Xp\% = 1,96 + 0,34.Up\%$	$Xp\% = 1,70 + 0,27.Up\%$
Mars	$Xp\% = 1,75 + 0,24.Up\%$	$Xp\% = 1,93 + 0,31.Up\%$	$Xp\% = 1,69 + 0,28.Up\%$
Avril	$Xp\% = 1,63 + 0,27.Up\%$	$Xp\% = 1,80 + 0,28.Up\%$	$Xp\% = 1,62 + 0,30.Up\%$
Mai	$Xp\% = 1,60 + 0,30.Up\%$	$Xp\% = 1,60 + 0,29.Up\%$	$Xp\% = 1,56 + 0,32.Up\%$
Juin	$Xp\% = 1,18 + 0,43.Up\%$	$Xp\% = 1,17 + 0,31.Up\%$	$Xp\% = 1,14 + 0,36.Up\%$
Juillet	$Xp\% = 0,41 + 0,58.Up\%$	$Xp\% = 0,72 + 0,44.Up\%$	$Xp\% = 0,61 + 0,44.Up\%$
Août	$Xp\% = 0,79 + 0,43.Up\%$	$Xp\% = 1,01 + 0,35.Up\%$	$Xp\% = 0,86 + 0,37.Up\%$

3.2.3 A l'échelle journalière

L'étude des précipitations journalières est consacrée à l'étude des pluies maximales. Le tableau mentionné ci-dessous, donne les pluies maximales des stations représentatives du bassin d'étude.

Les coefficients de variation dans les trois stations de référence (100410, 100603 et 100703) sont faibles et présentent successivement les valeurs (0,28, 0,29 et 0,39). Une faible dispersion des données est remarquée dans les stations de Constantine et du Hamma (100410 et 100603) avec des écarts types de (12,42 et 12,75). On note aussi une asymétrie à droite ($C_s = 1,67$) observée au niveau de la station de Hamala (code 100703). Le coefficient d'aplatissement au niveau de cette station est positif (4,81), négatif au niveau de la station de Constantine (-0,46) et presque nul à la station de Hamma Bouziane (0,02).

L'ajustement graphique d'une droite de distribution et le calcul de l'intervalle de confiance permet de faire des estimations correctes des précipitations journalières maximales pour différentes fréquences sur le bassin (figure V.8). Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau V.18.

Tableau V.18 Précipitations maximales journalières en (mm) aux stations représentatives

Code de Station	100410	100603	100703
Nom de Station	Constantine	Hamma Bouziane	Hamala
1970	41,05	39,50	87,50
1971	45,05	44,10	92,00
1972	52,79	53,00	56,00
1973	30,18	27,00	73,50
1974	39,49	37,70	47,00
1975	35,83	33,50	89,80
1976	60,80	62,20	59,10

1977	28,88	25,50	49,70
1978	52,79	53,00	55,00
1979	38,88	37,00	70,90
1980	44,62	43,60	61,50
1981	31,92	29,00	46,60
1982	63,14	64,90	90,00
1983	48,97	48,60	101,50
1984	70,00	76,90	159,00
1985	29,10	33,58	48,60
1986	49,10	47,40	54,40
1987	28,00	32,82	36,50
1988	49,60	56,70	43,50
1989	37,60	39,10	82,50
1990	40,50	38,40	61,00
1991	55,60	63,40	62,00
1992	72,30	54,00	70,50
1993	53,20	44,30	85,00
1994	63,90	59,90	73,30
1995	37,80	36,10	58,30
1996	29,20	22,80	62,50
1997	39,60	36,80	360
1998	49,80	48,00	49,50
1999	36,10	45,40	28,00
2000	35,00	45,00	39,50
Max	72,30	76,90	159,00
Min	28,00	22,80	28,00
Moyenne	44,86	44,49	65,49
Ecart type	12,421	12,748	25,499
Variance	154,28	162,51	650,19
Cs	0,58	0,52	1,67
Cv	0,28	0,29	0,39
Coef d'appl	-0,46	0,02	4,81

L'ajustement des précipitations maximales journalières à la loi normal pour la station de Constantine (Code 100410) est présenté dans la figure ci-dessous.

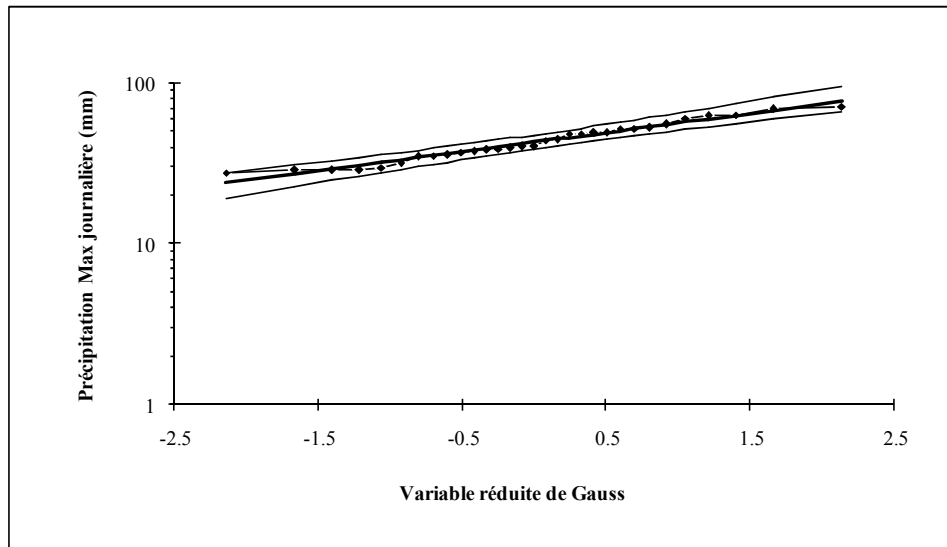


Figure V.9 Ajustement des précipitations maximales journalières à la loi normal : station de Constantine (Code 100410)

Les équations de la droite de Galton pour les stations étudiées sont données dans le tableau V.19.

Tableau V.19 Equation de la droite de Galton : Précipitations maximales journalières

Stations de références	Droite de Galton
100410	$X_{p\%} = 1,64 + 0,12.U_{p\%}$
100603	$X_{p\%} = 1,63 + 0,13.U_{p\%}$
100703	$X_{p\%} = 1,79 + 0,15.U_{p\%}$

Les quantiles sont résumés dans le tableau ci-dessous

Tableau V.20 Précipitations maximales pour différentes périodes de retour

Stations/périodes de retour (ans)	10	20	50	100	500	1000
100410	61,39	67,80	75,81	81,66	94,94	100,60
100603	62,02	68,92	77,61	84,00	98,60	104,86
100703	97,25	110,78	128,26	141,42	172,34	185,95

CONCLUSION

L'analyse des pluies dans le bassin versant Kébir Rhumel montre que le coefficient de variation maximal ne dépasse pas le 50 % pour l'étude de la précipitation annuelle, il est remarqué une grande dispersion observée dans les stations de Ain Fakroun et Hamma Bouziane avec des valeurs successive de coefficient d'asymétrie ($C_s = 1,02$ et $1,17$). Les coefficients d'aplatissement sont positifs dans la majorité des stations étudiées.

L'analyse de la variation annuelle de la précipitation par ACP montre également que les valeurs propres sont positives dans les trois composantes. On constate que presque toutes les variables (actives) sont corrélées fortement et positivement avec la première composante.

L'analyse de la corrélation montre une régionalisation des précipitations au niveau de notre bassin d'étude. Les stations pluviométriques présentées dans les figures VII.2, VII.3 et VII.4, s'organisent en quatre groupes avec des précipitations moyennes variant de 300 à 1300mm.

L'analyse en composantes principales a permis de dégager la station représentative du bassin versant qui est la station de Constantine.

A l'échelle mensuelle, les précipitations s'ajustent mieux à la loi log normal. L'analyse en composantes principales permet de visualiser aussi l'information des précipitations à l'échelle mensuelle. On constate également que les valeurs positives des valeurs propres sont observées dans les trois composantes. Mais la valeur de la 3^{ème} composante est inférieure à 1. On constate que presque toutes les variables (actives) sont corrélées fortement et positivement avec la première composante durant toute l'année sauf la saison d'été. Sur la première composante, les précipitations se répartissent mensuellement d'une façon presque constante de Septembre à Mai, viens ensuite une saison sèche de Juin à Août.

D'un point de vu spatial, les plus fortes corrélations avec le vecteur C_1 s'aperçoivent dans la zone Nord du domaine d'étude. Par contre allant au Sud, la corrélation avec le vecteur C_1 diminue. Il est donc prévisible d'apparaître une différenciation Nord-Sud dans les composantes supérieures.

A l'échelle journalière, L'analyse statistique des précipitations maximales journalières montre des coefficients de variation dans les stations de référence faibles (varient de 0,8 à 0,39). Une faible dispersion des données est remarquée dans certaines stations étudiées avec des écarts types dépasse le 12. Le coefficient d'aplatissement varie d'une station à l'autre.

CHAPITRE VI

ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT

Par suite du caractère aléatoire des variables d'entrée (précipitation), l'écoulement a tendance à varier dans le temps. Il est important de connaître l'étendue de ces variations afin d'établir les caractéristiques de la dynamique fluvio-sédimentaire dans un bassin versant situé en semi-aride.

La répartition de l'écoulement au long de l'année dépend des variations climatiques saisonnières. Dans la plupart des applications, la distribution mensuelle des débits est suffisante et peut se déduire des variations des paramètres météorologiques. Pour quelques problèmes, il peut être nécessaire de considérer la répartition des débits à l'échelle journalière.

Comme l'apparition des crues est aléatoire, il faut évaluer, d'une part, les écoulements superficiels aux crues et d'autre part quantifier les charges solides résultant du résultat du ruissellement superficiel.

Ce chapitre est consacré à l'étude des débits dans les cours d'eau du bassin versant Kébir-Rhumel. Pour décrire les caractéristiques de leur régime hydrologique, nous disposons des données des stations hydrométriques suivantes (Tableau VI.1):

- Station Grarem
- Station Tassaadane
- Station El Ancer

Tableau VI.1 Identification des stations hydrométriques

N°	Nom de station	Code	X (Km)	Y (Km)	Z (Km)	Date de service
1	Grarem	100601	821,55	363,35	173	01-09-1973
2	Tassaadane	100109	785,70	359,40	436	01-09-1972
3	El Ancer	100701	807,60	395,45	15	01-09-1972

L'étude de la variation saisonnière des débits moyens mensuels s'avère indispensable pour mieux connaître les fluctuations des débits.

Les caractéristiques de l'écoulement à savoir; le débit minimum, maximum et moyens annuel, le module spécifique (M°), l'hydraulicité (K_i), la lame d'eau ruisselée (L°), le coefficient d'écoulement, ainsi que les caractéristiques statistiques sont calculées pour toutes les stations hydrométriques étudiées.

VI.1 VARIATION DE L'ÉCOULEMENT

A partir des écoulements journaliers des débits établis par l'Agence Nationale des Ressources Hydrique (ANRH), nous avons déterminé pour les trois stations hydrométriques (Grarem, El Ancer et Tassaadane) les variations des débits liquides ainsi que quelques caractéristiques principales de l'écoulement. (Tableaux VI.3, VI.4 et VI.5).

Les paramètres statistiques, les plus couramment utilisés (l'écart type, le coefficient de variation) ont été présentés pour exprimer la variabilité de l'écoulement (Tableau VI.2).

Tableau VI.2 Variation interannuelle de l'écoulement au droit de différentes stations

Stations hydrométriques	Paramètres de variations	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Année
Tassaadane 100109	Qmoy (m ³ /s)	0,81	1,00	1,45	3,97	6,57	8,08	7,24	4,86	1,97	0,88	0,43	0,34	3,13
	Ecart type (m ³ /s)	0,69	1,39	1,57	4,09	7,84	7,69	7,31	4,89	1,35	0,63	0,44	0,36	2,20
	CV	0,85	1,39	1,08	1,03	1,19	0,95	1,01	1,01	0,68	0,71	1,04	1,08	0,70
Grarem 100601	Qmoy (m ³ /s)	2,52	2,28	3,24	7,38	11,31	11,62	10,06	6,35	3,40	1,91	1,13	0,98	5,14
	Ecart type (m ³ /s)	2,12	1,33	2,77	11,26	15,02	11,13	13,34	6,10	1,88	1,00	0,83	0,61	3,75
	CV	0,84	0,58	0,86	1,53	1,33	0,96	1,33	0,96	0,55	0,53	0,74	0,62	0,73
El Ancer 100701	Qmoy (m ³ /s)	4,41	9,31	15,62	40,23	48,58	62,06	47,66	39,00	14,96	10,83	3,34	2,61	24,88
	Ecart type (m ³ /s)	4,55	10,30	16,75	37,27	43,64	54,45	38,63	40,48	9,16	19,34	2,37	2,09	12,43
	CV	1,03	1,11	1,07	0,93	0,90	0,88	0,81	1,04	0,61	1,79	0,71	0,80	0,50

Tableau VI.3 Caractéristiques de l'écoulement du bassin Kébir-Rhumel
à la station Grarem (Code 100601)

Année	Q max (m ³ /s)	Q min (m ³ /s)	Q moy (m ³ /s)	Apport (Mm ³)	M ₀ (l/s.Km ²)	Ki	Lr (mm)	Ce
1972-1973	264,88	2,24	9,40	298,36	1,74	1,69	55,25	0,10
1973-1974	56,82	0,90	3,54	110,84	0,65	0,63	20,53	0,05
1974-1975	52,61	0,54	2,41	75,24	0,45	0,43	13,93	0,04
1975-1976	74,47	0,79	4,57	144,32	0,85	0,82	26,73	0,04
1976-1977	65,19	0,68	4,15	130,69	0,77	0,74	24,20	0,05
1977-1978	43,03	0,33	3,34	103,23	0,62	0,60	19,12	0,04
1978-1979	305,89	0,41	5,15	161,01	0,95	0,92	29,82	0,06
1979-1980	56,50	0,54	3,46	109,28	0,64	0,62	20,24	0,04
1980-1981	53,40	0,58	4,75	149,19	0,88	0,85	27,63	0,06
1981-1982	52,84	0,50	3,65	115,11	0,68	0,66	21,32	0,04
1982-1983	46,95	0,20	4,24	133,71	0,79	0,76	24,76	0,05
1983-1984	62,65	0,90	5,86	184,80	1,09	1,05	34,22	0,06
1984-1985	942,83	0,12	21,15	674,31	3,92	3,80	124,87	0,13
1985-1986	23,21	0,54	3,97	124,88	0,73	0,71	23,13	0,05
1986-1987	215,18	0,18	9,77	300,15	1,81	1,75	55,58	0,09
1987-1988	28,07	0,49	2,61	82,51	0,48	0,47	15,28	0,05
1988-1989	155,57	0,49	3,58	112,34	0,66	0,64	20,80	0,05
1989-1990	17,23	0,12	1,76	55,52	0,33	0,32	10,28	0,03
1990-1991	62,39	0,49	4,53	141,74	0,84	0,81	26,25	0,05
1991-1992	91,31	0,62	4,02	126,74	0,74	0,72	23,47	0,04
1992-1993	213,37	0,68	7,98	253,26	1,48	1,43	46,90	0,10
1993-1994	116,21	0,12	4,25	130,65	0,79	0,76	24,19	0,06
1994-1995	141,25	0,14	6,50	206,77	1,20	1,17	38,29	0,07
1995-1996	185,71	0,62	6,85	213,25	1,27	1,23	39,49	0,07
1996-1997	22,03	0,22	1,87	58,95	0,35	0,34	10,92	0,04
1997-1998	85,64	0,33	3,97	124,22	0,74	0,71	23,00	0,04
1998-1999	207,33	0,33	7,97	244,69	1,48	1,43	45,31	0,08
1999-2000	100,46	0,28	3,06	96,51	0,57	0,55	17,87	0,04
2000-2001	161,81	0,12	3,29	100,69	0,61	0,59	18,65	0,04
Moyenne	134,65	0,50	5,23	164,24	0,97	0,94	30,41	0,06
Ecart type	173,66	0,41	3,69	117,32	0,68	0,66	21,73	0,02
Coeff d'assy	3,85	2,87	3,11	3,18	3,11	3,11	3,18	1,56
Max	942,83	2,24	21,15	674,31	3,92	3,80	124,87	0,13
Min	17,23	0,12	1,76	55,52	0,33	0,32	10,28	0,03
Coeff d'appl	17,53	11,65	12,28	12,75	12,28	12,28	12,75	2,38
Médiane	74,47	0,49	4,15	130,65	0,77	0,74	24,19	0,05
Variance	30156,86	0,17	13,63	13763,46	0,47	0,44	472,00	0,001

Les valeurs du coefficient d'hydraulicité au niveau de la station de Grarem permettant de distinguer 19 années sèches, 6 années humides et 4 années moyennes.

Tableau VI.4 Caractéristiques de l'écoulement du bassin Kébir-Rhumel à la station Tassadane (Code 100109)

Année	Q max (m ³ /s)	Q min (m ³ /s)	Q moy (m ³ /s)	Apport (Mm ³)	M ₀ (l/s.Km ²)	Ki	Lr (mm)	Ce
1973 -1974	108,26	0,32	3,67	115,10	3,916	1,17	122,84	0,319
1974 -1975	53,54	0,21	1,71	53,02	1,822	0,55	56,58	0,105
1975-1976	51,30	0,32	4,38	136,91	4,669	1,40	146,12	0,329
1976-1977	64,48	0,10	2,63	82,84	2,804	0,84	88,41	0,316
1977-1978	64,48	0,04	3,14	97,44	3,352	1,00	103,99	0,358
1978-1979	67,82	0,00	2,53	79,44	2,703	0,81	84,78	0,243
1979-1980	45,35	0,18	1,73	54,69	1,843	0,55	58,36	0,246
1980-1981	115,19	0,12	2,50	78,58	2,672	0,80	83,86	0,146
1981-1982	83,699	0,200	5,25	163,69	5,603	1,68	174,69	0,524
1982-1983	62,60	0,01	2,56	80,77	2,727	0,82	86,20	0,205
1983-1984	152,44	0,13	5,29	163,80	5,647	1,69	174,82	0,281
1984-1985	123,6062	0,274	9,66	304,82	10,308	3,09	325,32	0,841
1985-1986	30,42937	0,02	1,96	61,57	2,096	0,63	65,71	0,123
1986-1987	58,04834	0,07	6,09	189,75	6,504	1,95	202,50	0,782
1987-1988	30,28938	0	1,10	34,95	1,173	0,35	37,30	0,080
1988-1989	86,21793	0,0636	2,91	91,35	3,108	0,93	97,50	0,261
1989-1990	14,93875	0,092	0,72	22,79	0,768	0,23	24,32	0,064
1990-1991	72,46917	0,088	4,42	138,33	4,718	1,41	147,63	0,351
1991-1992	75,53541	0,08	2,58	81,21	2,757	0,83	86,68	0,232
1992-1993	60,07291	0,058	3,18	100,75	3,391	1,02	107,52	0,452
1993-1994	97,60458	0,058	2,77	83,40	2,955	0,88	89,00	0,207
1994-1995	80,165	0,038	4,38	139,48	4,673	1,40	148,86	0,323
1995-1996	101,75	0,038	2,37	73,73	2,528	0,76	78,69	0,346
1996-1997	12,22271	0,004	0,42	13,29	0,449	0,13	14,18	0,035
1997-1998	42,29558	0,008	2,08	65,40	2,222	0,67	69,80	0,170
1998-1999	45,6725	0,0312	2,68	82,85	2,860	0,86	88,42	0,334
1999-2000	22,65583	0,017	0,69	21,87	0,736	0,22	23,34	0,065
2000-2001	36,24042	0,0098	1,33	41,08	1,418	0,42	43,84	0,117
2001-2002	16,75657	0,002	0,46	14,54	0,496	0,15	15,52	/
2002-2003	235,6621	0,004	8,80	276,13	9,389	2,81	294,70	/
Moyenne	66,41	0,092	3,03	94,75	3,23	0,97	101,12	0,281
Ecart type	33,90	0,095	1,93	60,69	2,063	0,62	64,77	0,193
Coeff d'assy	0,58	1,30	1,6	1,63	1,60	1,60	1,63	1,459
Max	152,45	0,320	9,66	304,82	10,31	3,09	325,32	0,841
Min	12,22	0,00	0,42	13,29	0,45	0,13	14,180	0,035
Coeff d'appl	4,64	1,02	2,43	2,53	2,43	2,43	2,53	2,64
Médiane	63,54	0,061	2,61	82,029	2,78	0,83	87,55	0,253
Variance	1148,85	0,009	3,74	3683,09	4,26	0,381	4195,01	0,037

Les valeurs du coefficient d'hydraulicité au niveau de la station Tassaadane permettant de distinguer 18 années sèches, 9 années humides et 3 années moyennes.

Tableau VI.5 Caractéristiques de l'écoulement du bassin Kébir-Rhumel à la station El Ancer (Code 100701)

Année	Q max (m ³ /s)	Q min (m ³ /s)	Q moy (m ³ /s)	Apport (Mm ³)	M ₀ (l/s.Km ²)	Ki	Lr (mm)	Ce
1972-1973	1111,00	2,00	60,29	1892,37	7,09	2,42	222,63	0,18
1973-1974	739,60	1,98	24,42	761,29	2,87	0,98	89,56	0,06
1974-1975	441,20	0,92	12,36	384,98	1,45	0,50	45,29	0,04
1975-1976	489,10	0,85	26,96	850,40	3,17	1,08	100,05	0,07
1976-1977	316,20	2,42	18,02	569,18	2,12	0,72	66,96	0,05
1977-1978	381,70	1,87	16,73	521,27	1,97	0,67	61,33	0,05
1978-1979	1774,00	1,34	37,92	1184,38	4,46	1,52	139,34	0,10
1979-1980	316,80	0,19	14,88	472,36	1,75	0,60	55,57	0,05
1980-1981	769,50	2,80	26,49	832,26	3,12	1,06	97,91	0,06
1981-1982	2529,00	1,450	34,70	1083,19	4,08	1,39	127,43	0,10
1982-1983	517,70	0,94	20,66	654,68	2,43	0,83	77,02	0,08
1983-1984	1791,00	0,50	35,17	1085,02	4,14	1,41	127,65	0,07
1984-1985	778,83	1,28	24,88	782,82	2,93	1,00	92,10	0,04
1985-1986	236,9	1,8	22,99	719,36	2,70	0,92	84,63	0,06
1986-1987	537,8	1,8	32,11	1000,05	3,78	1,29	117,65	0,08
1987-1988	189,2	0,575	9,53	300,94	1,12	0,38	35,40	0,04
1988-1989	424,4	0,575	17,01	534,27	2,00	0,68	62,85	0,05
1989-1990	187,4	0,708	8,47	267,10	1,00	0,34	31,42	0,04
1990-1991	1234	2,005	46,15	1446,35	5,43	1,85	170,16	0,11
1991-1992	729,9	0,87	23,20	728,39	2,73	0,93	85,69	0,07
1992-1993	962	0,69	20,91	667,52	2,46	0,84	78,53	0,07
1993-1994	677	0,67	13,53	410,51	1,59	0,54	48,30	0,04
Moyenne	778,83	1,28	24,88	779,49	2,93	1,00	91,70	0,07
Ecart type	596,40	0,71	12,43	388,68	1,46	0,50	45,73	0,03
Coeff d'assy	1,62	0,47	1,22	1,23	1,22	1,22	1,23	1,87
Max	2529,00	2,80	60,29	1892,37	7,09	2,42	222,63	0,18
Min	187,40	0,19	8,47	267,10	1,00	0,34	31,42	0,04
Coeff d'appl	2,51	-0,75	1,88	1,97	1,88	1,88	1,97	5,01
Médiane	607,40	1,11	23,09	723,88	2,72	0,93	85,16	0,06
Variance	355695,14	0,50	154,49	151074,97	2,14	0,25	2091,00	0,001

Les valeurs du coefficient d'hydraulicité au niveau de la station El Ancer permettant de distinguer 10 années sèches, 6 années humides et 6 années moyennes.

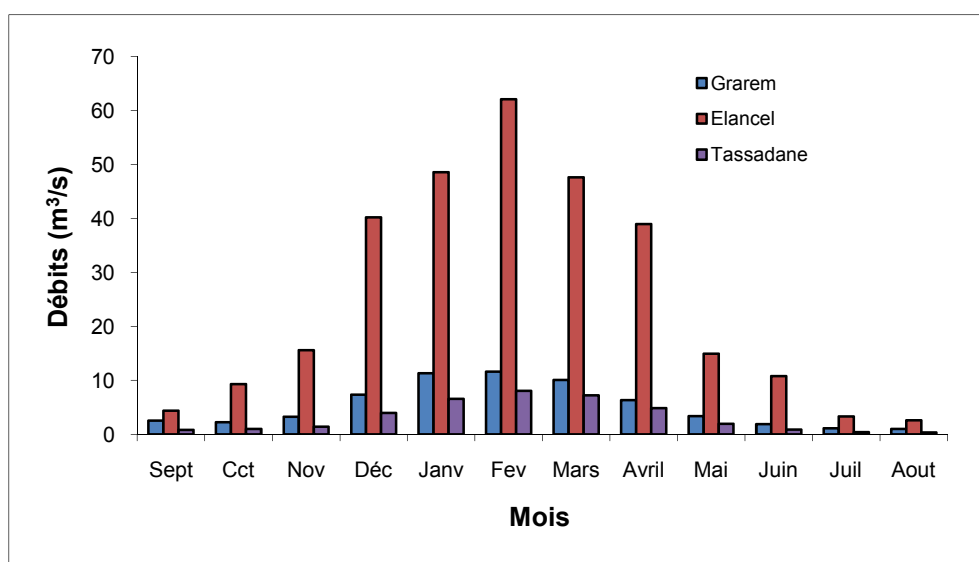


Figure VI.1 Histogramme de débits moyens mensuels (Station El Ancer, Grarem et Tassaadane)

VI.1.1 Débit moyen et max annuel

Les variations annuelles de débit dans les cours d'eau du bassin Kébir-Rhumel ont été présentées, les trois stations hydrométriques présentent des séries statistiques adéquates (22 à 30 ans).

L'écoulement qui s'effectue au niveau du bassin kébir-Rhumel est de plus irrégulier, il est très variable d'une année à l'autre (figure VI.2, VI.3 et VI.4). L'écoulement exceptionnel de l'année 84/85 pour la station de Grarem et Tassaadane est traduit successivement par les coefficients d'hydraulicité, 3,4 et 3,08 et peut être attribué aux fortes crues de cette année.

Les paramètres statistiques les plus couramment utilisés pour exprimer la variabilité de l'écoulement ont été présentés ci-dessus, tels que, le coefficient de variation, l'écart type. Les valeurs du coefficient d'hydraulicité étudiées ont permis de distinguer les années sèches et humides dans les différentes stations d'études (voir tableaux VI.3, VI.4 et VI.5).

- Station de Grarem : 19 années sèches, 6 années humides et 4 années moyennes.
- Station Tassaandane : 18 années sèches, 9 années humides et 3 années moyennes.
- Station El Ancer : 10 années sèches, 6 années humides et 6 années moyennes.

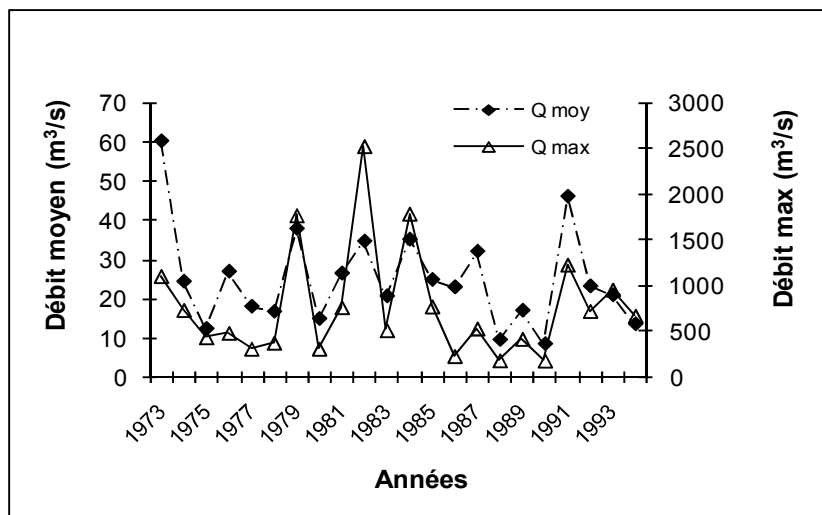


Figure VI.2 Variation annuelle des débits d'écoulement (Station El Ancer)

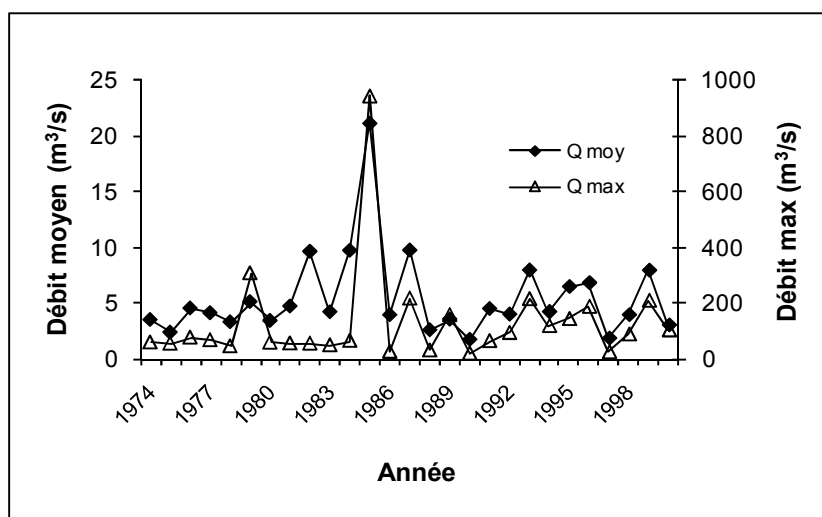


Figure VI.3 Variation annuelle des débits d'écoulement (Stations Grarem)

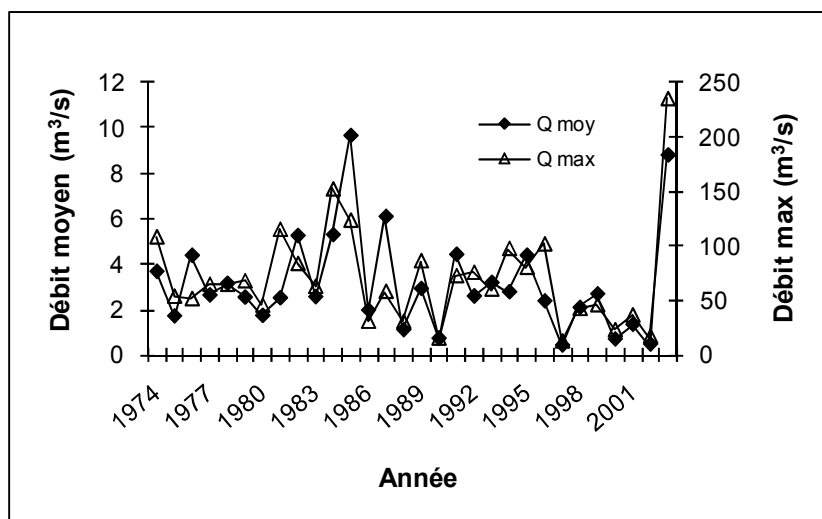


Figure VI.4 Variation annuelle des débits d'écoulement (Station Tassaadane)

Les équations d'ajustements des débits moyens annuels ont été présentées ci-dessous.

Tableau VI.6 Equations d'ajustement des débits moyens annuels à la loi Log-normal

Stations hydrométriques	Equation de la droite de Galton
Tassaadane	$\text{Log}X_{p\%} = 1,35 + 0,21. U_{p\%}$
Grarem	$\text{Log}X_{p\%} = 0,65 + 0,23. U_{p\%}$
El Ancer	$\text{Log}X_{p\%} = 0,39 + 0,33. U_{p\%}$

Les résultats de l'ajustement des débits moyens annuels des stations d'études sont donnés dans les figures (VI.5, VI.6 et VI.7).

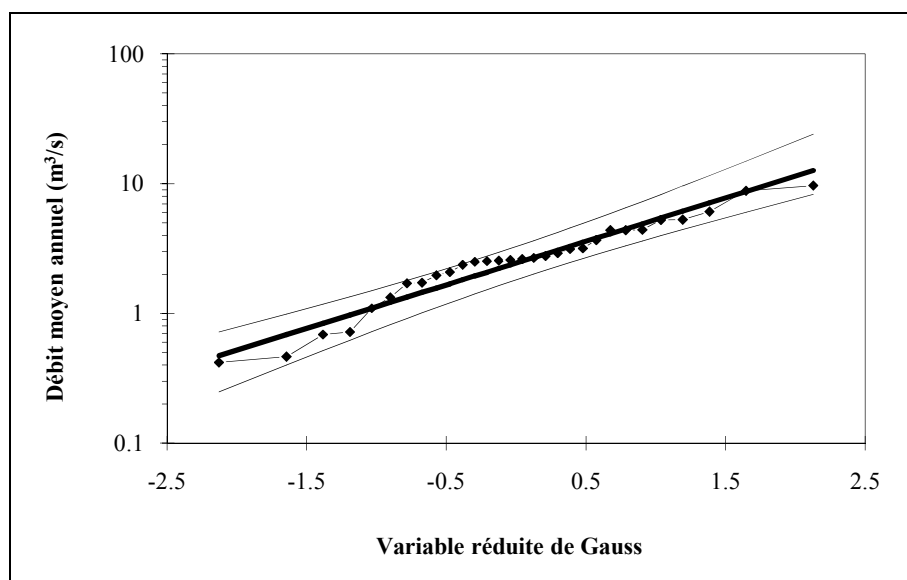


Figure VI.5 Ajustement des débits moyens à la loi log normal : Station Tassaadane

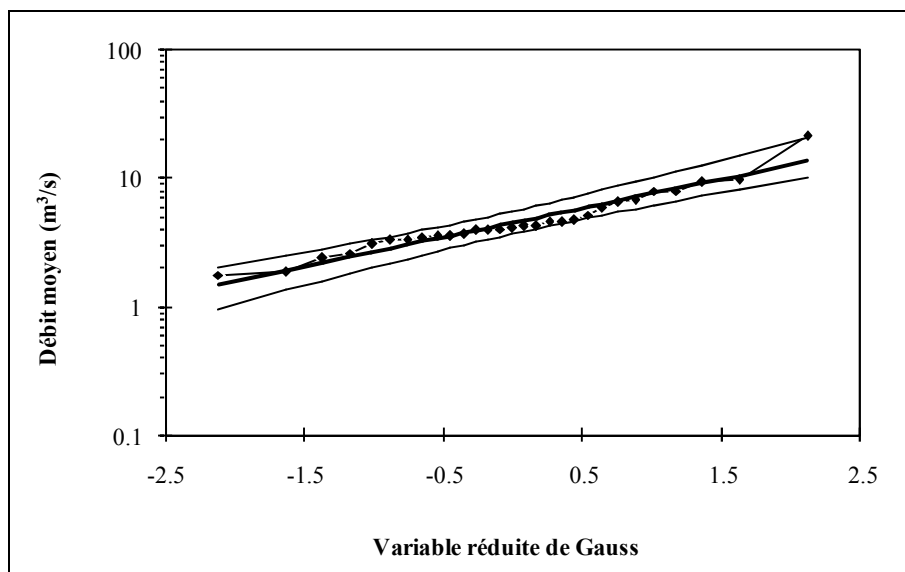


Figure VI.6 Ajustement des débits moyens à la loi log normal : Station Grarem

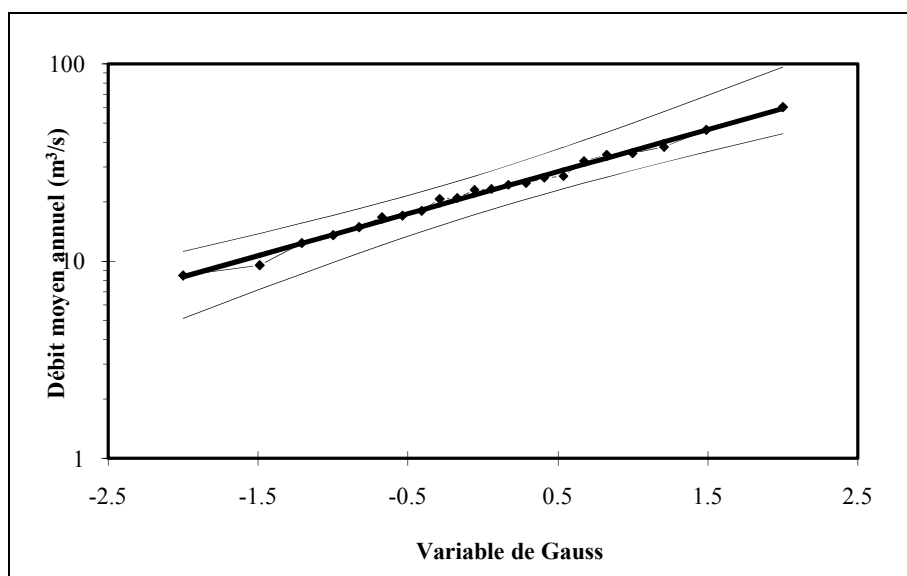


Figure VI.7 Ajustement des débits moyens à la loi log normal : Station El Ancer

Les quantiles pour les différentes stations hydrométriques qui se trouvent dans le bassin versant sont mentionnés dans le tableau VI.7.

Tableau VI.7 Débits moyens pour différentes périodes de retour

Période de retour (an)	10	20	50	100	500	1000
Ain Smara	1,88	2,34	3,00	3,53	4,93	5,60
Tassaadane	6,56	8,68	11,89	14,67	22,44	26,43
Grarem	8,75	10,57	13,07	15,06	20,06	22,39
El Ancer	41,68	49,82	60,90	69,62	91,27	101,27

La détermination de la tendance de la variabilité de l'écoulement fluvial en réponse aux précipitations tombées sur le bassin de Kébir-Rhumel a été établie par la représentation graphique de la hauteur d'eau précipitée en fonction de la lame écoulee. Les figures (VI.8, VI.9) montrent que les débits évoluent convenablement de la même façon que les pluies, à l'exception de certains cas d'années. La station El Ancer située au nord à l'aval du bassin montre la bonne corrélation excepté les deux années (84/85 et 90/91) et aussi la même observation est obtenue pour la station de Grarem située au milieu du bassin, la corrélation entre la lame écoulee et précipitée est de l'ordre de 0,83 à l'exception des années (75/76, 81/82, 91/92 et 97/98). La station de Tassaadane (figure VI.10) présente une mauvaise tendance entre la lame d'eau écoulee et la lame précipitée. On remarque que malgré l'augmentation plus au moins progressive de la pluviométrie à l'amont du bassin Kébir-Rhumel, la tranche d'eau annuelle moyenne reçue par l'ensemble du bassin reste relativement faible. Ceci est lié à l'influence semi-aride marqué du bassin supérieur combinée bien sûr à l'importance de la surface correspondante (Mébarki, 1986) et peut être aussi due à la perméabilité non négligeable des formations lithologiques ce qui est apparu plus clairement dans le bassin de l'oued Bou Merkoug à l'amont d'El Khroub (Wilaya de Constantine) qui se distingue par une plus grande extension des reliefs calcaires karstiques.

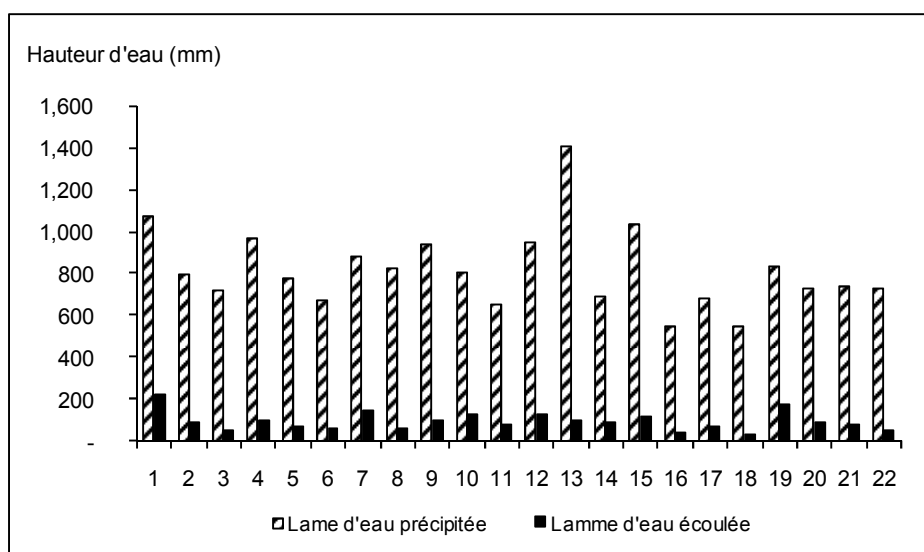


Figure VI.8 Lames d'eau précipitée et écoulee annuelles (Station El Ancrer)

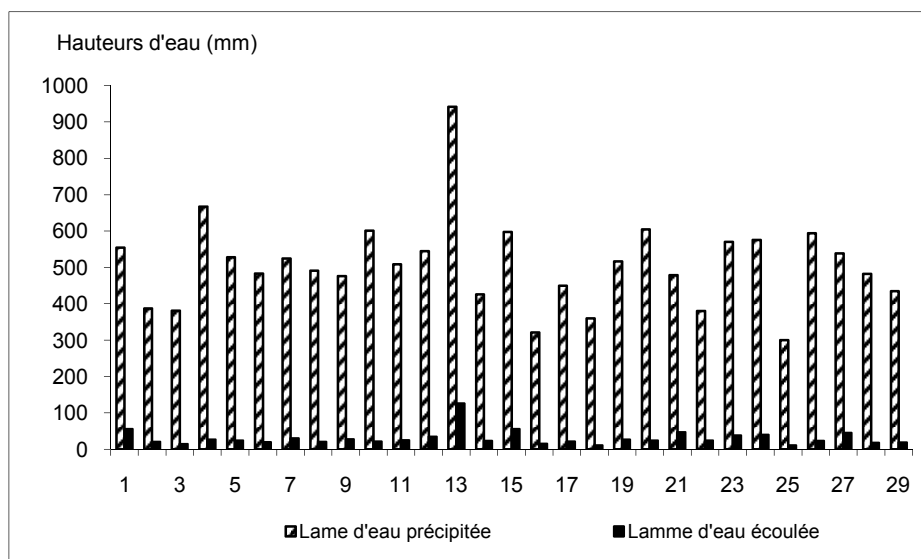


Figure VI.9 Lames d'eau précipitée et écoulée annuelles (Station Grarem)

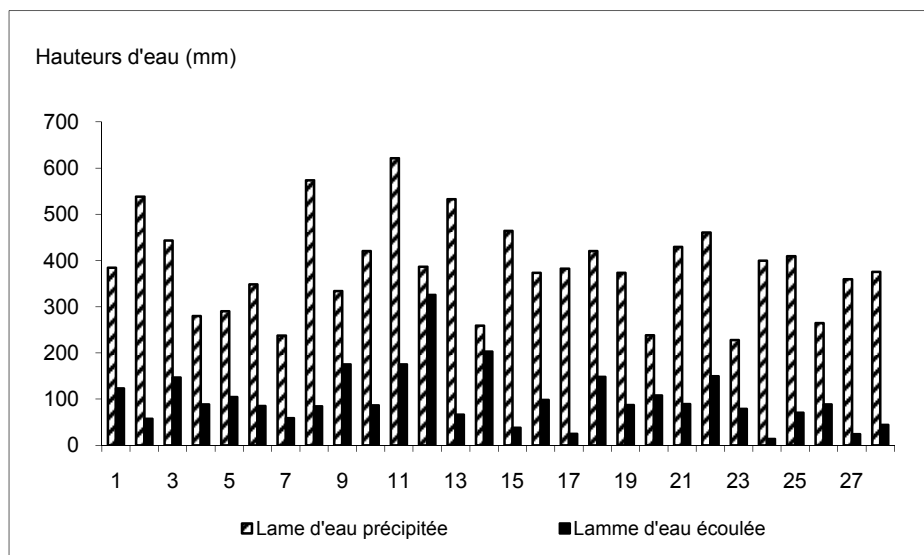


Figure VI.10 Lames d'eau précipitée et écoulée annuelles (Station Tassaadane)

VI.1.2 Variation mensuelle du débit

L'étude de la variation saisonnière des débits moyens mensuels est justifié nécessaire pour mieux connaître les fluctuations des débits.

L'étude des écoulements dans le bassin versant Kébir-Rhumel montre que les grands débits sont observés à la Station El Ancer à l'aval du bassin et qui sont enregistrés généralement entre les mois de Décembre et Avril (Qmoyen mensuel pour le mois d'Avril atteint les 62,06 m³/s, et les débits maxima qui dépassent les 1100 m³/s durant la période Décembre-Avril. Ce débit atteint une valeur de 1774 m³/s en mois d'Avril 1979. Pour le cas de la station de Grarem, les débits moyens intrannuels dépassent les 11 m³/s durant les mois de Janvier et Février. Un débit maximum mensuel est enregistré au mois de Décembre 1984 atteint une valeur de 942,83 m³/s.

Concernant la station Tassaadane, les débits de pointes mensuels enregistrés dans le mois de Février est de l'ordre de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ et avec un pic de débit atteint une valeur de $235,66 \text{ m}^3/\text{s}$ au mois du Janvier 2003 (figures VI.11 et VI.12).

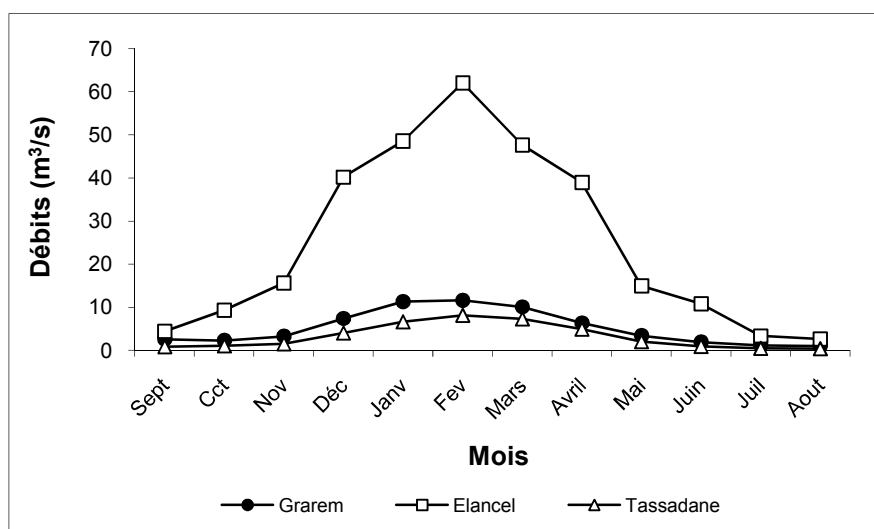


Figure VI.11 Variation saisonnière des débits moyens mensuels

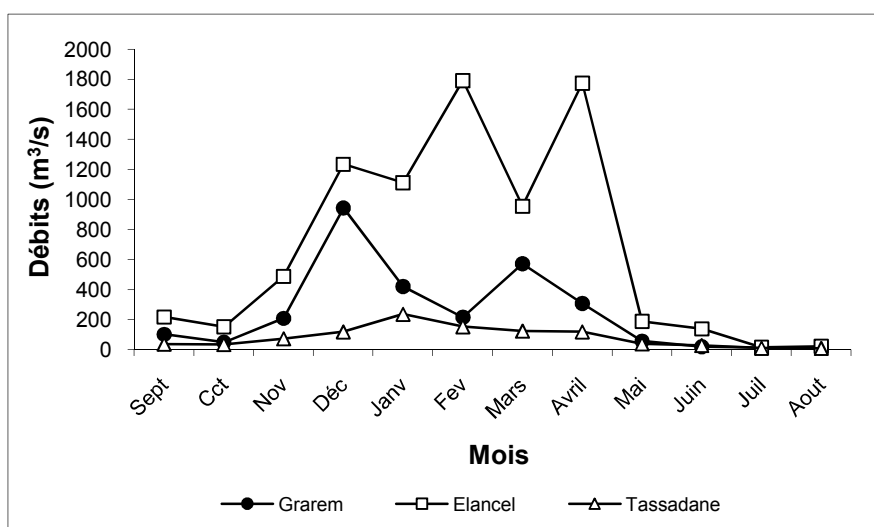


Figure VI.12 Variation saisonnière des débits maxima mensuels

VI.2 ANALYSE DES CRUES

Au cours de l'année, les débits des cours d'eau subissent des variations liées aux cycles crue/étiage. Sur les petits à moyens bassins, le régime hydrologique des cours d'eau est étroitement lié aux rythmes climatiques régionaux (Benkaled, 2001). En fonction de l'allure des variations saisonnières des débits, plusieurs régimes peuvent être identifiés (Pardé 1943 in Réméniéras, 1986) selon deux types de critère :

- la simplicité ou la complexité de la courbe chronologique annuelle des débits journaliers
- la nature et l'origine des hautes eaux.

Les crues correspondent à des augmentations relativement brutales du débit et par conséquent de la hauteur du niveau d'eau d'un cours d'eau, suite à un apport important en eau consécutif à une période exceptionnelle de précipitations ou de fonte de neige. Une crue provoque généralement des inondations lorsque les eaux débordent le lit mineur et submergent les terres environnantes.

Contrairement aux crues, les étiages correspondent au niveau le plus bas atteint par un cours d'eau, lorsque tout écoulement de surface a cessé et qu'il n'est plus alimenté que par le débit de base en provenance des eaux souterraines. Les étiages sont dus à des sécheresses prolongées causées par des températures élevées. Une baisse du niveau des nappes au cours des saisons précédentes contribue aussi à la faiblesse des débits, ainsi que des prélèvements en eau trop importants, qui ont tendance à se multiplier en période de sécheresse. L'étude des étiages, permet de mettre en valeur la forte décroissance des débits en phase de tarissement et surtout de préciser les restitutions des nappes aquifères à l'écoulement fluvial. (Bouanani, 2004).

Les crues seront étudiées à travers les débits journaliers et instantanés maxima dont les valeurs sont toujours supérieures aux débits moyens de hautes eaux.

La figure VI.13 indique que le régime d'écoulement de l'oued Kébir-Rhumel dépend principalement de l'intensité de crues.

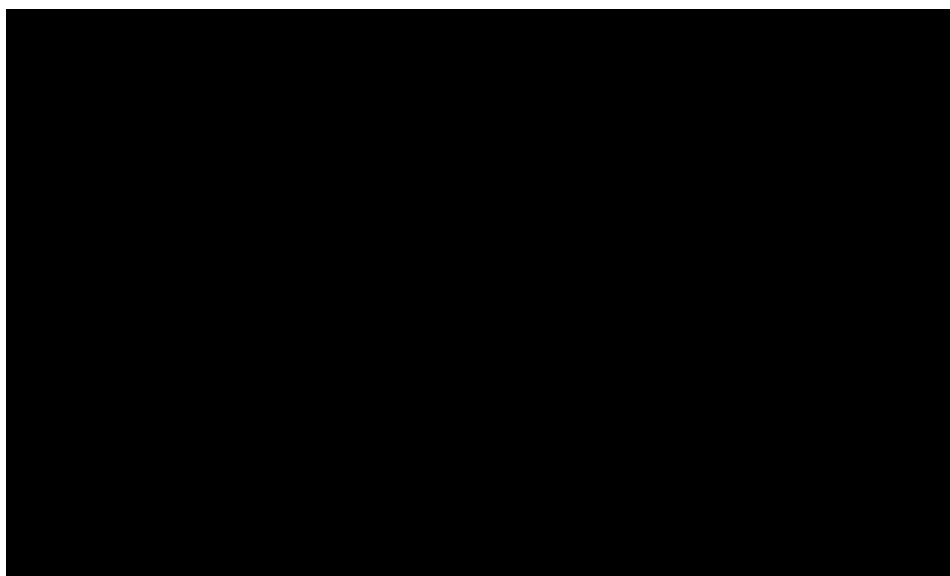


Figure VI.13 Chronologique des débits instantanés sur l'oued Kébir-Rhumel (station El Ancer)

La période d'observation des débits instantanés (station d'El Ancer) permet de distinguer les périodes de crues intenses et qui est concentrées durant la période (Octobre à Mai). Ces crues sont concentrées généralement lors des saisons Automnales, Hivernales et Printanières (Figure VI.14) elle est évidemment la période la plus caractéristique de l'année hydrologique moyenne.

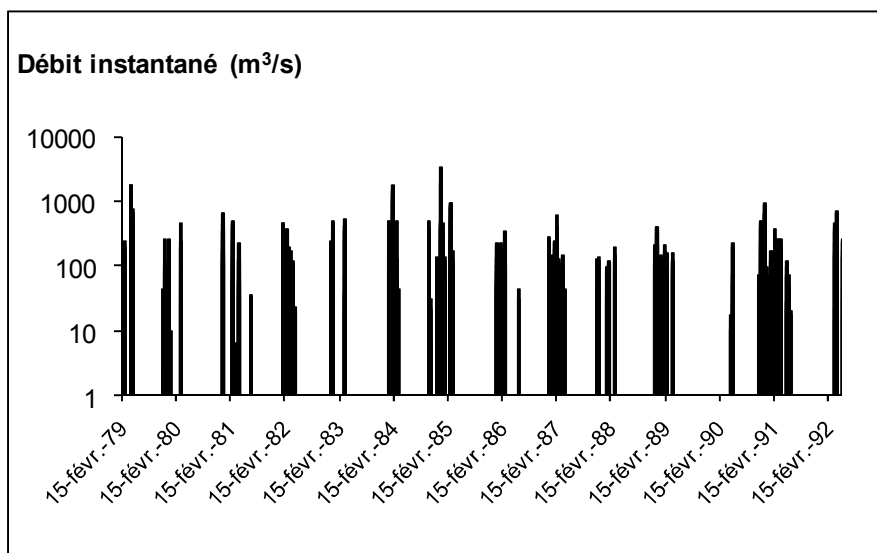


Figure VI.14 Hydrogrammes de crues durant la période 79-92 (Station El Ancer)

Sur 2025 valeurs de débit journalier instantanées, le nombre d'évènement des crues dont le débit dépasse $100 \text{ m}^3/\text{s}$ est de 365, représentant 18,02 % de l'ensemble des données.

Sur la période étudiée, les plus fortes concentrations des MES (de l'ordre de 100 g/l en moyenne) pour l'oued kébir-Rhumel ont été observées lors des épisodes pluviaux les plus importants (figure VI.15).

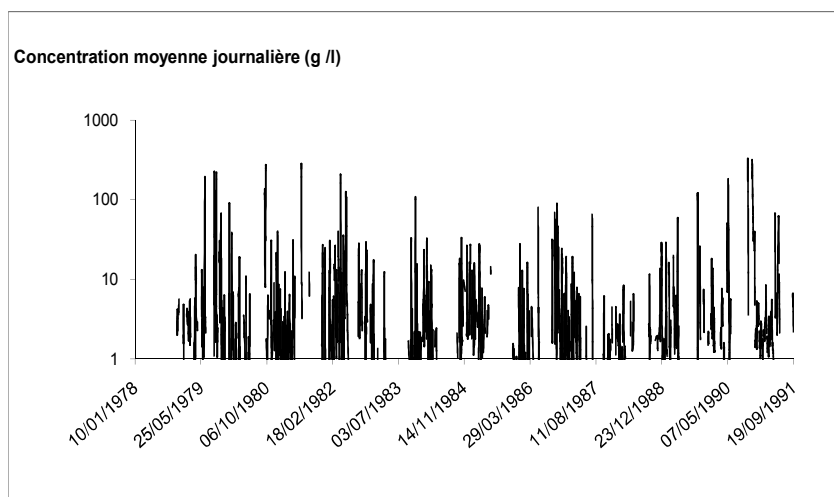


Figure VI.15 Graphique chronologiques des concentrations pour les débits $>100 \text{ m}^3/\text{s}$

Le transport de matières en suspension (MES) est particulièrement influencé par l'intensité de la pluie. En effet, celle-ci exerce deux actions complémentaires sur les versants :

- d'une part, l'impact des gouttes de pluie sur un sol dénudé est particulièrement fort lorsque les averses sont violentes. Il pulvérise les agrégats du sol, libérant ainsi des éléments susceptibles d'être amenés aux rivières.

- d'autre part, la violence des pluies favorise le déclenchement du ruissellement superficiel et donc, le transport des éléments arrachés aux versant jusqu'aux talwegs.

En outre, l'accroissement du débit des cours d'eau provoque une accentuation des conditions hydrodynamique, laquelle favorise l'érosion des berges et même le remaniement des dépôts qui s'étaient formés dans le fond du lit.

Le listing des crues observées dans la station El Ancer dont les débits sont supérieurs à 300 m³/s est présenté dans le tableau VI.08

Tableau VI.8 Crues observées au seuil de 300 m³/s (Station El Ancer)

Date	Débit moyen Journalier maximal (m ³ /s)	Débit instantané maximal (m ³ /s)	Rapport Débit max instantané/ débit moy max journalier (m ³ /s)
16 Avril 1979	1774,00	1832,08	1,03
06 Mars 80	316,80	458,68	1,45
22 Février 81	403,00	489,62	1,21
27 Décembre 82	446,50	501,40	1,12
18 Mars 83	478,80	525,00	1,10
04 Février 84	1611,00	1748,80	1,09
16 Février 84	307,00	355,60	1,16
10 Mars 84	445,40	490,60	1,10
13 Février 87	537,80	609,50	1,13
17 Novembre 90	487,30	487,00	1,00
13 Décembre 90	462,00	487,00	1,05

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus montrent une faible irrégularité de l'écoulement sur l'oued Kébir-Rhumel à la station El Ancer (rapport maximum égal à 1,45) à l'extrémité aval du bassin versant comparé aux autres stations de mesure. Ce rapport peut atteindre des proportions remarquables en mois de Septembre, il s'élève à 9,92 sur l'oued Enndja (Station de douar Tassaadane) et 4,77 sur l'oued Rhumel (station de Grarem). Les valeurs moyennes varient de 1,37 à la station El Ancer à 3,56 à la station Tassaadane.

Quelques crues observées dans les stations de Grarem et Tassaadane ont été mentionnées dans les tableaux (VI.9 et VI10).

Tableau VI.9 Crues observées à la station de Grarem

Date	Débit moyen Journalier maximal (m ³ /s)	Débit instantané maximal (m ³ /s)	Rapport Débit max instantané/ débit moy max journalier (m ³ /s)
28 Mars 1973	264,88	351,00	1,33
25 Septembre 73	56,82	270,80	4,77
15 Avril 79	305,89	396,08	1,29
28 Décembre 84	942,83	1085,20	1,15
Mars 1985	571,78	727,20	1,27
08 Février 1987	215,80	275,60	1,28
19 Avril 92	91,31	112,25	1,23
24 Mai 92	55,90	85,25	1,53
07 Octobre 94	48,59	196,00	4,04
27 Février 96	185,71	291,20	1,57
27 Novembre 98	207,33	276,00	1,33
09 Septembre 99	100,46	200,20	1,99

Tableau VI.10 Crues observées à la station de Tassaadane

Date	Débit moyen Journalier maximal (m ³ /s)	Débit instantané maximal (m ³ /s)	Rapport Débit max instantané/ débit moy max journalier (m ³ /s)
25 Septembre 73	36,22	196,80	5,43
23 Février 1974	46,08	119,20	2,59
16 Février 1975	53,54	121,60	2,27
13 Mai 1975	11,82	43,60	3,68
06 Février 1976	46,16	136,00	2,95
19 Décembre 80	113,03	516,00	2,56
01 Septembre 81	14,23	141,2	9,92
25 Décembre 82	62,60	147,7	2,36
28 Décembre 84	113,03	159,4	1,41
02 Février 84	152,44	366,2	2,40

Ces observations faites pendant l'évènement de crue mettent en évidence, la forte irrégularité de l'écoulement au cours d'une journée de crue, et à plus forte raison en saison chaude où les averses sont très localisées, brèves et d'intensités très variables (brutales et rapides). Cet aspect de forte irrégularité de l'écoulement de crue confirme bien le régime aléatoire méditerranéen.

L'Ajustement statistique des crues observées par la loi de Gumbel (figure VI.16) montre que la fréquence de l'évènement de crue le plus important sur le bassin de l'oued kébir-Rhumel ($Q_{max} = 1832,08 \text{ m}^3/\text{s}$) est cinquantaire.

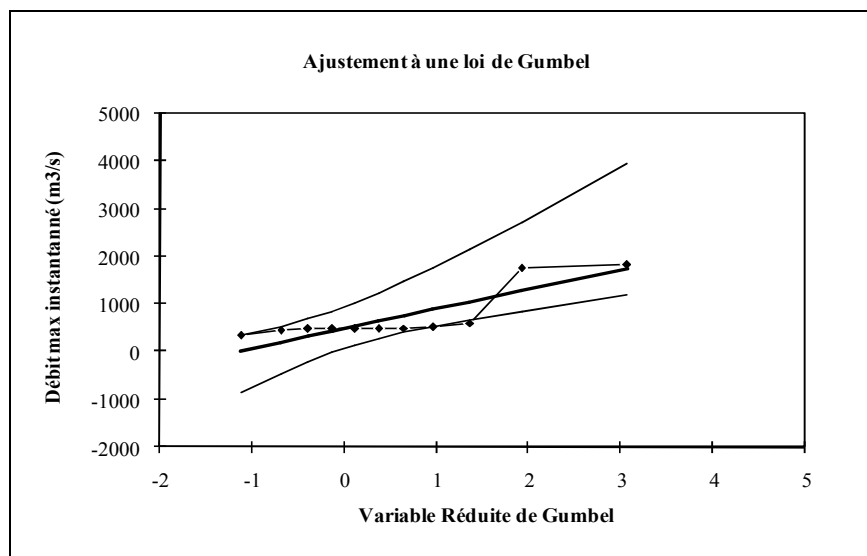


Figure VI.16 Ajustement des débits maxima à la loi de Gumbel : Station El Ancer

CONCLUSION

Le sous-équipement du réseau du bassin versant kébir-Rhume avec des séries d'observations hydrométriques n'ont pas rendu possible l'approfondissement de l'étude de certains mécanismes hydrologiques particulièrement liés aux débits extrêmes.

L'interprétation statistique et graphique des données nous a permis de saisir les variations spatiales de l'écoulement superficiel en liaison avec les données pluviométriques et physiographiques du bassin de même sa forte variabilité temporelle, annuelle et surtout saisonnière et journalière. Le calcul des bilans hydrologiques inter annuel (1972/73–2000/01) a fait ressortir la faiblesse du coefficient d'écoulement, notamment au niveau des stations Grarem et El Ancer avec des valeurs correspondantes respectivement à (6% et 7%) et au contraire, l'importance du coefficient d'écoulement au niveau de la station Tassaadane (28%) serait peut être de faible perméabilités des affleurements géologiques et à la Kartification plus développée du système souterrain permettant un déstockage plus rapide qui soutient l'écoulement superficiel.

L'analyse des variations saisonnières des débits a permis de dégager, spécialement à partir des coefficients mensuels, les nuances de régimes hydrologiques à l'alimentation essentiellement pluviale liées du reste aux régimes climatiques mais plus ou moins modifiés par le rôle de la lithologie. Qui ont fait ressortir la forte opposition entre l'abondance hivernale et l'indigence estivale des cours d'eau.

L'étude des formes extrêmes de l'écoulement, axées tout d'abord sur les crues, a mis successivement le caractère torrentiel des crues dû principalement à la forte intensité pluviométrique. La période d'observation des débits instantanés permet de distinguer les périodes des crues intenses qui sont concentrées durant la période (Octobre à Mai). Ces crues sont concentrées généralement lors des saisons automnales, hivernales et printanières.

Il faut noter que le nombre d'évènements des crues dont le débit dépasse $100 \text{ m}^3/\text{s}$ représentant 18 % de l'ensemble des données d'observation (le cas de la station El Ancer à l'aval du bassin), les plus fortes concentrations de MES (de l'ordre de 100 g/l en moyenne) ont été observées dans cette station lors des épisodes pluviaux les plus importants.

CHAPITRE VII

ANALYSE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

VII.1 CHRONOLOGIE DES COLLECTES

Les premières mesures systématiques et standardisées du transport solide en suspension ont débuté en 1946 à la station de la traïlle, qui contrôle le bassin de l'oued Isser.

Ces mesures ont été étendues à une trentaine de stations sur les bassins de côtières constantinois, côtier algérois, Chéelif, Macta, Hodhna et Soummam.

Après une interruption d'une dizaine d'années, ces mesures ont été reprises en 1970 et étendues à l'ensemble du réseau hydrique national.

L'exploitation de toutes les données de crues d'eau pour l'estimation de la masse sédimentaires et leurs origines est le but principal de cette partie d'étude.

Dans notre cas d'étude, une seule station dans le bassin Kébir-Rhumel qui présente des données un peu acceptables. Cette station appelée station d'El Ancer et située à l'aval du barrage de Beni-Haroun draine une superficie de 8735 km² et contrôle tout le bassin du Kébir-Rhumel. La période des données disponibles concernées par la présente analyse est malheureusement s'étale seulement entre 1979 et 1991 à cause de la décennie noire qui a touché l'Algérie.

Le tableau VII.1 montre la variation du nombre de mesure du transport solide en suspension. Cette variation est bien illustrée sur la figure 8-1, où l'on constate que dans le bassin, la concentration de sédiments en suspension se distingue bien au cours des mois pluviaux. Le mois qui engendre le plus grand nombre de valeur de concentration est le mois de Janvier. Le plus petit nombre est observé au mois d'Aout. A l'échelle annuelle, l'année 1982 possède le plus grand nombre de valeurs de concentration. On remarque aussi que la fréquence d'échantillonnage mensuelle est relativement homogène.

Tableau VII.1 Variation mensuelle et annuelle du nombre de mesure de la concentration des sédiments en suspension.

Année/ Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Total
1979	31	15	26	07	04	21	13	17	02	19	/	/	155
1980	14	18	08	35	15	07	20	06	15	/	/	/	138
1981	/	/	02	20	20	33	13	12	03	07	01	02	113
1982	28	14	09	35	16	35	31	31	26	14	/	/	239

1983	04	13	26	20	19	/	21	01	/	/	/	/	104
1984	02	29	05	28	25	28	19	05	/	/	/	/	141
1985	/	/	8	9	34	13	65	11	04	02	/	/	146
1986	07	31	33	43	47	30	32	03	03	05	/	/	234
1987	/	14	15	04	34	35	33	19	03	/	06	/	163
1988	16	/	04	41	20	18	24	02	05	/	/	/	130
1989	09	06	07	06	19	21	13	33	04	/	/	/	118
1990	/	07	36	43	36	/	14	05	31	/	/	/	172
1991	06	35	/	/	33	30	26	22	16	09	/	/	177
Total	117	182	179	291	322	271	324	167	112	56	7	2	2030

/ : Donnée manquante

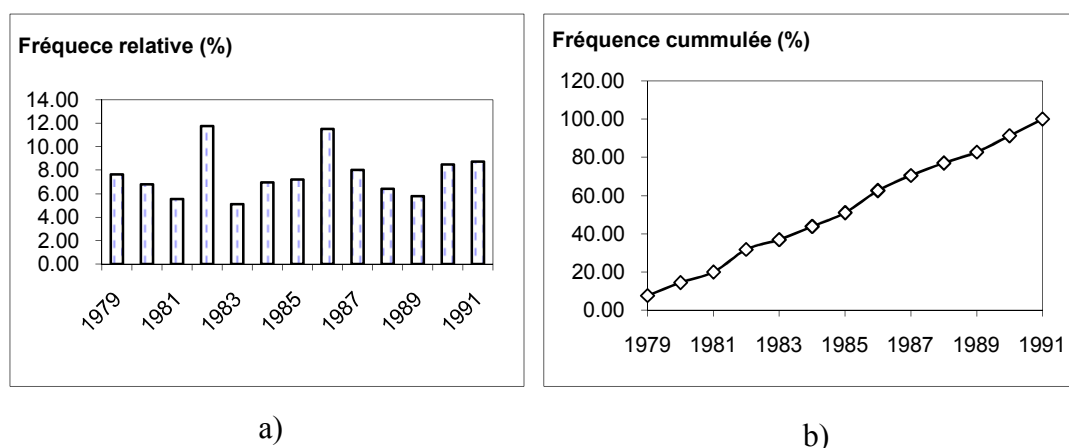


Figure VII.1 Variation du nombre de mesure de la concentration durant la période d'étude (1979-1991) : a)- fréquence relative ; b)- fréquence cumulée

La collecte des données consiste en un dépouillement systématique de tous les fichiers de la hauteur d'eau, et de leurs concentrations en matières en suspensions correspondantes (g/l).

La station d'El Ancer dispose d'une moyenne série de mesure hauteur d'eau-débit liquide (1979- 1991). Des prélèvements quotidiens des hauteurs d'eau dont la fréquence augmente surtout en période de crue sont effectués pour l'estimation du transport solide en suspension.

La saison estivale enregistre rarement des échantillons par rapport à d'autres périodes de l'année. Les faibles apports enregistrés généralement durant la saison estivale peuvent avoir une influence sur le bilan total des apports annuels.

VII.2 DONNEES DE DEBITS INSTANTANEEES

A la station d'El Ancer, nous disposons d'une série moyenne de mesures, environ de 2030 valeur de débit liquide instantanés Q_i (m^3/s), et des concentrations des sédiments en suspension C (g/l) allant du Septembre 1979 jusqu'à Août 1990.

Les données disponibles ont été sélectionnées pour la recherche des modèles mathématiques entre le débit solide et le débit liquide $Q_s = f(Q_l)$.

VII.3 GAMME DES CONCENTRATIONS

Les moyens journaliers de transport solide se sont échelonnés de 0,05 g/l à 327,7 g/l. La moyenne est de 9,94 g/l. (tableau VII.2)

Tableau VII.2 Paramètres statistiques de la concentration et du débit liquide

Paramètres statistiques	Concentration (g/l)	Débit (m^3/s)
Nombre de Valeurs	2030	2030
Minimum	0,05	0,62
Maximum	327,70	3530,60
Moyenne	9,94	91,01
Variance	808,29	35187,25
Ecart-type	28,43	187,58
Coefficient de variation	2,86	2,06

VII.4 METHODES ET OBSERVATIONS

Les débits d'écoulement dans les oueds du bassin Kébir-Rhumel et les concentrations des sédiments ont été mesurées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) de l'Algérie d'une façon journalière (plusieurs fois dans la journée). La charge des sédiments en suspension obtenus est le produit du débit d'écoulement et de la concentration.

Des mesures ont été effectuées le long des grands cours d'eau du bassin, trois stations hydrométriques principales pour l'étude d'écoulement ont été choisies dans cette étude. (Les stations de Grarem, Tassaadane et El Ancer).

La collecte des données constitue l'étape la plus importante de la solidité de tout modèle statistique.

L'étape de la collecte des données est très fastidieuse, et très importante car la fiabilité de tout modèle est subordonnée à la qualité de l'information en notre possession.

Ainsi, la collecte des données brutes recueillies auprès des services de l'ANRH (d'Alger et Constantine) a constitué l'étape la plus délicate pour la mise en forme.

La collecte des données a consisté à établir des fichiers de :

- ✓ Débits liquides instantanés (m^3/s)
- ✓ Concentration C (g/l)
- ✓ Débits solides instantanés (Kg/s)
- ✓ Débits moyens journaliers (m^3/s)

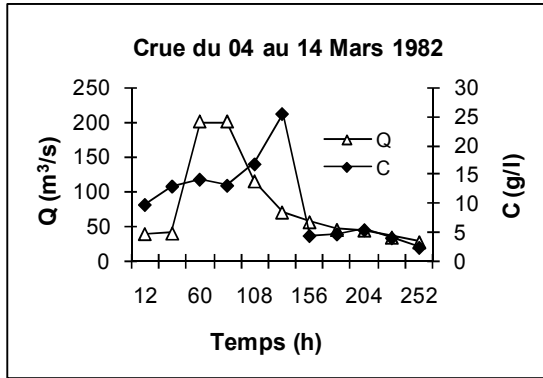
Vue le manque des données nécessaires au niveau des stations hydrométriques du bassin, Les observations des débits d'écoulement de trois stations hydrométriques (Grarem, Tassaadane et El Ancer) dans le bassin ont été pris en considération et seulement la station d'El Ancer qui a été choisie pour l'étude de transport solide vu les lacunes importantes constatées au niveau des autres stations.

VII.5 ETUDE DES CRUES

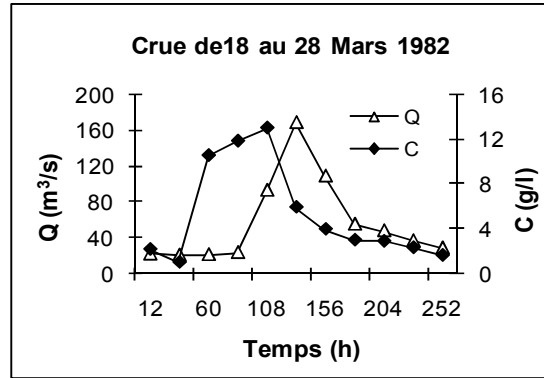
Plusieurs crues dans cette étude ont été analysées dans la station d'El Ancer où les données sont disponibles. Les données des crues dans cette station montrent que des pics de concentration dans la majorité de crues sont retardés d'une moyenne de 14 heures avant la pointe des débits d'écoulement (en particulier les mois de Mars, Janvier et Décembre) (figures VII.2 (a, d, f et h). Ce retard a été mentionné aussi dans les travaux de (Dicenzo et Luk, 1997).

Il faut montrer que l'entraînement et le transport limité des sédiments précédemment déposés dans les lits larges et peu profonds (cas des oueds algérien), et les caractéristiques des sédiments récents au niveau des lits et des rives des oueds n'arrive pas au bien moment à la station de jaugeage (station hydrométrique) même jusqu'à ce que l'écoulement atteint une pointe.

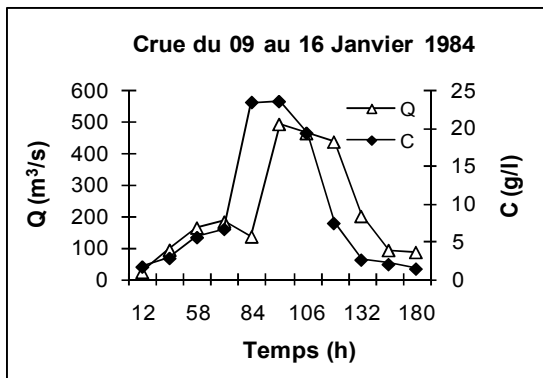
Certains cas des figures présentent le contraire (figures VII.2 (c, e, i et j), le cas où les concentrations sont en avance par rapport aux débits de pointe lors d'une crue. Cette constatation a été aussi observée dans les ruisseaux du bassin expérimental de Shenchong en Chine (Dicenzo et Luk, 1997).



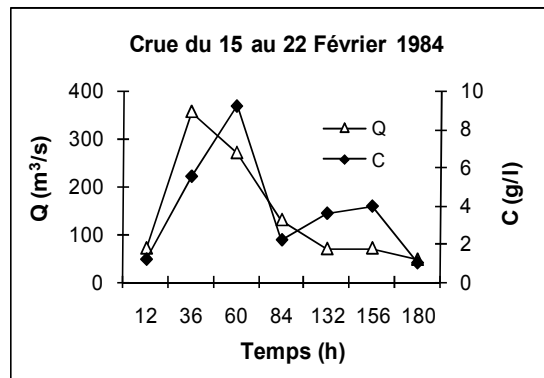
a)



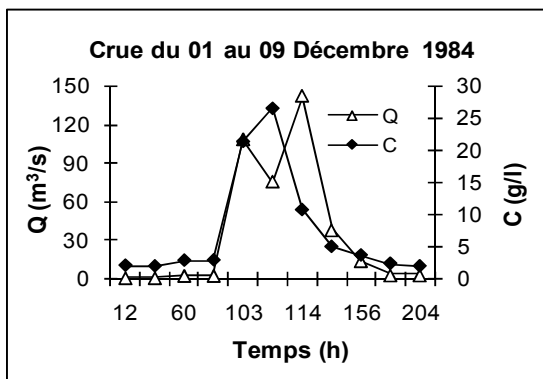
b)



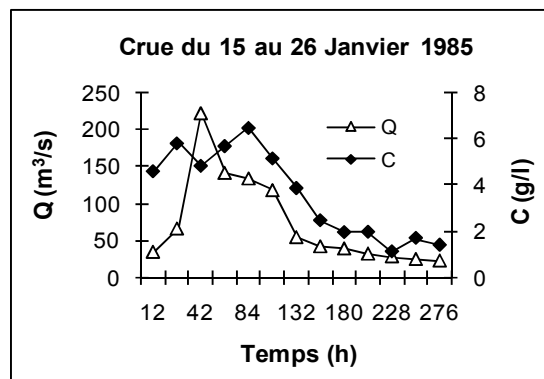
c)



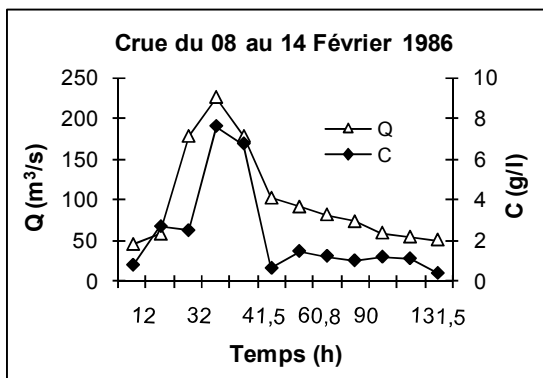
d)



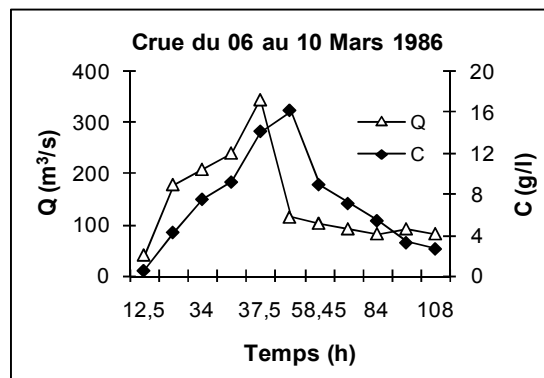
e)



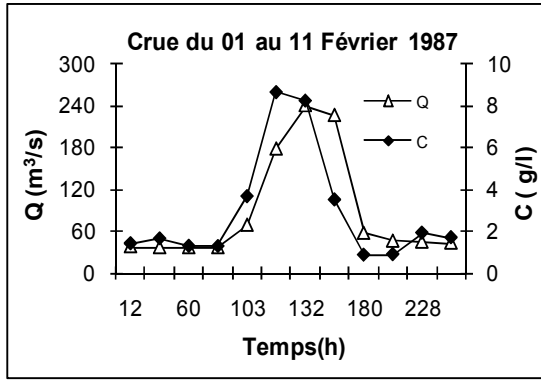
f)



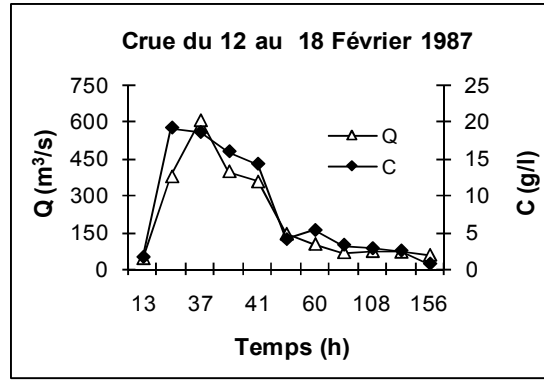
g)



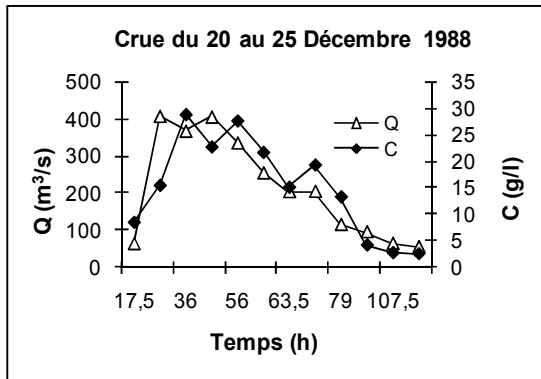
h)



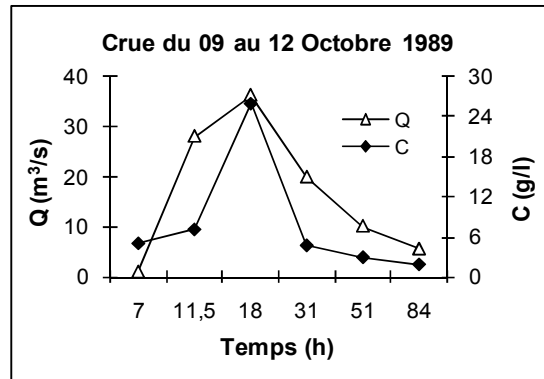
i)



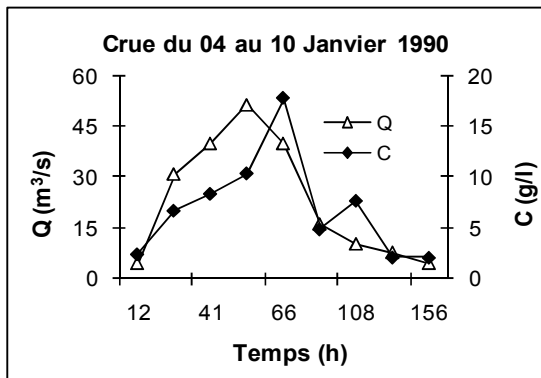
j)



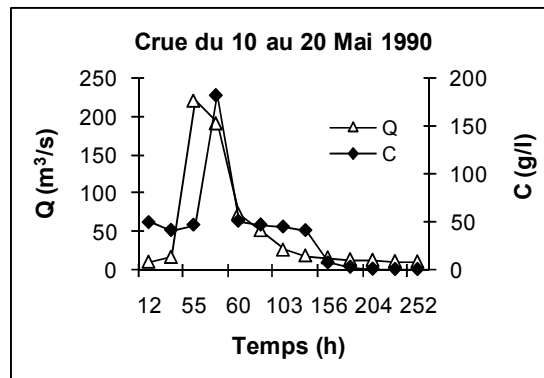
k)



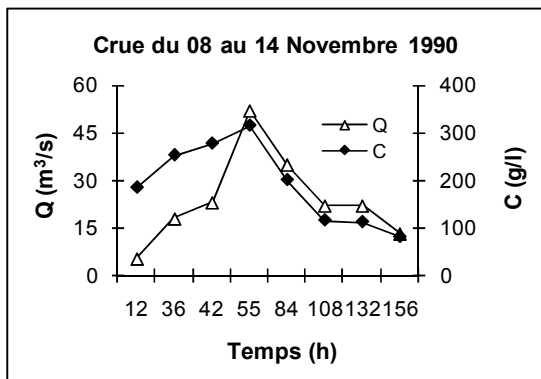
l)



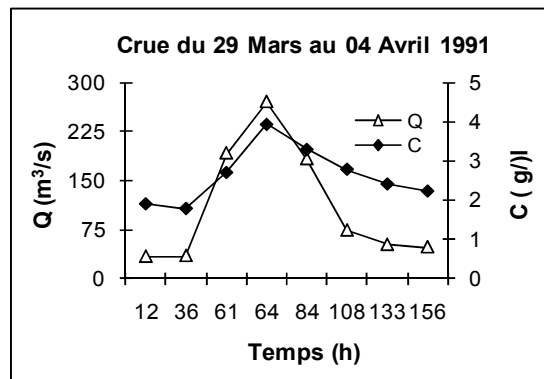
m)



n)



o)



p)

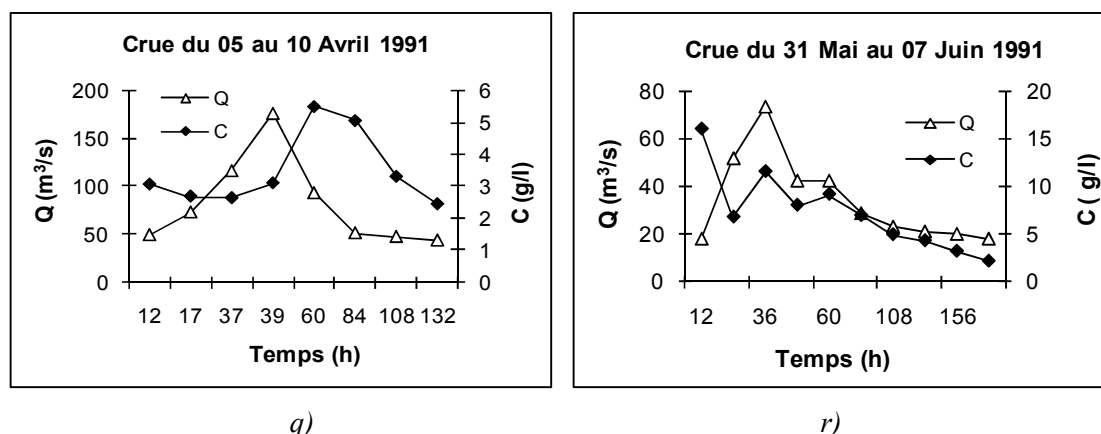


Figure VII.2 Relation entre la concentration des sédiments et le débit d'écoulement durant les crues (période : 1982-1991 ; Station El Ancer)

La représentation de l'ensemble des données a été présentée séparément de la montée et la décrue des hydrogrammes de crues. Les résultats observés montrent l'excellente tendance exponentielle entre les débits liquides (Q_l) et les débits solides (Q_s) au niveau de 35 crues étudiées. (Voir figures, VII.3 et VII.4). Le coefficient de corrélation atteint le 0,84 pour la montée des hydrogrammes de crues étudiées et le 0,79 pour la décrue.

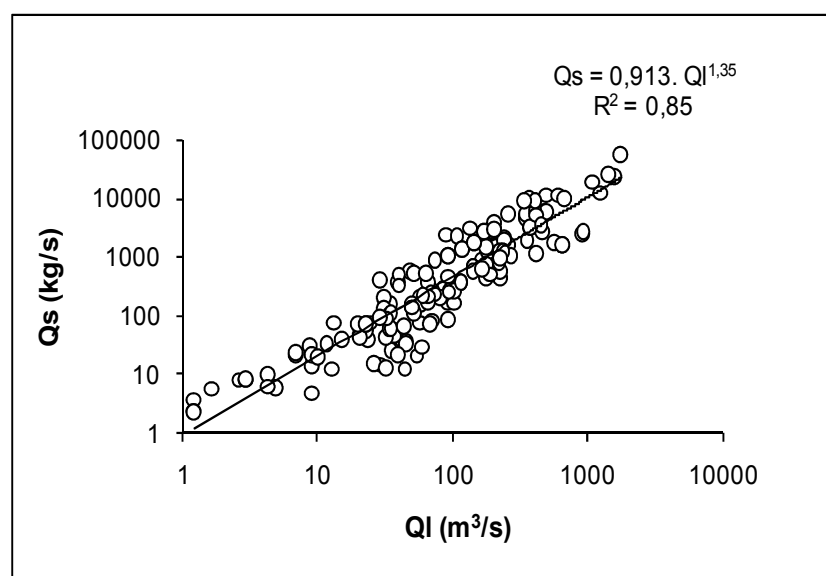


Figure VII.3 Représentation graphique des débits solides et débits liquides pour 35 crues durant la période 1982-1991 (a : la montée de l'hydrogramme)

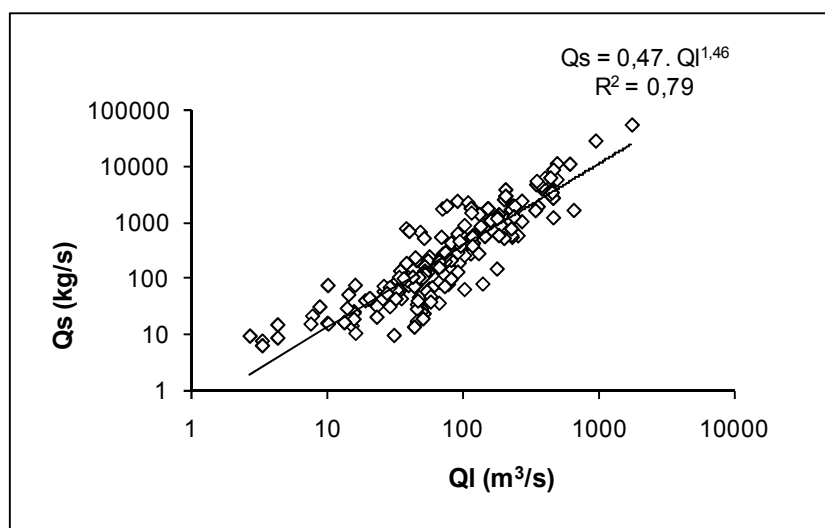


Figure VII.4 Représentation graphique des débits solides et débits liquides pour 35 crues durant la période 1982-1991 (b : la décrue de l'hydrogramme)

VII.6 TRANSPORT DE SEDIMENTS DANS LE BASSIN

VII.6.1 Mise en forme des données

Dans le but de l'homogénéisation des données, nous avons recherché des modèles régressifs entre deux paramètres de mesure : le débit liquide et le débit solide. A cet effet les données sont mises en graphe et leurs allures orientent le choix du modèle régressif.

Les variations de débit et de sédiment ont été présentées par différentes façons, en fonction de la variation brute pour chaque heure pour aider à comprendre les variations du flux de l'eau et de sédiment et de leurs impacts sur la morphologie fluviale dans le bassin Kébir-Rhumel. Des données moyennes mensuelles et annuelles ont été aussi calculées pour les différents mois et années en représentant, en particulier, les saisons sèches et humides.

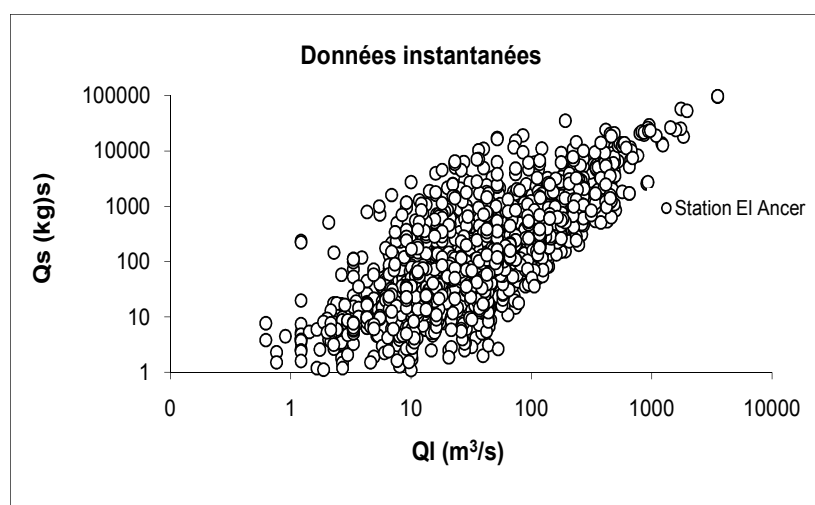


Figure VII.5 présentation des données instantanées (débit liquide/débit solide : Station El Ancer)

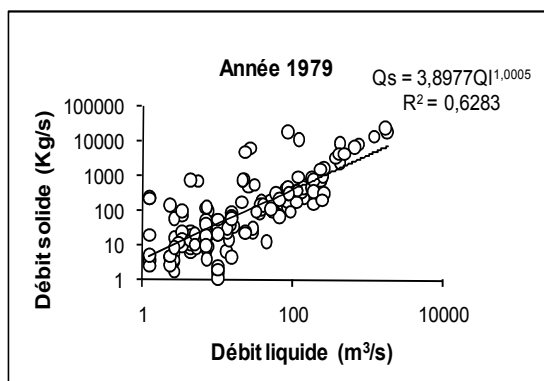
VII.6.2 Variation annuelle de la charge sédimentaire

A l'échelle annuelle, les couples de débit liquide–débit solide pour la station hydrométrique d'El Ancer ont été présentés pour chaque année observée, en cherchant la relation fonctionnelle adéquate ($Q_s = f(Q_l)$). Le tableau présenté ci-dessous montre les résultats de la représentation graphique des couples.

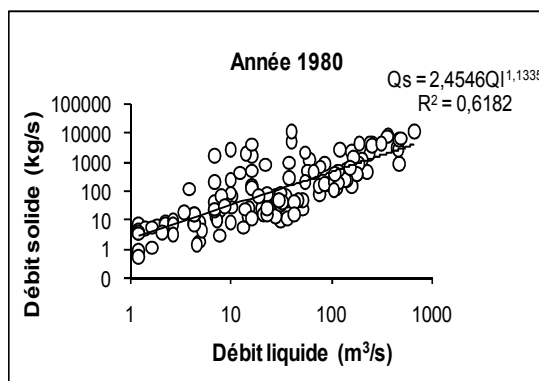
Tableau VII.3 Modèles retenus et leurs coefficients de corrélation calculés à l'échelle annuelle pour la station El Ancer

Echelle Temporelle	Type de modèle	Modèles retenus	Coefficient de corrélation (R^2)
1979	Puissance	$Q_s = 3,8977Q_l^{1,0005}$	0,63
1980	Puissance	$Q_s = 2,4546Q_l^{1,1335}$	0,62
1981	Puissance	$Q_s = 2,103Q_l^{1,0108}$	0,46
1982	Puissance	$Q_s = 3,6383Q_l^{1,0553}$	0,52
1983	Linéaire	$Q_s = 7,1062Q_l$	0,61
1984	Linéaire	$Q_s = 24,357Q_l$	0,93
1985	Puissance	$Q_s = 0,4662Q_l^{1,4931}$	0,87
1986	Linéaire	$Q_s = 8,8145Q_l$	0,41
1987	Linéaire	$Q_s = 10,304Q_l$	0,63
1988	Puissance	$Q_s = 0,1398Q_l^{1,6122}$	0,46
1989	Puissance	$Q_s = 2,1998Q_l^{1,0751}$	0,51
1990	Puissance	$Q_s = 4,2808Q_l^{1,1869}$	0,55
1991	Polynomiale	$Q_s = 0,009Q_l^2 + 2,42Q_l$	0,34

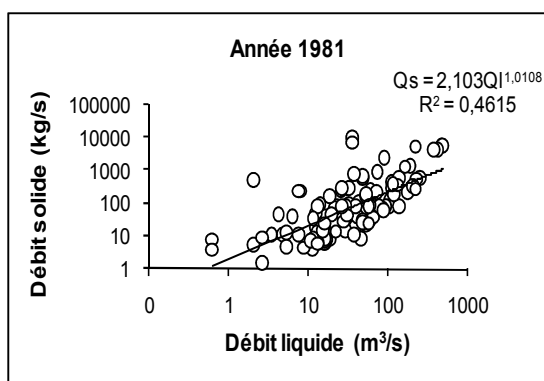
Les représentations graphiques des relations obtenues entre le débit liquide et le débit solide à l'échelle annuelle à la station hydrométrique El-Ancer sont montrées ci-dessous.



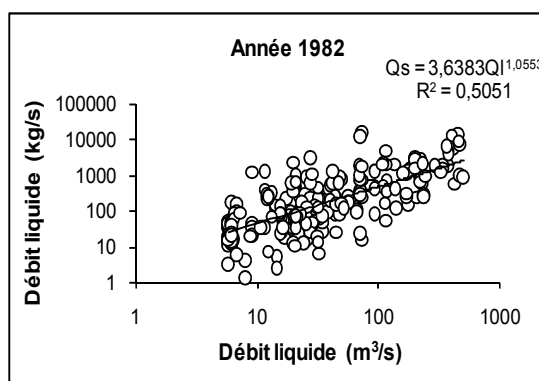
a)



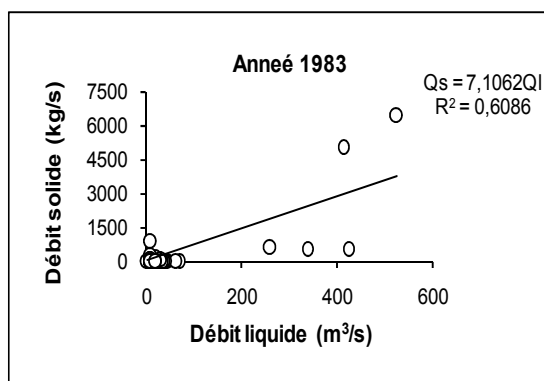
b)



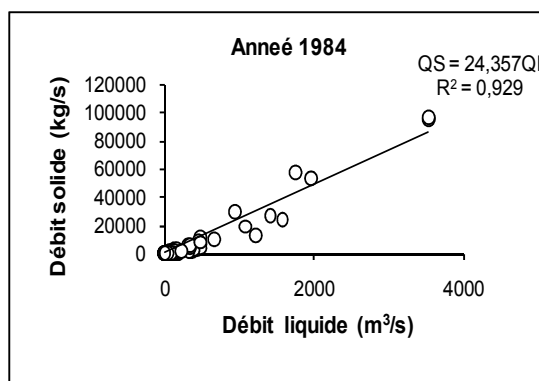
c)



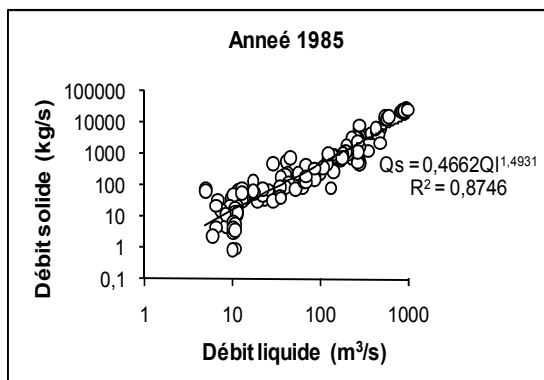
d)



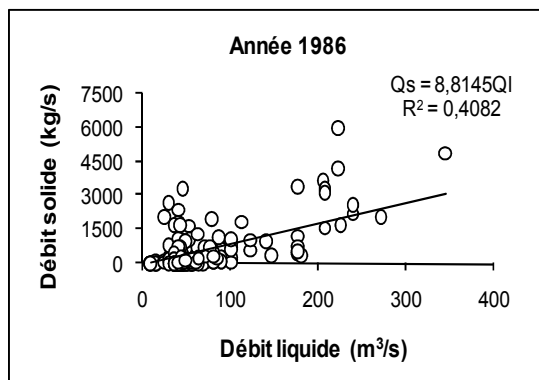
e)



f)



g)



h)

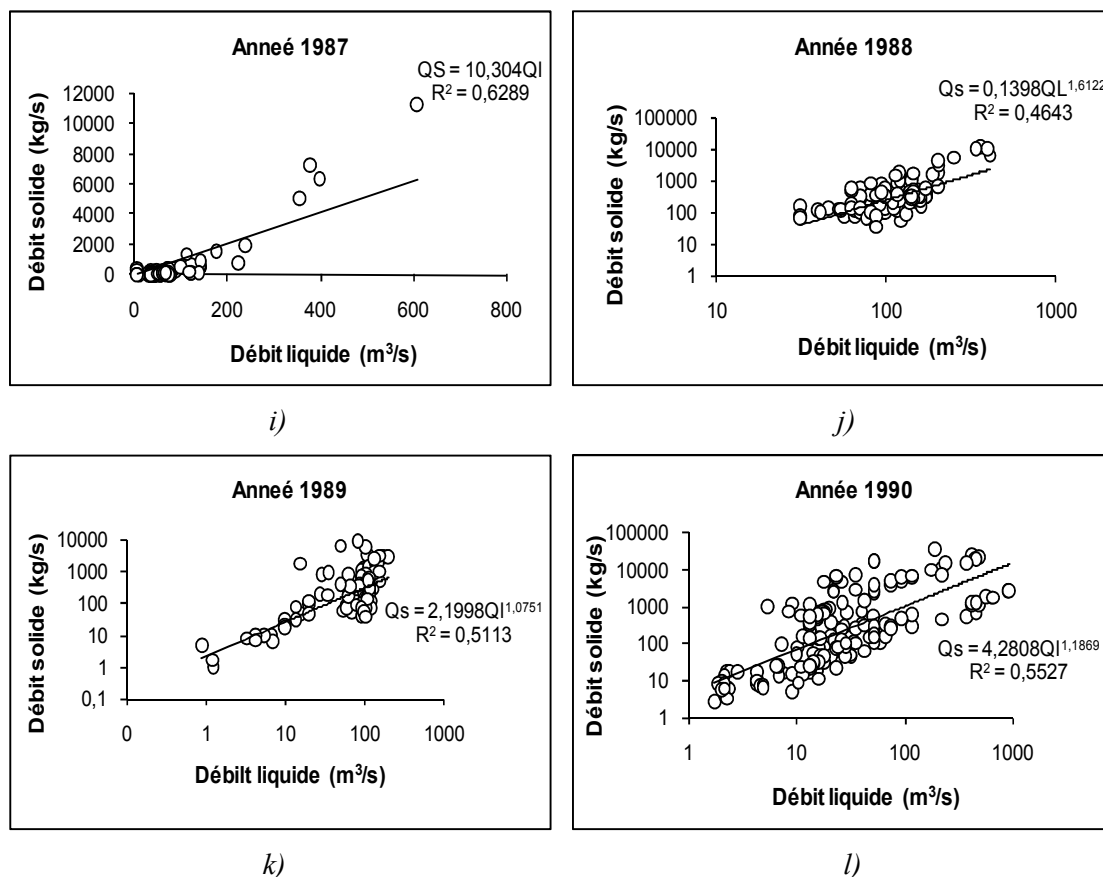
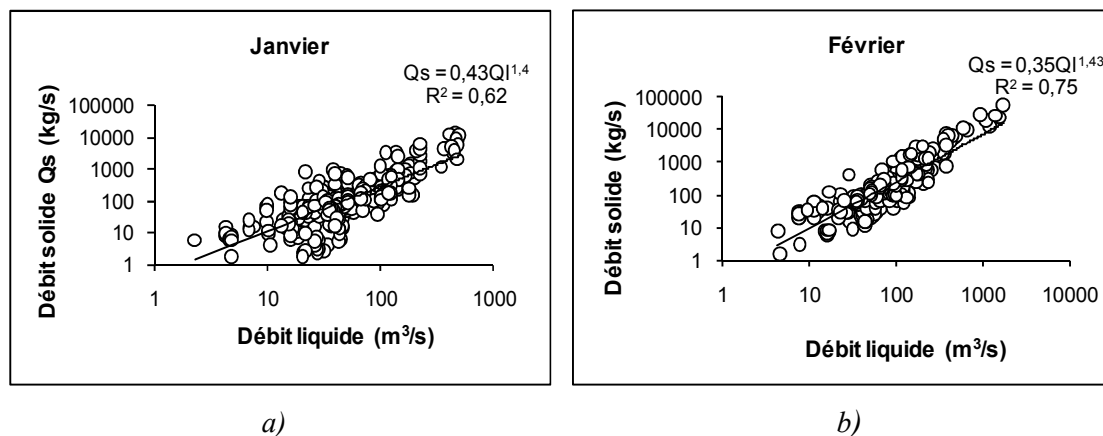


Figure VII.6 Variation annuelle entre les débits liquides et les débits solides (Station El Ancer)

VII.6.3 Variation mensuelle de la charge sédimentaire

Les données sont traitées par mois. Les corrélations obtenues à l'échelle mensuelle sont bonnes, cela démontre que la variation du transport à l'échelle mensuelle est moins importante par rapport à l'année. La figure VII.7 présentée ci-dessous, montre les relations des paramètres débit liquide et débit solide instantanés à la station d'El Ancer.



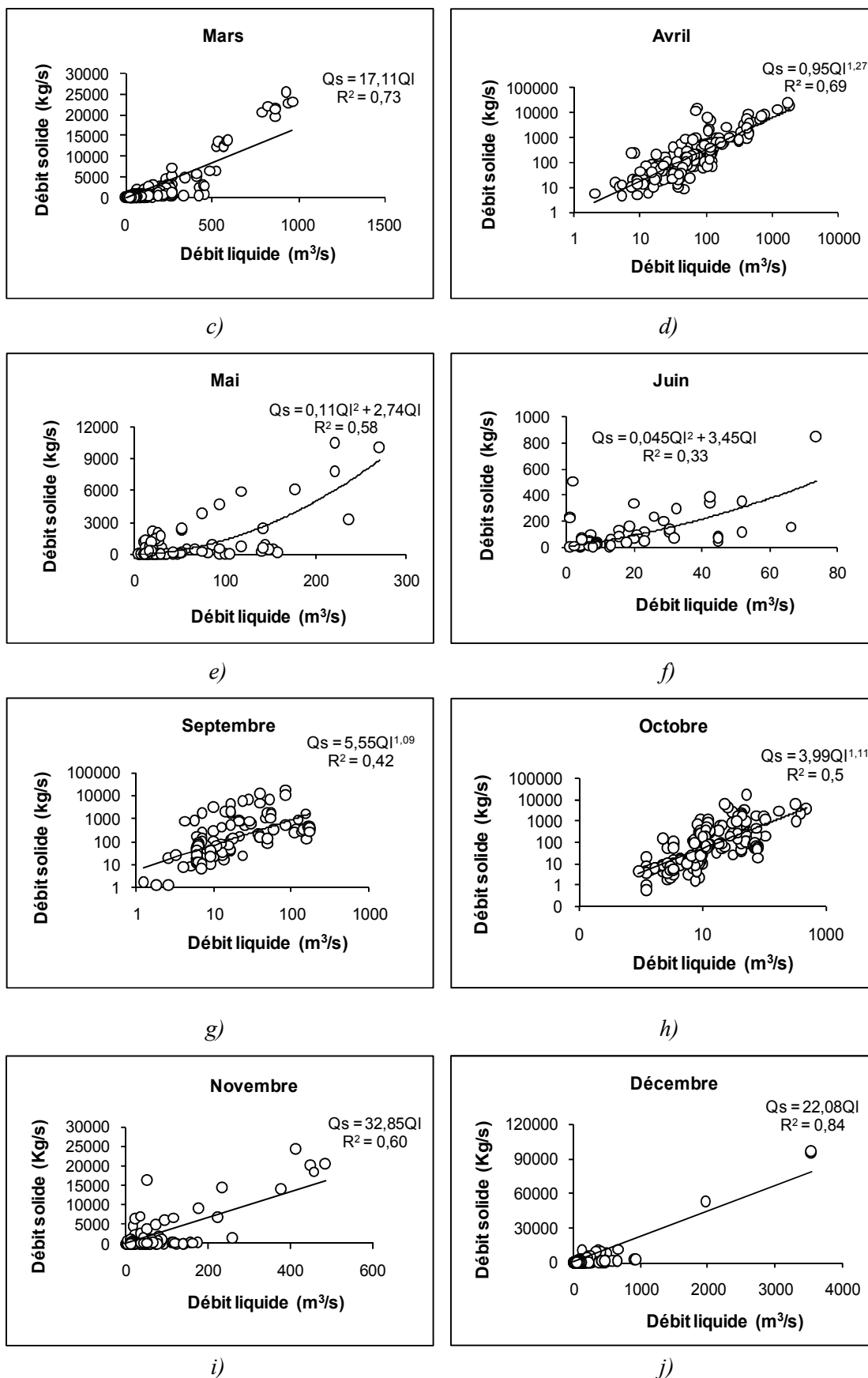


Figure VII.7 Relation entre les débits solides et liquides à l'échelle mensuelle (Station El Ancer)

Les résultats de la représentation graphique des couples débit liquide – débit solide à l'échelle mensuelle de la station El Ancer sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau VII.4 Modèles retenus et leurs coefficients de corrélation calculés à l'échelle mensuelle pour la station El Ancer

Echelle Temporelle	Type de modèle	Modèles retenus	Coefficient de corrélation (R^2)
Septembre	Puissance	$Q_s = 5,552Q_l^{1,0899}$	0,42
Octobre	Puissance	$Q_s = 3,9878Q_l^{1,1075}$	0,50
Novembre	Linéaire	$Q_s = 32,851Q_l$	0,60
Décembre	Linéaire	$Q_s = 22,077Q_l$	0,84
Janvier	Puissance	$Q_s = 0,4333Q_l^{1,4009}$	0,63
Février	Puissance	$Q_s = 0,3451Q_l^{1,4294}$	0,75
Mars	Linéaire	$Q_s = 17,109Q_l$	0,73
Avril	Puissance	$Q_s = 0,9527Q_l^{1,2673}$	0,69
Mai	Polynomiale	$Q_s = 0,1112Q_l^2 + 2,7369Q_l$	0,58
Juin	Puissance	$Q_s = 0,045Q_l^2 + 3,4524Q_l$	0,33
Juillet	Puissance	$Q_s = 2E-28Q_l^{34,602}$	0,98
Août	/	/	/

La variation annuelle et mensuelle de débit liquide – débit solide au droit de la station d'El Ancer à l'aval du bassin de Kébir-Rhumel ont été montrés dans les figures (VII.6 et VII.7). Les relations reliant le débit liquide (Ql) et le débit solide (Qs) montrent la corrélation moyenne à l'échelle annuelle et même mensuelle.

Les coefficients de corrélation à l'échelle annuelle varient entre (0,64 et 0,96) par contre à l'échelle mensuelle, seulement les mois de Décembre, Janvier, Mars et Avril présentent de bonnes corrélations comprises entre (0,79 et 0,92).

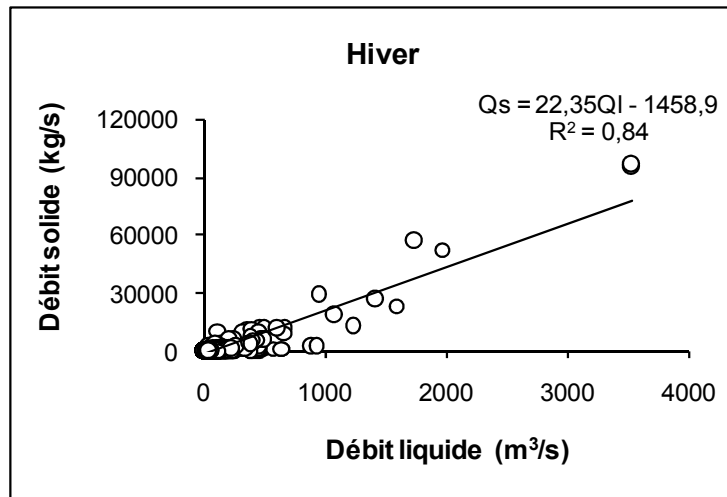
Il faut noter que les faibles corrélations montrées entre le débit liquide et le débit solide pendant la saison d'inondation peuvent résulter de la pente brusquement faible et les vitesses faibles dans certains tronçons du cours d'eau, ce qui ne permet pas de transporter les sédiments en suspension en aval (au niveau de la station d'El Ancer).

VII.6.4 Variation saisonnière

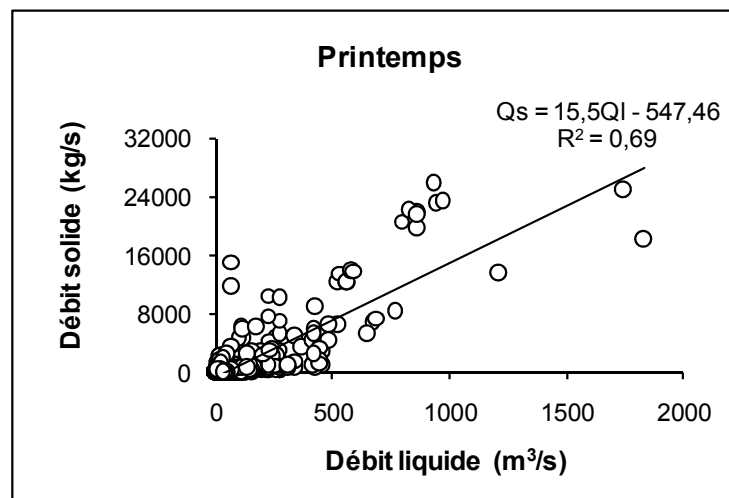
La variation saisonnière a été présentée dans la figure ci-dessous. Dans la saison humide le débit d'écoulement atteint une valeur maximale qui dépasse les 3,5 m³/s en Hiver (correspond à débit solide de 96,45 Kg/s). En Printemps le débit atteint un pic de 1,8 m³/s (correspond à un débit solide de 18,14 Kg/s), dans ce cas le débit solide maximal enregistré Q_s égal à 25,7 Kg/s est correspond un débit liquide de 0,93 m³/s.

A l'Automne pour des débits inférieurs à 0,49 m³/s, beaucoup de points de mesure dépassent à la moyenne, une concentration de 200 g/l. Il faut noter qu'une forte corrélation linéaire est observé en Hiver ($R = 0,92$).

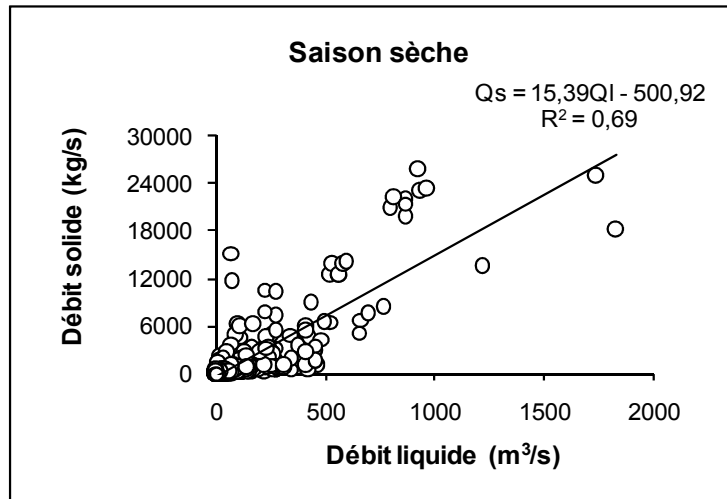
Différents travaux du transport solide en Algérie (Benkaled et Remini, 2003; Terfous et al., 2001; Touaibia et Achite, 2001, Meddi, 1992 ; etc.) montrent que l'échelle saisonnière est très représentative du phénomène. D'autre part, l'évènement averse-crue s'est avéré l'unité hydrologique la plus adéquate pour les analyses en relation avec le transport solide.



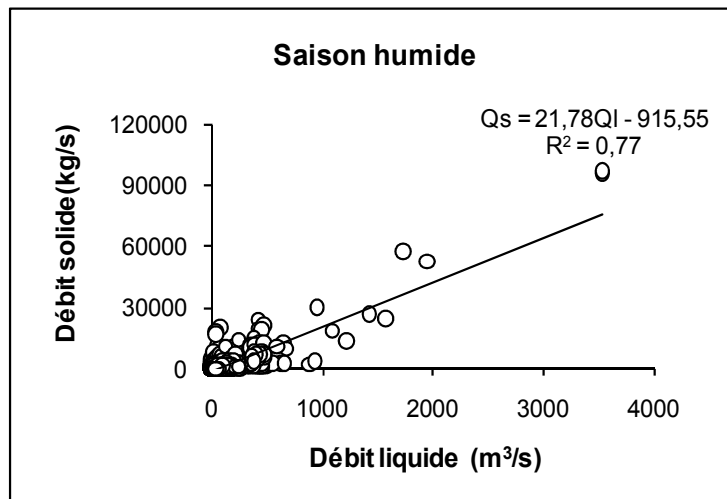
a)



b)



c)



d)

Figure VII.8 Relation saisonnière entre les débits solides et les débits liquides (Station El Ancer : a- Printemps; b- Saison sèche; c- Saison humide)

La relation entre le débit liquide et le débit solide le long de l'oued Kébir-Rhumel montre la bonne corrélation linéaire obtenue pendant la saison sèche et humide. Dans la saison sèche, les faibles débits pendant cette saison sont en accord avec les charges sédimentaires faibles. Pendant la saison d'inondation (humide), la bonne corrélation présentée dans ce cas, peut être interprétée par le fait que les grandes vitesses d'écoulement et la puissance du cours d'eau pendant les crues peuvent donc mobiliser et transporter les charges mêmes élevées de sédiments. (Figure VII.8 (a et d)).

Le tableau VII.5 présenté ci-dessous montre les résultats de la représentation graphique des couples débit liquide et débit solide à l'échelle saisonnière pour les saisons représentatives d'Hiver et du Printemps et aussi sur les deux grandes saisons sèche et humide au droit de la station d'étude.

Tableau VII.5 Modèles retenus et leurs coefficients de corrélation calculés à l'échelle saisonnière pour la station El Ancer

Echelle Temporelle	Type de modèle	Modèles retenus	Coefficient de corrélation (R^2)
Hivers	Linéaire	$Q_s = 22,346Q_l - 1458,9$	0,84
Printemps	Linéaire	$Q_s = 15,499Q_l - 547,46$	0,69
Sèche	Linéaire	$Q_s = 15,387Q_l - 500,92$	0,69
Humide	Linéaire	$Q_s = 21,781Q_l - 915,55$	0,77

Les résultats de calculs des débits annuels et les charges sédimentaires annuelles ont été également présentés dans la figure ci-après.

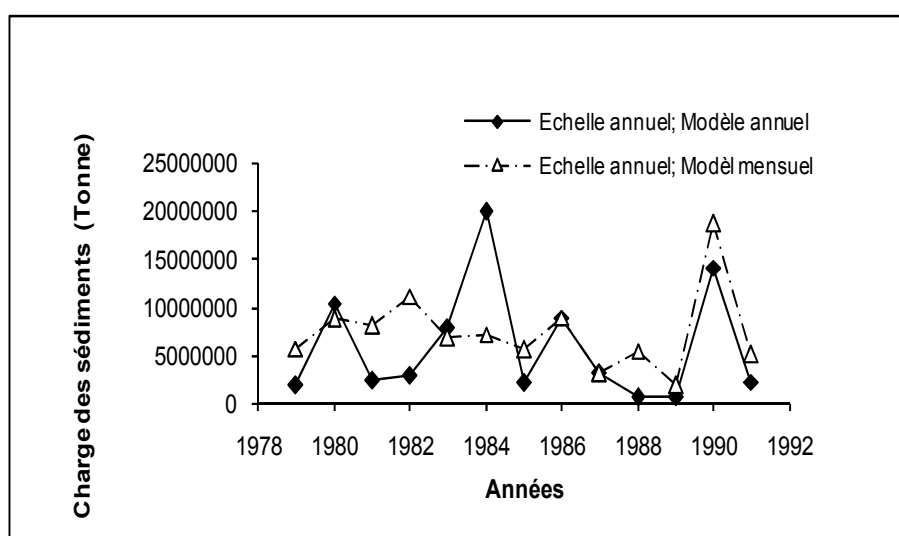


Figure VII.9 Variation de la charge sédimentaire pour différents modes de calculs (Echelle annuelle et Modèle annuel ; Echelle annuelle et Modèle mensuel)

Les variations temporelles de la charge de sédiments en suspension le long des cours d'eau du bassin montrent une tendance vis-à-vis au débit correspondant. La charge moyenne annuelle de sédiments atteinte une valeur maximale annuelle de vingt millions de tonnes (Echelle annuelle ; Mode annuel). Pour le cas du modèle mensuel, la charge moyenne annuelle estimée est d'environ 7,5 millions de tonnes. (Voir Tableau VII.6).

Tableau VII.67 Résultats de quantification du transport solide en suspension

Année	Apport solide Qs (tonnes/an)	Apport solide Qs (tonnes/an)	Apport solide Qs (tonnes/an)
Type	Tous points instantanés	Echelle annuelle; modèle annuel	Echelle annuelle ; modèle mensuel
1979	19741,02	1843973,69	5691547,16
1980	6201,96	10382148,69	8833780,29
1981	12462,60	2388047,90	8086880,16
1982	17532,55	2930060,56	11128573,92
1983	9224,49	7725425,68	6779747,99
1984	17571,68	19855612,90	7213285,12
1985	11531,84	2081985,60	5615797,79
1986	10370,34	8890630,79	8904709,22
1987	15788,63	3100836,04	3180257,04
1988	3638,97	614630,79	5425886,16
1989	7194,00	704515,06	1807835,33
1990	3165,06	14117583,96	18719962,01
1991	25896,08	2254395,31	5006635,08
Moyenne	12332,25	5914603,61	7414992,10

Les résultats illustrés dans le tableau ci-dessus relèvent que les années 1980, 1984 et 1990 offrent des volumes de sédiments en suspension d'un ordre de grandeur double à triple en tenant compte du modèle annuel comparativement aux volumes moyens annuels. Par contre au mode mensuel, les années 1982 et 1990 montrent des volumes de sédiments qui dépassent de 30 % à 300% le volume moyen de sédiments.

Ces résultats montrent la justification marquée par l'avènement des crues exceptionnelles en volume et en durée. La crue du mois d'Avril 1979 avait totalisée un volume de l'ordre de 275 Millions de m³.

VII.7 VARIATION MOYENNE MENSUELLE

Il est à noter qu'une bonne présentation entre la concentration de sédiments en suspension (Cs) et le débit liquide (Qi) est mieux appréhendée, lorsqu'en utilisant la variation moyenne mensuelle. Cette présentation permet d'avoir un degré élevé de corrélation (R ~1). Cette corrélation élevée est due à la réduction de la variance en faisant la moyenne à l'échelle mensuelle par rapport à l'échelle journalière.

Un rapport polynomial présente une très bonne corrélation ($R=0,99$) pour des concentrations inférieures à 9 g/l (figure VII.10 : a). La même observation est établie pour les concentrations supérieures à 9g/l montrent aussi la bonne corrélation avec le ($R=0,93$) figure (VII.10 : b). La diminution de la concentration moyenne est observée pour les débits moyens qui dépassent les 40 m³/s (figures VII.10 : b) et cela peut être due aux crues hivernales et printanières intenses après le lessivage des sédiments dans les cours d'eau du bassin.

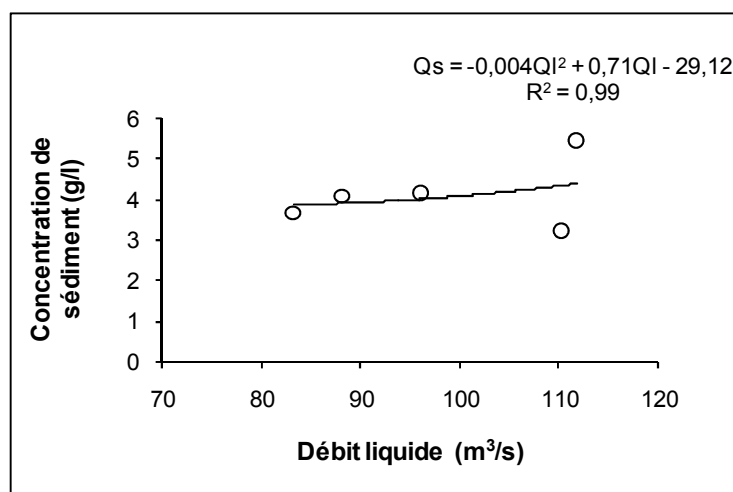


Figure (VII.10 ; a) : Variation moyenne mensuelle des concentrations de sédiments en suspension et le débit d'écoulement (a : $C < 9\text{g/l}$) ; Station El Ancer.

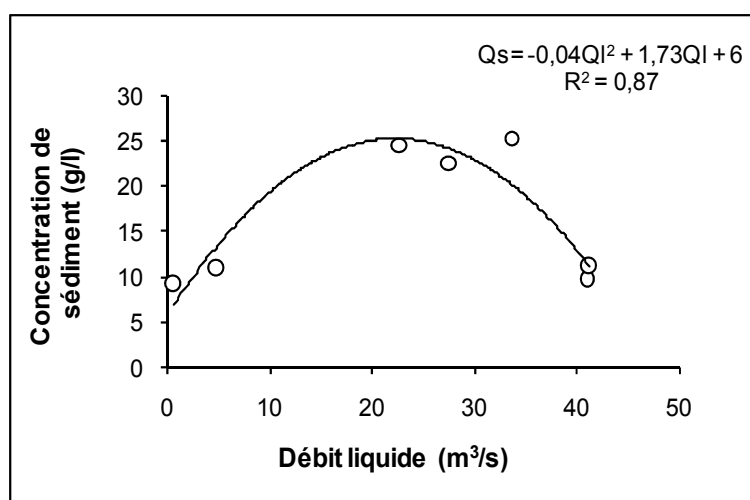


Figure (VII.10 ; b) : Variation moyenne mensuelle des concentrations de sédiments en suspension et le débit d'écoulement (b : $C > 9\text{g/l}$) ; Station El Ancer.

VII.8 L'ÉROSION SPÉCIFIQUE

VII.8.1 Calcul du taux d'érosion spécifique

Le calcul du taux d'érosion spécifique consiste à la détermination des volumes annuels de sédiments transportés par unité de surface. En prenant en considération le transport solide total annuel en suspension Q_s (en tonne/an), l'érosion spécifique moyenne sur une période de 10 ans, $E_s = Q_s/S$, où S est la surface du bassin versant, au droit de la station d'El Ancer. Les résultats de l'érosion spécifique de la série de données sont montrés dans le tableau ci-dessous.

Tableau VII.7 Résultats de l'érosion spécifique

Année	(T /Km ² .an)	(T /Km ² .an)
Type	Echelle annuelle; modèle annuel	Echelle annuelle ; modèle mensuel
1979	210,98	651,21
1980	1187,89	1010,73
1981	273,23	925,27
1982	335,25	1273,29
1983	883,92	775,71
1984	2271,81	825,32
1985	238,21	642,54
1986	1017,23	1018,85
1987	354,79	363,87
1988	70,32	620,81
1989	80,61	206,85
1990	1615,28	2141,87
1991	257,94	572,84
Moyenne	676,73	848,40

CONCLUSION

La saison estivale enregistre rarement des échantillons par rapport à d'autre période de l'année. Les faibles apports enregistrés généralement durant la période estivale peuvent avoir une influence sur le bilan total des apports annuels.

En se basant sur les mesures continues des concentrations de sédiments en suspension au droit de la station d'El Ancer. Nous disposons d'une série moyenne de mesure d'environ 2030 valeurs de débit liquide instantanés Q_i (m^3/s), et des concentrations de sédiments en suspension C (g/l) allant de Septembre 1979 jusqu'à Août 1990. Les données disponibles ont été sélectionnées pour la recherche des modèles mathématiques entre le débit solide et le débit liquide $Q_s = f(Q_l)$.

Les représentations graphiques des relations obtenues entre débit liquide et débit solide à l'échelle annuelle et mensuelle pour la station hydrométrique étudiée (El Ancer) montrent la tendance exponentielle. Les coefficients de corrélation à l'échelle annuelle varie entre (0,64 et 0,96) par contre à l'échelle mensuelle, seulement les mois de Décembre, Janvier, Mars et Avril présentent des bonnes corrélations comprises entre (0,77 et 0,92).

Différents travaux du transport solide en Algérie montrent que l'échelle saisonnière est très représentative du phénomène. D'autre part, l'évènement averse-crue s'est avéré l'unité hydrologique la plus adéquate pour les analyses en relation avec le transport solide.

La relation entre le débit liquide et le débit solide le long de l'oued Kébir-Rhumel montre la bonne corrélation linéaire obtenue pendant la saison sèche et humide. Dans la saison sèche, les faibles débits pendant cette saison sont en accord avec les charges sédimentaires faibles. Pendant la saison d'inondation (humide), la bonne corrélation présentée dans ce cas, peut être interprété, le fait que les grandes vitesses d'écoulement et la puissance de cours d'eau pendant les crues peuvent donc mobiliser et transporter les charges mêmes élevées de sédiments.

La représentation de l'ensemble des données à l'échelle de crue a été présentée séparément de la montée et la décrue des hydrogrammes des crues. Les résultats observés montrent l'excellente tendance exponentielle entre les débits liquides (Q_l) et les débits solides.

Il faut noter que les faibles corrélations montrées entre le débit liquide et le débit solide dans certains cas pendant la saison d'inondation peuvent résulter de la pente brusquement faible et les vitesses faibles dans certains tronçons du cours d'eau, ce qui ne permet pas de transporter commodément les sédiments en suspension en aval (au niveau de la station d'El Ancer).

Les données des crues dans cette station montrent que des pics de concentration dans l'ensemble des crues sont retardés d'une moyenne d'une demi-journée avant la pointe des débits d'écoulement, en particulier, en saison hivernal. Il faut noter que l'entraînement et le transport limités des sédiments précédemment déposés et les

caractéristiques des sédiments au niveau des lits et des rives des oueds du bassin d'étude n'arrive pas au bon moment à la station de jaugeage même l'écoulement atteint sa pointe.

Les variations spatiales de la charge de sédiments le long des cours d'eau du bassin montrent une tendance vis-à-vis du débit correspondant. La charge moyenne annuelle de sédiments en suspension atteinte une valeur maximale annuelle de 20 millions de tonnes (échelle annuelle ; mode annuel). Pour le cas du modèle mensuel, la charge moyenne annuelle est estimée à environ 7,5 millions de tonnes. La dégradation spécifique moyenne dans le bassin Kébir-Rhumel est de l'ordre de 850 t/km²/an.

CHAPITRE VIII

ANALYSE DE L'EFFET D'HYSTERESIS SUR LA RELATION CONCENTRATION-DEBIT

VIII.1 INTRODUCTION

La relation entre la concentration de sédiments en suspension, C , et le débit liquide, Q , d'un cours d'eau est une relation fondamentale dans le domaine du transport solide en rivière. Les types de relation $C - Q$, dans leur ensemble restent mal connus. Dans ce chapitre, on cherche à caractériser la relation $C-Q$ à travers une série d'événements chronologiques (crues). L'analyse à mener est orientée beaucoup plus vers l'aspect graphique qui donnerait la mise en graphe selon l'ordre chronologique de C et de Q . Les paramètres débit et concentration de sédiments en suspension et leurs phénomènes d'hystérésis dans le bassin de l'oued Kébir ont été recueillies afin d'examiner leurs distributions temporelles.

L'objectif est d'élaborer une classification de cette relation et d'en ressortir le modèle de boucle d'hystérésis dominant. L'analyse s'effectue principalement en deux étapes :

- a)- l'identification et le classement des principaux types de relation $C-Q$
- b)- l'analyse et la discussion de chaque type de relation.

VIII.2 DONNEES

Nous disposons d'une série de mesures d'environ 2030 valeurs de débit Q (m^3/s) et la concentration de sédiments en suspension C (g / l) à la station de jaugeage El Ancer. Ces données sont utilisées pour la quantification du transport solide dans le cours d'eau principal du bassin. La relation entre les deux paramètres (C et Q) pendant les inondations sélectionnées a été étudié de manière qualitative. Seize (16) crues réparties sur la période d'étude ont été analysées représentant des épisodes ayant différentes caractéristiques (tableau VIII.1). Cette sélection n'est pas exhaustive mais elle permet de fournir le maximum d'information sur la relation $C-Q$, en identifiant le modèle d'hystérésis dominant.

Leopold et al., (1964) Ont constaté dans leur étude sur la relation débit-concentration des sédiments dans plusieurs bassins des Etats Unis que la plus grande charge annuelle des sédiments s'est produite durant des crues modérées avec répétition fréquente.

La procédure systématique d'échantillonnage du transport solide sur la plupart des rivières algériennes est spécifiquement un simple échantillonnage (Benkhaled et Remini, 2003).

Tableau VIII.1 Chronologie des crues sélectionnées

N°	Date	Nombre d'observations
01	08-15 Septembre 1979	12
02	25-30 Juin 1981	07
03	09-16 Janvier 1984	11
04	15-22 Février 1984	07
05	01 au 09 Décembre 1984	11
06	15-26 Janvier 1985	13
07	08-14 Février 1986	12
08	06-10 Mars 1986	11
09	12-18 Février 1987	11
10	20-25 Décembre 1988	12
11	09-12 Octobre 1989	06
12	04-10 Janvier 1990	09
13	08-14 Novembre 1990	05
14	10-20 Mai 1990	13
15	29 Mar- 04 Avril 1991	08
16	31Mai-07 Juin 1991	10

La démarche d'obtention des relations C-Q est purement graphique. Elle se présente en trois étapes :

1. Les données de débit et de concentration sont mises en graphe avec en ordonnée, la concentration C en (g/l) et le débit Q en m^3/s , et en abscisse, le temps comme variable indépendant. On obtient les graphes temporels de C et Q. Pour la représentation graphique de l'hystérésis, la concentration C en (g/l) est prise en ordonnée et le débit Q en (m^3/s) en abscisse.

2. Un graphique chronologique idéal est établi, en faisant varier l'étalement.

3. Les associations idéales C-Q réalisées sont retenues et analysées.

VIII.3 IDENTIFICATION DES CLASSES DE RELATION C-Q

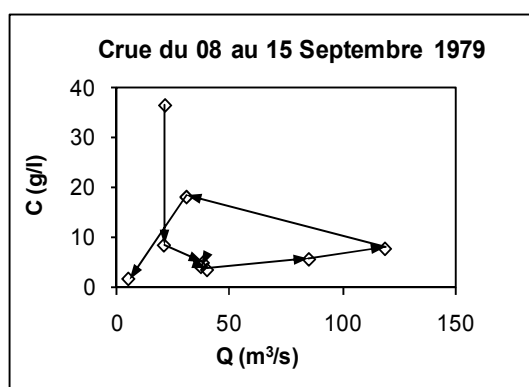
L'identification des différentes classes de relations C - Q est élaborée sur la base des résultats graphiques et statistiques des deux variables mises en relation. La figure VIII représente respectivement les graphes temporels et l'hystérésis des événements sélectionnés.

Le tableau VIII.2 représente les grandeurs statistiques des crues retenues dans cette analyse. Ces paramètres fournissent des informations très importantes pour l'identification des classes d'hystérésis.

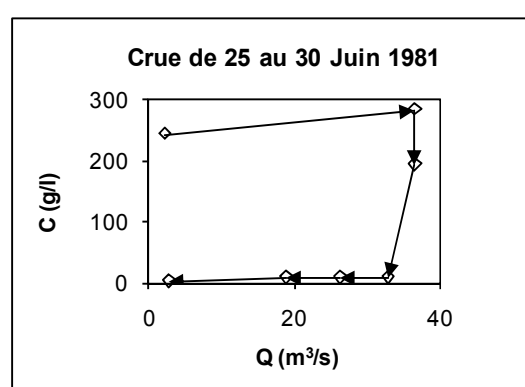
Chaque classe est caractérisée par un critère simple, objectif et mathématiquement fiable. Une fois les deux séries chronologiques sont disponibles. Ce critère est le rapport C/Q à des moments choisis lors de la montée et la décrue du graphe temporelle de la concentration de sédiments en suspension (C) et de débit (Q) (Williams, 1989). La première étape de l'analyse consiste à choisir le temps de la partie montante du graphe, la lecture correspondante des valeurs de Q et C , et le calcul du rapport, C/Q . La deuxième étape est de trouver cette même valeur de débit dans la partie de la montée du graphe- Q et l'autre sur la partie de décrue.

Ces paramètres fournissent des informations très importantes pour l'identification des classes d'hystérésis. En raison du rapport d'hystérésis entre les concentrations des sédiments (C) et les débits d'écoulement (Q), des courbes séparées d'estimation des sédiments sont souvent établies pour les parties montantes et décrues des hydrogrammes des crues.

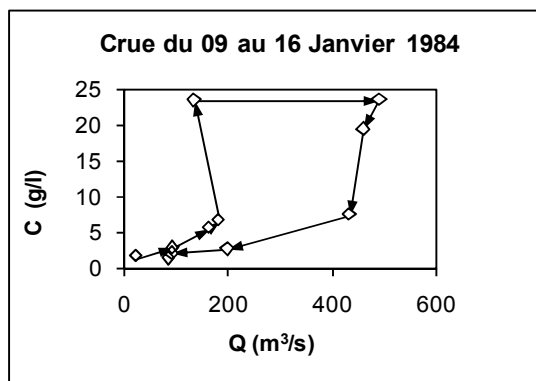
Il faut noter que la concentration de sédiments en suspension (C) augmente avec le débit d'écoulement (Q) sur la montée et la décrue de l'hydrogramme (figure VIII;1-16) mais la grande dispersion dans les données rend le rapport statistique insignifiant. Le manque des relations $C-Q$ significatives peut se relier à plusieurs facteurs. Quand le débit Q monte au niveau de la retenue du barrage de Béni- Haroun à l'aval du bassin versant Kébir-Rhumel, il reçoit probablement des sédiments des sources variables dans les oueds et les petits cours d'eau. L'entrée élevée des sédiments des oueds augmente le stockage temporaire dans les petits cours d'eau, ce qui augmente l'effet de lessivage en orages suivants. Ce phénomène a été mentionné dans les travaux de Dicenzo et Luk en 1997.



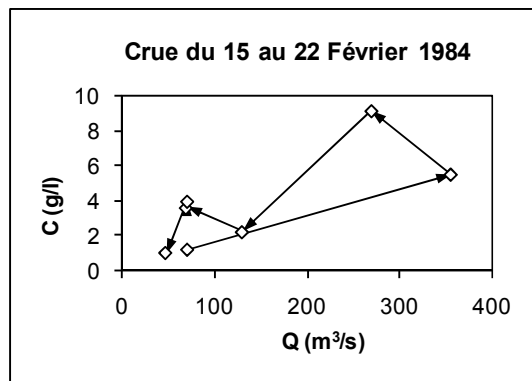
01)



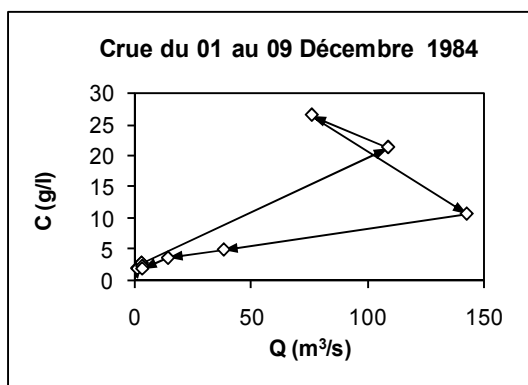
02)



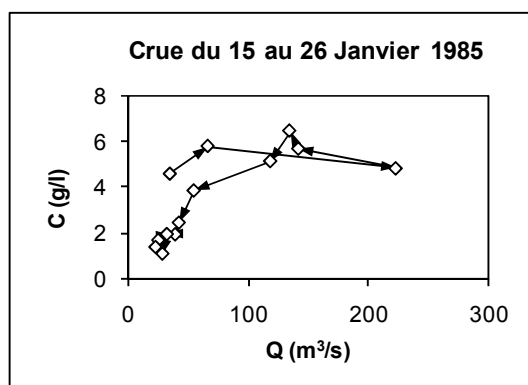
3)



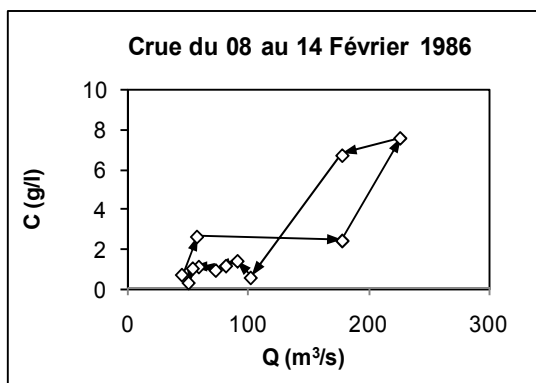
04)



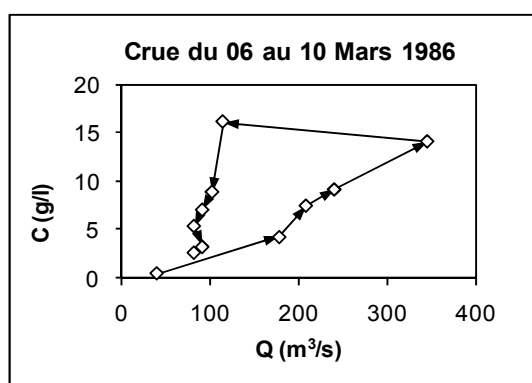
05)



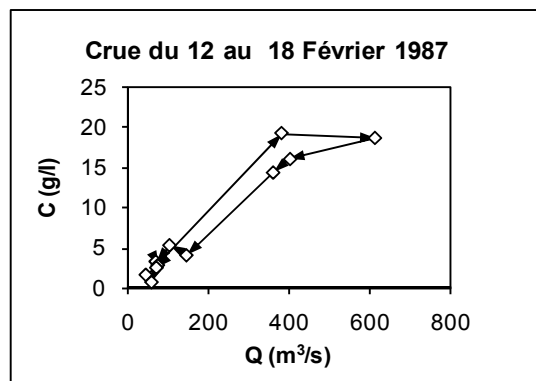
06)



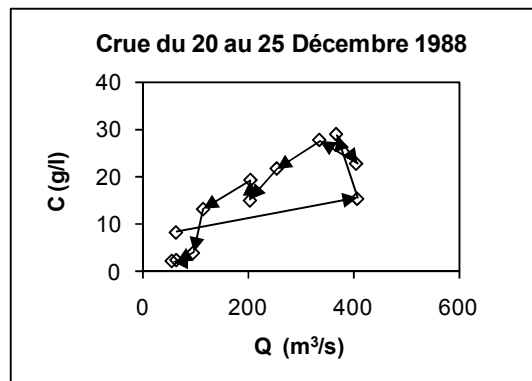
07)



08)



09)



10)

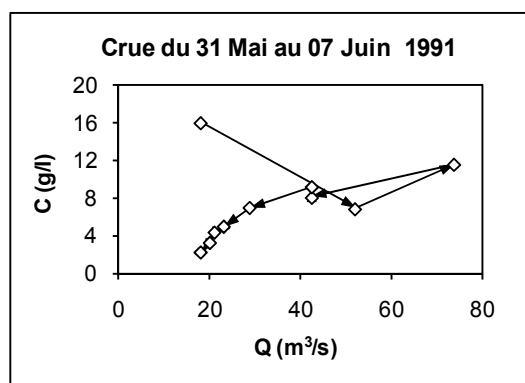
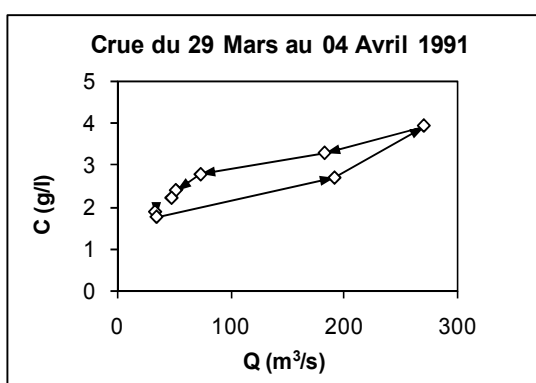
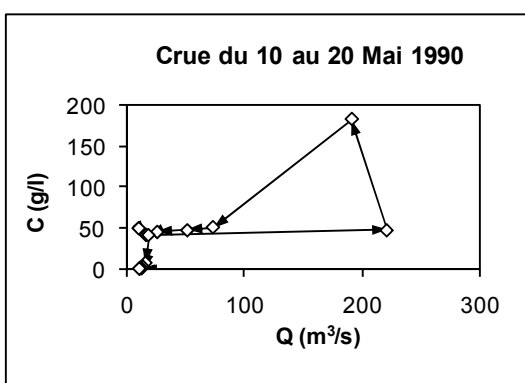
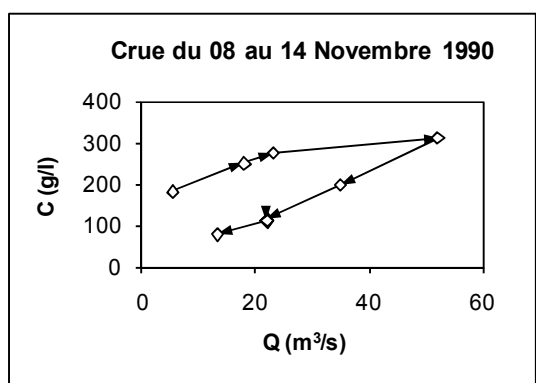
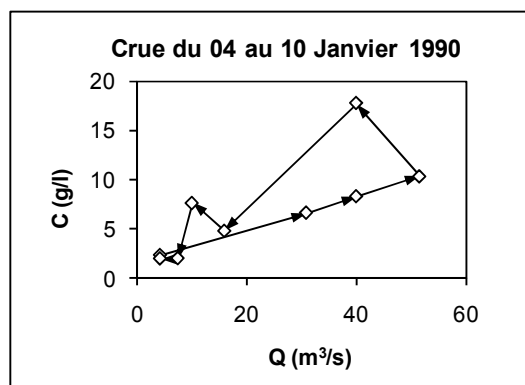
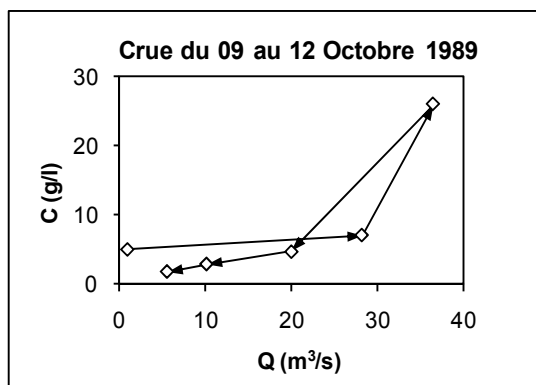


Figure VIII ; 1-16: Courbes d'hystérésis entre les concentrations des sédiments et les débits d'écoulement sélectionnées durant les crues 1979-1991 (Station El Ancer)

Tableau VIII.2 Paramètres statistiques des crues sélectionnées.

Crues	Variables	Ecart-type	Moyenne	Coefficient Variation	Aplatissement	Asymétrie
01 08-15 Sep 79	Q	35,63	36,88	0,97	1,91	1,48
	C	10,20	9,01	1,13	5,89	2,37
02 25-30 Juin 81	Q	14,86	22,16	0,67	-1,56	-0,61
	C	127,59	107,58	1,19	-2,24	0,53
03 09-16 jan 84	Q	166,68	215,25	0,77	-0,87	0,87
	C	8,95	8,55	1,05	-0,67	1,10
04 15-22 Fév 84	Q	120,04	144,86	0,83	-0,004	1,23
	C	2,87	3,81	0,75	1,26	1,16
05 01-09 Déc 84	Q	50,27	35,78	1,40	0,58	1,36
	C	8,65	7,41	1,17	1,65	1,69
06 15-26 jan 85	Q	65,96	78,62	0,84	1,40	1,21
	C	1,92	3,33	0,58	-1,74	0,44
07 08-14 Fév 86	Q	60,85	104,59	0,58	0,15	1,11
	C	2,47	2,42	1,02	1,91	1,63
08 06-10 Mars 86	Q	90,47	142,88	0,63	1,14	1,25
	C	4,75	7,19	0,66	-0,09	0,67
09 12-18 Fév 87	Q	192,78	209,51	0,92	-0,08	1,05
	C	7,32	8,00	0,92	-1,59	0,67
10 20-25 Déc 88	Q	137,93	214,57	0,64	-1,64	0,25
	C	9,30	15,09	0,62	-1,23	-0,04
11 09-12 Oct 89	Q	13,75	16,81	0,82	-1,46	0,36
	C	9,08	7,87	1,15	5,17	2,23
12 04-10 Janv 90	Q	18,05	22,73	0,79	-1,60	0,44
	C	5,05	6,94	0,73	1,86	1,25
13 08-14 Nov 90	Q	14,19	23,87	0,59	1,62	1,06
	C	85,21	192,06	0,44	-1,50	0,10

14 10-20 Mai 90	Q	71,07	52,22	1,36	2,59	1,94
	C	47,98	40,46	1,19	7,05	2,35
15 29 Mar 04 Avr 91	Q	90,61	110,88	0,82	-0,79	0,90
	C	0,73	2,62	0,28	0,10	0,74
16 31 mai-07 Jin 91	Q	18,48	33,98	0,54	0,98	1,23
	C	4,18	7,30	0,57	0,86	0,95

Le coefficient de variation maximal atteint 1,31 pour la concentration de sédiments en suspension et 1,40 pour le paramètre débit, on a remarqué que la majorité des paramètres concernant certaines crues présente une asymétrie à droite varie de 0,1 à 2,37 pour les concentrations et 0,25 à 1,94 pour les débits d'écoulement. Les coefficients d'aplatissement sont positifs dans certaines crues et négatifs dans d'autres. D'autres crues présentent des coefficients d'aplatissement importants pour le paramètre concentration (crues, 01, 11 et 14).

VIII.4 CARACTERISTIQUES DES BOUCLES D'HYSTERESIS

Le tracé des seize (16) graphes temporels de la concentration et du débit permet de constater les caractéristiques types de chaque crue. La procédure de classement des crues sélectionnées est effectuée de la manière suivante :

- a)- regrouper les mêmes orientations et la même forme ;
- b)- séparer les boucles d'une même classe ayant différentes formes en analysant les critères mentionnés dans la bibliographie.

Les caractéristiques des crues classées sont présentées dans le tableau VIII.3

VIII.5 INTERPRETATIONS

Les résultats des tableaux VIII.2 et VIII.3 confirment bien que le rapport C/Q est le critère fondamental dans l'identification des boucles d'hystérésis (Benkaled et Remini, 2003 et Williams, 1989). Les autres paramètres (coefficients d'aplatissement et d'asymétrie) n'apportent que des détails concernant la largeur et l'orientation de la boucle.

Tableau VIII.3 Classement et caractéristiques des crues sélectionnées.

Classes	Sous-classes	Crues	Caractéristiques	Formes et caractéristiques de la boucle
I	1	9,3	C/Q (montée) > C/Q (décrue) Cmax avant Qmax $C_s > 0$, $A_p < 0$ pour C et Q	Sens des aiguilles d'une montre La largeur de la boucle est remarquable pour la crue 3 La boucle est moins large pour la crue 9
	2	2, 13	C/Q (montée) > C/Q (décrue) Cmax avec Qmax C_s et A_p varie pour C et Q	Sens des aiguilles d'une montre La largeur de la boucle est remarquable pour la crue 02
II	1	15	C/Q (montée) < C/Q (décrue) Cmax avec Qmax $C_s > 0$, A_p varie pour C et Q	Sens contraire des aiguilles d'une montre La boucle est très étroite (rétrécie) et la montée est fortement linéaire
	2	4,8, 10,12,14	C/Q (montée) < C/Q (décrue) Cmax après Qmax $C_s > 0$, C_f varie pour C et Q	Sens contraire des aiguilles d'une montre La boucle est très étroite (rétrécie) et la montée est fortement linéaire
III	1	1,5, 16	C/Q (montée) < C/Q (décrue) pour une gamme des valeurs de Q C/Q (montée) > C/Q (décrue) pour d'autre gamme des valeurs de Q Cmax avant Qmax $C_s > 0$, $A_p > 0$ pour C et Q	Boucle sous forme de huit et entièrement complète pour la boucle 5
	2	6	C/Q (montée) < C/Q (décrue) pour une gamme des valeurs de Q C/Q (montée) > C/Q (décrue) pour d'autre gamme des valeurs de Q Cmax après Qmax $C_s > 0$, A_p varie pour C et Q	Boucle rétrécie sous forme de huit incomplète
	3	8, 11	C/Q (montée) < C/Q (décrue) pour une gamme des valeurs de Q C/Q (montée) > C/Q (décrue) pour d'autre gamme des valeurs de Q Cmax avec Qmax $C_s > 0$, A_p varie pour C et Q	Boucle rétrécie sous forme de huit incomplète pour la crue 11 et entièrement complète pour la crue 8

La majorité des graphes temporels (figures VIII ; 1-16) analysés entre le débit (Q) et la concentration de sédiments en suspension (C) montrent des boucles d'hystérésis dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (figures VIII ; 4, 8, 10, 12, 14, et 15). Une boucle de cette forme indique la prédominance des sources des sédiments dans les versants par rapport à la vallée du bassin. Les caractéristiques géologiques et climatiques, en particulier, au centre du bassin Kébir-Rhumel favorise le transport des sédiments dans le lit, les rives et la vallée du bassin. Les résultats obtenus en 1997 par DiCenzo et Luk sur le bassin expérimental de Shenchong en Chine montrent le cas opposé, la prédominance des sources des sédiments est dans la vallée par rapport au versant du bassin.

Dans d'autres cas, dans les saisons d'Eté et d'Automne (figures VIII; 2 et 13) où l'intensité pluviométrique est importante, on peut observer des boucles d'hystérésis dans le sens des aiguilles d'une montre où les sédiments présentent des concentrations très élevées. Dans ce cas, la plus grande contribution des sédiments proviennent de la vallée du bassin, en raison des conditions climatiques (température élevée pendant la saison d'Eté et les premières gouttes de fortes pluies. Nous avons également observé différentes boucles d'hystérésis sous forme de huit qui présentent différents pics de concentration de sédiments en suspension (crues 5, 6 et 16). Les pics multiples de concentration des sédiments indiquent les différentes sources de sédiments et leurs délais d'arrivage (Piest et Spomer, 1968; Rapp et al, 1972). Une boucle de cette forme implique l'abondance des sources de sédiments dans les versants des collines par rapport aux vallées du bassin.

La majorité des crues analysées présente des pics des débits alors que la concentration maximale en sédiments n'est pas obtenue. Un temps de retard d'environ une demi-journée est observé dans plusieurs crues analysées (Crues 4, 8, 12 et 14). Ce retard a été mentionné également dans les travaux de DiCenzo et Luk (1997). L'étude de Piest et al., (1975) présente le cas contraire, la prédominance du transport des sédiments est dans la vallée du bassin. Il est montré que, parfois, l'extraction limitée du transport des sédiments déposés précédemment et les caractéristiques des sédiments récents dans des lits larges et peu profonds comme également le cas des oueds algériens, le transport des sédiments n'arrive pas en même temps à la station de jaugeage même lorsque le débit d'écoulement est en maximum.

VIII.5.1 Analyse de l'hystérésis

Trois principales classes d'hystérésis sont analysées et comparées qualitativement.

Classe I (Boucle sens des aiguilles d'une montre).

Dans cette classe, l'observation montre que la concentration maximale des sédiments (C_{max}) est obtenue toujours avant le débit d'écoulement maximal (Q_{max}). Cette remarque a été mentionnée par Colby (1956) est conforme à l'idée que les particules lâches de sol au début d'une averse sont érodées directement par le premier ruissellement en quantités appréciables. Cette situation peut être aussi obtenue

lorsqu'il ya une réduction des matériaux en suspension juste avant l'obtention du débit maximum (Arnbord et al., 1967 ; Wood, 1977 ; Benkhaled et Remini, 2003) ou une limitation d'approvisionnement des matériaux (Moog et Whiting, 1998). De plus elle est considérée comme une caractéristique commune aux petits bassins (Emmett, 1970 ; Walling, 1974). Les boucles dans ce sens, dans certains cas, ont la tendance à être plus fréquentes au cours de la première partie de la saison d'orage ou de ruissellement que durant la dernière partie (Sidle et Cambell, 1985). Dans ce cas, Arnbord et al., (1967) la plus grande contribution de sédiments provient entièrement de la vallée du bassin, en raison des conditions climatiques (température élevée pendant la saison d'été) et les premières gouttes de pluie intenses. A titre d'exemple, les crues 2 et 13 illustrent cet effet.

Classe II (Boucle dans sens contraire des aiguilles d'une montre)

D'une manière générale, les crues de cette classe sont caractérisées par une courte période lors de la montée, par rapport au temps de concentration du bassin et une forte concentration des sédiments.

Ce type de boucle peu être indicatif quant à l'érodabilité du sol du bassin l'instabilité des berges des cours d'eau principaux. Les causes de l'origine de cette classe dans le bassin Kébir-Rhumel peu être expliquée par l'instabilité des berges des cours d'eau (Marouf et Remini, 2011), ce qui provoque des concentrations maximales des sédiments même après avoir un débit maximum lors de la crue. La variation spatiotemporelle de précipitation est très remarquable entre le nord et le sud du bassin étudié, la station Oued-Messaouda au nord du bassin est caractérisée par une précipitation moyenne annuelle de 1300 mm par rapport à la station d'Ain Fakroun située au sud du bassin avec une précipitation moyenne annuelle de 350 mm.

Les caractéristiques hydrologiques irrégulières et la lithologie du bassin Kébir-Rhumel (Chapitre II) tels que l'instabilité du sol, pluies d'Eté et d'Hiver, les températures estivales élevées, et la saison de sécheresse s'étale parfois sur 6 mois de l'année allant du mois d'Avril au mois de Septembre ou Octobre ce qui favorisent l'augmentation véloce des sédiments dans ce bassin (Marouf et Remini, 2011).

Classe III (Boucles sous forme de huit)

Les boucles sous forme de huit est une combinaison des parties de la classe I (boucle dans le sens des aiguilles d'une montre) et de la classe II (boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre). Le taux de l'augmentation de concentration était plus grand que le débit d'écoulement et la concentration des sédiments atteignent le pic avant le débit d'écoulement. Dans cette classe, les multiples pics de la concentration des sédiments ont été observés dans plusieurs crues analysées (crues 5, 6 et 16). Les multiples pics de la concentration des sédiments indiquent habituellement les différents sources et les délais d'arrivage de sédiments (Piest et Spomer, 1968 ; Rapp et al., 1972). La majorité des crues analysées présentent des

débites d'écoulement (Q_{max}) même lorsque la concentration des sédiments (C_{max}) n'est pas atteinte.

VIII.6 DISCUSSION ET CONCLUSION

En raison de la proximité de la source de sédiments par rapport au cours d'eau et petits ruisseau, les caractéristiques lithologiques, en particulier, les zones les plus proche du barrage de Beni-Haroun (terres sensibles et instables ; Région de Mila) et à partir des données de mesures de la station hydrométrique d'El Ancer à l'aval du bassin kébir-Rhumel, le modèle d'hystérésis observé indique différentes formes; formes dans le sens des aiguilles d'une montre, sens contraire des aiguilles d'une montre et la forme de huit, chacun de ces modèles correspondent à un ensemble différent d'écoulement et des conditions de dégagement des sédiments. Ces conditions ont un certain effet sur la forme des boucles d'hystérésis. La forme de la classe II (sens contraire des aiguilles d'une montre est obtenue dans plusieurs événements des crues étudiées. Ces résultats montrent également la prédominance des sédiments au niveau des rives du cours d'eau principal et les versants par rapport à la vallée du bassin Kébir-Rhumel. Certaines complications du modèle sont observées en raison de la variation des précipitations et des débits de pointe des crues. L'augmentation rapide des sédiments dans la vallée et les versants du bassin sont favorisées par les caractéristiques lithologiques et hydrologiques irrégulières du bassin Kébir-Rhumel. L'analyse des classes d'hystérésis montre aussi l'effet saisonnier relatif à la forme de la boucle obtenue. La saison d'Automne présente une hétérogénéité des classes à cause de l'irrégularité des précipitations et des régimes hydrologiques du bassin et aussi l'étalement de la période estivale.

On note aussi un décalage d'une demi-journée en moyenne dans les crues étudiées entre le temps de pic de débit et le pic de concentration. Ce décalage montre bien le retard de la réponse hydrosédimentaire dans le bassin kébir-Rhumel par rapport à l'onde de la crue. Ce décalage peut se produire, en fonction de la répartition spatiale des pluies du bassin, de la localisation des zones productrices de matériaux (éloignement par rapport à la station de mesure) et de la taille du bassin versant.

Ces modèles d'hystérésis ne sont pas des indicateurs définitifs de la source de sédiments, à moins que l'information concernant l'érosion, la pente et de ravine en amont de la station d'El Ancer soit disponible. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été présentées pour déterminer la source de sédiment dans le bassin, en utilisant des caractéristiques des sédiments telles que la dimension de la particule (Carson et al., 1973 ; Xu, 2003; Polyakov et Nearing, 2003), la couleur des sédiments (Grimshaw et Lewin, 1980) ou la composition minéralogique (Peart et Walling, 1986). Le modèle temporel de débit solide Q_s à l'aval du bassin est étroitement lié au débit d'écoulement du cours d'eau. Les estimations des débits solides du cours d'eau principal du bassin versant Kébir-Rhumel confirme la gravité du taux d'érosion au niveau de ce bassin (environ 7,4 millions de tonnes/km.an), ce qui provoque, l'envasement rapide du plus grand barrage en Algérie (le barrage de Beni-Haroun).

CHAPITRE IX

IMPACT DU SYSTEME DE TRANSFERT HYDRAULIQUE DU BARRAGE DE BENI-HAROUN SUR LA REGION EST DE L'ALGERIE

INTRODUCTION

Le système hydraulique intégré de Beni-Haroun est destiné à satisfaire les besoins d'alimentation en eau potable de plusieurs agglomérations ainsi que la mise en valeur des terres aptes à l'irrigation, identifiées au niveau des Hautes Plaines Sud Constantinoises de l'Algérie.

La consistance physique de cet aménagement composé d'ouvrages de mobilisation, transfert, de traitement, d'adduction et de réseau d'irrigation comprend globalement (ANBT, T.I., 1999):

- ⇒ Deux barrages principaux : Beni-Haroun et Boussiaba d'une capacité respective de 960 et 120 million de m³.
- ⇒ Trois barrages réservoirs : Oued Athemenia 35 Mm³, Koudiat Medouar 62Mm³ et Ourkis 65 Mm³.
- ⇒ Trois stations de pompage d'eau brute de grande capacité dont la plus importante est celle de Beni-Haroun d'une puissance de 180 mégawatts refoulant 23 m³/seconde sur une hauteur de 800m.
- ⇒ 200 Km de conduites de gros diamètres de transfert d'eau brute dont 7 Km de tunnel.
- ⇒ Six couloirs d'alimentation en eau potable comprenant 3 stations de traitement, 460 Km de conduites d'adduction, 25 réservoirs et 15 stations de pompage.
- ⇒ Quatre périmètres d'irrigation d'une superficie totale d'environ 42.000 ha

En plus du volume régularisé par le barrage de Beni-Haroun (435 hm³/an), le système se complètera, dans une seconde étape, par la connexion du barrage de Boussiaba (oued Boussiaba, affluent du Kébir), apportant un volume complémentaire de 69 hm³/an, ce qui portera à 504 hm³ le total à transférer annuellement vers les wilayates de l'intérieur. La répartition des ressources a été établie sur la base des besoins des agglomérations et des industries des 5 principales wilayas concernées (Mila, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna et Khenchela), évalués pour l'horizon 2030. Le solde disponible (environ la moitié du total régularisé) sera affecté à l'irrigation des quatre périmètres : Teleghma, Chemora, Batna-Ain Touta et Touffana-Remila couvrant ensemble près de 41030 ha. L'alimentation en eau potable d'une partie de la wilaya de Jijel (centres urbains de la daïra d'El Milia) sera assurée directement à partir du barrage de Boussiaba (figure IX.1).

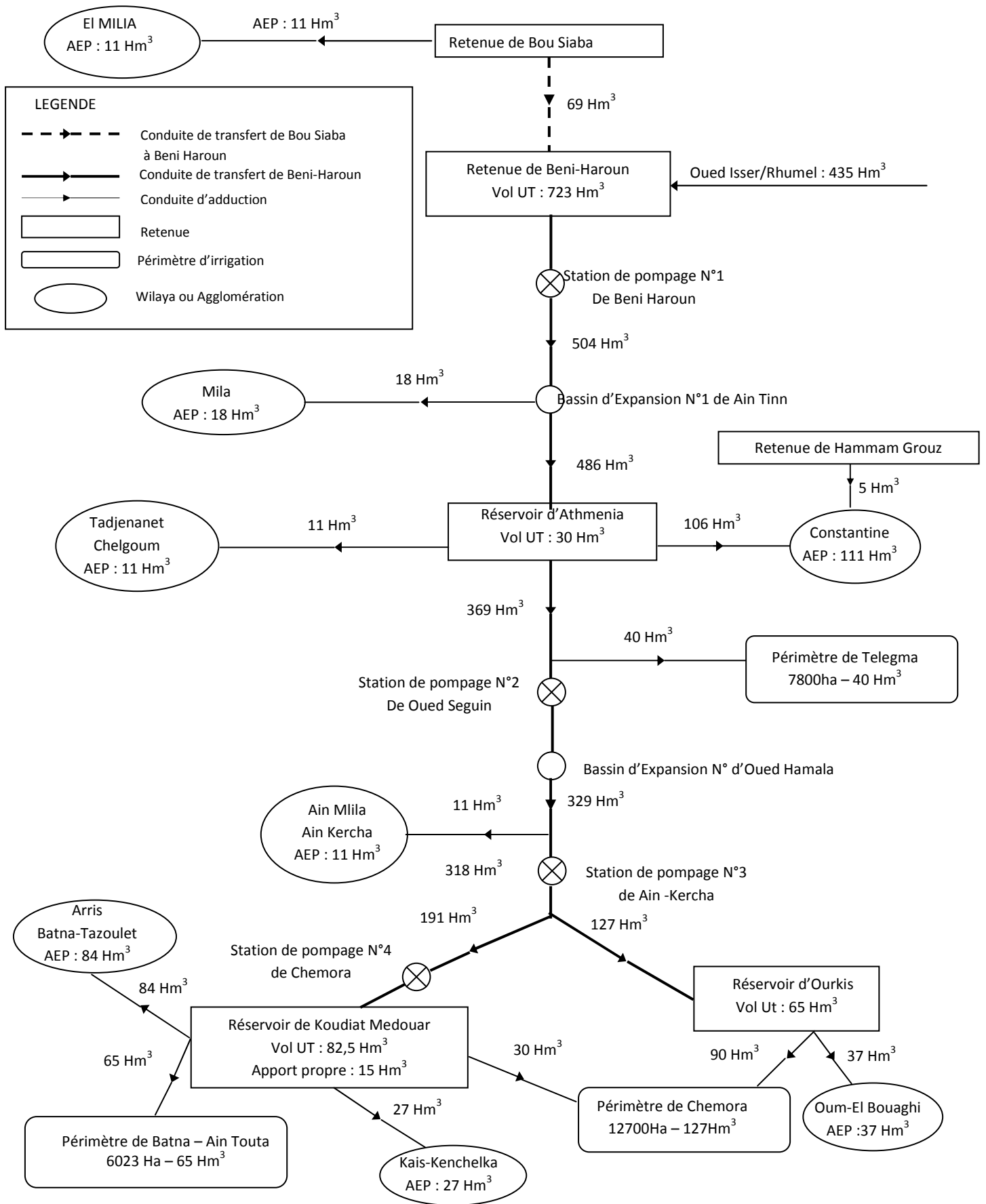


Figure IX.1 Schéma de fonctionnement et allocation des ressources : Transfert de Beni-Haroun

IX.1 LES IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES

L'avantage est plus grand ce qui porte l'intégration des grands périmètres irrigués et de l'industrie conçus par des services de l'état Algérien. Le passage de l'agriculture sèche à l'irrigation va suffisamment améliorer les rendements et rendre plus sûres les récoltes. Le cas des agriculteurs dont les terres ont été ennoyées par les retenues des barrages du transfert hydraulique de Beni-Haroun est encore plus déplorable, puisqu'ils sont contraints de quitter les lieux de leur terre et de leur habitat. Leur avenir est alors étroitement conditionné par les autorités qui choisissent avec plus ou moins de bonheur les lieux et les modalités de réinstallation (Bethemont, 1986). Le cas du barrage d'Assaouan par exemple (Bakre, 1980), on observe ainsi une forte distorsion entre les politiques suivies par les Soudanais et les Egyptiens pour la réinstallation des Nubiens relevant des deux pays.

- **L'Alimentation en eau potable** en 2030 de la région d'étude est estimée à 300 hm³/an à partir du transfert de Beni-Haroun dans les wilayas présentées ci-dessus pour subvenir aux besoins en eau potables des habitants. Ce gigantesque transfert va combler les déficits des besoins en eau d'environ quatre millions d'habitant en l'an 2030 (voir chapitre II ; figures II.10, II.11 et II.3). la première tranche de l'aménagement concernant l'alimentation en eau potable des eaux wilayas de Mila et de Constantine est déjà opérationnelle à partir de l'année 2006. seulement la première tranche, la population concernée, répartie entre 19 agglomérations atteindra plus de 2 millions en l'an 2030. Il est envisagé d'affecter un volume annuel de 121, 2 hm³.

Le deuxième couloir presque achevé qui alimente 8 agglomérations dans les wilayas de Batna et Khenchela, grâce au transfert par refoulement des eaux de Beni-Haroun vers le réservoir de Koudiat Medouar, près de 60 Mm³/an seront fournis à 1,5 millions d'habitants à l'horizon 2030. La 3^{ème} tranche du transfert qui sert à alimenter Oum El Bouaghi, Ain M'Lila, Ain Fakroun et Ain Beida à partir du barrage réservoir Ourkis grâce toujours à une adduction gravitaire et par refoulement des eaux du barrage de Beni-Haroun et avec un volume annuel de l'ordre de 37 hm³/an.

- **L'industrie** dans le bassin Kébir-Rhumel est concentrée autour de grandes agglomérations (Constantine, Chelgoum Laid, Khroub, Hamma Bouziane, Mila et Didouche Mourade) notamment le complexe Pelles et Grues de Ain Smara, l'Entreprise de détergents ENAD-SODER à Chelghoum Laid, le complexe Moteurs-Tracteurs d'El Khroub, la cimenterie de Hamma Bouziane, l'Entreprise de céramique et faïence de Mila, boissons gazeuses, sirop de Didouche Mourad etc. (voir figure IX.2).

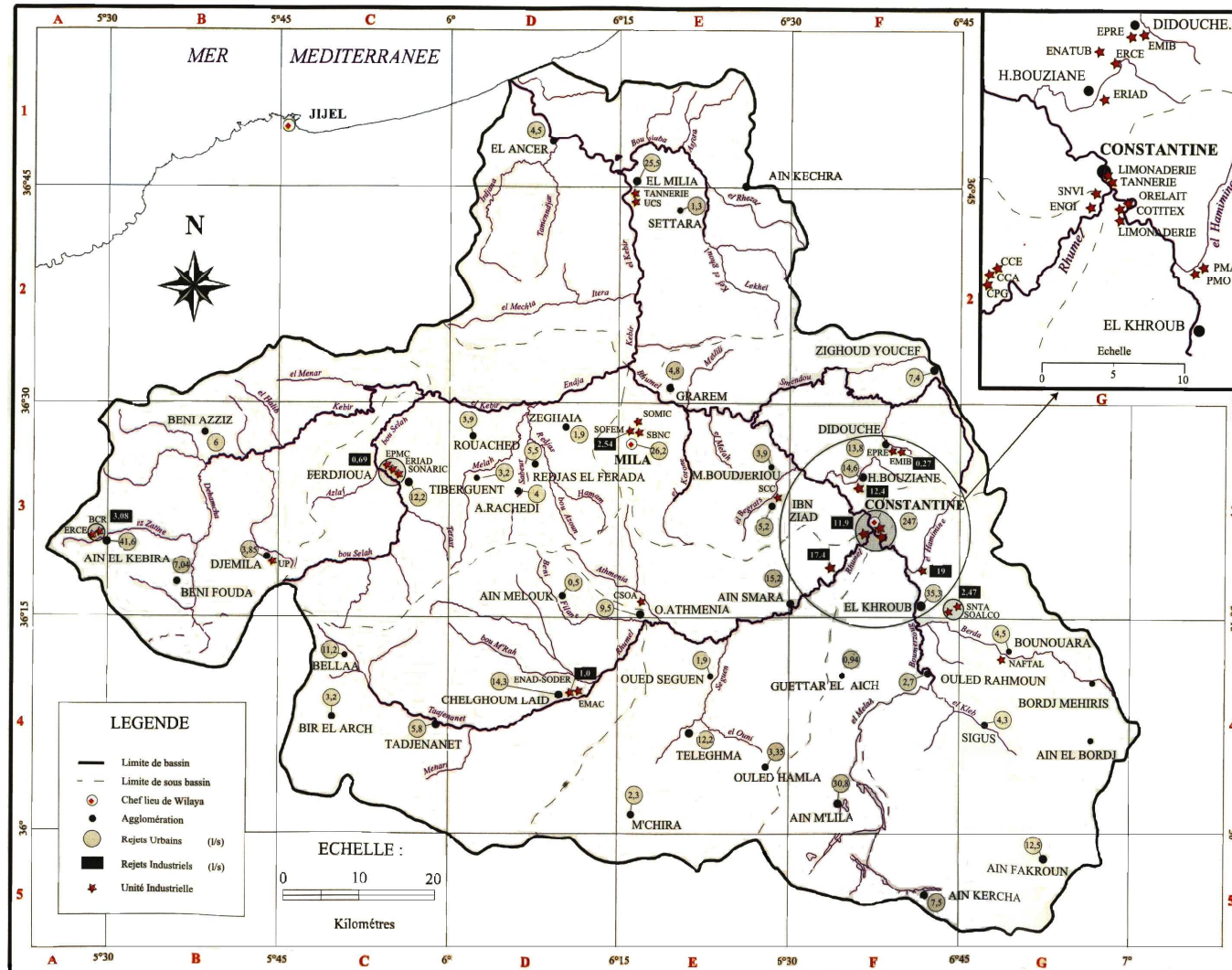


Figure IX.2 Carte des rejets urbains et industriels (ABH Constantine, 1999)

- Le résumé des données des besoins en eau pour l'industrie au niveau du bassin est illustré sur le tableau suivant :

Tableau IX.1 Industrie dans le bassin Kébir-Rhumel (ABH Constantine, 1999; 2004)

Sous Bassins	Wilaya	Besoin total m ³ /j	Volume total M ³ /j	Volume total recyclé m ³ /j
1004-1007	Constantine	14077	10643	525
1002-1003	Mila	847	838	395
1001-1005	Oum El Bouaghi	387	322	80

L'industrie dans le Kébir-Rhumel considérée comme un secteur très important dans l'amélioration du mode de vie des habitants. Cette industrie est consomme énormément d'eau ; par conséquent, ces eaux utilisées seront rejetées sales, chargées en produits chimiques, en produits phytosanitaires, en métaux lourds, en hydrocarbures et inorganiques, etc. Si elles ne sont pas traitées dans des stations d'épuration, entraînent une pollution physique et chimique du milieu naturel.

Dans ce monde industriel, il demeure toujours difficile de bien gérer ces déchets dangereux et de traiter le milieu contaminé des rivières, nappes et barrages. Comme les eaux de l'oued Rhumel et l'oued Enndja seront stockées avec ces différents rejets au niveau de la retenue du barrage de Beni Haroun.

Il est toujours recommandé que la distance qui sépare les points de restitution et de réutilisation doive être au moins égale à 8 Km (distance franchie en un jour d'écoulement à l'étiage par une rivière de plaine) c'est-à-dire, un minimum d'auto épuration (Rodier, 1986).

- **L'Agriculture** dans le bassin Kébir-Rhumel est de type Mixte, traditionnelle (gravitaire), et irrigation moderne (par canaux d'aspersion) selon le type de culture. Les Céréales et les cultures maraîchères sont les principales activités des périmètres irrigués. Un impact socio-économique positif du transfert hydraulique de Beni-Haroun sur le développement actuel et futur de l'irrigation. Les eaux de la retenue du barrage de Beni-Haroun serviront à l'irrigation des terres agricoles existantes d'une superficie d'environ 42.000 ha susceptible de faire l'objet d'une extension compte tenu des énormes potentialités existantes. La création de ces périmètres irrigués pourrait renforcer les traditions des riverains prédominants par l'arboriculture. On peut qualifier cet avantage qui est très significatif. Il nous sera difficile d'estimer le nombre exact de postes d'emplois que pourra fournir la réalisation du transfert hydraulique de Beni-Haroun. La création de nouvelles terres agricoles

engendra sans doute la création de nouveaux emplois, ce qui renforcera la vocation agricole dans plusieurs régions du bassin.

A l'est de la région, le transfert se fait à partir du barrage réservoir de Ourkis à Oum El Boughi. Il régularisera l'apport d'eau nécessaire à l'irrigation d'un périmètre de 15.000 ha à la région de Chemora et également du périmètre de Touffana-Remila (11.000 ha répartis entre 2.000 ha dans la zone de Touffana et 9.000 ha dans la plaine de Remila). La retenue de Koudiat Medouar, assurera aussi l'irrigation du périmètre de 6000 ha (Couloir Batna-Ain Touta). Ce réservoir assurera probablement un complément d'eau au périmètre d'irrigation.

Les projets de périmètres d'irrigation alimentés par le transfert hydraulique du barrage de Beni- Haroun sont comme suit :

- 1. Le périmètre de Teleghma :** (8.000 ha) s'étend le long des vallées du haut Rhumel et son affluent l'oued Seguin, dans une zone comprise entre les centres d'Ouled Hamla au Sud et Oued Seguin au Nord. Cette zone semi-aride de la frange Nord des Hautes plaines (autour de 400 mm de pluie par an), vouée principalement à la céréaliculture sèche, recèle des sols argilo-limoneux qui se prêtent bien à l'irrigation.

La plaine de Teleghma-Ouled Hamla a connu déjà les bienfaits de l'intensification agricole grâce à l'exploitation de la nappe phréatique par plusieurs centaines de puits équipés de motopompe.

Cependant, face à l'importance du déficit hydrique et aux rabattements de la nappe (effet de la surexploitation), un apport extérieur d'eau s'avère nécessaire. Le périmètre est actuellement à l'étude par l'Entreprise Algérienne (Hydroprojet-Est) en vue de son équipement et son irrigation à partir de la retenue d'Oued Athmania.

- 2. Le périmètre de Chemora :** (15.000 ha), localisé entre les wilayas d'Oum El Bouaghi et Batna se trouve dans un milieu fortement marqué par l'endoréisme, au cœur des Hautes Plaines où le déficit hydrique est plus marqué qu'à Teleghma.

L'oued Chemora qui prend sa source sur le versant de l'Aurès s'écoule dans un étroit couloir, entre les djebels Bou Arif et Fedjoudj, pour atteindre la plaine de Boulhilet au Nord.

Cette zone a connu une irrigation de type traditionnelle basée sur un système de partage, entre utilisateurs des épandages de crue. Il permettait, en aménageant des seds (diguettes) et des canaux d'irrigation de faire profiter les terres des eaux de crue de l'oued Chemora. Aujourd'hui, l'oued est capté en amont par le barrage de Koudiat Medaour.

Le périmètre en projet devrait être irrigué à partir des eaux de Beni-Haroun transitant par la retenue d'Ourkis.

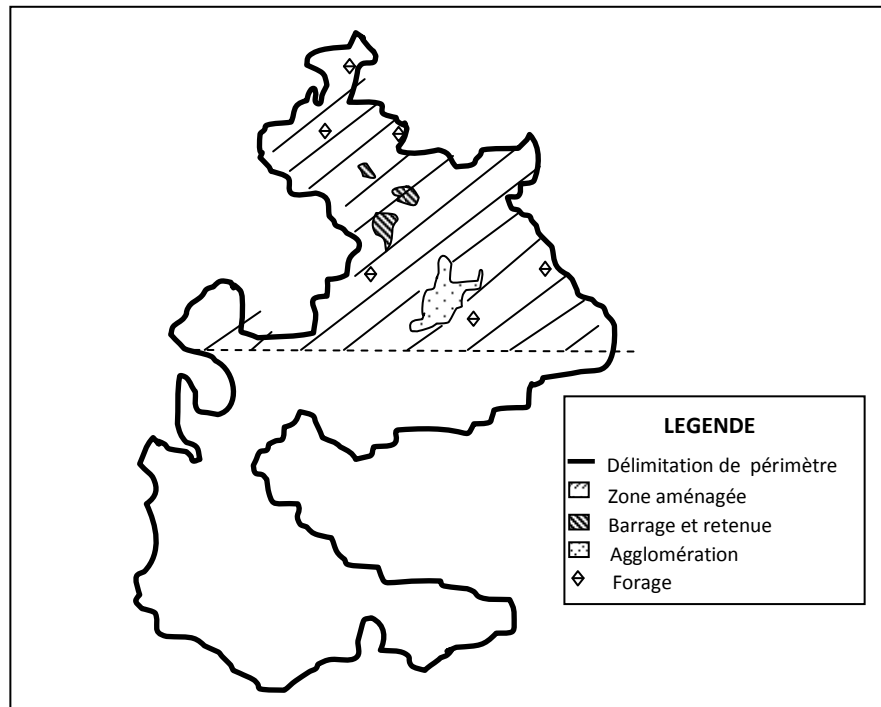


Figure IX.3 Périmètre d'irrigation de Chemora

- 3. Le périmètre de Touffana-Remila:** (11.000 ha) : Il est réparti entre 2.000 ha dans la zone de Touffana (Ouled Fadhel) et 9.000 ha choisi parmi les 21.000 ha de sols de la plaine de Remila ayant déjà fait l'objet d'études agro-pédologiques en 1971 et 1973 (ANBT, BG., 2003).

La sélection des terres aptes à l'irrigation tient compte des deux principales contraintes à la mise en valeur dans la région : la salinité et la profondeur des sols.

A la demande de l'A.G.I.D (Agence de l'Irrigation et de Drainage), l'équipement de ce périmètre est en cours d'étude par Energoprojekt (figure. IX.4). L'ancienne aire d'irrigation de Foum El Gueiss (3200 ha), abandonnée suite à l'envasement du barrage est incorporée au projet de périmètre.

La ressource en eau allouée à ce périmètre serait acheminée très probablement à partir de la retenue du barrage de Koudiat Medaour.

L'apport de l'eau d'irrigation a montré ses effets sur la mise en valeur agricole de ces vastes étendues du Piémont de l'Aurès (projets du F.N.D.R.A. - Fonds National de développement rural et agricole - et de la Générale Concession Agricole). Les moyens de la grande hydraulique sont susceptibles de transformer ces paysages de nudité et d'améliorer la situation socio-économique de la population rurale.

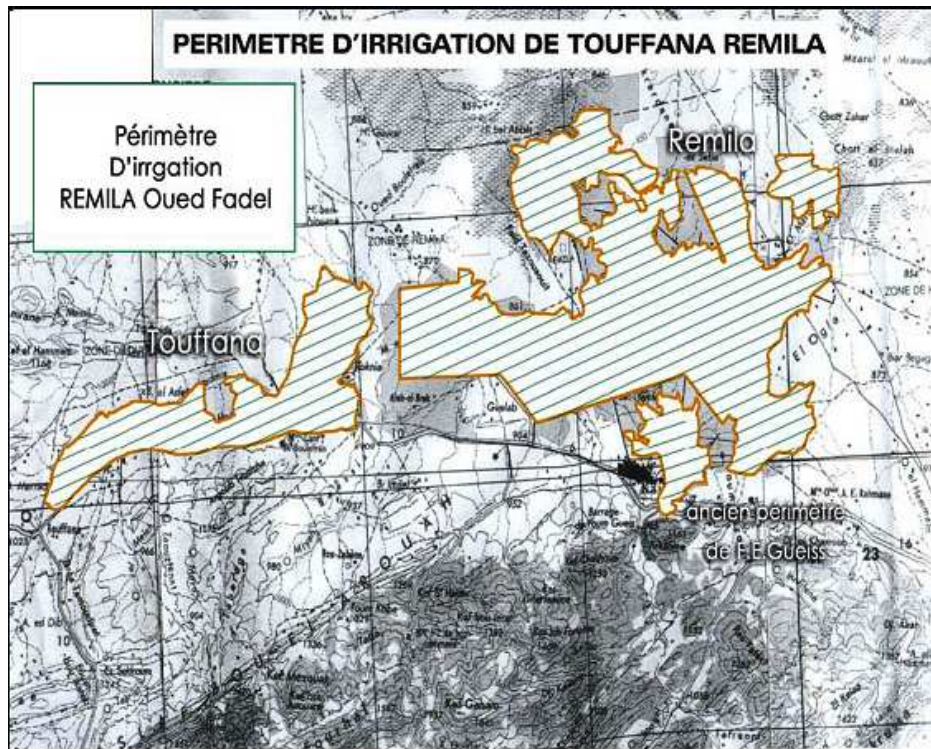


Figure IX.4 Périmètre d'irrigation Touffana-Remila

4. **Le périmètre de Batna-Ain Touta** : (6.000 ha) s'étend entre Batna et Ain Touta en un long couloir Nord-Est – Sud-Ouest, compris entre les Monts de Bellezma et la chaîne de l'Aurès. Ce périmètre est en projet d'étude et les ressources en eau qui lui seront allouées ne sont pas encore strictement définies. Les caractéristiques des périmètres à irriguer ont été mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IX. 2 Les caractéristiques des périmètres à irriguer du bassin

Périmètres d'irrigation	Superficie équipée (ha)	Volume alloué (Hm ³ /an)
Teleghma	7.079	69,5
Remila – Oued Fadel	10.849	86,3
Batna – Ain Touta	6.171	45,8
Chemora	16.940	90,4
Total	41.039	292

Il faut noter que, les conséquences de la forte activité agricole qui se développe dans la zone est de plus en plus préoccupante à cause de l'utilisation intensive des produits fertilisants, chimiques ou organiques, et l'emploi excessif des pesticides (insecticide, herbicide) et les fongicides.

L'agriculture, l'élevage et l'aviculture sont responsables du rejet de nombreux polluants organiques et inorganiques dans les eaux de surfaces et souterraines de la région.

Ces contaminations comprennent à la fois des sédiments provenant de l'érosion des terres agricoles, des rives et lits des cours d'eau, des composés phosphorés ou azotés, issus des déchets animaux et des engrais commerciaux, notamment des nitrates (NO_3^-) et de produits phytosanitaires, qui n'ont pas été décomposés vont nourrir les algues qui se multiplient et absorbent tout l'oxygène. Les déchets animaux sont pauvres en oxygène, riches en azote et en phosphore et renferment souvent des organismes pathogènes. Les résidus issus des engrais sont retenus par les sols mais peuvent contaminer les cours d'eau par ruissellement des eaux de pluie ou d'irrigation et les nappes phréatiques par le lessivage.

IV.2 IMPACTS SUR LA QUALITE DE L'EAU ET LE MILIEU NATUREL

Les conséquences socio-environnementales les plus préoccupantes aujourd'hui dans le bassin du Kébir-Rhumel sont l'eutrophisation des eaux du barrage de Beni-Haroun, la prolifération de plantes aquatiques et aussi le risque de la prévalence des maladies hydriques dues au rejet non contrôlé des eaux usées domestiques et industrielles en particulier dans les zones périphériques de la retenue du barrage de Beni-Haroun. Ces conséquences néfastes sont le résultat de la perturbation du milieu biophysique du bassin, suite à la régularisation du débit de l'oued Rhumel et de l'oued Enndja. Les impacts consécutifs aux grands ouvrages concernant non seulement la morphologie des lits mais également la qualité des eaux et les systèmes hydrobiotiques (Peiry, 1990). Ils sont susceptibles d'affecter de vastes espaces parfois très éloignés des ouvrages qui peuvent être incriminés. Ce phénomène de distanciation spatiale et leur étalement dans le temps font qu'ils n'ont pas toujours été perçus lors des changements provoqués par l'action humaine (Goudie, 1986).

La construction de vastes retenues, le cas de la retenue de Beni-Haroun a comme pour premier effet, une modification radicale du milieu. Dans les zones profondes de la retenue, l'eau accumulée tend vers une stratification thermique avec couche supérieure plus chaude en été et plus froide en hiver que la couche inférieure. Dans ce dernier cas, des courants verticaux de densité peuvent faire basculer et inverser la stratification ou l'abolir et la température de l'eau devient uniforme. La stratification de la teneur en oxygène subit une diminution en profondeur qui peut aller jusqu'à la désoxygénation totale, alors qu'en surface le contact de l'air enrichit cette teneur. Elle est naturellement élevée dans les cours d'eau dont les tourbillons favorisent le mélange par brassage. Dans les zones peu profondes, certains phosphates solubles développent l'activité biologique au point de conduire à un excès d'alimentation organique : c'est l'eutrophisation. Le lac encombré d'algues et de matières putrescibles génératrices d'hydrogène sulfuré devient répulsif.

Les principaux impacts prévus du projet sont liés à la modification du milieu aquatique, laquelle aura une incidence sur la production de la faune aquatique et la qualité de l'eau du cours d'eau. L'accumulation des polluants dans la retenue favorise la dégradation de la qualité des eaux dans la retenue en aval du barrage. Même le risque d'avoir une pollution par les métaux lourds (Cu, Cr, Zn etc.).

Le contrôle des paramètres indicateurs de pollution, réalisé par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Constantine durant une période de vingt ans (voir Chapitre IV) dans le bassin versant kébir-Rhumel montre que l'ensemble des eaux de surface dans le bassin présente des concentrations élevées des phosphates et des nitrites en particulier les stations Grarem, Menia et Ain Smara (pollution excessive). La turbidité et les concentrations des eaux en sulfates (SO_4^-) sont très remarquables. Les valeurs des paramètres indicateurs de pollution tels que ; l'oxygène dissous, le DBO_5 et le DCO confirme la qualité médiocre des eaux dans les cours d'eau du bassin, les stations de Ain Smara et Menia dans la région de Constantine présentent une forte contamination par les polluants où l'activité industrielle est fortement intensive.

Quelques analyses des métaux lourds élaborées par l'ANRH de Constantine montrent des concentrations périlleuses dans ce bassin, les eaux de l'oued Kébir-Rhumel atteint la retenue du barrage avec des concentrations de cuivre de l'ordre de 0,012 mg/l.

La turbidité et les matières en suspension sont en concentrations élevées dans la retenue du barrage. Malgré la qualité moyenne des eaux de la retenue du barrage de Beni-Haroun, des analyses effectués en 2006 sur quelques paramètres physico-chimiques et bactériologiques (NO_3^- , PO_4 , DBO_5 , DCO, $\text{O}_{2\text{dissous}}$, $\text{O}_{2\text{saturé}}$, etc.), indiquent la contamination chimique et microbiologique des eaux de cette immense retenue, ce qui favorise la prolifération des algues et accélère le phénomène d'eutrophisation (une couleur verdâtre très foncée est observée dans les eaux de la retenue du barrage, en particulier, près de la digue).

L'Oued Rhumel est actuellement utilisé comme un milieu récepteur d'une grande partie des rejets liquides du groupement urbain des wilayas limitrophe. Aux conséquences écologiques liées cette pollution de l'eau, particulièrement en période d'étiage, vient s'ajoutée le risque d'une sévère détérioration de la santé publique. En effet, la contamination des eaux du l'oued et par là même des nappes et des produits alimentaires (spécialement au moment des cultures et des récoltes) par les différents germes fécaux augmentera les risques d'exploitation aux maladies infectieuses (choléra, dysenterie, maladies diarrhéiques, hépatite, etc. Ces maladie peuvent toucher, en particulier, les habitants les plus proches de la retenue du barrage de Beni-Haroun, comme le cas de plusieurs maladies qui ont été observées en l'Egypte (Delta du Nil), les rives du Zambèze et aussi en Chine (Bethemont, 2000).

La construction de ce barrage va certainement modifier les activités pratiquées par certains citoyens. Ces nouveaux aménagements amèneront les citoyens, en particulier, les agriculteurs à modifier leur pratique de certaines activités sur le cours d'eau principal et à la périphérie de la retenue du barrage. Certaines agglomérations périphériques de la retenue du barrage nécessitent d'améliorer leurs systèmes d'évacuation des rejets des eaux usées en essayant de rejeter ces eaux de préférence à l'aval du barrage de Beni-Haroun ou bien d'installer les différentes stations d'épuration nécessaires, en utilisant les différents modes de traitement préconisés dans cette région. Des mesures ont été prises en considération par l'Agence Nationale des Barrages et de Transferts (ANBT) pour relocaliser, quantifier et caractériser les rejets de la région périphérique de la retenue et sécuriser l'ouvrage clé du système hydraulique. Le retard élaboré dans les études et la réalisation des stations d'épuration pour quantifier, contrôler et épurer les eaux usées des agglomérations concernées a abouti à un vrai problème environnemental sur les eaux du barrage et le milieu naturel.

Une surveillance environnementale pendant toute la réalisation et le fonctionnement du transfert hydraulique est nécessaire. Le remplissage de la retenue du barrage, la stabilité de la digue en BCR, les fuites dans le barrage et le fonctionnement hydraulique de système, afin de s'assurer de l'application des mesures d'atténuation. Les travaux de réalisation de ce grand transfert hydraulique entraîneront d'importantes retombées économiques dans le pays. Le coût de ce transfert hydraulique est de l'ordre de trois mille (3.000) milliard de dinars, les dépenses liées à ce projet permettront d'y maintenir ou d'y créer de l'emploi dans la région Est de l'Algérie. La majorité de main-d'œuvre pourrait provenir de cette région.

IX.3 IMPACTS DU TRANSFERT SUR LE TRANSPORT SOLIDE

Les ouvrages hydrauliques affectent non seulement l'abondance et le rythme des écoulements mais modifient aussi la dynamique des transports solides. Les barrages et les grands réservoirs piègent la charge de fond (gravier et galets) et une partie des fractions sableuses et limoneuses, ce qui nécessite de procéder régulièrement à des vidanges et à des chasses pour les évacuer, à l'aval des réservoirs, les changements hydrologiques modifient les conditions de mise en mouvement de la charge de fond. L'effet de ce changement des flux d'eau et des transits sédimentaires conduit à des modifications géomorphologiques qui affectent les lits fluviaux.

Le blocage de la charge de fond et rupture des continuums sédimentaires par les barrages est un classique de la littérature géomorphologique consacrée aux impacts des rivières régulées (Petts, 1984 ; Williams et Wolman, 1984 ; Kondolf, 1995). Ce qui sur certains, les ouvrages hydrauliques a pu aller jusqu'à empêcher la manœuvre des vannes de fond (Vivian, 1982). Le cas du barrage de Beni-Haroun est conçu seulement avec deux vannes de demi fond situées au dessus du niveau de volume

mort estimé (à une cote de 140m), ce qui ne permet jamais de minimiser le transport solide dans la retenue et de les évacuer par le courant de densité durant les premières années de leur fonctionnement, la vase située au dessous du volume mort, pendant l'ouverture de la vidange de demi-fond et lors des crues importantes reste toujours bloquée, tassée et consolidée au fond de la retenue.

Dans les zones de fortes productions sédimentaires, le cas du barrage de Beni-Haroun, le piégeage affecte d'énormes volumes de matériaux. Le barrage reçoit probablement un volume de sédiments de l'ordre de 22 Mm³/an (Marouf et Remini, 2011). L'évolution des concentrations et des débits en période de crue dans ce bassin d'étude donnent des indications sur le fonctionnement hydrosédimentaire des cours d'eau. La station d'El Ancer à l'aval du bassin présente les plus fortes crues (débits instantanées de l'ordre de 1000m³/s) et les plus fortes concentrations des MES (100g/l). L'analyse d'hystérésis des paramètres concentration-débit montrent la prédominance des sédiments des rives et de lit de cours d'eau principal par rapport à la vallée du bassin.

Le cas de la décantation des sédiments a été aussi montré dans plusieurs pays, en Salvador par exemple, le volume sédimentaire déposée dans la retenue du Saulel (Drac supérieur) rapporte qu'entre 1930 et 1965 un volume de 13 Mm³ (370.000 m³/an) et en Mairienne, la retenue de Sain-Martia-de-Potre aurait vu sa capacité passer de 371000 à 210.000 m³/an entre 1974 et 1986 (soit environ 15.000 m³/an de dépôts), et ce, malgré les chasses annuelles visant à limiter la sédimentation. Sur le Rhône franco-suisse, le suivi du comblement de l'ouvrage de Verbois a relevé des dépôts qui varient de 350.000 à 1.000.000 de m³/an se formaient, la quasi-totalité provenant de l'Arve (Bruschin, 1987). En Algérie, la quantité de sédiments déposés dans les 98 barrages Algériens était évaluée à 650 Million de m³ en 2000 (Remini, B., 2002), soit un taux de comblement de 14,5%.

Afin de limiter les problèmes de sédimentation et de perte des capacités utiles de la retenue du barrage, des chasses périodiques sont indispensables, les transits de charge se font à l'occasion des temps de vidanges destinées à ausculter et assurer la maintenance des barrages. Le rôle de ces chasses est d'évacuer les dépôts des retenues pour maintenir leur capacité de stockage et de dégager les vannes de fond et les prises d'eau. On profite des périodes de forte hydraulité pour les réaliser.

Les chasses et les vidanges des barrages ont fréquemment de fortes conséquences sur le milieu fluvial. La qualité des eaux est fortement altérée, le remaniement des dépôts contribue également au transit brutal dans le milieu de large quantités de polluants (pesticides, métaux lourds, ammoniac) et à une forte diminution de la teneur en oxygène dissous de l'eau. Il semble aussi que les matériaux fins exportés participent au colmatage des fonds et contribuent à une « cimentation » du substrat alluvial, dommageable pour les cycles biologiques, les échanges nappe/rivière et la mobilité des sédiments du lit. Même pour le cas des ouvrages dans le barrage, il s'agit d'un ouvrage de 200 mètres de hauteur environ, équipé d'un

déversoir à écoulement libre et qui peut être érodé à cause des cavitations des écoulements (Bouvard, 2004). Ce cas a été observé dans le barrage de Kerum en Iran, la courbure de déversoir a provoqué une érosion, due à la cavitation qui finit par éliminer complètement le revêtement en béton du profil jusqu'au rocher, sur une distance considérable. Ce phénomène peut toucher également les vidanges de fond. Il faut noter que, le blindage des pertuis de la vidange dans le barrage de Serre-Ponçon avait été perforé, par cavitation, sur une surface triangulaire de 20x30 cm (Bouvard, 2004). Le volume d'une fosse résultant aussi de ce phénomène atteignait ailleurs 150m³/s. même aussi le transport des eaux brutes du barrage avec un réseau d'adduction de 200km et trois stations de pompage va compromettre le mauvais fonctionnement du transport et du traitement.

IX.4 IMPACTS MORPHOLOGIQUES ET TECTONIQUES

Les impacts morphologiques liés aux barrages diffèrent bien entendu, selon la nature de ceux-ci, barrage-réservoirs ou barrage au fil d'eau. De façon générale, ces ouvrages piègent les sédiments venus de l'amont et restituent une eau décantée vers l'aval. Il y a donc comblement progressif à l'amont sur un rythme variable selon la morphologie des bassins et la dynamique érosive. Pour l'Europe centrale par exemple, le comblement des retenues serait de l'ordre 0,51% par an, mais en Chine, le barrage de Sanmenxia, achevé en 1960 a été transformé en simple bassin de décantation en 1964, au vu de son comblement. Vers l'aval, les eaux issues de la retenue disposent d'un excédent de capacité tractrice et provoquent soit des phénomènes d'incision en roches dures, soit de façon plus générales des phénomènes d'érosion classiques (passages d'un cours d'eau rectiligne à un cours d'eau sinueux puis un tressage). Ces phénomènes de déstabilisation prennent une ampleur toute particulière lorsque les ouvrages sont implantés dans les zones de roche meubles.

En Nord Africain, le cas de l'Algérie, l'érosion et le transport de sédiments est très répandu, dont il menace gravement les potentialités en eau et sol. Le taux d'érosion spécifique atteint dans ces pays, les valeurs les plus importantes du monde. Les travaux de Demmak, en 1982 sur l'érosion et le transport solide montrent le taux d'érosion spécifique, atteint dans le Nord Algérien les valeurs les plus élevées du Magreb qui dépassent 2.000 T/km².an, sur la plus part des bassins versants. Le transport des sédiments de l'ordre de 2.600 T/km².atteint le barrage de Beni-Haroun à Mila (Marouf et Remini, 2011).

Les infrastructures hydrauliques algériennes, notamment «les barrages», courent un vrai danger d'envasement et de sédimentation. La lutte antiérosive continue s'impose pour leur préservation et la protection des terres à l'amont. Le réseau d'écoulement est le plus affecté, le transit des lâchers sur des tronçons de cours d'eau non aménagés amplifie le sapement des berges et l'affouillement du lit, créant des dépôts importants à l'aval (Touaibia, B., 2010).

Aux impacts liés au transfert des sédiments, peuvent s'ajouter divers traumatismes : glissement de terrain dans le réservoir comme le cas du Vaiont italien ; rupture d'ouvrages implantés, sur champs de failles, le cas de Malpasset en France, resta exemplaire par ses conséquences dramatiques. Cas limite de poids d'un réservoir implanté en milieu instable peut provoquer le mouvement sismique : le remplissage du lac de Mead sur le Colorado en 1935 a été suivi par plusieurs mouvements sismiques assez amples. Il en a été de même pour le barrage de Kariba, implanté sur le champ de failles et il a été suivi en 1960 d'une secousse atteignant le niveau 4 sur l'échelle de Richter.

La géomorphologie de la région du projet du transfert est liée à un historique tectonique complexe. Une phase tectonique particulièrement importante s'est développée au Miocène inférieur. D'après les observations et les enregistrements disponibles mis à jour en Décembre 1997, le site du barrage de Beni-Haroun, bien que situé à la limite celles des deux provinces géomorphologiques semble présenter une sismicité moins importante que des régions avoisinantes telles que la zone de Constantine et des Babors. La région de Beni-Haroun est située dans une région sismique classée, d'après Bochel, comme pouvant subir d'intensité VI à VII. Cette zone est bordée au nord-ouest et au sud-est par deux zones sismiquement plus actives d'intensité possible supérieure à VIII. Le séisme répertorié le plus important dans un rayon de 50km autour du site est celui du 27 Octobre 85 de magnitude 5,9 et dont l'épicentre est situé au nord-est de Constantine à environ 40 Km du site de Beni-Haroun. Les structures tectoniques dimensionnantes pour le site sont situées dans le bassin de Constantine que l'on limitera aux failles bordières du massif et les failles de charriage. Par déplacement de ces séismes jusqu'à la limite de la zone ou structure la plus proche du site, on peut considérer qu'un séisme de magnitude 5,9 peut avoir son épicentre à 20 Km du site et qu'un séisme de magnitude 4,6 peut avoir son épicentre à 1 Km du site (ANBT, T.E, 2002).

Les effets d'installer un grand barrage, comme le cas du barrage de Beni-Haroun sur des fondations karstiques présente un effet immuable sur l'évolution du régime hydrologique et climatique de la région.

Lors du fonctionnement du barrage de Beni-Haroun, les responsables du secteur de l'hydraulique et ceux de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) ont décidé d'arrêter temporairement le pompage à partir de la grande station de pompage de Douar El Bidi suite à des fuites d'eau jugées «importantes» enregistrées au niveau du tunnel de transfert des eaux du barrage de Beni-Haroun situé à Djebel Lakehal, dans la wilaya de Mila. Ce tunnel de transfert sert à acheminer les eaux du barrage de Beni-Haroun vers le barrage réservoir d'Oued Athmania. Des quantités importantes d'eau ont été perdues. L'estimation de la déperdition en eau, en raison de ces fuites, selon l'ANBT, est de l'ordre de 35 % du volume pompé qui est de l'ordre de 12,5 m³/s. Cet arrêt momentané du pompage a duré quelques mois durant lesquels des travaux de réparation ont été achevés par la firme italienne Condotte D'Aqua ayant réalisé le tunnel.

Les spécialistes dans le domaine hydraulique n'écartent pas la possibilité de la relation entre l'activité sismique enregistrée dans la région durant cette période et la secousse tellurique (3,3 degrés) enregistrée avant l'apparition des fuites.

Selon l'ANBT, l'existence des problèmes dans les fondations de l'ouvrage ainsi que des infiltrations d'eau estimées à 1,2 m³/s, empêchent les services de l'exploitation du barrage de faire remplir et exploiter le barrage d'une façon optimale. Les problèmes d'infiltration peuvent constituer une menace pour la population et sur l'écologie de la région, en cas de catastrophe.

L'inconvénient de la station de pompage prototype fabriquée par une société française a fût remarqué dans les pièces de rechange est inexistantes et le non maîtrise de la technologie moderne de fonctionnement des grandes stations. En cas de panne, dans cette station risque de paralyser tout le système de Beni-Haroun et priver les citoyens consommateurs. Une moindre fuite avec pression de pompage de 80 barres, pourrait causer une déflagration énorme.

Le projet, composé de plusieurs lots dont les transferts vers les cinq wilayas concernées, devrait sécuriser une bonne partie de l'Est du pays en eau potable (près de 4 millions d'habitants répartis sur le territoire des six wilayas).

La réalisation de ce barrage a une influence sur la nappe aquifère de la région, selon les données recueillies par l'ANRH, DHW et ABH de Constantine. Une analyse des débits nominaux et exploités des forages à été effectuée dans trois wilayas (Constantine, Mila Oum El Bouaghi à l'amont et Jijel à l'aval du barrage). Les données observées (Tableau IX) montrent l'augmentation des débits des forages dans les wilayas situées en amont du barrage de Beni-Haroun en comparant le fonctionnement des forages d'eau durant les deux années (1989 et 2004). Les nappes seront rechargées davantage et surtout dans la zone qui entoure la cuvette. L'analyse des données montre l'enfoncement de la nappe phréatique à l'amont de la retenue du barrage de Beni-Haroun, et cependant que vers l'aval l'exhaussement de ce même niveau induira un relèvement des nappes phréatiques.

La seule wilaya située à l'aval du site du barrage, présente un abaissement de ses nappes souterraines et cela est dû à la rupture de l'alimentation des ces dernières par la mise en place du barrage sur le lit majeur de l'oued Kébir. La diminution du niveau de la nappe souterraine dans la région de Jijel au nord du bassin kébir-Rhumel est remarquable malgré que c'est la région la plus pluvieuse du bassin d'étude (la pluviométrie moyenne est de l'ordre de 1000 mm).

Tableau IX.3 Etat des forages dans le bassin Kébi-Rhumel

Wilaya	Année 1998		Année 2004	
	Qn (l/s)	Qexp (L/s)	Qn (l/s)	Qexp (L/s)
Constantine	1494	1010	2310	1955
Mila	960	873	1767	1129
Oum El Bouaghi	740	710	1027	927
Jijel	960	873	1267	648

En éloignant en nord, en aval du barrage, le déficit d'apports sédimentaires se traduit aussi par une déstabilisation du littoral, (recul du cordon littoral). Ce phénomène qui s'avère particulièrement grave dans le cas de l'ouvrage d'Akosombo qui piège la totalité des apports sédimentaires sableux, jusqu'alors assez importants de la Volta. Ces apports étaient l'origine d'une formation deltaïque et lagunaire assez stable et leur cessation a été suivie d'une reprise d'érosion marquée par un recul du cordon littoral de 12 mètre par an. La lagune a presque disparu et la petite ville de Keta, à l'Est du delta est en voie de destruction rapide (Rossi et Bilivi, 1995). L'évolution des rivages égyptiens n'est pas moins critiques : à la suite du piégeage des sédiments dans le lac Nasser, il a fallu protéger le littoral du delta par des enrochements ; plus à l'Est, les courants littoraux agressent le cordon littoral de Bradwil et provoquent un recul des plages qui peut atteindre trois mètres par an dans la région d'El-Arish où les stations balnéaires sont menacées. Dans le cas de notre étude, le littoral au nord du bassin présente aussi un recul à cause de la mise en place des barrages de Beni-Haroun, Hammam-Grouz, Oued Athmania et Boussiaba. Une translation plus faible des sédiments le long de la cote, ceci peut être bénéfique pour le port de Jijel en évitant un comblement difficile à combattre et aussi une diminution des apports nutritifs pour le plancton, ceci peut avoir un effet négatif sur la production de poisson de la région.

IX.5 STRATEGIES DE DEPOLLUTION

IX.5.1 Considérations générales sur les niveaux de rejet à atteindre

Le projet de dépollution visé par les services de l'ANBT a pour but de réduire les flux polluants transitant vers le lac de Beni-Haroun afin de ne pas compromettre les utilisations futures notamment la production d'eau potable, principal enjeu de l'ouvrage.

Les impacts des flux polluants sur la retenue du barrage se traduisent de plusieurs façons :

- Contribution à l'envasement du barrage.
- L'apport de matières organiques biodégradables contribue à la diminution du taux d'oxygène dans les eaux et peut entraîner des phénomènes de fermentation et de dystrophie.
- Apparition de composés toxiques. Le pH, lié à la photosynthèse à des valeurs fortes dans la journée. Si en plus les températures sont élevées et les teneurs en ammoniac (NH_4^+) sont fortes, il apparaît de l'ammoniac gazeux (NH_3) très toxique pour les poissons.
- Asphyxie du milieu. Le jour, les végétaux produisent beaucoup d'oxygènes par photosynthèse et en consomment peut par respiration pendant la nuit, seule la respiration continue. Si la quantité des végétaux dans la retenue est très importante, au petit matin, tout l'oxygène de l'eau sera peut être consommé. Les poissons et certains insectes aquatiques peuvent alors mourir par asphyxie.
- L'apport en matières azotées peut compromettre la vie piscicole, accentuer les coûts de potabilisation et contribuer à l'eutrophisation.
- L'apport de substances phosphorées est en grande partie responsable de l'eutrophisation du milieu avec excès de production d'algues et de matières organiques, contrainte de potabilisation et risques d'asphyxie et de fermentation.

Ces impacts sont d'autant plus significatifs en période estivale (débit presque nul dans tous les thalwegs et oueds) et il faudra en conséquence s'attacher à réduire les émissions polluantes pendant ces périodes de fragilité du milieu naturel.

L'enjeu consiste donc à limiter ces impacts par la mise en œuvre d'un programme de dépollution qui passe par la collecte et le traitement des effluents urbains.

En matière de traitement, les technologies d'épuration des eaux usées domestiques permettent d'atteindre une réduction des flux polluants dans les proportions maximales suivantes :

- 80 à 95% de la matière organique et des matières en suspension.
- 70 à 80% sur les matières azotées.
- 80% sur les substances phosphorées.

Si la plupart des procédés d'épuration assurent aisément un traitement efficace de la matière organique et des matières en suspension, le traitement de l'azote et du phosphore est réservé à quelques procédés plus complexes à mettre en œuvre.

L'étude environnementale permettra de préciser les impacts des flux résiduels et les niveaux de rejets nécessaires pour chacune des agglomérations.

En effet, les flux polluants transitent par des oueds différents et les temps de transit permettent de prendre en considération des phénomènes d'autoépuration avant rejet dans le lac.

Par conséquent, dans l'état actuel, l'Agence Nationale des Barrages et de Transfert visera de façon préventive à limiter les apports des agglomérations dans les zones périphériques de la retenue du barrage tout en proposant des solutions faisables et réalistes (ANBT, 2003).

L'étude élaborée pour l'ANBT par le bureau d'étude internationale BG en 2003 fait en première approche, de se fixer comme objectif global :

- De réduire significativement les apports organiques (<80%) pour l'ensemble des agglomérations avec pour objectif de niveau de rejet, les normes algériennes :
 - ✓ DCO 120 mg/l
 - ✓ DBO₅ 40 mg/l
 - ✓ MES 30 mg/l
- De réduire partiellement, voire progressivement les apports en azote et phosphore en se focalisant sur les agglomérations principales à l'origine des flux les plus significatifs et où les temps de transit des rejets sont assez courts.

Aussi des solutions complémentaires au traitement des effluents peuvent réduire significativement l'impact des rejets et limiter le niveau de rejet après traitement :

- Evacuation des eaux traitées hors du bassin versant en acheminant ces eaux loin du barrage à l'instar des aménagements réalisés pour la retenue de Hammam Grouz.
- Réutilisation des eaux traitées à des fins agricoles ou agro-forestières.
- Aménagement de « zones tampon » en bordure du lac.

IX.5.2 Solutions visant à réduire les impacts de la pollution résiduelle après traitement

Ces solutions complémentaires au traitement des eaux brutes sont envisagées dans l'optique de réduire les apports résiduels dans la retenue et de limiter les niveaux de traitements sur les ouvrages d'épuration et en conséquence sur les coûts des investissements et d'exploitations de ces stations.

a- Dérivation des effluents à l'aval du barrage

Cette solution radicale, nécessitant des travaux de raccordement importants a déjà été mise en œuvre pour la retenue de Hammam Grouz. Un réseau de détournement d'une longueur de 25 km achemine les effluents bruts à l'aval du barrage où ils sont ensuite traités sur une station d'épuration d'une capacité de 45.000 EH (ANBT, BG., 2003). Cette solution serait envisageable pour les agglomérations de Mila, Grarem et Sidi Merouane qui constituent 76% de la population qui entoure la retenue du barrage. Une station d'épuration en amont ou en aval du barrage assurerait alors un traitement de base (MO et MES).

b- la réutilisation des eaux traitées

La réutilisation des eaux, après traitement, est une priorité nationale dans le contexte de la pénurie que connaît le pays. Cette alternative de valorisation a été d'ailleurs retenue pour une partie des effluents traités par les stations d'épuration de Constantine et de Chelgoum Laid.

Il faut également rappeler que la réutilisation à partir d'effluents bruts est une pratique courante dans la zone d'étude. Les agriculteurs dérivant les eaux sur les parcelles à partir des collecteurs ou des oueds. Dans le cas des deux projets d'épuration de Constantine et Chelgoum Laid, les exploitants ont constatés que ces prélèvements avant l'arrivée à la station d'épuration sont significatifs et entraînent une baisse importante et préjudiciable des charges entrantes dans les stations qui fonctionnent en sous charge. A l'avenir, ces pratiques devront être réglementées à la fois pour des questions sanitaires et pour assurer le bon fonctionnement des ouvrages de collecte et d'épuration.

Le niveau de qualité nécessaire pour la valorisation agricole des eaux usées peut être défini en se référant aux recommandations préconisées par l'Organisation Mondiale de la santé (OMS) publiées en 1989.

Dans ce contexte, la réutilisation est indispensable et aurait un double intérêt:

- Valoriser les eaux traitées en les affectant à l'irrigation notamment en période sèche où les besoins agricoles existent et la protection du barrage doit être maximale.
- Limiter les apports de pollution résiduelle sur le lac en période de fragilité du milieu.

Les spécificités à prendre en compte dans la zone périphérique du barrage (Mila, Grarem, etc.) pour les envisager pratiquement sont énumérées ci-dessous:

- L'implantation des futurs sites d'épuration à priori en points bas proches du lac limitera les surfaces agricoles facilement irrigables.
- L'irrigation à partir du lac sera sans doute privilégiée par les utilisateurs.
- Le relief accidenté limitera les possibilités de reprise des eaux traitées.

- Les types de cultures (cultures céréalières et fourragères, arboricultures) permettent une réutilisation avec de contraintes limitées (normes OMS) mais une organisation et une implication des différents acteurs seront essentielles.
- Les projets de lutte contre l'érosion des sols en vue de la protection du barrage contre le transport des sédiments peuvent trouver des synergies pertinentes avec la réutilisation des eaux traitées.

c- Aménagement du milieu récepteur

Une idée actuellement largement mise en avant sur des projets analogues qui consiste à optimiser les phénomènes d'autoépuration en aménageant des zones « tampon » permettant de retenir et d'améliorer l'autoépuration d'une partie de la pollution résiduelle. Et aussi le recalibrage et la protection des oueds demeurent essentielles pour minimiser le transport des sédiments et par conséquent le transport élevé des polluants.

IX.5.3 Sélection des modes d'épuration envisageables

5.3.1 Les différents processus

Il existe toute une panoplie de techniques d'épuration éprouvées correspondant à des besoins et critères spécifiques.

Principalement on distingue les familles de procédés suivants :

1. **Traitement physico-chimique** : Coagulation, floculation de la population par adjonction de produits chimiques.

Ce procédé chimique est coûteux et difficile à réaliser, s'applique plutôt aux eaux résiduaires industrielles ou aux usées contenant en proportion notable des résidus d'usines susceptibles d'entraver le développement des processus biologiques.

2. **Boues activées** : Développement d'une culture bactérienne en suspension dans un bassin compact en fournissant l'oxygène artificiellement.

Cette technique occupe une place très importante dans l'épuration des eaux usées. C'est un mode épuratoire très répandu. Il s'agit donc d'une technique qui n'est d'autre qu'une accélération artificielle des processus d'autoépuration dans les milieux naturels. Au sein d'un courant continu d'eau usée, les bactéries aérobies sont soumises à l'action prolongée d'une forte oxygénation obtenue par une introduction d'air régulièrement répartie dans l'effluent ; ces bactéries absorbent les matières organiques et forment de gros flocons qui décantent, les quels, à son tour, constituent des boues ou des masses floculeuses dites «boues activées» (Stain et Marc., 1995).

3. **Lits bactériens** : Cultures bactériennes fixées sur support poreux à travers lequel circule l'effluent à épurer, l'oxygénation s'effectue naturellement à travers d'ouïes d'aération. L'efficacité d'un lit bactérien dépend des facteurs suivants (les caractéristiques des matériaux servant de support aux bactéries, le volume et la profondeur de lit, la régulation du débit d'alimentation et la concentration des matières organiques nutritives).
4. **Lagunage naturel** : Epuration naturelle dans des bassins étanches assurés grâce à un long temps de séjour.

Dans le cas d'un lagunage naturel, l'apport d'oxygène est assuré par des échanges avec l'atmosphère au niveau du plan d'eau et par les végétaux à chlorophylle.
5. **Lagunage aéré** : Combinaison de la technique rustique du lagunage naturel optimisée par une aération artificielle sur les premières lagunes qui fournit l'oxygénation.
6. **Infiltration – percolation** : Epuration par filtration biologique aérobie sur un milieu granulaire fin ; le sol en place peut être utilisé comme matériau filtrant si les caractéristiques le permettent.

5.3.2 Définition des critères spécifiques et déterminants pour le choix du processus

Les critères déterminants de sélection (selon ANBT, BG., 2003) des filières les mieux adaptées dans la région sont :

1. Contexte géomorphologique de la zone d'étude : Relief très accidenté, forte pente, talwegs, terrains argileux limoneux.
2. Les objectifs de réduction de la pollution et niveau du rejet : abattement des matières organiques, azote et phosphore.
3. La taille unitaire des agglomérations de la zone.
4. Le devenir des sous-produits de l'épuration.
5. La fiabilité et la facilité d'exploitation.

5.3.3 Analyse des solutions envisageables

Le tableau suivant dresse rapidement le positionnement des différentes filières suivant les critères retenus (+ favorable ; - défavorable).

Tableau IX.4 Positionnement des filières selon les critères mentionnés ci-dessus

Filières/critères	Géomorphologie	Niveau de rejet	Taille	Fiabilité	Boues
Traitement physico-chimique	++	-	++	-	--
Boues activées	++	++	++	+	-
Lits bactériens	++	+	-	++	+
Lagunage naturel	---	+	--	+++	++
Lagunage aéré	--	+	-	++	+
Infiltration – percolation	---	+	-	+	+

- **Traitement physico-chimique** : cette solution ne répondrait que partiellement au niveau du rejet attendu sur l'azote et la matière organique. De plus, cette technique est coûteuse en exploitation et génère des boues non stabilisées en grande quantité. Cette solution est en évidence exclue.
- **Lagunage** : la topographie de la zone exclue quasiment dans tous les cas, les procédés extensifs de type lagunage naturel. Pour certaines agglomérations, la solution lagunage aéré serait envisageable notamment sur le secteur ouest (Ferdjioua et Rouached) mais au détriment des surfaces agricoles de qualité. Les niveaux de rejets seraient atteints pour les matières organiques (MO) mais les abattements sur l'azote (N) et le phosphore (P) seraient partiels.
- **Infiltration – percolation** : la topographie, la nature des sols argileux de la région exclut cette technique.
- **Lits bactériens** : Cette technique, précédée d'une décantation primaire (décanteur digesteur), permet d'atteindre des niveaux de rejets satisfaisants sur la MO mais limitée sur N et P. Ces stations sont généralement retenues pour des tailles < 5000 EH et reconnues pour leur facilité d'exploitation. Elle peut être envisagée pour les agglomérations secondaires.
- **Boues activées** : Cette technique, la plus répandue dans le monde et notamment en Algérie. Cette technique répond au mieux aux critères de sélection :

L'implantation est facilement envisageable mais des terrassements importants sont à prévoir notamment en cas de filière boue de type lits de séchage consommatrice de terrain.

Il n'y a pas de limite de la taille d'agglomération. Elle permet d'envisager pour les filières à faibles charges, le traitement de l'azote et du phosphore.

Nous retenirons donc deux filières possibles pour la zone d'étude :

- Boues activées sans limite de capacité offrant les possibilités de traitement de N et de P
- Lagunage aéré limité en capacité pour des questions de place disponible et topographie appropriée.

CONCLUSION

L'intégration des préoccupations sociologiques et environnementales dans la conception des barrages est un phénomène récent. Elle est prise en compte au niveau de l'étude d'impact, procédure au cours de laquelle le projet d'étude de barrage est accompagnée d'une enquête permettant d'en apprécier les conséquences du projet sur le milieu naturel et sur le développement socio-économique. A cela deux raisons essentielles, d'une part une évolution du comportement social des habitants vis-à-vis de la protection de l'environnement et d'autre part une réglementation sévère sur l'eau et la pollution. Le transfert de Beni-Haroun a pour objectif de transférer un volume d'eau annuel de 504 Hm³/an (dont 435 Hm³ en volume propre et 69 Hm³ du transfert du barrage de Boussiaba). Ces ressources sont mobilisées par le barrage de Beni-Haroun vers les six wilayas de Batna, Khenchela, Mila, Oum-El-Bouahi, Constantine et Jijel (Région de Mila) pour satisfaire leurs besoins en eau potable et industriel à l'horizon 2030.

Les divers avantages que présente le barrage de Beni-Haroun par rapport aux autres barrages, compte tenu de sa forte capacité, celui-ci pourrait non seulement combler le déficit en eau des régions de l'Est Algérien (environ de 4 millions habitants) à long terme mais aussi permettre d'irriguer près de 42.000 ha de terres avec un débit de 292 Hm³/an.

Ce projet constitue un grand investissement dans la région. Ils devraient permettre le développement d'une agriculture intensive (culture maraichères, fourrages intensives, cultures industrielles) dans les hautes plaines vouées jusqu'ici à une céréaliculture sèche à faible rendement.

L'effet structurant des grands barrages-réservoirs à l'échelle régionale est incontestable. Il faut être cependant, prudent quant aux répercussions que peuvent avoir ces macro-aménagements sur le plan tant physique que social et économique.

L'étude des impacts du transfert hydraulique de Beni-Haroun nécessite les moyens et les expertises scientifiques mobilisées pour prédire les évolutions actuelles, ce qui nécessite une stratégie adaptative efficace.

CONCLUSION GENERALE

Par ce travail, nous pensons avoir contribué à la connaissance des problèmes du transport solide en suspension, la pollution des eaux, d'un grand bassin versant kébir-Rhumel du Nord-Est de l'Algérie dont l'originalité physique réside dans la présence de massifs montagneux riches en eau à l'aval alors que la partie amont correspond à des hautes plaines semi-arides à faibles écoulement de surface.

Dans ce travail on parvient aux conclusions suivantes.

- La synthèse bibliographique qui traite les différents aspects relatifs au transport solide en suspension et en charriage et la relation entre le transport des sédiments et la pollution des eaux. Beaucoup de travaux sur le transport solide et l'envasement des barrages ont montré la gravité de ce phénomène en Algérie et dans le monde et leurs conséquences sur les retenues et les digues des barrages. La sédimentation des barrages dans les pays de l'Afrique du nord est très élevée et même spectaculaire. La connaissance des processus de transport solide est difficile, il est considéré comme un phénomène complexe influencé par les caractéristiques lithologiques et hydrologiques (pluviométrique, couvert végétal, pente, température etc.). Les critères d'apparition de ce phénomène, c'est la forme critique de courant susceptible d'amorcer le transport et la tension tangentielle critique qui provoque le début d'entraînement. Il existe plusieurs formules d'évaluation du transport solide, mais leur utilisation nécessite une grande précision et précautions.

- Les conséquences de l'érosion, du transport solide et de la pollution dans les cours d'eau et les ouvrages hydrauliques sont graves et inquiétantes, c'est pour cela, il est indispensable d'agir sérieusement afin de rétrécir ces phénomènes.

- Dans le domaine du transport solide en suspension, le problème demeure dans la relation concentration-débit liquide ou débit solide-débit liquide. Différents approches d'estimations ont été mentionnées se basant toujours sur le couple débits liquides-débits solides en vue de l'établissement des modèles de régression pour différentes échelles temporelles.

- La plupart des polluants rejetés en solution ou en suspension dans les cours d'eau, que ce soit des polluants chimiques, ou organiques, peuvent se fixer sur les sédiments très fins dispersés dans les eaux et être entraînés avec eux sur de grandes distances et venir se déposer dans les retenues des barrages ou d'autres secteurs privilégiés. La surveillance de l'environnement aquatique par la mesure de la pollution dans les eaux de surface et les sédiments fins, suppose la connaissance précise des mécanismes hydrosédimentaires, la circulation des sédiments-polluants dans cours d'eau du bassin et la localisation de leurs zones d'accumulation.

C'est à partir de ces informations que les lieux et les moments des prélèvements peuvent être décidés, en utilisant des moyens appropriés aux circonstances et aux objectifs. C'est par un rapprochement entre les différentes disciplines que le contrôle nécessaire du milieu aquatique naturel pourra être très fortement amélioré.

C'est ainsi que les zones à surveiller pourraient être plus efficacement sélectionnées, et le nombre d'échantillons à analyser sera diminué en prélevant des échantillons plus judicieusement choisis. La validité de mesures en serait renforcée à un moindre coût.

L'objectif principal de l'étude élaborée étant de comprendre et quantifier le transport de sédiments en suspension (période 79-91) dans le bassin versant Kébir-Rhumel et de contrôler la qualité des eaux de leurs cours d'eau basant sur des analyses dans quatre stations hydrométriques durant une période de vingt ans (1984-2005) et par conséquent leur effet sur la qualité des eaux du barrage de Beni-Haroun. Parmi les objectifs aussi, l'impact du grand transfert hydraulique de Beni-Haroun sur les six wilayates intérieures de l'Est Algérien.

Dans ce travail nous avons procédé à l'analyse détaillée des paramètres suivants :

CII. Caractéristiques du Barrage (Caractéristiques de l'Aménagement)

La description du grand projet du transfert a été faite en montrant les différentes caractéristiques du barrage, caractéristiques de la retenue, Type de barrages et les ouvrages annexes. La construction de cet ouvrage, qui est actuellement le plus grand barrage en Algérie. Il permet de mobiliser les eaux de l'oued Kébir-Rhumel qui est la principale ressource hydrique de la région. La retenue est créée par la réalisation du barrage de Beni-Haroun dont la hauteur est proche de 120m. La retenue est caractérisée par une surface de 3700ha à la cote 200m, Le volume régularisé est de 435 Hm³. Le projet est implanté dans une région dont le cadre géologique est caractérisé par la présence de nappes de charriage. Ces nappes de charriage constituent de vastes ensembles de terrains d'âge antécambrien à miocène inférieur qui se sont déplacés sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètre et qui se sont superposés mécaniquement suivant des modalités variées et complexes.

CIII. Caractéristiques du bassin versant Kébir-Rhumel

Une vaste superficie du bassin Kébir-Rhumel de l'ordre de 8825 Km² s'étend dans l'Est Algérien à une forme allongée, un relief faible et un temps de concentration de l'ordre de 18 heures. Des ensembles morphostructuraux bien tranchés, des caractères morphométriques déterminant des différences sensibles dans l'aptitude des terrains au ruissellement, des facteurs lithologiques donnant lieu à des possibilités d'infiltration très nuancés sur le plan géographique, un climat méditerranéen à forte variabilité spatiale et surtout temporelle, et marqué par l'influence élevée de l'évapotranspiration, un couvert végétal très discontinu, essentiellement dans l'espace et secondairement dans le temps.

Telles sont les principales conditions physico-géographiques caractérisant le bassin Kébir-Rhumel et dont la combinaison est déterminante dans le comportement hydrologiques des diverses unités du bassin.

CIV. La pollution des eaux dans le bassin

L'objectif aussi de cette analyse est le contrôle des paramètres de pollutions des cours d'eau du bassin Kébir-Rhumel pour une période de vingt ans (1984 - 2005) et l'analyse physico – chimique, organoleptique et bactériologique des eaux de la retenue du barrage de Beni-Haroun durant l'année 2006-2007.

Certains paramètres analysés sont en relation avec la structure naturelle des eaux tels que le pH, la conductivité, la turbidité, les ions chlorures, les ions sulfates, etc. Et d'autres concernant les substances indésirables tels que la teneur en nitrates (NO_3^-), en phosphates (PO_4^-), qui sont les principaux facteurs responsables de la prolifération des algues et l'accélération du phénomène d'eutrophisation.

Les paramètres indicateurs de pollution tels que, (le DCO, le DBO_5 , l' O_2 dissous et l' O_2 saturé.) présentent des concentrations inquiétantes en particulier dans la saison estivale. La turbidité et les matières en suspension présentent ainsi des concentrations élevées et indiquent la dégradation de la qualité des eaux en particulier la retenue du barrage.

L'analyse élaborée indique la contamination chimique et microbiologique (Escherichia-collie, streptocoques, les germes pathogène), des eaux des cours d'eau du bassin et de la retenue du barrage, ce qui favorise la prolifération des algues et accélère le phénomène d'eutrophisation. La mauvaise qualité des eaux du barrage de Beni-Haroun et des cours d'eau du bassin Kébir-Rhumel montre la saturation de l'autoépuration des oueds du bassin d'étude par une pollution excessive.

On peut dire qu'une meilleure connaissance de l'importance des différentes sources de pollution et leurs impacts sur l'écosystème aquatique est indispensable à la bonne gestion de l'eutrophisation et des autres formes de pollution des lacs et des réservoirs.

CV. L'analyse des pluies dans le bassin

L'analyse des pluies dans le bassin versant Kébir-Rhumel montre que le coefficient de Variation maximal ne dépasse pas le 50 % pour l'étude de la précipitation annuelle et les coefficients d'aplatissement sont positifs dans la majorité des stations étudiées.

L'analyse de la corrélation montre une régionalisation des précipitations au niveau de notre bassin d'étude. Les stations pluviométriques présentées dans cette étude, s'organisent en quatre groupes avec des précipitations moyennes variant de 300 à 1300mm. L'analyse d'ACP a permis de dégager la station représentative du bassin versant qui est la station de Constantine.

A l'échelle mensuelle, les précipitations s'ajustent mieux à la loi log normal et l'analyse par ACP des précipitations a montré que presque toutes les variables (actives) sont corrélées fortement et positivement avec la première composante durant toute l'année sauf la saison d'été. Les précipitations se répartissent mensuellement

d'une façon presque constante de Septembre au Mai, succèdent ensuite une saison sèche de Juin à Août.

D'un point de vu spatial, une différenciation nord-sud dans les composantes supérieures est observée, les plus fortes corrélations avec le vecteur (C_1) se rencontrent dans la zone nord du domaine d'étude. Par contre allant au sud, le coefficient de corrélation avec C_1 diminue.

A l'échelle journalière, l'analyse statistique des précipitations maximales journalières montre de faibles coefficients de variation dans les stations de références. Dans certaines stations étudiées, une faible dispersion des données est observée avec des écarts types qui dépasse le 12.

CVI. L'analyse des écoulements dans le bassin

Le sous-équipement du réseau du bassin versant Kébir-Rhumel avec des séries d'observations hydrométriques n'ont pas rendu possible l'approfondissement de l'étude de certains mécanismes hydrologiques particulièrement liés aux débits extrêmes.

L'interprétation statistique et graphique des données nous a permis de saisir les variations spatiales de l'écoulement superficiel en liaison avec les données pluviométriques et physiographiques du bassin de même sa forte variabilité temporelle. Le calcul des bilans hydrologiques inter annuel (1972/73–2000/01) fait ressortir la faiblesse du coefficient d'écoulement, notamment au niveau des stations Grarem et El Ancer avec des valeurs qui correspondent respectivement à (6% et 7%) et au contraire, l'importance du coefficient d'écoulement au niveau de la station Tassaadane (28%) serait peut être de faibles perméabilités des affleurements géologiques et à la Kartification plus développée du système souterrain permettant un déstockage plus rapide qui soutient l'écoulement superficiel.

L'analyse des variations saisonnières des débits a permis de dégager, spécialement à partir des coefficients mensuels, les nuances des régimes hydrologiques à l'alimentation essentiellement pluviale liés du reste aux régimes climatiques mais plus ou moins modifiés par le rôle de la lithologie. Ce qui fait ressortir la forte opposition entre l'abondance hivernale et l'indigence estivale des cours d'eau.

L'étude des formes extrêmes de l'écoulement, axée tout d'abord sur les crues, a mis successivement le caractère torrentiel des crues dû principalement à la forte intensité pluviométrique. La période d'observation des débits instantanés permet de distinguer les périodes des crues intenses et qui sont concentrées durant la période (Octobre à Mai). Ces crues sont concentrées généralement lors des saisons automnales, hivernales et printanières.

CVII. Analyse du transport solide en suspension

La saison estivale enregistre rarement des échantillons par rapport à d'autres périodes de l'année. Les faibles apports enregistrés généralement durant la période estivale peuvent avoir une influence sur le bilan total des apports annuels.

En se basant sur les mesures continues des concentrations de sédiments en suspension au droit de la station d'El Ancer. Nous disposons d'une série moyenne de mesure, environ de 2030 valeur de débit liquide instantanés Q_i (m^3/s), et des concentrations de sédiments en suspension C (g/l) allant du Septembre 1979 jusqu'à Août 1990. Les données disponibles ont été sélectionnées pour la recherche des modèles mathématiques entre le débit solide et le débit liquide $Q_s = f(Q_l)$.

Les représentations graphiques des relations obtenues entre débit liquide et débit solide à l'échelle annuelle et mensuelle pour la station hydrométrique étudiée (El Ancer) montrent la tendance exponentielle. Les coefficients de corrélation à l'échelle annuelle varient entre (0,51 et 0,95) par contre à l'échelle mensuelle, seulement la période (Décembre-Avril) présentent de bonnes corrélations comprises entre (0,6 et 0,84).

Différents travaux du transport solide en Algérie montrent que l'échelle saisonnière est très représentative du phénomène. D'autre part, l'évènement averse-crue s'est avéré l'unité hydrologique la plus adéquate pour les analyses en relation avec le transport solide.

La relation entre le débit liquide et le débit solide le long de l'oued Kébir-Rhumel montre la bonne corrélation linéaire obtenue pendant la saison sèche et humide.

La représentation de l'ensemble des données à l'échelle de crue a été présentée séparément de la montée et la décrue des hydrogrammes des crues. Les résultats observés présentent l'excellente tendance exponentielle entre les débits liquides (Q_l) et les débits solides.

Il faut noter que les faibles corrélations montrées entre le débit liquide et le débit solide pendant la saison d'inondation peuvent résulter de la pente brusquement faible et les vitesses faibles dans certains tronçons de cours d'eau, ce qui ne permet pas de transporter les sédiments en suspension en aval du bassin.

Les données des crues dans cette station montrent que des pics de concentration dans la majorité des crues sont retardés d'une moyenne d'une demi-journée avant la pointe des débits d'écoulement en particulier en saison hivernale. L'entraînement et le transport limités de sédiments précédemment déposés dans les lits larges et peu profonds (cas des oueds Algériens) et les caractéristiques de sédiments au niveau des lits et des rives des oueds n'arrive pas au bon moment à la station de jaugeage même l'écoulement atteint une pointe.

Les variations spatiales de la charge de sédiments le long des cours d'eau du bassin montrent une tendance vis-à-vis au débit correspond. La charge moyenne annuelle de sédiments atteinte une valeur maximale de l'ordre de 20 million de tonnes. Pour le cas du modèle mensuel, la charge moyenne annuelle est estimée à environ 7,4 million de tonnes et la dégradation spécifique moyenne dans le bassin est de l'ordre de 850 t/km²/an.

CVIII. Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation Concentration -Débit

En raison de la proximité de la source de sédiments par rapport au cours d'eau, les caractéristiques lithologiques, en particulier des zones les plus proche du barrage de Beni-Haroun (terres sensibles et instables ; Région de Mila), et à partir des données de mesures de la station hydrométrique d'El Ancer à l'aval du bassin kébir-Rhumel, le modèle d'hystérésis observé indique différentes formes; formes dans le sens des aiguilles d'une montre, sens contraire des aiguilles d'une montre et la forme de huit. Chacun de ses modèles correspond à un ensemble différent d'écoulement et des conditions de dégagement des sédiments. Ces conditions ont un certains effets sur la forme des boucles d'hystérésis. La forme de la classe II (sens contraire des aiguilles d'une montre est obtenue dans plusieurs événements des crues étudiées. Ces résultats montrent également la prédominance de sédiments au niveau des rives du cours d'eau principaux et les versants par rapport à la vallée du bassin Kébir-Rhumel. Certaines complications du modèle sont observées en raison de la variation des précipitations et des débits de pointe lors des crues. L'augmentation rapide des sédiments dans la vallée et les versants du bassin sont favorisées par les caractéristiques lithologiques et hydrologiques irrégulières du bassin Kébir Rhumel. L'analyse des classes d'hystérésis montre aussi l'effet saisonnier relatif à la forme de la boucle obtenue, la saison d'Automne présente une hétérogénéité de classes à cause de l'irrégularité des précipitations et des régimes hydrologiques du bassin et l'étalement de la période estivale.

On note le décalage observée dans les crues étudiées entre le temps de pic de débit et le pic de concentration. Ce décalage montre le retard de la réponse hydrosédimentaire dans le bassin kébir-Rhumel par rapport à l'onde de la crue. Ce décalage peut être se produire, en fonction de la répartition spatiale des pluies du bassin, de la localisation des zones productrices de matériaux (éloignement par rapport à la station de mesure) et de la taille du bassin versant.

Ces modèles d'hystérésis ne sont pas des indicateurs définitifs de la source de sédiments, à moins que l'information concernant l'érosion, la pente de ravine en amont de la station El Ancer soit disponible. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été présentées pour déterminer la source de sédiments dans le bassin, en utilisant des caractéristiques des sédiments telles que la dimension de la particule, la couleur du sédiment ou la composition minéralogique. Le modèle temporel de débit solide Q_s à l'aval du bassin est étroitement lié au débit d'écoulement du cours d'eau. Les estimations des débits solides de cours d'eau principal du bassin versant Kébir-

Rhumel confirme la gravité du taux d'érosion au niveau de ce bassin (environ 7.4 millions de tonnes/km.an, ce qui provoque, l'envasement rapide du plus grands barrage en Algérie (le barrage de Beni-Haroun).

CIX. Impact du Système de Transfert Hydraulique du Barrage de Beni-Haroun sur la Région Est de l'Algérie

L'intégration des préoccupations sociologiques et environnementales dans la conception des barrages est un phénomène récent. Elle est prise en compte au niveau de l'étude d'impact, procédure au cours de la quelle le projet d'étude de barrage est accompagnée d'une enquête permettant d'en apprécier les conséquences du projet sur le milieu naturel et sur le développement socio-économique. A cela deux raisons essentielles, d'une part une évolution du comportement social des habitants vis-à-vis de la protection environnementale et d'autre part une réglementation sévère sur l'eau et la pollution. Le transfert de Beni-Haroun a pour objectif de transférer un volume d'eau annuel de 504 Hm³/an (dont 435 Hm³ en volume propre et 69 Hm³ du transfert du barrage de Boussiaba). Ces ressources sont mobilisées par Beni-Haroun vers les six wilayates intérieures (Batna, Khenchela, Mila, Oum-El-Bouahi, Constantine et Jijel (Région de Mila)) pour satisfaire leurs besoins en eau potable et industriel à l'horizon 2030.

Les divers avantages que présente le barrage de Beni-Haroun par rapport aux autres barrages. Compte tenu de sa forte capacité, celui-ci pourrait non seulement combler le déficit en eau des régions de l'Est Algérien (environ deux millions habitants) à long terme mais aussi permettre d'irriguer près de 42.000 ha de terres.

Ce projet représente un grand investissement dans la région, il permet le développement d'une agriculture intensive dans les hautes plaines vouées jusqu'ici à une céréaliculture sèche à faible rendement.

L'effet structurant des grands barrages-réservoirs à l'échelle régionale est incontestable. Il faut être, cependant, prudent quant aux répercussions que peuvent avoir ces macro-aménagements sur le plan tant physique que social et économique.

Nous pensons que les résultats obtenus, doivent être améliorés tout en se basant sur les nouvelles techniques de mesure et d'analyse et aussi en augmentant la taille des séries de données disponibles. Nous recommandons :

- D'étudier le processus du transport des sédiments et la détermination des sources de sédiments par plusieurs méthodes, en utilisant des caractéristiques de sédiment telles que ; la dimension de la particule, la couleur du sédiment ou la composition minéralogique.
- Déterminer les formes d'érosion dominantes dans ce bassin.
- Déterminer les taux d'érosion des berges des cours d'eau et de la vallée du bassin à l'échelle expérimentale.

- Une estimation par procédé expérimental du transport solide par charriage.
- Quantifier d'une façon judicieuse, les différents polluants dans le bassin d'étude et avoir la connaissance précise des mécanismes hydrosédimentaires, et de la circulation des sédiments et les polluants dans les cours d'eau du bassin et de la localisation des zones d'accumulation.
- les zones à surveiller pourraient être plus efficacement sélectionnées et le nombre d'échantillons à analyser diminué, en prélevant des échantillons plus judicieusement choisis. La validité des mesures en serait renforcée à un moindre coût.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbot, J.E., Francis, J.R.D, 1977. Saltation and suspension trajectories of solids grains in a water stream. Philos. Trans. Roy. Soc. Landon, Ser. A., 284, pp225-254.

Acquers, P., White, W.R, 1973 Sediment transport: New approach and analysis. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 99, H11, pp2041-2060

Agence Nationale des Barrages et de Transferts .1999. Transfert de Beni Haroun. Rapport de synthèse, vol. 1, Tractebel Engineering.

Agence Nationale des Barrage et de Transferts .2003. Etude du schéma collecte et de traitement des eaux résiduaires des centres de la Wilaya de Mila en vue de la protection des eaux du barrage de Béni-Haroun (mission A). Rapport du BG, 46p.

Agence Nationale des Barrages et de Transferts, Juin 2002. Barrage de Beni-Haroun sur l'Oued Kébir, Algérie, Monographie, Volume01, Textes, Tractebel Engineering, 104p.

Agence Nationale des Barrage et de Transferts, Décembre 2000. Transfert de Beni-Haroun, Etude de Faisabilité, Analyse Financière et Economique, Algérie, Tractebel Engineering, 20p.

Agence Nationale des Barrages et de Transferts, Octobre 2008. Alimentation en eau potable des villes d'Oum El Bouaghi, Ain Beida, Ain M'lila, Ain Fakroun et Ain Kercha à partir du barrage d'Ourkiss (W. d'Oum El Bouaghi). Mission3 : Avant projet détaillé, Algérie, Brli-Tassili Engineering, 136p.

Agence Nationales des Bassins Hydrographiques Constantinois- Sybousse-Mellegue (1999). La pollution des eaux superficielles. Cahier de l'Agence N°03, 17p.

Agence Nationales des Bassins Hydrographiques Constantinois- Sybousse-Mellegue (1999). Le bassin Kébir Rhumel. Cahier de l'Agence N°02, 20p.

Agence Nationales des Bassins Hydrographiques Constantinois- Sybousse-Mellegue (2002). Le Bassin de Seybousse. Actualisation, Cahier N° 07, 31pp

Agence Nationales des Bassins Hydrographiques Constantinois- Sybousse-Mellegue (2004). Le bassin Kébir Rhumel. Cahier de l'Agence N°08, 44p.

Agence Nationales des Bassins Hydrographiques Constantinois- Sybousse-Mellegue (2005). La Qualité des eaux souterraines dans le bassin hydrographique Constantinois – seybousse–Mellegue (1998-2003). 60p

Antonelli, C, 1999.Quantification de la charge solide du grands Rhône et du petit Rhône à proximité de leur embouchure. Mémoire de DEA-Université Aix-Marseille I, 86 p.

Antonelli, C, 2002. Flux sédimentaire et morphogénèse récente dans le chenal du Rhône aval, Thèse de Doctorat, Université de Provence, Marseille, 266p

Arabi, M, 1991. Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu méditerranéen à Media, Algérie, Université de Grenoble III. 276p.

Arnaud-Fassetta, G., 1996. Les inondites rhodaniennes d'octobre 1993 et janvier 1994 en milieu fluvio-deltaïque. L'exemple du petit Rhône. Quaternaire. 7, 2-3, pp139-153.

Arnborg, L., Walker, H. J., Peippo, J. 1967. Suspended load in the Colville River, Alaska. *Geogr. Ann.* 49A, pp131–144.

ASCE, 1975. Sedimentation engineering: Manual number 54. New York, American Society of Civil Engineers.

Asselman, N.E.M., 1999. Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine. *Hydrological Processes*, 13, pp1437-1450.

Bagnold, R.A., 1956. Flow of cohesionless grains in fluids. *Proc. Roy. Soc, London, Phil.Trans., Series Q*, volume 249, number 964.

Bagnold, R.A., 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. Washington, U.S. Geological survey. Paper n°422-1.

Bagnold, R.A., 1980. An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural river. *Proceeding of the Royal Society of London*. A3722., pp453-473.

Bakre, M., Bethemont, J., Commere, R., Vant, A., 1980. L'Égypte et le barrage d'Assouan. Saint-Étienne, Presses de L'université, 190p.

Balayn, Pierre. 2001. Contribution à la modélisation de l'évolution morphologique de cours d'eau aménagés lors de crues. Thèse de Doctorat. Université Claude Bernard-Lyon1. 122p

Bassin Rhone–Méditerranée–Corse. 2002. Pollution toxique et écotoxicologie: notion de base, guide technique N° 7, 21-30pp.

Baulig H, 1959. La morphométrie. *Annuaire. Géographie.*, Paris, N° 365, pp385-408

Beschta, R.L., 1987. Conceptual models of sediment transport in streams. In: Thorne, C.R., Bathurst, J.C., Hey, R.D. (Eds.), *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*. Wiley, New York, pp387– 419

Belaud, D., Paquier, A, 2000, Estimation of the total sediment discharge in natural stream flows using a depth-integrated sampler. *Aquatic Sciences*, 62, pp39-53

Benkhaled, A, 2001. Contribution à l'étude du transport solide en suspension, Bassin de oued Ouahrane Bassin Hydrographique Chellif-Zahrez. Thèses de doctorat. Université des sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, 175p

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* V°16. pp333-356

Benkhaled, A ; Remini B. 2003. Temporal variability of sediment concentration and hysteresis phenomena in the Wadi Wahrane basin. Algeria. *Hydrological Sciences Journal*. N° 48(2). pp243-255

Bethemont, J., 2000. Les grands fleuves. entre nature et société, 2^{ème} Edition, ARMANDCOLIN, 251p

Bethmon, J., 1986. Acteurs et stratégies de l'eau dans la vallée du Sénégal. *Revue de Géographie de Lyon*, Vol1, pp63-78.

Bogardi, J. L. 1974. Sediment transport in alluvial streams. *International courses in Hydrology*. Budapest, Academiai Kiado Press. 812p.

Borgen, J., 1980. The hysteresis effect of sediment transport systems. *Norsk Geogr. Tidssk.*, V°34, pp45-54.

Bouanani, Abderrazak., 2004 .Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna. (NW – Algérie). Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. 250p

Boulvain, F., 2004. Une introduction aux processus sédimentaires. Cours on ligne Université de Liège. 63p3.

Bouvard, M. 2004. Transport des sédiments dans les ouvrages hydrauliques. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 194p.

Bowes, M.J., House, W.A., Hodgkinson, R.A. 2003. Phosphorus dynamics along a river continuum, *The Science of the Environment*, Vol.313, pp199-212.

Bravard, J. P., Petit, F., 1997. Les Cours d'eau, Dynamique du système fluvial. Ed. Armand Colin/Masson, Paris, 221p.

Bruschin, J. 1987. Envasement et chasses dans la retenue de Vrbois, de 1942 à 1985. ingénieurs et architectes suisses. 1987. Vol18. pp208-286.

Caplancq, Jacques., Décamps, Henri. 2002. L'eutrophisation des eaux continentales : questions à propos d'un processus complexe, Natures Sciences Sociétés, Vol 10, N°2 pp6-17.

Carbonneau, P. E., Bergeron, N.E., 2000, The effect of bedload transport on mean and turbulent properties. *Geomorphology*, 35, pp267-278.

Carling, P.A., Williams, J.J., Goltz, E., Kelsey, A.D., 2000. The morphodynamics of fluvial sand bars in the River Rhine, near Mainz, Germany. II. Hydrodynamics and sediment transport. *Sedimentology*, 47, pp253-278.

Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N., Smith, V.H. 1998. non point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol Appl* , Vol 08 N°03, pp547-558

Carson, M.A., Taylor, C.U., Grey, B.J., 1973. Sediment production in a small Appalachian watershed during spring runoff : the Eaton Basin, 1970-1972 *Can. J. Earth Sci.*, V°10, pp1709-1734.

Chaumont M. et Paquin C., 1971. Carte pluviométrique de l'Algérie, éch. 1/50.0000, 4 feuilles + notice. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord. Algérie.

Chen, Z., Li, J., Shen, H., Zhanghua, W., 2001. Yangtze river of China : Hystorical analysis of discharge variability and sediment flux" *Geomorphology* V°41, pp77-91.

Colby, B. R., 1956. The relationship of sediment discharge to streamflow. U.S. Geological Survey Open File Report. 156p.

Coque, R. 1998. Géomorphologie. Armand Colin. Paris, France. 6^{ème} Edition. 503p.

Corbonnois, J., 1991., Crue et transport solides dans le ruisseau de Vezon (Lorraine). *Moselle*, XVIII, pp161-188

Corbonnois, J., 1998, Les facteurs de la variation spatiale des transport solides et dissous, exemple de trois bassins versants en Lorraine. *Géomorphologie:relief, processus, environnement*, 4, pp313-330

Cordova. J. R, Gonzalez. M., 1997. Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements" *Sol Technology* V°11, pp57-65.

Cosandey, C., Robinson, M. 2001. Hydrologie continentale Ed Paris Colin coll U. 22 tab. 128 fig.

Deceballos, B.S.O., Konig, A., Deoliveira, J.F 1998. Dam reservoir eutrophication: A simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation, 'Water Research , Vol.32 N°. 11, pp3477-3483.

Deboer, D.H., Campbell, I.A., 1989. Spatial scale dependence of sediment dynamics in a semi-arid badland drainage basin. *Catena*, V°16, pp277-290.

Dodds, W.K., Whiles, M.R. 2004. Quality and quantity of suspended sediment particles in rivers: continent scale patterns in the United States. *Environmental management*, 33, pp355-367.

Demmak, A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et du transport solide en Algérie Septentrionale. Thèse Université pierre et Marie Curie. Paris. 210p

Descy, J.P., Lambinon, J., 1984. L'écosystème fluvial In *Sediment and pollution in wterways general considerations IAEA*, Vienna, 1984, 181p.

DiCenzo, D. Peter., Luk, L.Shiu., 1997. Gull erosion and sediment transport un a small sustropical catchement, Sputh China” *Catena* V°29, pp161-176.

Dinhaart, R.L. 1992. Sediment data for streams near Mount St. Helens, water years 1984-1987. *Us Geol. Survey open file Report 91-219*. vol. 3.

Dinehart, R.L. 2002. Bedform movement recorded by sequential single-beam surveys in tidal rivers. *Journal of Hydrology*, 258, pp25-39.

DEMRRH. Direction des Etudes de Milieu et de Recherche Hydraulique, Algérie, 1974 Etude Hydrologique de l'Aménagement Hydraulique de L'Oued Kébir Est et Du Lac Oubeika. Romantcouk, 102p

Dodds, W. K., Whiles, M. 2004. Quality and quantity of suspended particles in rivers: continental-scale patterns in the United States. *Environ. Manage.* 33(3), pp355–367.

Dorioz, J. M., Pelletier, J. P et Benoit, P., 1998. Physico-chemical properties and bioavlablity of particulate of lake Geneva (France). *Water Research*, Vol.32, N°.02, pp275-286.

Doyle, M.W., Shields, F.D. Jr., 2000. Incorporation of bed texture into a channel evolution model. *Geomorphology*, 34, pp291-309

Du, Boys, 1879. Le Rhône et les rivières à lit affouillables annales des ponts et chaussées, séries 5. Vol18, France

Duda, A. 1993. Addressing non point sources of water-pollution must become an international priority. Water Sci technol, Vol.28, pp03-05.

Durant, D. 1952. Le Sud-Ouest de la petite Kabylie. XIXe congrès géologie interne, Algérie, Monographie régionales, 1^{ère} série. Algérie, N°10, 62p

Einstein, H.A. 1944. Bed load transportation in mountain creek. Washington D. C., U.S. Department Of Agriculture.

Einsten, H.A. 1950. The bed load function for sediment transportation in open flows". Unites States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (USA, D.C), Technical Bulletin n°1026

Emmet, W.W. 1984. A field calibration of the sediment transport model for straight alluvial channels. Nordic Hydrology. 7. pp293-306,

Emmett, W. W. 1970. The hydraulics of overland flow. *US Geol. Survey Prof. Paper* 662A.

Englund, F., Hansen, E, 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams, Teknisk forlag, Copenhagen, Danemark,

Engelund, F., Fredsoe, J., 1976. A sediment transport model for straight alluvial channels. Nordic Hydrology, 7, pp293-306.

Ergenzinger, P., Conrady, J., 1982. A new tracer technique for measuring bedload in naturel channels, Catena, 9, pp77-80.

Evans, D. Jet., Johnes, P. J. 2004. Physico-chemical controls on Phosphorus cycling in two lowland strems. Part 1, Science of Total Environment, Vol.329, pp145-163.

Fernandez, Luques. R., Van, Beek. R., 1976. Erosion and transport of bed-load sediment. Journal of hydraulic Research, 14, 2, pp127-144

Fort, M., Arnaud-Fassetta, G., Cossard, B., Bourbon, C., Debail, B., Einhorn, B. 2002. Impacts et signification hydromorphologique de la crue de Guil de Juin 2002 (Haut Queiras). Proceedings of Geomorphological:from expert opinion to modelling, pp159-166, European Center on Geomorphological Hazards, Strasbourg, France.

Frank, Rejsk. 2002. Analyse des eaux, Aspects réglementaire et techniques. Série Sciences et Technique de l'Environnement, Edition Scérène, 361p.

- Frenette, R. 1996. Modélisation tridimensionnelle par éléments finis du transport des sédiments dans les cours d'eau. Thèse Université Laval, Quebec, 243p.
- Gaboury, B., Edward, X.Y.W., William, C.Nieder., Michael, L., Vincent, T. B. 1999. Sources and Deposition in History of Heavy Metal Contamination and Sediment Tivoli South Bay, Hudson River, New York. *Estuaries* Vol. 22, No. 2A, pp167-178.
- Garcia, C., Laronne, J.B., Sala, M. 2000. Continuous monitoring of bed load flux in a mountain gravel-bed river. *Geomorphology*, 34, pp23-31.
- Gaussan, H., Bagnouls, M.F., 1948. Carte des précipitations de l'Algérie (moyenne 1913-1947), éch. 1/500.000, 4 feuilles, I.G.N., Paris
- Gilbert, R., 1975. Sedimentation in Lilloet Lake, British Colombia. *Can J. Earth Scis.* 12, pp 1697-1711.
- Golz, E. 1990. Suspended sediment and bed load problems of the upper Rhine. *Catena*, 17, pp127-140.
- Gomez, B., Mertes, L.A.K., Phillips, J.P., Macgilliam, F.J., James, L. A. 1993. Sediment characteristics of an extrem flood: 1993 upper Mississippi river valley, *Geology*, 23, 11, pp963-966.
- Goudie, A. S. 1986. The integration of human and physical geography, *Transactions of the Institute of British Geographers, New Series*, 11(4): pp454-458.
- Graf, W.H., 1971, *Hydraulics of sediment transport*. New York, McGraw-Hill.
- Graf, W.H., 1996. *Hydraulique fluvial. Ecoulement non permanent et phénomènes de transport*. Tome 2. V°16. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.p.
- Grass, A.J. 1970., Initial instability of fine sand bed, *Journal of Civil Division, Proc.A.S.C.E*, Paper 7139.
- Gray, J.R., Glysson, G.D. 2000. Comparability of suspended sediment concentration and total suspended solids data. USGS - Water Ressources investigation report 00-4191.
- Gray, J.R., Glysson, G.D. 2002. Proceedings of the Fifth Interagency Workshop on turbidity and other sediment surrogates. Reno, May 2002
- Green T. R., Beavism S.G., Dietrich C.R., Jakeman, A.J. 1999. Relating stream-bank erosion to in-stream transport of suspended sediment. *Hydrological processes*, 13, pp777-787

Grimshaw, D.L., Lewin, J., 1980. Source identification for suspended sediment” J. Hydro., V°47, pp151-162.

Guillen, J., Palanques, A. 1992. Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River. *Sedimentology*, 39, pp567-579.

Gulcher, p. 1979, Précis d’hydrologie marine et continentale. Masson et Cie. 344p.

Guo, Z.H., Song, J., Xiao, X. Y., Ming., H., Miao, X.F., Wang, F.Y. 2010. Spatial distribution and environmental characterization of sediment-associated metals from middle-downstream of Xiangjiang River, southern China. *J. Cent. South Univ. Technol.* V 17, pp68–78

Gupta, A., Asher, M.G., 1998. Environment and the developing world: principles, policies and management. Wiley, Chichester , 360p.

Hamilton, H., 1991. Soil erosion and losses of nitrogen and Phosphorus in the loess plateau, Wangjiagou Lishi, people’s republic of china. Unpublished PH.D. Thesis University of Toronto, 207p

Haschenburger, J.K., Church, M. 1998. Bed material transport estimated from the virtual velocity of sediment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, pp791-808.

Hassan, M. A., Church, M., Lisle, T.E., Sediment transport and channel morphology of small, forsted stream” *Journal of the American Water Resources Association.* V41, N°4, pp853-876.

Heidel S.G., 1956. The progressive lag of sediment concentration with flood waves. In : *Sediment concentration versus water discharge during single Hdrologic events in rivers* (ed. by G.P., Willams, 1989). *J. Hydrol.*, 111, pp89-106.

Idlafkih, Z., Cossa, D., Meybeck, M., 1995. Comportements des contaminants en trace dissous et particulaires As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) dans la Seine. *Hydroécol. Appl.* Tome 7, Vol 1-2, pp127-150

John, P.Smol. 2002. Pollution of lakes and rivers. Key issue in environmental change Arnold, 280p

Jiongxin, X. 1996. Underlying gravel layers in a large sand bed river and their influence on downstream-dam channel adjustment. *Geomorphology*, 17, pp351-359.

Khadraoui, A., Année . Eau et impact environnemental dans le Sahara Algérien, Définition-Evaluation et perspectives de développement, Edition, 299p.

- Kattan, Z., Gac, J. Y., Probst, J. L. 1987. Suspended load and mechanical erosion in the Senegal basin. *Journal of Hydrology*. N°92. pp 59-7
- Klein, M. 1982. The relation between channel geometry and suspended sediment discharge relations for rivers. *Journal of hydraulic Engineering*, V°116, N°8, pp978-996.
- Klein, M. 1984. Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individuals storms: Holbeck catchment; Yorkshire, England. *Catena*, 11, pp251-257
- Kelly, Martyn. G., Wilson. Shelagh. 2004. Effect of phosphorus stripping on water chemistry and diatom ecology in an eastern lowland river. *Water Research*, Vol.38, pp1559-1567.
- Kleinhans, M.G. 2001. The key role of fluvial duns in transport and deposition of sand-gravel mixtures, a preliminary note. *Sedimentary Geology*, 143, pp7-73.
- Knighton, A. D. 1998. *Fluvial forms and processes*. Ed. Edward Arnold, Londrers, 383p.
- Knighton, A. D. 1999a. The gravel-sand transition in a disturbed catchment. *Geomorphology*, 27, pp325-341
- Knighton, A.D.1999b. Downstream variation in stream power. *Geomorphology*, 29, pp393-306.
- Kondolf, G.M. 1995. Managing bedload sediment in regulated rivers: examples from California. USA” in *Natural and Anthropogenic influences in fluvial Geomorphologies*, pp 165-176.
- Kung, S.Y., Chiang, T.C. 1977. Sol erosion and its control in small gully watershed in the rolling loess area on the middle reaches of the yellow River. Peking. 21p.
- Laborde, J.P. 1993. Carte pluviométrique de l’Algérie du nord au 1/500 000. Note explicative. ANRH. Alger.
- Laborde, J.P. 1998. Notice d’installation du logiciel Hydrolab. Version 98.2. CNRRS. «Analyse spatiale », Université de Nice-Sophia Antipoli, 45p
- Laborde, J.P. 1998. *Eléments d’hydrologie de surface*. UFR Espaces et cultures Edition 2000. Université de Nice-Sophia Antipolis. 191p
- Lafkir, Abdelkader., Benkaci, Tarik., Dechemi, Noureddine. 2006. Quantification du transport par la technique floue, application au barrage de Beni Amrane (Algérie). *Revue Science de l’eau*. 13(3). pp247-257.

Leopolds, L.B., Maddock., T.G., 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Washington. D.C.U.S. Geological. Survey. Professional Paper. 252 p.

Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.D. 1964. Fluvial processes in geomorphology, San Fransisco, Freeman and Company, 522p.

Lisbeth, M. Ottosen., Arne, Villumsen. 2006. High Cu and Cd pollution in sediments from Sisimiut, Greenland. Adsorption to organic matter and fine particles. Environ Chem Lett, V° 4, pp195–199

Marouf, N., Remini, B. 2011. Temporal Variability in Sediment Concentration and Hysteresis in the Wadi Kebir Rhumel Basin of Algeria. The Hong Kong Institution of Engineers Transactions, Vol 18, No 1, pp13-21

Martin, C., 2003. Apports de matière en suspension par les fleuves cotières à l'Etang de Berre (Bouches-du-Rhône, France), Thèse de Doctorat, Institut de Géographie, Université de Provence, Marseille, 280p.

Mébarki, A. 1982. Le bassin de Kébir-Rhumel (Est Algérien). Hydrologie de surface et Aménagement des ressources en eau. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle. Université de Nancy. France.

Mébarki, A. 1984. Ressource en eau et alimentation en Algérie, le bassin du Kébir Rhumel. (Algérie). Office des Publications Universitaire, Alger, 295p.

Mébarki, A. 2005. Hydrologie des bassins de l'Est Algérien: Ressources en eau, Amenagement et Environnement. Thèse de Doctorat d'état. Universite de Mentouri. Constantine. 360p

Meddi, M. 1992. Hydrologie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina. Thèse université Louis pasteur. Strasbourg. France. 320p

Medinger, G. 1956. Hauteurs de pluie en Algérie, moyenne 1913-1953 (recueil statistique), S.E.S., Alger. 23p.

Meguenni, K., Remini, B. 2008. Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Harraza (Algérie). Larhyss Journal. N°07, pp7-19

Meyer-Peter, E., Muller, R. 1948. Fomulas for bed-load transport. 2nd meeting of IAHR, Stockolm, Sweed, pp39-64

- Mibniot, C. 1981. Hydrodynamique des sédiments très fins. pp33-55. In sediments and pollution in waterways general considerations. 1984. The first research co-ordination meeting on the role of sediments in the accumulation and transport of radionuclides in waterways. 180p
- Miller, M.C., Mac, Cave, I.N., Komar, P.D. 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, 24, pp507-527.
- Miller, A., Gupta, A. 1999 (EDS). *Varieties of fluvial Form*. Wiley, Chichester, pp114-143.
- Milliman, J. D., Meade, R.H. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology* N°91. pp 1-21
- Milliman, J.D., Syvitski, J.P.M., 1992. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to ocean: the importance of small mountainous rivers. *Journal of geology* V°100, pp525-544
- Ministère de l'Hydraulique, de l'Environnement et des Forêts, Algérie, Juillet 1984, Etude d'Avant -Projet détaillé d'un Barrage Sur l'Oued Kébir ou l'un de ses affluents, Harza Engineering Company. 54p.
- Molinas, A., Wu, B. 2001. Transport of sediment in large sand-bed rivers. *Journal of hydraulic research*, 39, 2, pp135-146.
- Moog, D. B. et Whiting, P. J. 1998. Annual hysteresis in bed load rating curves. *Water Resour. Res.* 34(9), pp2393–2399.
- Morehead, M.D., Syvitski, J.P., Hutton. W.H., Pechham, S. D., 2003. Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins” *Global and planetary change* V°39, pp95-110
- Neal. Colin., Jarvie. Helen. P., Neal. Margaret 2004. Water quality of treated sewage effluent in rural area of the upper Thames Basin, Southern England, and the impact of such effluents on riverine phosphorus concentrations. *Journal of Hydrologie*, pp01-15.
- Neal. C., Whitehead. P.G. (EDS). 2002. Water quality functioning of lowland permeable catchments: inferences from an intensive study of the river Kennet and upper River Thames. *SCi. Total Environ*, pp282-283.
- Neill, C.R. 1976. Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed-material. *Proc. 12, Conf. IAHR*, vol.3, pp46-54.
- Nelson, L.N. 1991. *Stream, lake, estuary and ocean pollution*. 2nd Edition, Environmental Engineering Series, 500p

Nessah, A., Texier, H., Lacroix, M., Oudane, B. 1999. Transport de la charge solide dans le bassin versant de l'Orne. Composition, variabilité et flux (1994-1995) Hydroécol. Appl. Tome 112 Vol. 11, pp103-125

Nouar, T., Toumi, A., Messaadi. 2005. Etude de la pollution des eaux superficielles du bassin de Guelma. Le Journal de l'Eau et de l'Environnement N°06, pp32-40.

O'Riordan, C., Maldiney, M.A., Mouchel, J.M., Poulin, M. 1996. Un nouveau dispositif d'analyse du transport solide en suspension dans les rivières. C.R. Acad.Sci.Paris, Série II a, 322, pp285-292.

Owens, P. N., Walling, D.E. 2002. The phosphorus content of fluvial sediment in rural and industrialized river basins. Water Research, 36, pp685-701

Pardé, M., 1943. Cours de Patamologie. Grenoble. Ecole des ingénieurs hydrauliciens. 2Vol. in Remenieras, G., 1999. L'hydrologie de l'ingénieur. Edition, Eyrolles. 465p.

Parker, R. S., Osterkamp, W. R. 1995. Identifying trends in sediment discharge from alterations in upstream land use. IAHS Publ. N°. 226, pp207-213

Passega, R. 1957. Texture as characteristic of classic deposition. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 41-9, pp1952-1984.

Passega, R. 1963. Analyses granulométriques, outil géologique pratique. Revue de l'institut Français du pétrole XVIII, n°11-novembre, pp1489-1499.

Passega, R. 1964. Grain size representation by CM patterns as a geological tool. Journal of Sedimentary Petrology, 34, 4, pp830-847.

Paustian, S. J., Beschta, R.L. 1979. The suspended regime of an Oregon Coast range stream. Water Resources Bulletin. V°15 N°01. pp144-154

Pauwels, Helene., Talbo, Henri 2004. Nitrate concentration in wetlands: assessing the contribution of deeper groundwater from anions. Water Research, Vol.38, pp1019-1025.

Peart, M.R., Walling, D.E., 1986. Fingerprinting sediment sources: the example of a drainage basin in Devon, UK. Ass. Hydrol. Sci. Spec. Publ., V°519, pp41-45

Peiry, j., L, 1990. Les torrents de l'Arve : Dynamique des sédiments et impact de l'aménagement des bassins versant sur l'activité torrentielle » Revue de Géographie alpine, Vol.78, pp25-58.

Petit, F. 1987. The relationship between shear stress and the shaping of the bed of a pebble-loaded river La Relles, Ardennes. Catena, 14, pp453-468.

Petit, F. 1989. L'influence de la forme de cailloux en tant que facteur de résistance à l'érosion. *Révue de Géographie de Lyon*, 64, 4, pp231-239.

Petit, F., Perpinien, G., Deroanne, C. 2000. Détermination des puissances spécifiques critiques dans des rivières à charge de fond caillouteuse. *Revue Géographique de l'Est*, 40, pp59-65.

Petts, G.E. 1984. *Impounded rivers: perspectives for ecological management*. Chichester, John Wiley et Son Ltd. Petts, 326p.

Picouet, C., Hingray, B., Olivry, J.C. 2001. Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin. *Journal of hydrology*, 250, pp19-39.

Piest, R.F., Spomer, R.G., 1968. Sheet and gully erosion in the Missouri Valley Loess Region". *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, V°11, pp850-853.

Piest, R.F., Bradford, J.M., Wyatt, G.M., 1975. Soil erosion and sediment transport from gullies". *Journal hydraul. Div. am. Am. Soc. Civil Eng.*, V°101, pp65-80.

Polyakov, V.O., Nearing, M.A., 2003. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions" *Catena* V°51 pp 33-43.

Potelon, Jean. Lun., Zysman. Karyne 1998. *Le guide des analyses de l'eau potable*. Nouvelle Edition, 253p.

Quisserne, D., 2000. Caractérisation de la charge de fond du Rhône dans sa plaine deltaïque. *Mémoire de maitrise, Université Paris VII-Jussieu*, 143p.

Racoszi, L., Szekeres, J. 2002. In-Situ checking the performance of bed-load samplers by underwater video. *Proceedings of River Flow 2002*, Louvain-la Neuve, Belgique, 2, pp1145-1149, Balkema, The Netherlands.

Rapp, A., Axelsson, V., Berry, L., 1972. Soil erosion and sediment transport in the morigoro river catchment, Tanzania" *Geogr. Ann.*, Vol 54, pp 125-155.

Remenieras, G., 1999. *L'hydrologie de l'ingénieur*. Edition, Eyrolles. 465 p., 149 fig.

Remini, b., Kettab a., Hihat, h. 1995. Envasement du barrage d'IGHIL EMDA (Algérie). *Revue Internationale de l'eau: La Houille Blanche* N° 2/3, pp23-28

Remini, B. 1996. Remini, B., Avenard, J.M., Kettab, A. 1996. Le barrage d'IGHIL EMDA (Algérie) I- Les courants de densité dans la retenue. Les Annales Maghrébines de l'Ingénieur, Tunis, avril, Vol. 10. 9 fig., 7 photos, pp.53-67.

Remini, B., 1997. Envasement des retenues de barrages en Algérie : importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique du soutirage. Thèse de Doctorat d'état, Ecole nationale Polytechnique d'Alger, mars, 342 P.

Remini, B. 1999. Les conséquences de l'envasement des barrages: quelques exemples algériens. Revue Techniques sciences méthodes, N°4, avril, pp. 55-62.

Remini, B. 2002. L'envasement des barrages et la technique de soutirage. Quelques exemples algériens. Colloque international sur l'eau, Chélif, 5-6 Février.

Remini, W., Remini, B. 2003. La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. Larhyss Journal, N° 02, pp. 45-54

Restrepo, J. D., Kjerfve, B. 2000. Magdalena river: interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. Journal of Hydrology, 235, pp137-149.

Richards, K., 1984. Some observations on suspended sediment dynamics in Storbregrova Jotunheimen. Earth Surface Processes and Landforms 9, pp101– 112.

Robert, A. 1997. Characteristics of velocity profiles along riffle-pool sequences and estimates of bed shear stress. Geomorphology, 19, pp89-98.

Robert, A., Roy, A.G., De Serres, B. 1996. Turbulence at a roughness transition in a depth limited flow over a gravel bed. Geomorphology, 16, pp 175-187.

Roche, M. 1963. Hydrologie de surface. Gauthier VILLARS. Paris. 430 p

Rodier. Jean, 1996. L'analyse de l'eau (eau naturelle, de mer et résiduaire). 8 Edition, Dunod, Paris, 1365p.

Roose, E. 1967. Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agronomie tropicale (France), V° 22. N°02. pp123-152

Roose, E. 1999. Montagne méditerranéenne en algérie. Cahiers Sécheresse N°10. pp221-226

Rossi, G., Blivi, A. 1995. Les conséquences des aménagements hydrauliques de la vallée du Mono (Togo-Bénin). Saura-t-on gérer l'avenir ? Cahiers d'Outre-Mer, 48 (192), pp435-452.

Romanovsky, V.V. 1972, Issledovanie gidravlicheskoj krupnosti estestvehih chastic". Investigations of the fall velocity of natural particles, Trudy GGI, N191.

Rondeau, B., Cossa, D., Gagnon, P., Bilodeau, L. 2000. Budget and sources of suspended sediment transported in the St. Lawrence River, Canada. *Hydrological Processes*, 235-21-36.

Rossi, G., Blivi, A.B., 1995. Les conséquences des aménagements hydrauliques de la vallée du Mono (Togo-Bénin). *S'aura-t-on gérer l'avenir? Cahier d'Outre-Mer*, 48(192), pp 435-452.

Rullan-Perchirin, F. 1985, Recherche sur l'érosion dans quelques bassins du constantinois (Algérie), Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université de Paris I (Panthéon-Sorbonne), 343p.

Ryan, S.E., Porth, L.S. 1999. A field comparison of three pressure-difference bedload samplers. *Geomorphology*, 30, 307, pp307-322.

Ryding. Sven-Olof., Rast, Walter. 1994. Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. Edition Masson, UNESCO, Paris, 287p.

Sambrook Smith, G. H., Ferguson, R.I. 1996. The gravel-sand transition: flume study of channel response to reduced slope. *Geomorphology*, 16, pp147-159.

Satin, Marc., Selmi, Bechir., 1995. Guide technique de l'assainissement, Edition Moniteur, Paris, 627p.

Sear, D. A. 1996. Sediment transport processes in pool-riffle sequences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, pp241-262.

Seltzer, P. 1946. Le climat de l'Algérie. Univ. Alger, Inst. Météo. et phys. Du Globe, carbonnel., 219p. in Mebarki, Azzedine. 1984. Ressource en eau et alimentation en Algérie, le bassin du Kébir Rhumel. (Algérie). Office des Publications Universitaire, Alger, 295p.

Serrat, P., Ludwig, W., Navarro, B., Blazi, J.L. 2001. Variabilité spatio-temporelle des flux de matières en suspension d'un fleuve côtier méditerranéen: la Têt (France). *C.R. Acad. Sci. Paris, Série IIa*, pp389-397.

Shields, A. 1936, Anwendung der aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau*. Berlin, Heft 26.

Schumm, Stanley A., 1977. *The fluvial system*. John Wiley & Sons, New York 338 p.

Sidle, R.C., Campbell, A.J., 1985. Patterns of suspended sediment transport in a coastal Alaska stream. *Water Resources Bulletin* 21, pp909-917.

Simon, A., Darby, S.E. 1997. Process-form interactions in unstable sand-bed river channels: a numerical modeling approach, *Geomorphology*, 21, pp85-106.

Simon, A., Diskerson, W., Heins, A., 2004. Suspended-sediment transport rates at the 1.5-year recurrence interval for ecoregions of the United States: transport conditions at the bankfull and effective discharge". *Geomorphology* V°58, pp243-262.

Smith, Edward. 2001. Pollutant concentrations of storm water and captured sediment in flood control sumps draining an urban watershed. *Water Research*, Vol.35 N° 13, pp. 3117-3126.

Sundborg, A. 1956. The River Klaralven: A study of Fluvial Processes. *Geografiska Annaler*. Stockholm. Vol. 38. N°2. pp 127-316.

Surian, N. , 1999. Channel changes due to river regulation: the case of the Piave river, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, pp1135–1151.

Surian, 2002. Downstream variation in grain size along an Alpine river: analyse of controls and processes. *Géomorphology*, 43, pp 137-149.

Syvitski, J.P.M., Morehead, M.D., Nicholson, M., 1998. A climate-driven hydrologic-transport model for predicting discharge and sediment load to lakes or oceans. *Computers & Geosciences* 24 (1), 51– 68.

Terfous, A., Meghounif, A., Bouanani, A. 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah," *Revue des Sciences de l'Eau*. Vol 14. N°2. pp175-187

Thompson, D.M., Wohl, E.E., Jarrett, R.D. 1999. Velocity reversals and sediment sorting in pools and riffles controlled by channel constrictions. *Geomorphology*, 27, pp229-241.

Thompson, D.M., Hoffman, K.S. 2001. Equilibrium pool dimensions and sediment-sorting patterns on coarse-grained New England channel. *Geomorphology*, 38, pp301-316.

Tixeront, J. 1960. Taux d'abrasion et teneur en suspension des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie. Secrétariat d'état à l'agriculture. Tunis.

Touaibia. B., Dautrebande, Sylvia., Gomer, Dietek., Aidaoui, Abdallah. 1999. Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'Oued Mina. (Algérie). *Journal des sciences hydrologiques*, vol44(1), pp973-986.

Touaibia, B. 2000. Erosion-Transport solide-Envasement de barrages. Cas du bassin versant Mina. Thèse de Doctorat d'Etat, INA. El-Harrach. Algérie.

Touaibia, B., Achite, M, 2001. Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi aride, de l'Algérie du Nord, *Journal des sciences hydrologiques*, vol46(1), pp41-53.

Touaibia, B. 2000. Erosion-Transport solide-Envasement de barrages. Cas du bassin versant Mina. Thèse de Doctorat d'Etat, INA. El-Harrach. Algérie.

Touaibia, B. 2010. Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. Sécheresse vol. 21, n° 1e, pp1-6

Touat, S. 1989. Contrôle de la représentativité de l'échantillon des transports solides en suspension. Revue Eaux et Sols d'Algérie 3, pp48-54.

Tricart, J. 1963. La cartographie hydrologique détaillée et son intérêt pour l'étude des régimes fluviaux. La houille blanche, Grenoble, pp 417-422.

Tricart, J. 1968. Méthode de cartographie au 1/1.000.000 du contexte hydrologique élaborée au centre de Géographie Appliquée de Strasbourg. pp671-682.

Unesco, 1986. Problème d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants, Projrt5.3 du programme hydrologique international, 161p.

Umesh K. Haritashya, Pratap Singh, Naresh Kumar, R. P. Gupta. 2005. Suspended sediment from the Gangotri Glacier: Quantification, Variability and association with discharge and temperature. Journal of hydrology, pp 1-15.

Upp, C.R., Osterkamp, W.R., 1996. Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. Geomorphology. V° 14, pp 277-295.

Van Den Berg, J.H., Van Gelder, A. 1998. Flow and sediment transport over large subaqueous dunes: Fraser River, Canada. Sedimentology, 45, pp217-221.

Vanoni, V. A. 1977. Erosion rates from sediment sources. In Engineering sedimentation, Manual ASCE. New York. pp 472-480.

Van Sickle, J., Beschta, R.L., 1983. Supply-based models of suspended sediment transport in streams. Water Resources Research. 19 (3), pp768-778.

Van Wijngaarden, M. 1999. A two-dimensional model for suspended sediment transport in the southern branch of the Rhine-Meuse estuary, The Netherland. Earth Surface Processes and landforms, 24, pp1173-1188.

Viguier, J.M. 1993. Mesure et modélisation de l'érosion pluviale. Application au vignoble de Vidauban (Var), Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II, 335p.

Vivian, H., Puper, N. 1982. Crue et aménagements hydroélectriques. L'exemple des crues de l'Isère et du Drac à Grenoble. Hommes et terres du Nord. V°1, 1996. pp 13-19.

Walling, D.E., Webb, B.W., 1982. Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields. *Internat. Ass. Hydrol.sci.spec. pub.*, V°197, pp 327-337.

Walling, D.E., Owens, P.N., Waterfall, B.D., Leeks, G.J.L., Wass, P.D. 2000. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK. *The Science of the Total Environment*, 251/252, pp205-222.

Walling, DE. 1974. Suspended sediment and solute yield from a small catchment prior to urbanization. In: *Fluvial Processes in Instrumented watersheds*. Institute of British Geographers. Special Pub. N°06. pp169-192.

Western, A.W., Finlayson, B.L., Mc Mahon, T.A., O'Neill, I.C. 1997. A method for characterising longitudinal irregularity in river channels. *Geomorphology*, 21, pp39-51.

White, S.J, 1970. Plain bed thresholds for fine-grained sediments. *Nature*, Vol.228. N°5267, pp 152-153

White, W.R., 1972. Sediment transport in channel: a general function, Wallingford Hydraulics Research Station, Report n°.INT104.

White, W.R., Milli, H., Crabbe, A.D. 1972. Sediment transport theories-a review. *Proc.I.C.E*, Part 2, vol.59, pp265-292.

White, W.R., Milli, H., Crabbe, A.D. 1978. Sediment transport; an appraisal of available methods, Vol. 2, Report n° IT 119, Segunda Impresión, Wallingford Research Station, Wallingford, England in *Problème d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants*. Etude et rapport d'hydrologie. UNESCO, 161p.

Williams, G.P., Wolman, M.G. 1984. Downstream effects of dams on alluvial rives. *Geological serves Professional paper*. 1286. 83p.

Williams, G. P. 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.* N°111. pp89-106

Willis, I.C., Richards, K.S., Sharp, M.J., 1996. Links between proglacial stream suspended sediment dynamics, glacier hydrology and glacier motion at Midtdalsbreen, Norway. *Hydrological Processes* 10, pp629– 648.

Wood, P. A. 1977. Controls of variation in suspended sediment concentration. *Rev. Sedimentol.* N°24. pp437-455.

Xu, Jiongxin., 2002. Implication of the relationships among suspended sediment size, waret discharge and suspended sediment concentration : the Yellow River basin, China.” *Catena* V°49, pp 289-307

Yalin, M.S, 1972. *Mechanics of sediment transport*. Pergamon.Owford. 290p.

Yves, Trambly. 2008. Régionalisation des concentrations extrêmes de sédiments en suspension dans les rivières d’Amérique du Nord. Thèse de doctorat (Ph.D). Université du Québec, Canada, 221p

Yinxian, S., Junfeng, J., Changping, M., Zhongfang, Yang., Xuyin, Y. 2010. Heavy metal contamination in suspended solids of Changjiang River — environmental implications. *Geoderma* N°159, pp286–295

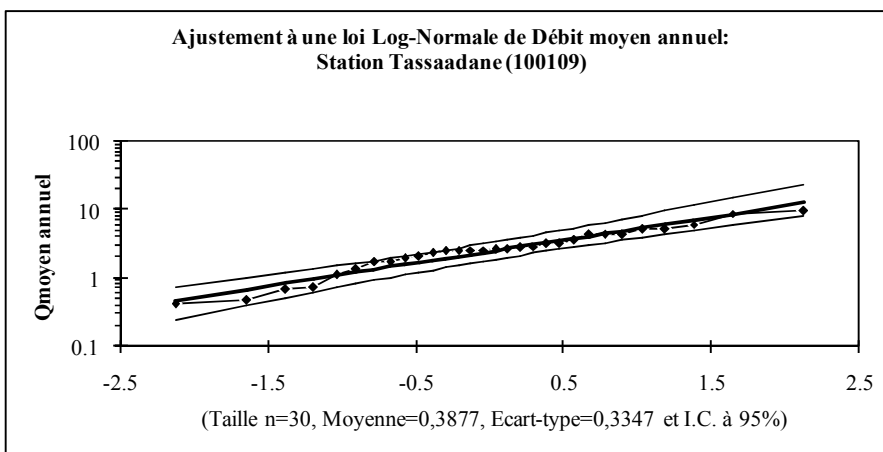
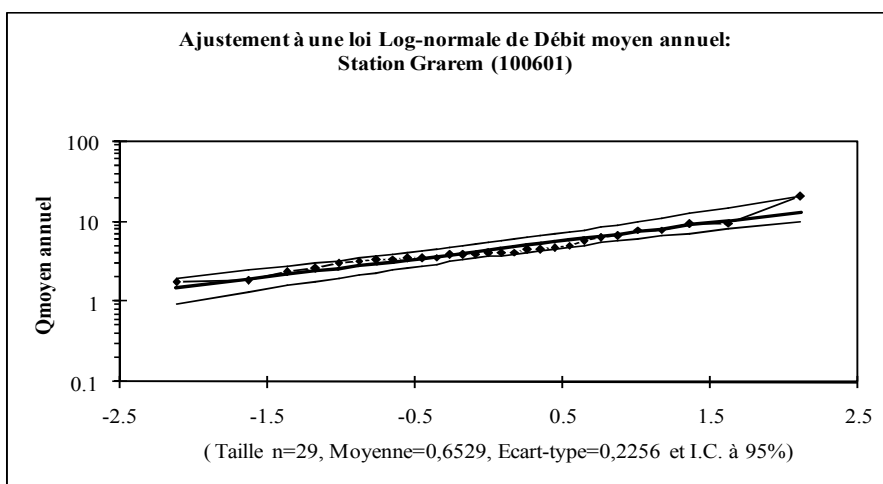
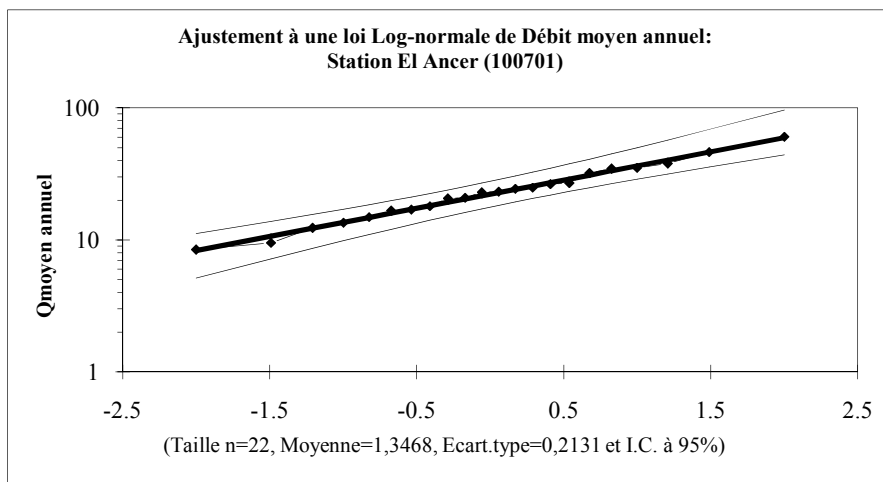
Yao, K., Soro, M., Albert, T., Bokra, Y, 2009. Assessment of Sediments Contamination by Heavy Metals in Tropical Lagoon Urban Area (Ebrié Lagoon, Côte d’Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 34 No.2 (2009), pp. 280-289.

Waters, T.F. 1995. *Sediments in streams: sources, biological effects and control*. American Fisheries Society Monograph, n0 7, USA. 251p.

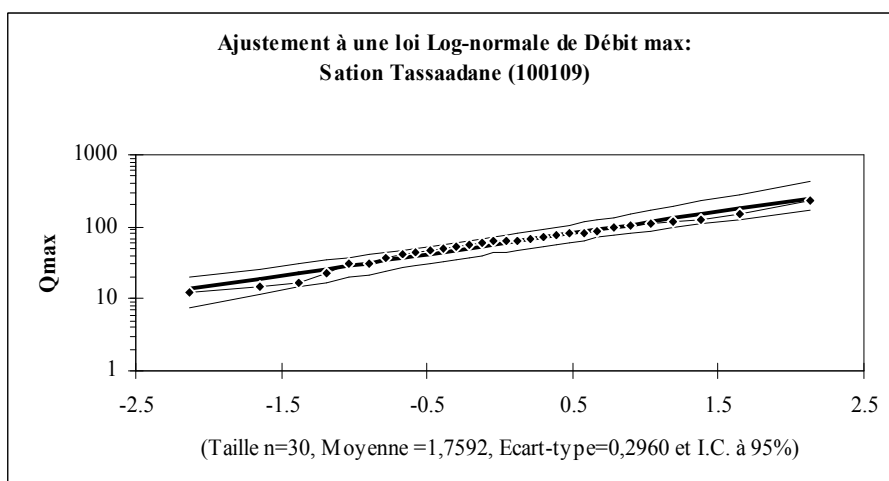
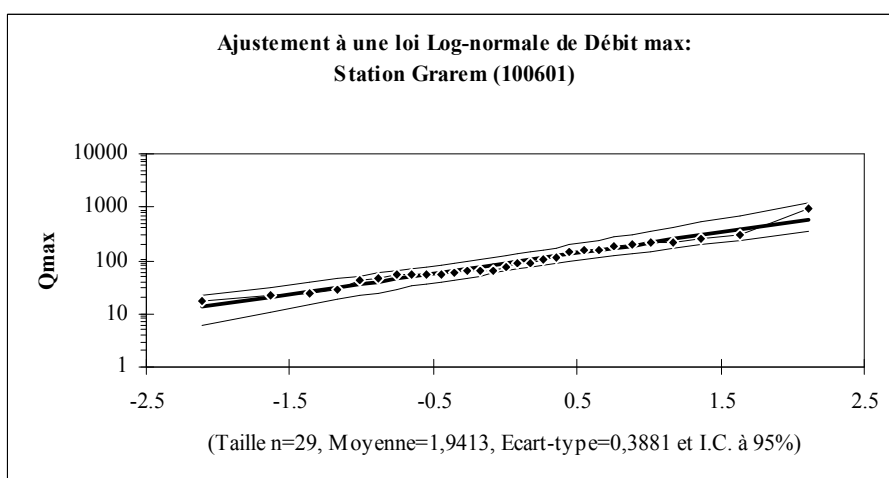
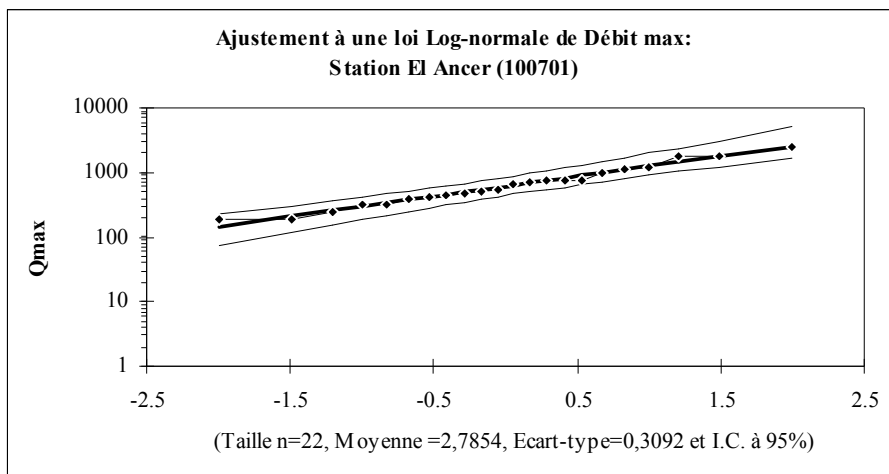
Zimmerman, A., Church, M. 2001. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel, *Geomorphologym* 40, pp311-327.

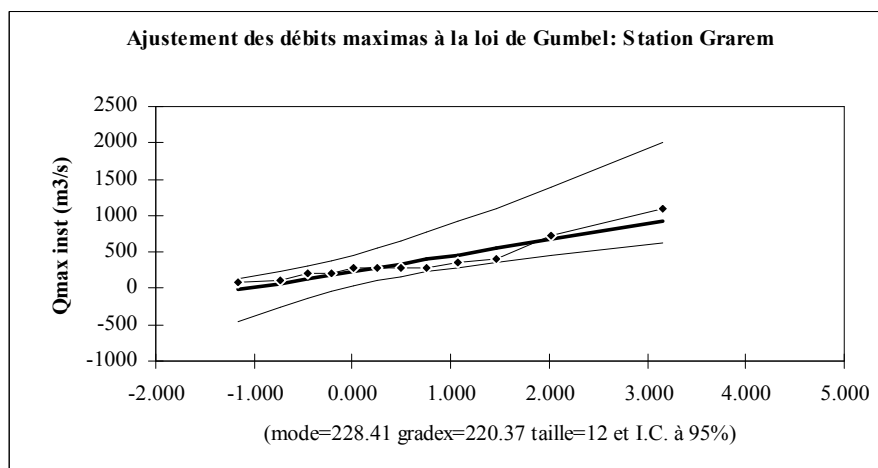
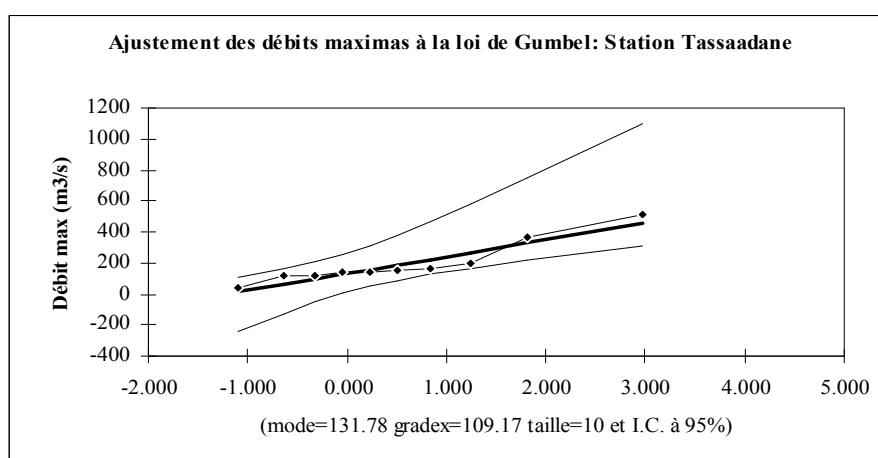
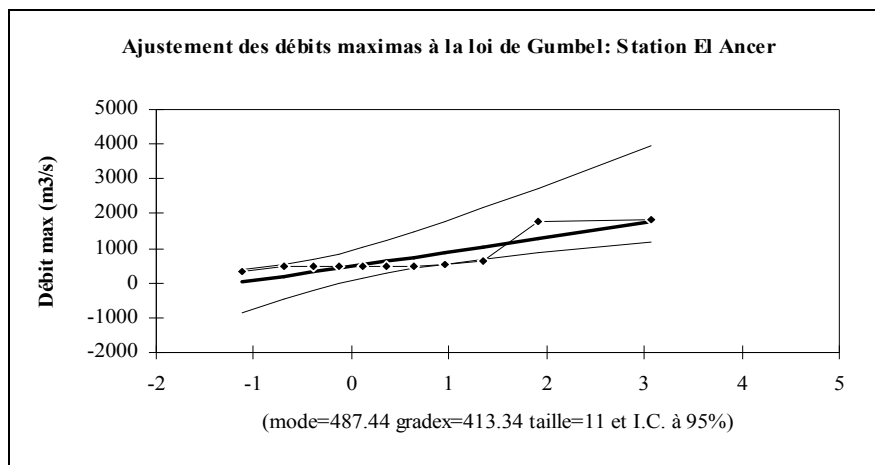
Zeggane, H. 2005. Approche Cartographique de l'Erosion Hydrique à partir ouvrages hydrauliques existants. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida, 172p.

ANNEXES

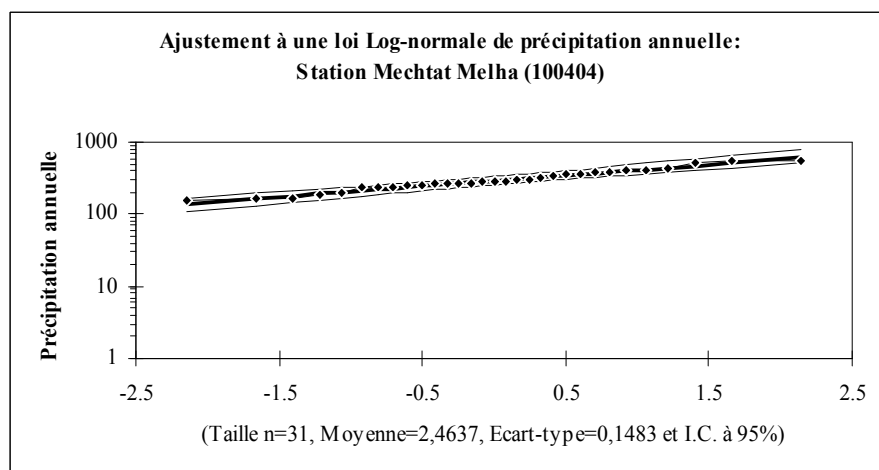
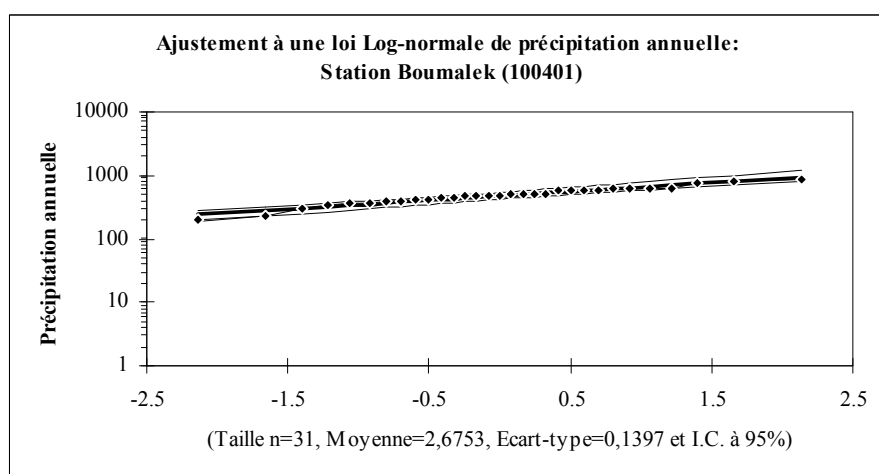
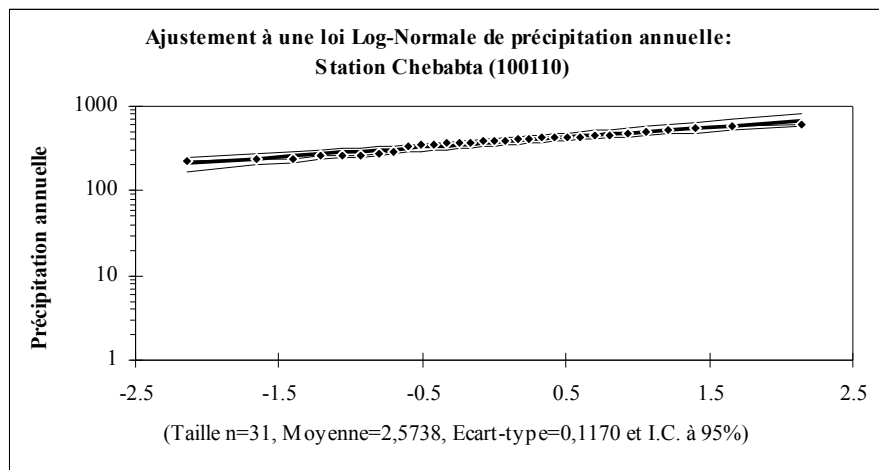


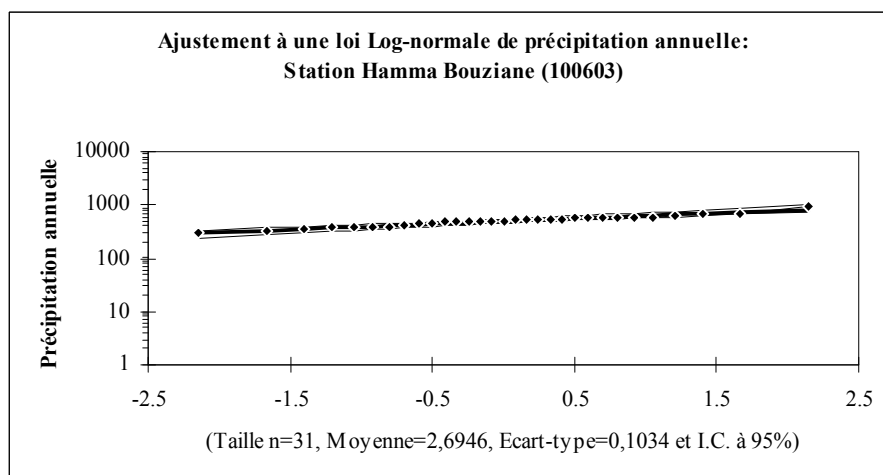
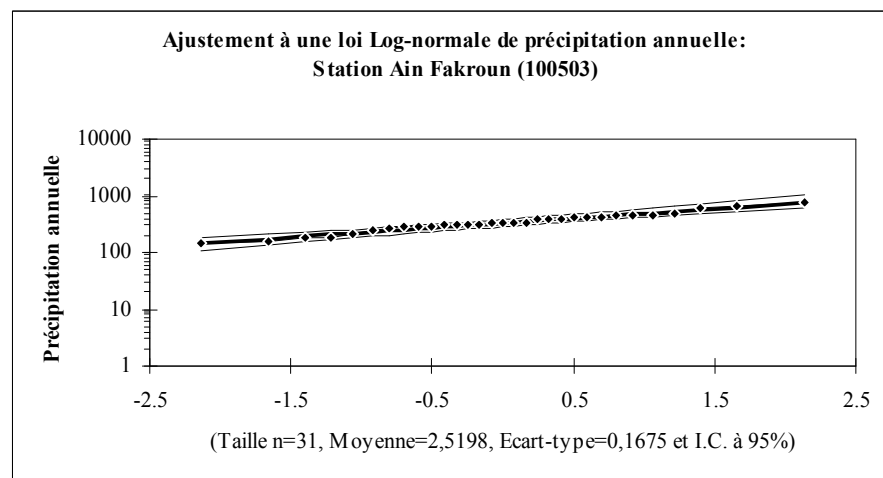
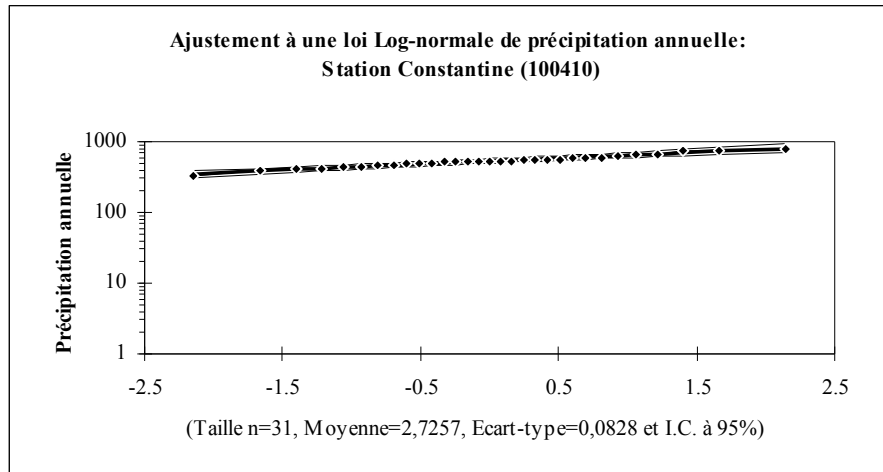
I Ajustements des débits moyens annuels des stations du bassin Kébir-Rhumel

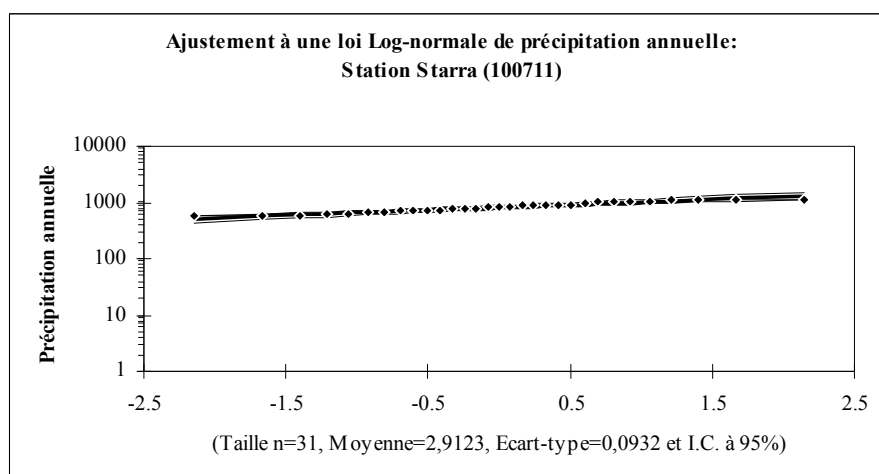
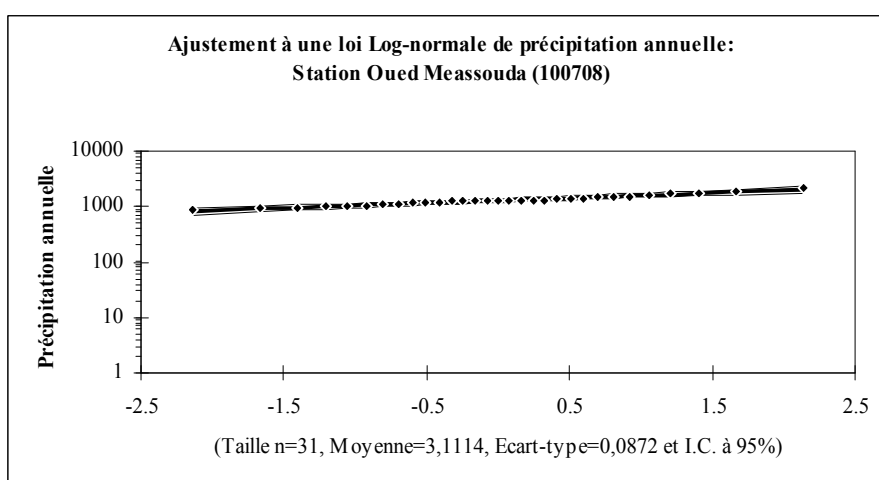
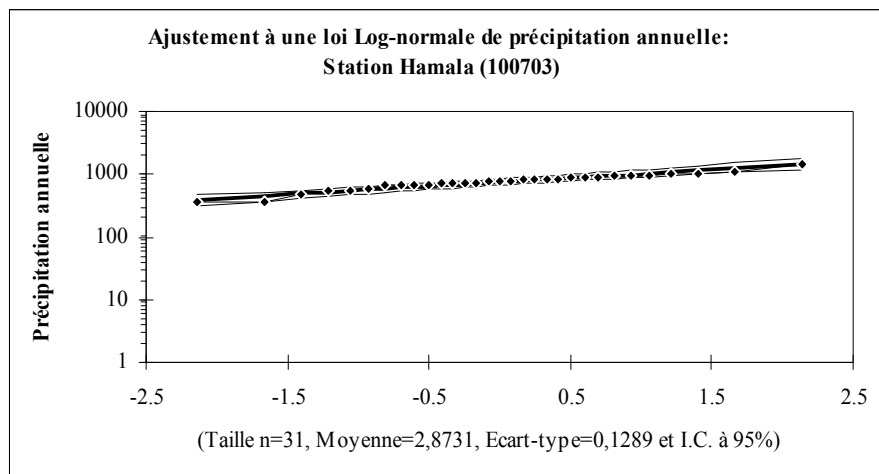




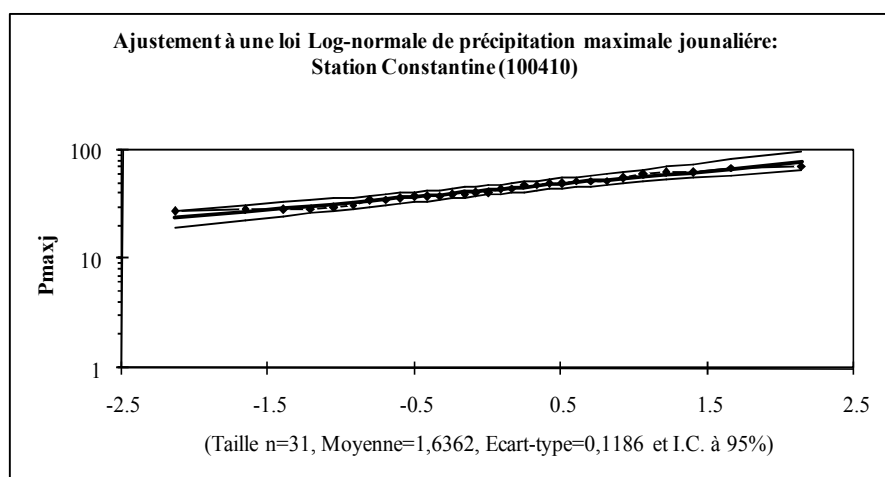
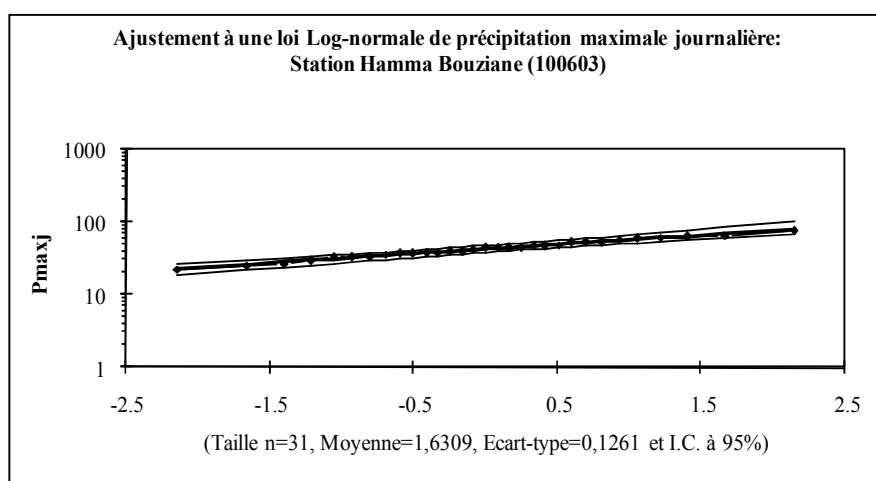
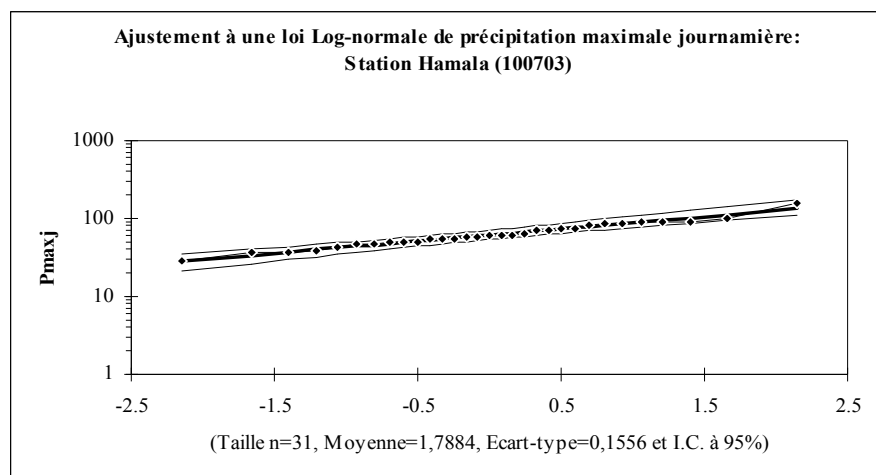
II Ajustements des débits maxima des stations du bassin Kébir-Rhumel







III Ajustements des précipitations moyennes annuelles des stations du bassin Kébir-Rhumel



IV Ajustements des précipitations maximales journalières des stations du bassin Kébir-Rhumel

V. Variation moyenne annuelle des paramètres de pollution : Station de Grarem (100601)

Année	DBO ₅	DCO	MES ₁₀₅	NH ₄	NO ₂	NO ₃	O _{2dis}	PO ₄	SO ₄	Turb
1984	20,73	33,38	1475,00	0,63	0,08	22,18	83,90	2,37	278,18	Lac
1985	12,67	32,78	462,67	2,72	0,24	17,89	82,56	1,08	288,00	Lac
1986	12,71	26,10	234,18	2,25	0,15	19,91	93,55	0,57	255,64	Lac
1987	9,29	27,86	245,71	0,10	0,31	17,29	95,29	0,54	242,57	56,73
1988	8,78	45,36	429,45	1,13	1,23	23,55	82,68	1,55	226,00	50,52
1989	2,50	67,17	70,67	2,35	1,43	23,67	83,33	0,97	287,00	8,83
1990	5,00	76,60	24,57	2,68	1,24	35,43	88,74	2,48	250,57	5,73
1991	28,50	0,10	51,57	0,56	1,19	22,71	83,78	0,00	272,57	5,09
1992	29,83	71,42	21,25	3,52	0,11	34,50	66,40	Lac	244,50	7,59
1993	0,00	73,40	696,86	1,37	0,11	26,60	61,79	4,54	294,80	5,85
1994	Lac	61,14	31,00	2,79	0,10	20,43	69,91	3,02	303,71	4,39
1995	Lac	111,00	Lac	1,67	0,39	24,33	86,90	2,33	256,00	7,17
1996	Lac	73,14	Lac	3,30	0,16	32,43	67,50	4,04	194,29	7,89
1997	17,00	70,67	Lac	3,75	0,16	14,33	64,01	3,78	239,33	6,91
1998	7,90	86,19	366,75	2,32	0,31	19,88	78,24	3,79	292,88	7,44
1999	6,11	73,43	132,00	1,97	1,78	25,25	70,46	3,10	271,25	5,49
2000	25,83	101,91	91,60	5,31	2,15	30,90	60,77	5,53	346,10	9,09
2001	8,88	119,56	107,50	2,68	0,96	23,22	68,47	3,62	337,33	19,83
2002	8,24	121,14	114,00	20,19	0,42	16,45	79,62	4,79	333,64	25,19
2003	7,59	82,00	180,00	3,19	2,38	20,71	63,04	1,87	298,57	46,75
2004	8,25	62,03	253,33	1,53	2,59	21,17	Lac	0,73	347,33	27,00
2005	6,89	50,05	266,00	4,72	2,54	16,01	Lac	2,64	302,00	19,39

VI Variation moyenne annuelle des paramètres de pollution : Station H.Grouze (100315)

Année	DBO ₅	DCO	MES ₁₀₅	NH ₄	NO ₂	NO ₃	O _{2dis}	PO ₄	SO ₄	Turb
1988	6,10	29,55	114,73	0,65	0,09	12,73	74,73	0,04	219,82	6,57
1989	1,67	58,29	106,57	0,23	0,17	7,14	85,43	0,21	267,14	4,57
1990	2,60	105,75	53,00	0,17	0,10	3,75	80,00	0,32	292,75	2,84
1991	1,00	25,00	37,20	0,11	0,30	5,50	89,29	0,30	218,89	2,52
1992	0,00	60,60	14,00	0,36	0,02	6,00	86,94	0,10	183,60	25,04
1993	lac	104,78	19,33	1,06	0,02	6,44	76,43	0,92	192,67	7,13
1994	0,00	94,18	16,00	1,59	0,04	11,45	73,83	0,81	236,18	4,77
1995	lac	91,13	Lac	1,40	0,04	12,75	83,71	1,39	196,00	5,98
1996	lac	95,90	Lac	9,50	0,04	11,80	67,91	2,75	162,40	8,72
1997	4,00	159,22	Lac	2,13	0,03	4,00	87,40	1,65	146,44	6,46
1998	4,75	82,67	126,53	1,35	0,04	4,13	69,57	0,82	145,73	5,65
1999	4,53	54,36	83,67	0,18	0,08	5,50	86,93	0,34	108,50	2,17
2000	4,33	30,12	105,50	0,06	0,00	7,00	80,57	1,46	125,17	2,85
2001	3,14	49,00	72,50	0,01	0,01	6,25	62,58	0,25	120,18	12,24
2002	3,62	43,16	107,22	0,11	0,03	8,56	77,17	0,27	64,30	8,93
2003	5,13	40,92	86,67	0,11	0,29	11,25	81,68	0,26	93,67	3,41
2004	5,65	58,26	189,20	0,35	0,39	17,30	73,40	0,34	215,60	26,55
2005	7,04	53,27	59,20	0,28	0,41	18,45	lac	0,23	191,17	7,68

VII Variation moyenne annuelle des paramètres de pollution : Station Ain Smara (100403)

Année	DBO ₅	DCO	MES ₁₀₅	NH ₄	NO ₂	NO ₃	O _{2dis}	PO ₄	SO ₄	Turb
1984	13,82	30,38	1504,00	0,09	0,02	17,91	83,70	1,33	348,27	Lac
1985	9,22	27,40	420,40	2,56	0,05	21,80	83,70	0,28	297,00	Lac
1986	17,67	72,57	389,71	0,54	0,06	16,13	89,29	0,29	326,25	Lac
1987	4,00	23,60	200,80	0,87	0,05	24,80	88,00	0,21	341,60	43,20
1988	16,90	70,20	312,73	4,49	0,28	17,73	30,83	1,34	359,18	69,69
1989	6,33	83,43	72,86	18,43	1,25	14,86	68,00	1,67	378,57	8,57
1990	2,20	103,00	62,00	2,71	0,40	16,14	52,11	1,05	374,57	6,50
1991	2,00	68,00	44,60	4,77	0,94	7,00	49,52	Lac	345,40	4,86
1992	0,00	89,71	22,86	19,85	0,05	17,86	44,74	Lac	292,86	5,97
1993	Lac	78,50	Lac	2,29	0,08	15,10	35,58	2,15	331,40	6,23
1994	Lac	93,57	Lac	9,68	0,11	14,71	44,91	2,31	398,00	7,16
1995	Lac	178,00	Lac	3,80	0,06	20,80	54,22	5,66	325,60	6,78
1996	Lac	121,14	Lac	14,97	0,07	9,29	20,49	5,74	292,29	9,26
1997	12,00	164,56	Lac	13,98	0,08	3,00	32,06	7,12	299,78	7,28
1998	13,84	132,13	235,47	14,53	0,21	10,47	35,75	8,63	370,13	7,66
1999	7,02	90,90	133,80	3,59	1,09	20,10	56,71	4,73	360,30	3,62
2000	39,05	169,53	153,33	22,66	0,84	10,11	46,36	6,88	437,00	9,73
2001	12,25	106,17	120,00	7,00	0,92	23,50	80,37	3,10	473,00	14,83
2002	0,95	142,40	132,00	9,48	0,19	16,33	74,46	2,71	428,67	16,90
2003	8,76	57,29	397,14	1,24	0,92	17,43	84,70	1,15	271,14	23,70
2004	5,12	43,49	221,50	0,88	1,08	24,00	73,40	0,86	358,44	174,88
2005	7,28	65,01	204,44	0,43	0,92	30,30	80,68	0,96	358,60	9,86

VIII Variation moyenne annuelle des paramètres de pollution : Station El Méria (100624)

Année	DBO ₅	DCO	MES105	NH ₄	NO ₂	NO ₃	O _{2dis}	PO ₄	SO ₄	Turb
1992	0,00	143,25	23,50	23,40	0,20	8,25	42,96	Lac	245,50	6,68
1993	Lac	120,67	74,00	11,16	0,10	5,11	39,32	5,22	289,33	7,62
1994	Lac	147,57	35,00	11,33	0,10	12,57	36,83	7,71	305,71	10,01
1995	Lac	191,67	Lac	27,67	0,15	11,33	30,77	7,77	228,00	11,33
1996	Lac	86,25	Lac	15,96	0,09	9,00	38,08	7,14	216,25	11,60
1997	28,00	107,56	Lac	25,91	0,11	6,89	43,98	9,24	236,22	12,99
1998	14,26	99,69	247,08	14,22	0,24	5,70	44,55	6,67	286,62	11,58
1999	5,43	127,25	143,25	3,95	203,33	26,25	67,83	4,83	305,00	8,40
2000	20,26	104,08	140,80	17,22	1,00	10,50	46,52	8,49	295,60	10,40
2001	10,75	142,11	115,00	9,06	1,17	10,00	61,29	7,94	299,11	9,72
2002	11,66	207,63	253,14	25,56	0,54	8,80	46,42	9,40	289,00	53,57
2003	6,96	87,57	337,14	6,45	1,65	13,14	67,93	2,68	312,00	42,75
2004	12,44	58,73	322,29	3,91	2,27	20,29	73,40	2,54	356,57	15,30
2005	12,23	75,17	156,00	7,04	1,66	13,27	Lac	3,88	348,00	27,70

IX Grille de qualité globale des eaux de surface en Algérie (ABH, Constantine).

Classe de qualité Paramètres	Unité	Excellence	Bonne	Passable	Médiocre	Pollution excessive
O ₂ dissous	mg/l	> 7	5 à 7	3 à 5	< 3	0
Saturation	%	> 90	70 à 90	50 à 70	< 50	0
DBO ₅	mg/l	< 3	3 à 5	5 à 10	10 à 25	> 25
DCO	mg/l	< 20	20 à 25	25 à 40	40 à 80	> 80
NH ₄	mg/l	< 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8	> 8
PO ₄	mg/l	< 0,2	0,2 à 0,5	0,5 à 1	1 à 2	> 2
NO ₃	mg/l	< 5	5 à 25	25 à 50	50 à 80	> 80
NO ₂	mg/l	< 0,1	0,1 à 0,3	0,3 à 1	1 à 2	> 2