

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Hydrologie des lacs, cas du lac Fetzara (w. Annaba) .

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 7-0003-12

APA Citation (APA توثيق):

Mouhoub, Lina (2012). Hydrologie des lacs, cas du lac Fetzara (w. Annaba)[Thèse de magister, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، دوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE

ARBAOUI ABDELLAH

LABORATOIRE DE RECHERCHE

MOBILISATION ET VALORISATION DES RESSOURCES EN EAU

N° d'ordre.....

Série.....

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité: Génie de l'eau

Présenté par :

Lina BENABED - MOUHOUB

THEME

HYDROLOGIE DES LACS, CAS DU LAC FETZARA

W. ANNABA

Devant le jury composé de:

Président :	M Mihoubi Mustapha Kamel. Maître de conférences.	ENSH. Blida
Rapporteur :	Mme Touaibia Bénina. Professeur.	ENSH. Blida
Examineurs:	M Aidaoui Abdellah. Professeur.	ENSA. El Harrach
	M Messahel Mekki. Maître de Conférences.	ENSH. Blida
	Mme Souag Doudja. Maître de Conférences.	USTHBab Ezzouar

Soutenu le : / /2012

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la gestion intégrée des ressources en eau. Elle a été menée dans le bassin versant du lac Fetzara; site classé RAMSAR depuis 2003, situé à 18 km du chef lieu de la Wilaya de Annaba, où les enjeux liés à l'exploitation des ressources en eau sont critiques et la disponibilité de données pertinentes est faible. L'objectif principal étant de constituer une monographie traitant l'hydrologie de ce lac qui appartient à un bassin versant non jaugé. L'évaluation des apports liquides et solides ainsi que l'analyse fréquentielle des débits et hydrogrammes de crues a été faite moyennant des approches qui reposent quasi-exclusivement ; dans ce cas de figure; sur l'information pluviométrique ce qui a imposé une vision critique et un contrôle de cette dernière.

Un modèle annuel du bilan hydrologique du Lac Fetzara a été développé pour deux périodes 1986/1996 et 2001/2006, la partie dite « entrée » a été évaluée et qui se résume aux précipitations sur le lac et le ruissellement sur le bassin-versant vers le plan d'eau, et la partie « sortie » qui est représentée par l'évaporation. Les résultats ont permis de constater que l'existence du lac Fetzara dépend donc d'un compromis subtil entre les apports hydriques et l'évaporation. La détermination du bilan hydrologique sur la période d'étude permet ainsi de mettre en avant le caractère semi-aride de cette région par l'existence d'un déficit pluviométrique important couplé à des données climatiques aggravantes (insolation élevée, températures fortes...). Les résultats présentés dans ce travail sont utiles pour la planification, la protection et la gestion des ressources en eau dans cette région d'Algérie.

Mots clés : Gestion intégrée, lac Fetzara, hydrologie, débits, hydrogrammes des crues, bilan hydrologique, semi - aride.

Abstract

This study is part of the integrated management of water resources, it was conducted in the watershed of Lake Fetzara; RAMSAR listed site since 2003, located 18 km from the capital of the Wilaya of Annaba, where issues related to the exploitation of water resources are critical and the availability of relevant data is low. The main objective is to establish a monograph on the hydrology of the lake, which belongs to an ungauged catchment, assessment of solid and liquid intake and the frequency analysis of flows and flood hydrographs was made subject to approaches that rely almost exclusively, in this case, information on rainfall which has imposed a critical view and control of the latter.

A model of annual water balance of Lake Fetzara a is developed for two periods 1986/1996 and 2001/2006, We evaluated the part called "input" that boils down to the lake precipitation and runoff in the watershed to the lake, and the "output" which is represented by evaporation. The results revealed that the existence of Lake Fetzara depends on a delicate balance between water inflow and evaporation. The determination of the water balance allows to highlight the character of this semi-arid region by the existence of a significant rainfall deficit coupled with aggravating climate data (high irradiation, high temperature ...). The results presented in this work are useful for planning, protection and management of water resources in this region of Algeria.

Keywords: Integrated management, lake Fetzara, hydrology, flow, flood hydrographs, water balance, semi-arid.

ملخص

تندرج هذه الأطروحة في إطار التسيير المتكامل للموارد المائية، لقد أجريت في الحوض الصباب لبحيرة فتزارة التي صنفت سنة 2003 كموقع رمسار ، والتي تقع على بعد 18 كم من بلدية عنابة، حيث تتميز هذه المنطقة بالإستغلال الحرج للموارد المائية و كذلك بندرة المعطيات اللازمة. إن الهدف الرئيسي هو إنجاز دراسة هيدرولوجية للبحيرة التي تنتمي إلى حوض غير مقاس التدفق ungauged basin ، حيث تم تقدير الكميات المتدفقة الصلبة والسائلة التي تصب في البحيرة وكذا تحليل تواتر السيلاان والهيدروغرامات الناتجة و ذلك اعتمادا على المناهج التي تستوجب بشكل حصري ، في هذه الحالة ، على معلومات عن سقوط الأمطار مما فرض وجهة نظر ناقدة وتصحيح هذه الأخيرة .

تم تطوير نموذج التوازن السنوي لمياه بحيرة فتزارة لفترتين 1996/1986 و 2006/2001. حيث قمنا بتقييم الجزء المسمى "الواردات" الذي يتلخص في هطول الأمطار على البحيرة وسيلاان المياه من مستجمعات المياه إلى البحيرة ، و "النفقات" الذي يمثله التبخر. وكشفت النتائج أن وجود بحيرة فتزارة يعتمد على توازن دقيق بين تدفق المياه والتبخر . تحديد التوازن المائي يسمح بتسليط الضوء على طبيعة هذه المنطقة شبه الجافة التي تميزت بوجود عجز كبير للأمطار مقترنة ببيانات مناخية متفاقمة (ارتفاع درجة حرارة، الإشعاع....). إن النتائج التي قدمت في هذا العمل قد تكون مفيدة لحماية ، وتخطيط وإدارة موارد المياه في هذه المنطقة من الجزائر.

الكلمات الجوهرية: الإدارة المتكاملة، بحيرة فتزارة، الهيدرولوجيا، التدفق، الهيدروغرامات ، التوازن المائي، شبه الجافة.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction.....	3
1.2. La limnologie.....	3
1.3. Epistémologie : évolution des problématiques de la limnologie.....	4
1.4. Les lacs.....	5
1.4.1. Origine et formation des lacs	8
1.4.2. Caractéristiques morphologiques des cuvettes lacustres.....	9
1.4.3. Le régime thermique des lacs.....	10
1.4.4. Classification thermique des lacs	12
1.5. Les lacs d'Algérie.....	13
1.5.1. Problèmes des lacs d'Algérie.....	17
1.5.2. La gestion intégrée des lacs en Algérie.....	19
1.6. Conclusion.....	20

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

2.1. Introduction.....	21
2.2. Localisation géographique.....	21
2.3. Description physique du bassin versant du lac.....	22
2.3.1. Géomorphologique du bassin.....	22
2.3.2. Hydrographie du bassin.....	22
2.3.3. Caractéristiques morphométriques et hydrologiques.....	23
2.3.4. Aperçu géologique.....	27
2.3.3.1. Litho-stratigraphie de la région.....	27
2.3.5. Hydrogéologie de la région.....	30
2.4. Occupation du sol.....	30
2.5. Caractéristiques climatiques.....	32
2.5.1. Type de climat.....	29
2.5.2. Humidité relative.....	33

2.5.3. Température.....	33
2.5.4. Evaporation.....	34
2.5.5. Vent.....	35
2.6. Le lac lui-même.....	36
2.6.1. Aperçu historique, chronique des niveaux lacustres.....	36
2.6.2. Bathymétrie du lac.....	37
2.6.3. Courbes Hauteur- Volume-Capacité de la cuvette.....	39
2.7. Salinisation du lac Fetzara.....	41
2.8. Conclusion.....	41

CHAPITRE 3 : ETUDE HYDROLOGIQUE

3.1. Introduction.....	42
3.2. Etude des précipitations.....	42
3.2.1. Qualité et critique des données recueillies.....	43
3.2.2. Comblement des lacunes.....	47
3.2.3. Ajustement des précipitations annuelles à une loi log-normale.....	50
3.2.4. Variation interannuelle de la pluviométrie.....	53
3.2.5. Précipitation moyenne annuelle sur le bassin versant.....	54
3.3. Etude des apports liquides et solides.....	60
3.3.1. Les apports liquides	60
3.3.1.1. Evaluation de l'apport et la lame d'eau annuels.....	60
3.3.2. Les apports solides.....	64
3.3.2.1. Estimation de l'apport solide annuel.....	64
3.4. Etude des crues.....	66
3.4.1. Méthodologie générale.....	67
3.4.2. Analyse historique des crues.....	67
3.4.3. Etude des pluies extrêmes.....	67
3.4.4. Elaboration des courbes IDF.....	69
3.4.5. Evaluation des crues.....	70
3.4.6. Définition des hydrogrammes de crues.....	76
3.4.6.1. Méthode du SCS Curve Number.....	76
3.4.6.2. Méthode des courbes isochrones.....	77

3.5. Réaction du lac Fetzara face aux crues.....	84
3.6. Conclusion.....	89

CHAPITRE 4 : BILAN HYDROLOGIQUE DU LAC FETZARA

4.1. Introduction.....	90
4.2. Bilan hydrologique annuel des lacs.....	90
4.3. Bilan climatique du lac Fetzara.....	90
4.4. Bilan hydrologique annuel du lac Fetzara.....	93
4.4.1. Quantification des différents termes du bilan hydrologique.....	94
4.4.1.1. Evaporation	94
4.4.1.2. Le ruissellement.....	95
4.4.1.3. Les précipitations sur le lac.....	104
4.4.1.4. Ecoulement par l'émissaire.....	104
4.4.2. Résultats et discussion.....	105
4.5. Conclusion.....	107
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....	109

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1.	Modèle schématique des liens fonctionnels entre les écosystèmes terrestres et aquatiques	4
Figure 1.2.	Les plus grands lacs du monde de par leur volume.....	7
Figure 1.3.	Milieux de transition entre les lacs et les principaux milieux aquatiques continentaux.....	10
Figure 1.4.	Stratification thermique des eaux d'un lac.....	12
Figure 1.5.	Processus de mélanges verticaux.....	
Figure 1.6.	Image satellite du chott Melrhir.....	14
Figure 1.7.	Photo de la sebkha d'Oran.....	14
Figure 1.8.	Photo du lac Fetzara.....	15
Figure 1.9.	Photo du lac Tonga.....	15
Figure 2.1.	Image ©Google 2011. Localisation géographique du lac Fetzara.....	21
Figure 2.2.	Terrains agricoles inondés par le lac en saison hivernale.....	22
Figure 2.3.	Découpage du bassin versant du lac Fetzara en sous bassins élémentaires.....	23
Figure 2.4.	Géologie du milieu étudié.....	26
Figure 2.5.	Carte d'occupation du sol du bassin versant du lac Fetzara.....	28
Figure 2.6.	Les domaines bioclimatiques du Nord d'Algérie.....	29
Figure 2.7.	Variation mensuelle de l'humidité relative, période 1978/2004.....	30
Figure 2.8.	Variation mensuelle de la température, période (1976/2005).....	31
Figure 2.9.	Variation mensuelle de l'évaporation, période (1986/1996).....	32
Figure 2.10.	Variation mensuelle de la vitesse du vent, période (1986/1996).....	32
Figure 2.11.	Image Google Earth 2011©, le lac Fetzara et son canal de d'assèchement.....	34
Figure 2.12.	Carte bathymétrique de la cuvette du lac Fetzara.....	35
Figure 2.13.	Courbes Hauteur-Surface-Volume du lac Fetzara.....	37
Figure 3.1.	Carte de situation des stations pluviométriques.....	39
Figure 3.2.	Corrélation double-masse des précipitations entre Bouati et Azzaba, période (1970/2004).....	41
Figure 3.3.	Données et droite de régression entre Azzaba et Bouati.....	43

Figure 3.4.	Histogramme des résidus centrés réduits.....	44
Figure 3.5.	Ajustement des précipitations annuelles à une loi log-normale (Berrahel, période 1970/2004).....	49
Figure 3.6.	Variation interannuelle des précipitations des stations Ain Berda, Berrahal, Boukhemouza, Zit Emba et Azzaba (1970/2004).....	50
Figure 3.7.	Variation interannuelle des précipitations des stations Bouati, El Kerma, Pont Bouchet et Kef Mourad (1970/2004).....	50
Figure 3.8.	Carte pluviométrique moyenne interannuelle du Nord-Est Algérien (Septembre 1969-août 1998).....	51
Figure 3.9.	Découpage de la surface du bassin versant en zones d'influences des stations pluviométriques.....	53
Figure 3.10.	Relation : précipitation moyenne interannuelle, altitude.....	54
Figure 3.11.	Répartition spatiale des résidus de régression.....	55
Figure 3.12.	Carte des isohyètes annuelles établie pour la période 1970/2004.....	56
Figure 3.13.	Contribution des sous bassins élémentaires du bassin versant du lac Fetzara dans l'écoulement annuel (méthode de Coutagne).....	59
Figure 3.14.	Carte de l'écoulement annuel moyen de l'Est Algérien (période moyenne : 1965/966–1994/1995).....	60
Figure 3.15.	Courbe des intensités fréquentielles (station de Berrahel).....	67
Figure 3.16.	Comparaison des débits de crues fréquents des sous bassins versants.....	71
Figure 3.17.	Hydrogramme de crue obtenu par la méthode SCS pour une période de retour de 10 ans pour le sous bassin BV 01.....	77
Figure 3.18.	Hydrogramme de crue obtenu par la méthode des isochrones pour une période de retour de 10 ans pour le sous bassin BV 01.....	77
Figure 3.19.	Hydrogrammes des crues des sous bassins obtenus par la méthode des isochrones pour une période de retour de 10 ans.....	78
Figure 3.20.	Hydrogrammes des crues des sous bassins obtenus par la méthode SCS –CN pour une période de retour de 10 ans.....	80
Figure 3.21.	Profil en travers du lac Fetzara.....	83
Figure 3.22.	Hauteurs d'eau engendrées par les crues de récurrence de 10 ans, 100	

	ans et 500 ans.....	84
Figure 4.1.	Corrélogramme pluie.....	88
Figure 4.2.	Corrélogramme évaporation.....	88
Figure 4.3.	Comparaison entre les valeurs moyennes mensuelles de la pluviométrie et de l'évaporation et leur ajustement par une fonction circulaire.....	89
Figure 4.4.	Variation annuelle de l'évaporation, périodes 1986/1996 et 2001/2006.	92
Figure 4.5.	Variabilité spatiale du paramètre de calage du modèle (a).....	99
Figure 4.6.	Corrélation entre les débits mesurés et les débits simulés.....	100
Figure 4.7.	Variation annuelle du débit simulé avec le modèle (a).....	100
Figure 4.8.	Variation annuelle de la pluviométrie, périodes 1986/1996 et 2001/2006.....	101
Figure 4.9.	Bilan annuel et interannuel du lac Fetzara pour la période 1986/1996...	103
Figure 4.10.	Bilan annuel et interannuel du lac Fetzara pour la période 2001/2006...	103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1.	Les plus grands lacs d'Algérie d'importance internationale.....	17
Tableau 2.1.	Modèles de calcul du temps de concentration.....	25
Tableau 2.2.	Caractéristiques des sous bassins élémentaires du lac Fetzara.....	26
Tableau 2.3.	Moyennes mensuelles de l'humidité relative (en %) pour la période (1978/2004) de la station de Annaba.....	30
Tableau 2.4.	Températures mensuelles (en °C) pour la période (1976/2005) de la station de Annaba (ONM).....	31
Tableau 2.5.	Moyennes mensuelles de l'évaporation (mm) pour la période (1986/1996) de la station de Annaba.....	32
Tableau 2.6.	Moyennes mensuelles de la vitesse du vent pour la période (1986/1996) de la station de Annaba	32
Tableau 2.7.	Calcul des courbes Hauteur -Surface-Capacité.....	36
Tableau 2.8.	Cordonnées des courbes Hauteur –Surface-Capacité.....	36
Tableau 3.1.	Caractéristiques des stations pluviométriques étudiées.....	40
Tableau 3.2.	Coefficients d'ajustement.....	42
Tableau 3.3.	Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables ($H_0 = Y = \text{Moy}(Y)$).....	42
Tableau 3.4.	Paramètres du modèle.....	42
Tableau 3.5.	Résultats des corrélations entre les stations par la régression linéaire.....	44
Tableau 3.6.	Précipitations annuelles fréquentielles des stations étudiées.....	48
Tableau 3.7.	La lame d'eau annuelle précipitée obtenue à partir de la méthode Thiessen.....	52
Tableau 3.8.	Estimation de la lame d'eau moyenne annuelle par la méthode des isohyètes.....	56
Tableau 3.9.	Formules utilisées pour l'évaluation de la lame d'eau écoulée.....	57
Tableau 3.10.	Estimation de la lame d'eau écoulée et l'apport moyen annuel sur l'ensemble du bassin versant.....	58
Tableau 3.11.	Valeurs de α pour différentes perméabilités.....	62
Tableau 3.12.	Résultats de l'estimation du transport solide.....	63

Tableau 3.13.	Pluies maximales journalières fréquentielles.....	66
Tableau 3.14.	Valeurs de l'exposant climatiques des stations pluviométriques.....	67
Tableau 3.15.	Débits des crues (m ³ /s) des sous bassins pour différentes périodes de retour.....	69
Tableau 3.16.	Débits de crues fréquentielles (m ³ /s) retenus pour les sous bassins.....	70
Tableau 3.17.	Débits maximum obtenus par la méthode SCS et celle des isochrones...	76
Tableau 3.18.	Volume et durée des crues fréquentielles atteignant le lac Fetzara.....	82
Tableau 3.19.	Surélévation de la hauteur d'eau lors des crues.....	85
Tableau 4.1.	Bilan annuel du lac pour la période 1986/1996.....	102
Tableau 4.2.	Bilan annuel du lac pour la période 2001/2006.....	102

INTRODUCTION GENERALE

Les lacs acquièrent à travers toute la planète une importance de plus en plus grande. Ces milieux sont non seulement exceptionnellement riches en biodiversité et extrêmement productifs, mais ils jouent également un rôle capital dans la conservation et la gestion des eaux douces. En outre, ces derniers présentent à travers tout le globe une source non négligeable de revenus pour une population croissante, et ont de ce fait une importance socio-économique significative pour les populations locales.

Les lacs sont des écosystèmes très complexes, vulnérables, et dont le fonctionnement n'est cependant ni bien connu ni bien compris, notamment dans les zones subhumides de la méditerranée méridionale. Le manque de maîtrise ou de compréhension des processus impliqués, s'explique souvent par l'absence d'analyses et d'évaluations adéquates assises sur des données fiables, d'un suivi régulier et itératif imposé par les réactions dans le temps, des systèmes naturels ou par la fréquence des événements à observer. N'étant pas correctement alimentés par des données, les modèles d'évolution des sols, des réseaux hydrographiques, du climat ou des écosystèmes reposent souvent sur des hypothèses insuffisantes pour représenter avec fiabilité l'évolution de la situation que ce soit au sein de la zone humide ou au niveau du bassin hydrographique .

Cet état de la connaissance qui est un cas de figure qui se répète dans tous les pays en voie de développement, influence et affecte amplement la gestion des bassins hydrographiques. Ses répercussions sont considérables non seulement sur les zones humides, mais aussi sur l'ensemble du bassin versant auquel elles appartiennent.

En Algérie, l'emprise croissante de l'homme sur ces lacs et leurs bassins versants, introduit des risques qui suscitent des craintes à l'échelle de seulement quelques années pour ce pays afro-méditerranéen, dont les ressources en eau sont limitées et très dépendantes de l'influence du climat. Malgré les nombreux efforts fournis par ce pays pour la mise en œuvre d'une gestion durable de la ressource au niveau des bassins versants et la conservation de ces zones humides, la situation pour la majorité de ces écosystèmes fragiles reste à désirer. L'exemple du lac Fetzara est illustratif, car il s'agit d'une zone classée site RAMSAR depuis 2003 et réserve de la biosphère, vu sa grande richesse faunistique et floristique. En parallèle, ce territoire continue à subir une dégradation intense, causée par l'action humaine surtout mais aussi par des facteurs naturels.

Les recherches dans les domaines de l'hydrologie et des bilans hydrologiques sont indispensables pour proposer des scénarios de gestion durable des bassins versants. Leur rôle est

particulièrement important dans les régions comme celle du lac Fetzara où l'utilisation des ressources en eau est critique, la disponibilité et la qualité des données hydrométéorologiques sont pauvres. Ce mémoire tente d'apporter une contribution à certains des besoins de recherche évoqués ci-dessus en répondant aux questions suivantes.

La première question abordée est liée à la disponibilité des données et à leur qualité. Un inventaire critique des types, de la qualité et des caractéristiques spatiales et temporelles des données existantes est fondamental avant de réaliser les études hydrologiques. Il met en évidence les lacunes et les erreurs dans les jeux de données existants et permet d'identifier les stratégies pertinentes pour résoudre ces problèmes. Cette étude a évalué les caractéristiques des jeux de données existants pour le bassin du lac Fetzara en soulevant quelques questions clés liées à la nature, la couverture spatiale, la qualité et la cohérence des séries de données hydrométéorologiques. Les données géographiques décrivant les bassins versants ont également été étudiées.

Dans la région étudiée, tous les sous bassins alimentant le lac Fetzara sont non jaugés. Les problèmes d'inondation et d'érosion sont critiques à cause de leurs impacts négatifs localement (pertes en terre) mais également en aval du site d'étude (envasement de la cuvette). Dans cette perspective, les recherches qui visent à améliorer les estimations des écoulements de surface provenant des bassins versants non jaugés et des apports de sédiments sont nécessaires pour assurer la durabilité de l'usage des ressources en eau. À cet égard, l'utilisation de modèles hydrologiques distribués à base physique peut se révéler très utile mais ces derniers exigent énormément de données.

Le bilan hydrologique du lac Fetzara a été étudié afin d'aboutir à des estimations des principaux termes du bilan issues d'un contrôle de qualité et représentatif des conditions hydrométéorologiques sur deux périodes 1986/1996 et 2001/2006.

Les objectifs spécifiques de ce mémoire consistent en :

- Inventaire, collecte, critique et analyse des données hydrométéorologiques et géographiques disponibles dans le bassin du lac Fetzara.
- Etude hydrologique globale du bassin versant incluant l'estimation des apports liquides et solides à l'échelle annuelle, l'étude des crues et des hydrogrammes des crues sur chacun des sous bassins versants du lac.
- Calcul du bilan hydrologique du lac Fetzara à l'échelle annuelle et interannuelle.

En abordant les questions de recherche présentées ci-dessus, ce mémoire apporte une contribution notable à la gestion durable des ressources en eau dans la région du lac Fetzara.

1.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'explorer le thème de recherche qui est la limnologie ou étude des lacs afin de se familiariser avec le courant de pensée dans lequel s'inscrit le sujet et s'habituer au langage employé, la genèse de la limnologie a été abordée ainsi que des définitions concernant les lacs ; leurs formation ; leurs origine ; leurs fonctionnement ...etc. Pour finir, un inventaire des différents lacs se trouvant sur le territoire Algérien a été énuméré ainsi que les problèmes rencontrés par ces derniers.

1.2. La limnologie

La limnologie, science des écosystèmes aquatiques continentaux, est une discipline née sur les bords du lac Léman. Elle se définit aujourd'hui comme une discipline, forme d'écologie spécialisée et régionalisée s'apparentant méthodologiquement et conceptuellement à l'océanographie. Bernard Dussart, grand limnologue français (Jacquet, 2009), créateur de la Station de recherche limnologique à Thonon-les-Bains, en a fait en 1966 la « science des eaux superficielles continentales ou intérieures », étendant son "domaine de compétence" aux eaux courantes. Cette extension a eu l'avantage de rendre compte de la solidarité du réseau hydrographique de surface.

De nos jours, la limnologie s'intéresse à toutes les eaux intérieures de surface, qu'elles soient douces ou saumâtres, stagnantes (lacs, étangs, zones humides, bras morts...), courantes (ruisseaux, fleuves et rivières...) ou souterraines (nappes, rivières souterraines...) et aux organismes de la flore, de la faune et de tous les autres règnes qui y sont liés. Elle examine l'ensemble des interactions entre les caractéristiques des milieux et ces organismes et entre les différentes communautés qui peuplent ces écosystèmes. Les travaux récents ayant mis en évidence l'importance des relations entre ces milieux aquatiques et leurs rives immédiates, sont également prises en compte, ne serait-ce que comme point de départ des chaînes trophiques alimentées par les débris végétaux terrestres. Il en va de même pour la prise en considération de l'importance du bassin versant. Enfin, tous ces aspects sont considérés tant du point de vue fondamental qu'appliqué pour la préservation, la gestion et l'exploitation durable de ces écosystèmes.

Il est donc clair que les relations étroites qui lient l'homme et les eaux douces sont autant de facteurs que la limnologie doit prendre en compte. La limnologie présente donc une diversité thématique très importante. La compréhension et la gestion des écosystèmes

aquatiques font en effet appel à de nombreuses compétences scientifiques, allant de la chimie à la biologie en passant, entre autres, par l'hydraulique et la climatologie.

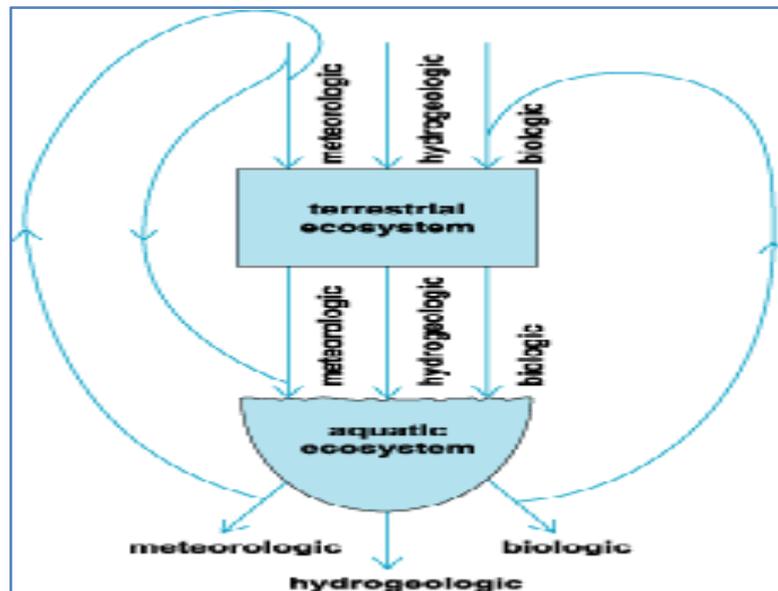


Figure 1.1. Modèle schématique des liens fonctionnels entre les écosystèmes terrestres et aquatiques (McGraw-Hill Science & Technology Encyclopedia) .

1.3. Epistémologie : évolution des problématiques de la limnologie

Qualifiée d'océanographie des lacs par son fondateur, le suisse François Alphonse Forel, la limnologie est née en 1892, avec la publication d'une monographie sur le lac Léman. Elle est ensuite devenue la science des eaux continentales, en s'intéressant aux relations qu'entretiennent les organismes aquatiques et riverains entre eux et avec leurs milieux lacustres ou lotiques, superficiels ou souterrains, doux ou saumâtres.

La limnologie moderne est donc héritière d'un siècle d'histoire ? Elle s'est particulièrement développée entre les deux guerres mondiales, en Europe, en Amérique du Nord et au Japon. Parmi les figures marquantes de la discipline, l'Allemand August Thienemann (1959) et le Suédois Einar Nauman (1931) animèrent pendant une trentaine d'années, entre autres recherches, un vaste travail de classification des lacs de la planète, tandis qu'en Amérique du Nord, Edward Birge (1956) et Chancey Juday (1963) s'attachaient à replacer les lacs et leurs différents types le long de gradients environnementaux. Cette phase principalement descriptive prit fin avec G. Evelyn Hutchinson, auteur d'un monumental traité de Limnologie et instigateur d'une bonne part des recherches menées de 1945 à 1980 sur l'écologie des eaux continentales.

De 1945 à 1960, les avancées les plus marquantes ont porté sur : le métabolisme des rivières, l'influence des bassins versants sur le fonctionnement écologique et biogéochimique des cours d'eau, la modélisation prédictive de l'eutrophisation des lacs et leur réhabilitation, la manipulation in situ des réseaux trophiques. Ces avancées, souvent réalisées par des petites équipes dans un souci d'application, ont simulé des recherches plus fondamentales sur les mécanismes écologiques sous-jacents. Elles ont aussi ouvert la voie, notamment sous l'influence du Programme Biologique International entre 1960 et 1980, au développement de modèles qualitatifs de plus en plus réalistes. Les travaux menés en France, dans les différents organismes de recherche et dans les universités, ont largement contribué à ces avancées (Pourriot et Meybeck, 1995).

Les dernières décennies du XX^{ème} siècle ont vu s'estomper les limites entre la limnologie fondamentale et appliquée. Surtout, elles se sont démarquées des décennies précédentes (Kalff, 2002) : d'un point de vue technique, les méthodes d'observations en continu, y compris par télédétection, ont permis de disposer de quantités considérables de données, en même temps que se développaient les capacités de modélisation et que s'affinaient les analyses permettant de détecter, par exemple, les produits contaminants; d'un point de vue conceptuel, les écosystèmes aquatiques continentaux sont apparus comme des systèmes ouverts, largement influencés par les caractéristiques de leurs bassins versants, et les communautés aquatiques comme des systèmes en état de non-équilibre quasi permanent.

Au delà de ce débat, et quel que soit son intérêt, la limnologie est confrontée à deux défis majeurs en ce début de XXI^{ème} siècle. Le premier défi concerne la question des échelles d'espace et de temps, y compris la question des relations entre ces échelles auxquelles convient de se placer face aux changements de l'environnement. Le second défi concerne l'articulation de la limnologie avec d'autres sciences, particulièrement celles de l'homme et de la société, pour imaginer des solutions aux problèmes posés par ces changements, une articulation qui renvoie à des notions telles que celle de socio-écosystème. Répondre à ces défis suppose une organisation plus cohérente et plus interdisciplinaire des recherches conduites un peu partout dans le monde, une organisation qu'il faudrait repenser, à un niveau continental, sans oublier le devoir d'une vision planétaire.

1.4. Les lacs

Les lacs sont des dépressions de l'écorce terrestre remplies d'eau. Ils sont de taille très variable et sont répartis sur toute la surface du globe. On en trouve à toutes les altitudes, aussi

bien en haute montagne (le lac Titicaca au Pérou est situé à 3 812 m au-dessus de la mer) qu'au niveau de la mer ou même en dessous (le niveau de la mer Morte est à - 394 m d'altitude). Le plus profond est le lac Baïkal, qui, avec ses 1 637 m de profondeur, n'en est pas moins situé à 457 m d'altitude, occupant une dépression tectonique (ancien rift). De nombreux lacs de Norvège remplissent d'anciens fjords dont le fond est au-dessous du niveau de la mer. Quant au plus grand, certains, considérant la définition et la situation actuelles des lacs, le verront dans la Caspienne, d'autres dans le lac Supérieur.

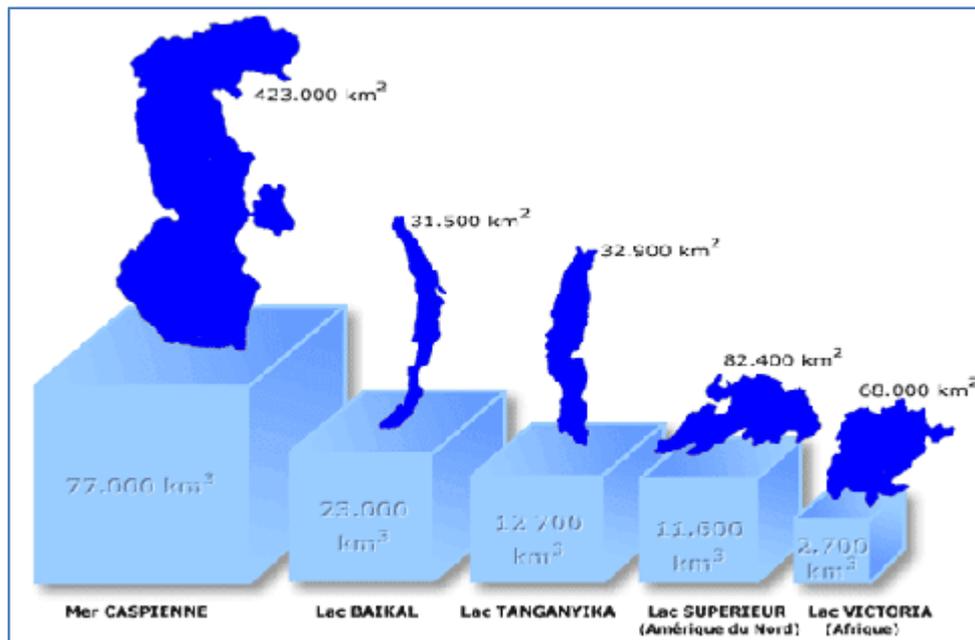


Figure 1.2. Les plus grands lacs du monde de par leur volume.
(<http://www.lacbaikal.org>)

Plus de quarante lacs naturels dans le monde ont une superficie supérieure à 4 000 km² et une quarantaine ont une profondeur qui dépasse trois cents mètres. Dans les régions où un même phénomène géologique a provoqué l'apparition d'un grand nombre de cuvettes remplissables, on parle de familles de lacs : ainsi la Scandinavie compte des dizaines de milliers de lacs dus à des phénomènes glaciaires.

La classification des lacs peut se faire en fonction de critères selon:

- Leur origine ;
- Leur zonation thermique;
- Leur statut trophique (quantité de matière organique produite en fonction des apports en azote et phosphore) .

Les limites typologiques des lacs ne sont pas nettes comme le montre la figure 1.3. Un élargissement de rivière peut être caractérisé par des zones d'eau stagnante (cas du lac Saint-Pierre sur le Saint-Laurent). Les réservoirs de barrage, non considérés en tant que tels, sont un des meilleurs exemples de ces milieux de transition aux caractéristiques à la fois fluviales et lacustres; certains lacs de barrage naturels, comme celui de Chaillexon, dans le Doubs, ont d'ailleurs des fonctionnements très semblables à ceux des réservoirs artificiels et sont aussi des milieux mixtes. Les lacs côtiers, souvent appelés lagunes, peuvent avoir une ouverture, quelquefois agrandie par l'homme, sur l'océan. Lorsque les échanges avec les eaux salées sont très importants, la lagune ou le plan d'eau côtier peuvent alors être considérés comme faisant partie du milieu marin (cas pour la mer Baltique). La Baltique doit aussi être considérée comme un milieu intermédiaire : elle est très peu salée dans le golfe de Finlande, mais elle est en connexion directe avec l'océan Atlantique. De légères modifications du seuil suffisent à la priver de cette connexion, ce qui lui est arrivé deux fois depuis le retrait des glaciers. Certains lacs ne sont pas en eau de façon permanente mais intermittente (plaines d'inondation, lacs en région karstique), ou occasionnelle (lacs en région aride).

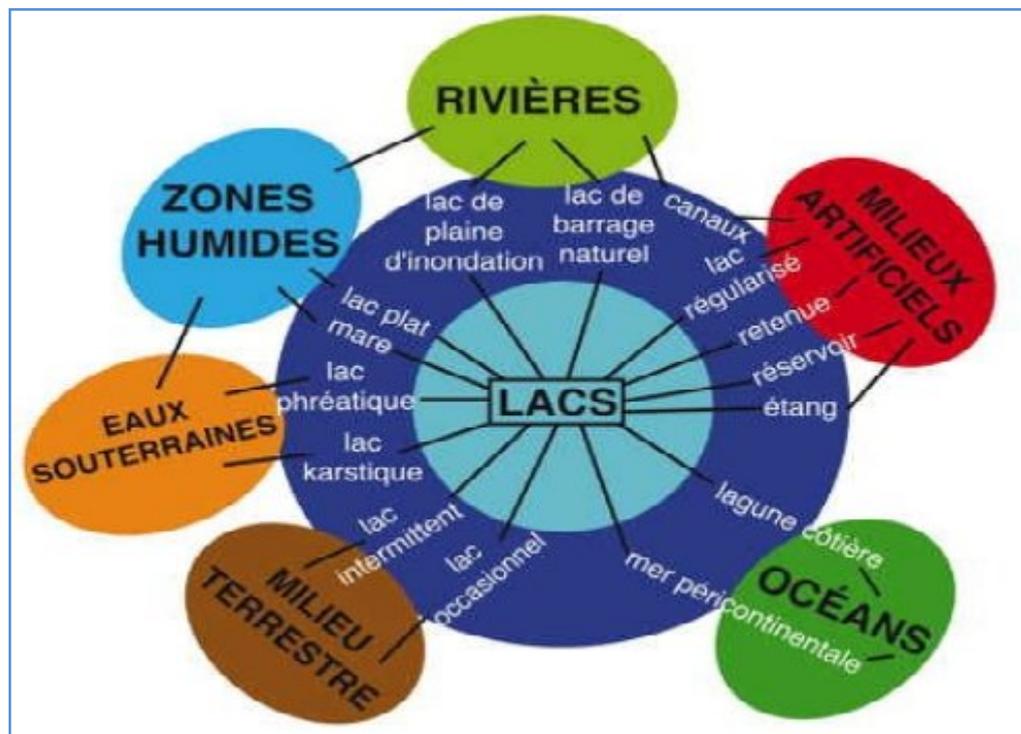


Figure 1.3. Milieux de transition entre les lacs et les principaux milieux aquatiques continentaux (d'après Meybeck 1995).

1.4.1. Origine et formation des lacs

Il existe bien des causes possibles à la formation d'un lac. Spécialiste de limnologie, G. Evelyn Hutchinson a identifié 76 types de lacs différents selon la manière dont ils ont été formés (Lacroix, 1991). En général, les lacs se forment lorsque les eaux qui coulent le long des pentes, cours d'eau ou eaux de ruissellement, rencontrent un obstacle, une contre-pente, qui les empêche de poursuivre leur course. Les eaux envahissent alors la dépression, ainsi créée formant des étendues d'eaux parfois immenses, à tel point que certains grands lacs sont appelés des mers comme la mer Caspienne avec ses 371 000 kilomètres carrés de superficie. Une classification des lacs peut se faire sur le type d'événement géologique qui a présidé à leur formation :

- **Océaniques**, comme la mer Caspienne ou la mer d'Aral ;
- **Tectoniques**, dus à l'effondrement de portions de la croûte terrestre, comme le lac Tanganyika, le lac Malawi et le lac Victoria ;
- **Volcaniques**, un lac peut se former dans une caldeira ou un volcan actif (Lac acide) :
 - Lacs de cratère comme le lac Albano, le lac de Nemi ou le Barombi-mbo;
 - Lacs polycratères ou intercratères, comme le lac de Bolsena ou le lac de Bracciano ;
- **Alluvionnaires**, quand un cours d'eau, par exemple le Brenta en Vénétie, rencontre des dépôts alluvionnaires sur son cours, formant ainsi le lac de Levico et le lac de Caldonazzo ;
- **Glaciaires**, dus à l'érosion glaciaire, comme les lacs des régions préalpines; c'est l'exemple des Cent lacs en Italie ;
- **Pro-glaciaires**, quand le lac est situé devant et alimenté par un glacier ;
- **Morainiques**, quand les matériaux transportés et déposés par les glaciers forment un barrage ;
- **Karstiques**, dus à des phénomènes d'érosion en milieu calcaire et souvent très petits ;
- **De déflation**, dus à l'érosion par les vents, tels ceux du Languedoc ;
- **Artificiels**, créés par des ouvrages construits par l'homme, souvent des barrages pour la production hydroélectrique.

Certains lacs ont des origines multiples. Ainsi le Léman résulte d'un surcreusement de vallée glaciaire au front du chevauchement des Préalpes. Les lacs Toba (Sumatra) et Kivu (Rift est-africain) sont volcano-tectoniques. Les Grands Lacs Laurentiens (Supérieur, Huron,

Michigan, Érié, Ontario) résultent à la fois du surcreusement glaciaire et du rebond isostatique du Bouclier Canadien.

1.4.2. Caractéristiques morphologiques des cuvettes lacustres

Les rapports entre la morphologie des lacs et leur origine ont été largement développés par les fondateurs de la limnologie tels que Forel (1892), Delebecque (1898) et Collet (1925). C'est à Hutchinson (1957) que l'on doit la première description exhaustive de l'origine des lacs de la planète. Plus récemment, Hakanson (1981) et Hakanson et Jansson (1983) ont largement traité de la morphologie des lacs et de son influence sur leurs caractères sédimentaires. Le répertoire des lacs du monde de l'ILEC (1988 à 1991) fournit de nombreuses indications morphométriques utiles sur plus de 400 lacs de la planète. Herdendorf (1984, 1990) décrit les 250 plus grands lacs du monde ($S > 500 \text{ km}^2$). L'établissement des cartes de profondeurs ou cartes bathymétriques s'est tout d'abord effectué par des sondages ponctuels le long de transversales. Ainsi, Delebecque et Hörnlmann ont dû donner des milliers de coups de sonde pour établir, en 1898, la carte du lac de Genève - ou Léman - qui fait encore autorité aujourd'hui. Depuis, l'utilisation de l'échosondeur acoustique ou sonar a permis des relevés continus sur des transversales. La probabilité de manquer une particularité importante du relief sous-lacustre (île sous-lacustre, ravin, trou) est donc beaucoup plus faible. Les paramètres morphologiques principaux sont les suivants (Hutchinson 1957, Wetzel 1983), les abréviations les plus communément admises étant celles d'Hutchinson :

- Longueur maximale (l)** suivant une ligne reliant les deux points les plus éloignés du plan d'eau.
- Largeur maximale (b)** reliant les deux points les plus éloignés suivant une ligne orthogonale à la première qui peut traverser des îles.
- Profondeur maximale (Z_{max})**, plus grande profondeur connue du lac.
- Superficie (A₀)**, superficie du plan d'eau à une cote moyenne. On détermine également la superficie à chaque profondeur (z).
- Volume (V)**, intégrale des superficies déterminées à chaque profondeur (z) depuis la surface du lac jusqu'à la profondeur maximum. Une estimation correcte du volume peut généralement être obtenue par la somme d'une série de volumes (V_{ij}) de tronc de cône entre les profondeurs z_i et z_j.
- Profondeur moyenne (Z)**, quotient du volume (V) du lac à sa superficie (A₀) :
- Périmètre ("shoreline" des Anglo-saxons) (L)**, longueur totale du rivage à une cote donnée. Elle dépend de l'échelle de la carte utilisée, ayant une dimension fractale.

-**Développement du périmètre (Shoreline Development Ratio) (DI)**, rapport du périmètre à la circonférence d'un cercle de superficie équivalente à celle du lac .

Tous ces paramètres morphologiques s'appliquent bien sûr pour une cote déterminée du plan d'eau, en général la cote moyenne annuelle, quelquefois la cote maximale pour les lacs non permanents. Pour les lacs à fort marnage, ces paramètres peuvent considérablement être modifiés d'une année sur l'autre, voire même pendant une même année. La distribution des superficies d'un lac suivant sa cote, la courbe hypsographique et la distribution correspondante des volumes sont des informations clés dans la compréhension du système lacustre. Ces courbes sont directement représentatives de la forme d'un lac et permettent la comparaison de lacs de différentes tailles entre eux.

1.4.3. Le régime thermique des lacs

La surface des lacs est en contact avec l'atmosphère et possède une température sensiblement identique. Les parties les plus profondes sont occupées par de l'eau à une densité supérieure à celle de surface. Cette densité peut atteindre le maximum au fond, pour une température de 4°C. Il s'ensuit qu'un lac profond présente, lorsque l'on descend de la surface vers le fond (figure 1.4):

- De l'eau chaude se refroidissant jusqu'à 4°C l'été,
- De l'eau froide (ou glacée) se réchauffant jusqu'à 4°C l'hiver.

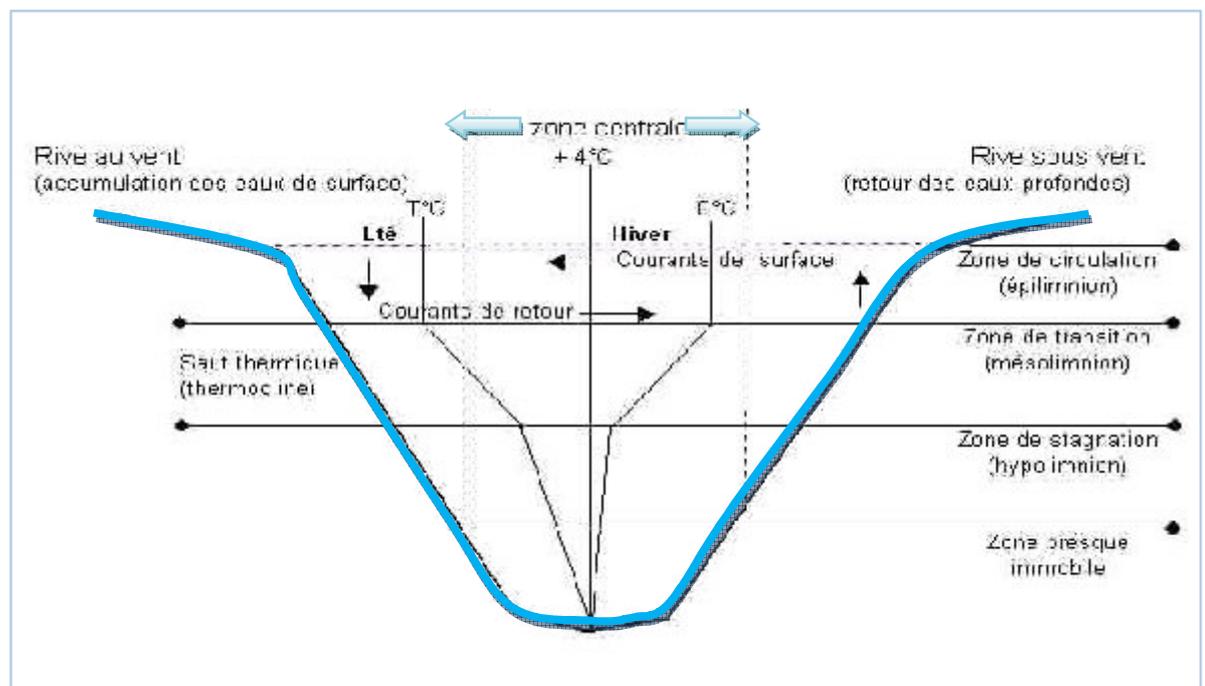


Figure 1.4. Stratification thermique des eaux d'un lac selon Hydroland

(<http://hydroland.pagesperso-orange.fr>)

Ce relevé de la figure 1.4 met en évidence trois couches d'eau de comportement très différent :

- La zone supérieure ou épilimnion, est aérée, reçoit de la lumière et réchauffée l'été. Elle est le siège d'une vie intense. Les algues vertes qui y prolifèrent consomment le CO_2 dissous (lien interne sur ce gaz) et rejettent de l'oxygène O_2 (assimilation chlorophyllienne, et lien interne sur ce gaz).
- La zone de transition ou mésolimnion (thermocline). La teneur en oxygène dissous décroît du haut au bas de cette zone. Les espèces vivantes aérobies disparaissent donc progressivement au profit d'autres moins exigeantes ou strictement anaérobies.
- La zone profonde ou hypolimnion. Totalement dépourvue d'oxygène, cette zone est le siège de fermentations anaérobies. Certaines bactéries libèrent de l'hydrogène sulfuré (H_2S , lien interne sur ce gaz), d'autres du méthane (CH_4 , lien interne sur ce gaz) en décomposant les végétaux morts qui s'accumulent sur le fond.

Le lac subit généralement, en climat tempéré, deux brassages par an qui sont provoqués par la disparition de la stratification thermique faisant place à une colonne d'eau homotherme. Dans ces conditions nouvelles, la masse d'eau devient très instable et le vent qui souffle en surface du lac provoque le brassage de toute la colonne d'eau. On distingue :

- **Un brassage d'automne** : les eaux de surface refroidissent et passent au fond lorsqu'elles atteignent une température de 4 °C. Les eaux du fond remontent à la surface.
- **Un brassage de printemps** : par un phénomène inverse, les eaux de surface qui avaient une température avoisinant 0 degré Celsius, se réchauffent tout doucement et passent au fond du lac lorsqu'elles atteignent 4 °C.

Ce brassage illustré par la figure 1.5 a pour effet de remettre en jeu, dans les zones éclairées ou la vie planctonique se développe, la matière minérale libérée au niveau du fond par l'activité bactérienne (Lemmin, 1995). Il concourt donc au maintien et au développement de toutes les formes de vie qui se manifestent dans ce milieu.

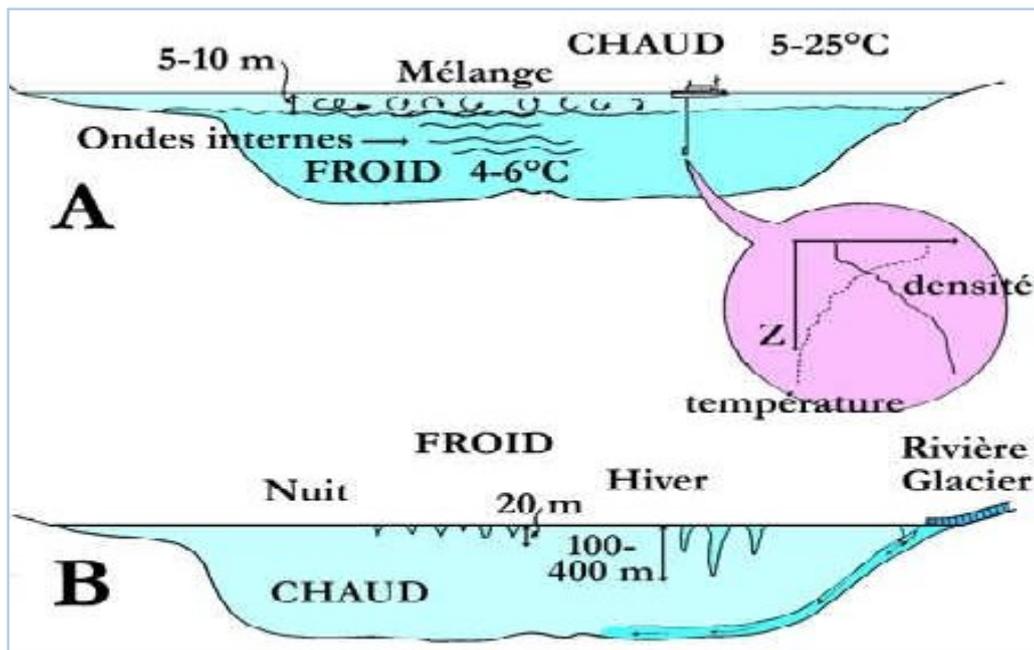


Figure 1.5. Processus de mélanges verticaux (d'après U. Lemmin, 1995).

1.4.4. Classification thermique des lacs

D'après Hutchinson et Loeffler (1956), selon l'altitude, la latitude et les dimensions des lacs, on distingue :

- a. **Lacs amictiques** : pas d'échanges thermiques appréciables entre air et eau. Couche permanente de glace en surface et une température constante et faible en dessous.
- b. **Lacs monomictiques** froids, de type polaire. La température ne dépasse jamais 4°C en surface en saison chaude. Ils gèlent en hiver. Ex : lacs d'altitude dans les Alpes et les Pyrénées.
- c. **Lacs dimictiques** à deux périodes de stratification, une directe en saison chaude, une inverse en saison froide et deux périodes de brassage. Lacs de type tempéré, les plus fréquents. Ex : lacs du Jura, lac d'Annecy.
- d. **Lacs monomictiques** chauds, de type tropical. La température ne descend jamais en-dessous de 4°C, ni en surface, ni en profondeur. Une seule période de brassage en saison froide et une période de stratification directe en saison chaude. Lacs de type tropical de Forel, de type sub-tropical de Yoshimura ou lacs chauds. Ex : lac Léman.
- e. **Lacs oligomictiques** dans lesquels l'eau est toujours chaude à toute profondeur et les périodes de circulation rares, courtes, irrégulières et réduites. Lacs de type tropical de Yoshimura et de Ruttner. Ex : lacs de faible altitude de la zone équatoriale.

f. **Lacs polymictiques** à température relativement basse mais toujours supérieure à 4°C et présentant de nombreuses voire quotidiennes périodes de circulation due à la perte de la chaleur emmagasinée et interdisant ainsi la formation d'une stratification stable.

1.5. Les lacs d'Algérie

La position géographique de l'Algérie, sa configuration physique et la diversité de son climat lui confèrent une importante richesse de zones humides. Sa configuration physique s'est traduite globalement par une zonation latitudinale caractérisée par l'existence de plusieurs types de climats sur lesquelles l'influence méditerranéenne s'atténue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la mer.

Cette diversité de climat a engendré une grande diversité d'écosystèmes de lacs dont la constitution n'est pas sans intérêt: la plupart sont salés ou saumâtres; ils s'emplissent durant la saison des pluies, et se dessèchent en été. Mis à part les lacs d'eau douce, l'Algérie compte un bon nombre de lacs salés de types :

- **Chott** : En Afrique du Nord, un chott est une étendue d'eau salée permanente, au rivage changeant, située dans les régions semi-arides. Les géomorphologues le limitent à la partie tantôt ennoyée tantôt découverte autour du lac, portant quelque végétation et faisant partie d'un ensemble plus étendu qu'ils préfèrent nommer *sebkha*. Les chotts sont alimentés de façon discontinue lors des rares pluies, et subissent une forte évaporation, qui accumule les sels à la surface des limons, parfois exploités, tel que chott El Hodna, chott chergui et chott Melghir, ce dernier est le plus grand lac d'Algérie (figure 1.6). Il se trouve à 40 m sous le niveau de la mer, ainsi il est le point le plus bas de la géographie Algérienne .
- **Sebkha** : qui est un bassin fermé dont le fond est imperméable et où s'accumulent les produits solubles et insolubles issus du bassin versant connue sous le nom de *playa* aux États-Unis et *salinas* en Amérique latine (Amat et al., 2002). Elle se distingue des « *daïa* » caractérisées par la présence d'un drainage par le fond et des « *chott* » qui bénéficient d'une alimentation par voie artésienne.

La frange Nord-Ouest sur les hautes plaines steppiques ; soumise à un régime pluviométrique critique, se caractérise surtout par ces plans d'eau salés tels que ; les marais de la Macta, et la *sebkha* d'Oran (figure 1.7). Contrairement au Nord-Est qui subit un climat

humide ; les lacs d'eau douce sont les plus répandus tels que ; le lac Fetzara (figure 1.8), lac Mellah, lac Oubeira et le lac Tonga (figure 1.9).



Figure 1.6. Image satellite du chott Melrhir.
(<http://en.wikipedia.org>)



Figure 1.7. Photo de la sebkha d'Oran.
(<http://www.skyscrapercity.com>)



Figure 1.8. Photo du lac Fetzara .
(<http://www.sea7h.net>)



Figure 1.9. Photo du lac Tonga .
(<http://images.toocharger.com>)

Une classification de plus de vingt (20) lacs selon le type et la localisation géographique est résumée au tableau 1.1, et qui sont inscrits sur la liste de la convention RAMSAR ; officiellement convention relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, aussi couramment appelée convention sur les zones humides.

Ce traité international adopté le 2 février 1971 pour la conservation et l'utilisation durable des zones humides, vise à enrayer la dégradation ou disparition des zones humides, aujourd'hui et demain, en reconnaissant leurs fonctions écologiques ainsi que leur valeur économique, culturelle, scientifique et récréative.

Dans le cadre de la gestion rationnelle des zones humides et leur utilisation durable, l'administration des forêts d'Algérie a envisagé en 2008, d'initier un programme d'actions sur 5 ans pour les sites classés sur la liste de la convention de Ramsar des zones humides d'importance internationale.

Ce programme d'actions présenté sous forme de projet de développement, se fera sur financement propre. Les principales actions prévues dans le cadre de ce programme sont :

- La fixation des dunes pour fixer le sable et atténuer l'atterrissement des lacs; ainsi que le reboisement des rives de certaines zones humides;
- La correction torrentielle pour la régulation des écoulements des eaux et la lutte contre l'érosion; ainsi que l'ouverture et aménagement de pistes pour le désenclavement des populations ;
- La construction de points d'eaux et forages au profit des populations pour soulager les zones humides des pompages excessifs;
- La construction de postes d'observations pour la surveillance et le suivi scientifique;
- La création de centres d'accueil et d'information du grand public.

Tableau 1.1. Les plus grands lacs d'Algérie d'importance internationale

Nom du lac	Superficie (ha)	Type de lac	Wilaya
Lac Tonga	2.700	Lac d'eau douce côtier	El Tarf, , Parc National d'El kala
Lac Oubeïra	2.200	Lac d'eau douce côtier	El Tarf, , Parc National d'El kala
Le lac des oiseaux	170	Lac d'eau douce côtier	El Tarf, commune du lac des oiseaux
Lac de Réghaïa	842	Lac, marais et oued côtiers	Wilaya d'Alger ,commune de Réghaïa
Lac Béni Bélaïd	600	Lac côtier d'eau douce	Wilaya de Jijel
Lac Fetzara	20.680	Lac d'eau douce	Wilaya de Annaba
Sebkhet El Hamiet	2 509	Lac salé saisonnier	Sétif
Sebkhet Bazer	4 379	Lac salé permanent	Sétif
Chott El Beïdha	12 223	Lac salé saisonnier	Sétif
Garaet Annk Djemel	18 140	Lac salé saisonnier	Oum el Bouaghi
Garaet Guellif	24 000	Lac salé saisonnier	Oum el Bouaghi
Garaet El Taref	33 460	Lac salé permanent	Oum el Bouaghi
Dayet El Ferd	3 323	Lac saumâtre permanent	Tlemcen
Oglat Edaïra	23 430	Lac saumâtre	Naama
Les Salines d'Arzew	5 778	Lac salé saisonnier	Oran
Le lac de Tellamine	2 399	Lac salé saisonnier	Oran
Le Lac Mellah	2 257	Lac d'eau saumâtre	El Tarf
Sebkhet El Meleh	18 947	Lac salé	Ghardaïa
Chott Oum Raneb	7 155	Lac salé	Ouargla
Chott Sidi Slimane	616	Lac saumâtre permanent	Ouargla
Chott Aïn El Beïda	6 853	Lac salé	Ouargla

1.5.1. Problèmes des lacs d'Algérie

Les principales causes de la régression des lacs algériens sont: le drainage, la pollution, la perte et/ou la perturbation des habitats, l'agriculture et la pêche.

a. Drainage

Depuis les temps anciens, l'homme a essayé de drainer les zones humides dans le but de cultiver leurs fonds fertiles. Les interventions à grande échelle ne sont devenues possibles qu'au cours du 20^{ème} siècle grâce à la mécanisation et aux travaux publics de grande envergure. Durant cette période, une partie importante des zones humides de la Méditerranée fut drainée et cultivée, généralement dans des conditions intensives.

Vers la fin du siècle, il commençait à apparaître, à travers des expériences amères, que les schémas de drainage ne réussissent pas toujours et conduisent à des problèmes majeurs, notamment lorsqu'ils sont mêlés à l'intensification de l'agriculture : la perte dans l'approvisionnement en eau, dépôt d'eau et inondation, chute des aquifères, salinisation ainsi qu'un éventuel besoin d'abandon. Les exemples en sont nombreux de part l'Algérie : lac Fetzara, Oubeira, Mellah...etc, et c'est ce qui a conduit à un arrêt graduel du drainage aux fins agricoles.

b. Pollution

La pollution des lacs côtiers et de leurs zones humides par les sous-produits solides et liquides urbains et industriels, est, selon la plupart des états Méditerranéens, un problème majeur du au manque de facilités des traitements appropriés. Les industries chimiques et pétrochimiques concentrées autour des villes côtières constituent en particulier une source majeure de pollution. A cela s'ajoute maintenant une pollution d'origine agricole provenant des grandes quantités de rejets de fertilisants, de pesticides et d'autres substances chimiques agricoles. Leurs effets combinés sur la santé des citoyens et en particulier certaines espèces sont souvent élevés. Il est cependant à noter que ces effets ne sont pas irréversibles et, qu'après élimination des sources de pollution, la biodiversité peut être rétablie à des niveaux considérablement élevés.

c. La surexploitation des ressources

Les populations qui vivent autour des lacs tirent profit des ressources de ces zones pour l'alimentation, les fibres et la biomasse. La surexploitation de ces ressources conduit, dans certains cas, à leur effondrement. Un exemple caractéristique en est la pêche dans les lagunes et les lacs côtiers ou l'utilisation des filets de faible maillage et d'autres méthodes de pêche sont à l'origine de la diminution drastique des captures. D'une manière similaire, la chasse excessive des oiseaux des zones humides et des zones côtières a conduit à une grande diminution de leurs populations, atteignant souvent des niveaux qui dépassent leur besoin de reconstitution.

Le surpâturage dans les zones côtières a causé également la disparition totale de la végétation et, en conséquence, l'érosion de la couche superficielle du sol.

La croissance démographique est à l'origine d'une demande croissante d'eau. Cette demande a conduit à une absence dramatique de gestion des ressources en eau douce. Les lacs et autres zones humides ont été complètement drainés, les rivières détournées, les aquifères surexploités jusqu'à des centaines de mètres de profondeur, conduisant à la salinisation des nappes. Par ailleurs l'eau douce est nécessaire à la maintenance de la biodiversité, notamment pour les habitats et les espèces liées aux zones humides. Celles-ci jouent, en retour et lorsque leurs fonctions sont intactes, un rôle d'équilibre dans le cycle de l'eau; leur dégradation contribue, en revanche, aux déficits en eau ; ce qui établit un cercle vicieux classique.

d. L'agriculture

Il existe certains types de zones humides (marais, zones inondables) qui sont utilisés pour l'élevage et la récolte des matériaux (bois, roseaux, tourbe), comme est le cas du marais de Mekhada qui est utilisé pour le pâturage extensif, notamment dans la partie sud où le marécage laisse progressivement place à la prairie humide (Triplet et al, 1991 in Medouni, 1996). De même les pompages illicites pour l'agriculture et les modes d'irrigation archaïques qui dilapident une considérable quantité d'eau vitale pour l'avifaune aquatique (Anonyme, 1993 in Medouni, 1996).

e. La pêche

Certaines pratiques font de la pêche un danger pour le renouvellement des ressources marines, on note l'utilisation d'explosifs qui aboutit à une modification de substrat entraînant la disparition de tout être vivant dans cette zone (Anonyme, 1993 in Medouni, 1996).

f. Autres problèmes

Comme autres problèmes affectant les zones humides algériennes, il faut ajouter la mise à feu des roselières, le surpâturage, le braconnage et le manque d'équipements de surveillance des écosystèmes marins et lacustre, enfin signalons la faiblesse de la législation concernant les activités d'exploitation et de protection des milieux marins (Medouni, 1996).

1.5.2. La gestion intégrée des lacs en Algérie

La gestion des ressources en zones protégées et en particulier les zones humides d'importance internationale « zone Ramsar », s'orientent de plus en plus vers une gestion

intégrée et globale par bassin versant. Par contre, en Algérie, l'application de ce processus quoi qu'il soit débattu depuis plus d'une décennie, progresse timidement, et l'emphase est toujours mise sur la gestion sectorielle. L'état de dégradation et la menace qui pèse sur les sites Ramsar (lac Fetzara, lac Tonga...) sont un exemple concret de l'échec de cette gestion. Nous émettons l'hypothèse qu'une telle approche est inefficace et que dans ces conditions, pour réaliser cette gestion intégrée, il faut passer d'une approche sectorielle impliquant séparément, un protecteur de la nature, un agriculteur, un consommateur, un gestionnaire hydraulique, un forestier, ...etc. à une approche globale visant collectivement à identifier, comprendre et contrôler tous les éléments qui interviennent dans le système eau /milieu et donc dans sa gestion.

L'approche écosystémique de gestion, déjà largement appliquée et qui fait ses preuves au niveau des zones Ramsar euro-méditerranéennes, est le modèle idéal pour sauver la situation et définir les enjeux majeurs et prioritaires sur les bassins versants. Elle fait également mention des orientations pour l'adoption et la mise en place d'un organisme capable de coordonner les actions d'un schéma d'aménagement et de gestion intégrée du bassin versant. Elle tiendrait compte du caractère protégé du territoire et en même temps des impératifs du développement socio-économique de la population riveraine du lac, dans une perspective de développement durable. Cette étude pionnière dans son genre pourrait être un précurseur pour favoriser la réflexion sur l'adoption d'une démarche intégrée de gestion de la ressource en eau, qui pour une première étape pourrait être effectuée à titre pilote au niveau d'un des bassins versants, car l'adoption définitive d'une telle démarche dans le contexte de l'Algérie génère beaucoup d'hésitation (Raachi , 2007), ce qui constitue la principale contrainte quant à sa mise en œuvre.

1.6. Conclusion

Les lacs sont des écosystèmes très fragiles de part leur nature et leur fonctionnement et l'impact de l'homme sur eux n'est pas des moindres (surexploitation et mauvaise gestion), pour mieux les préserver; une gestion intégrée par bassin versant s'impose qui tente à adopter une approche multisectorielle plus cohérente et globale visant à identifier, comprendre et contrôler collectivement tous les éléments qui interviennent dans le système eau-milieu et donc dans sa gestion.

2.1. Introduction

Ce chapitre décrit la zone d'étude en présentant le milieu physique, la localisation géographique du bassin versant du lac Fetzara ainsi que ses principales caractéristiques, qui comprennent le relief, la géologie, le type et usage du sol et le couvert végétal. La climatologie de la zone d'étude, le réseau hydrographique alimentant le lac ainsi que la bathymétrie de ce dernier ont été abordé.

2.2. Localisation géographique

Le lac Fetzara se situe à 18 Km au Sud-Ouest du Chef lieu de la Wilaya de Annaba et à 14 Km de la mer Méditerranée. Il est limité au Nord par le massif de l'Edough, par les collines d'Ain Berda au Sud et les cordons dunaires situés à l'Est et à l'Ouest. La route Nationale 44 (RN 44) menant vers la ville de Constantine passe au Nord du site, alors qu'à l'Ouest et au Sud, passe le chemin de wilaya N°13 (CW 13) et, à l'Ouest, le chemin de wilaya N°108 (CW 108). A signaler aussi que la voie de chemin de fer, Alger-Annaba, passe entre la RN 44 et le lac. Ses coordonnées géographiques :

- Latitude $36^{\circ} 43'$ et $36^{\circ} 50'$ N
- Longitude $7^{\circ}24'$ et $7^{\circ}39'$ E



Figure 2.1. Image ©Google 2011. Localisation géographique du lac Fetzara.

Le lac Fetzara s'allonge sur 17 kilomètres d'Est en Ouest de la ville d'Annaba à l'extrême Est de l'Algérie et sur 13 kilomètres dans sa partie la plus large. Le plan d'eau libre, dont l'eau douce est relativement temporaire selon l'intensité de la saison des pluies dont il dépend presque

exclusivement, est généralement d'une étendue de plus de plus de 5.800 hectares, auxquelles se rajoutent 4.000 hectares de terres inondables en saison hivernale constituant ainsi de vastes prairies humides.



Figure 2.2. Terrains agricoles inondés par le lac en saison hivernale.
(<http://www.djazair.com>)

2.3. Description physique du bassin versant du lac

2.3.1. Géomorphologique du bassin

Les principaux éléments qui constituent le relief du bassin versant du lac Fetzara se divisent en 4 ensembles distincts:

- Les montagnes aux alentours atteignant une altitude supérieure à 40 mètres,
- La terrasse formée au centre du lac atteignant une altitude comprise entre 2 à et 40 mètres,
- La plaine d'Annaba avec une altitude comprise entre 11 et 20 mètres,
- Les terrains bas dont l'altitude est inférieure à 11 mètres.

2.3.2. Hydrographie du bassin

Les eaux du lac Fetzara proviennent des montagnes environnantes, en dehors des nombreuses châabates (ruisseaux) en provenance des massifs environnants, il existe trois principaux oueds:

- Oued El Hout au Sud ;
- Oued Mellah à l'Ouest ;
- Oued Zied au Nord-Est.

Le bassin versant est d'une superficie totale de 520 Km² et s'étend sur quinze sous-bassins versants qui ont le lac Fetzara comme exutoires comme l'illustre la figure 2.3. Ce morcellement du bassin facilite l'exercice de modélisation puisqu'il permet de modéliser, de façon indépendante le comportement hydrologique de chacun des sous-bassins.

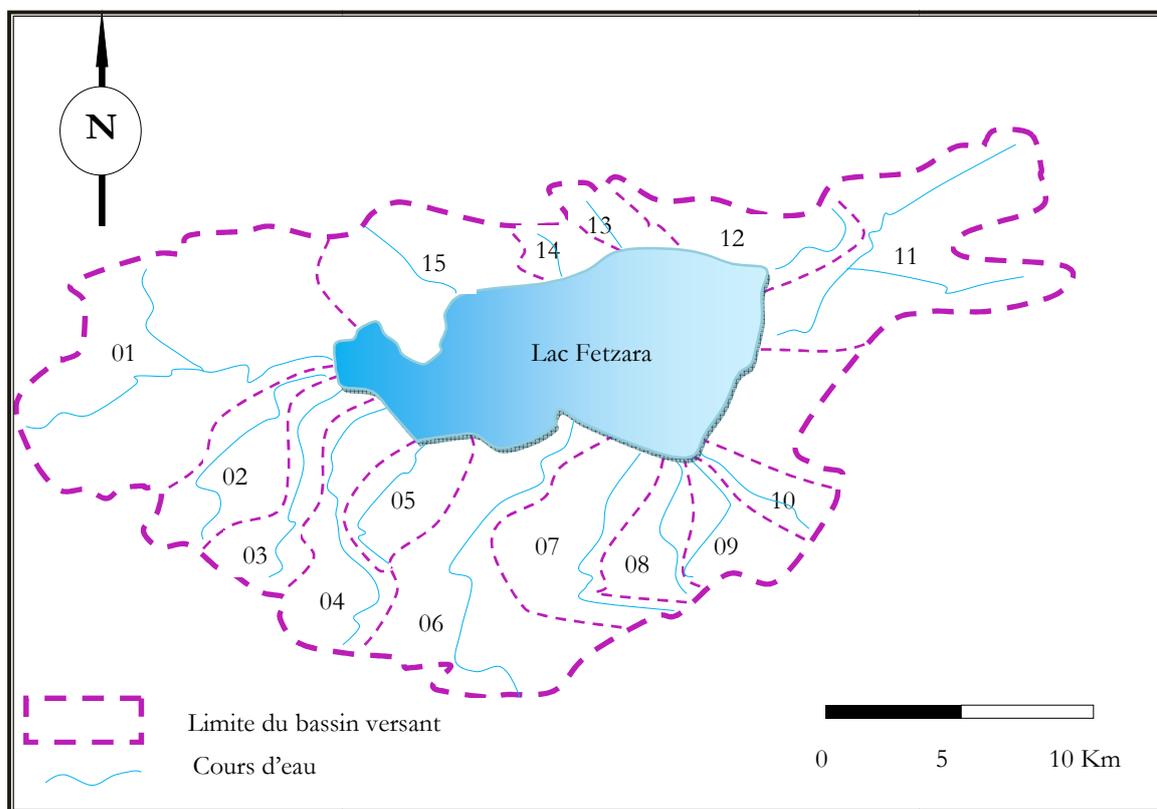


Figure 2.3. Découpage du bassin versant du lac Fetzara en sous bassins élémentaires.

2.3.3. Caractéristiques morphométriques et hydrologiques

Les différents paramètres morphométriques du bassin notamment, la forme, l'altitude caractéristique, la pente du relief, interviennent et souvent de façon combinée dans les modalités de l'écoulement, donc il convient de les préciser dès le début de toute étude, ces derniers nécessitent d'abord la connaissance et la mesure de deux paramètres de base indispensables, en l'occurrence la surface du bassin et son périmètre. L'exactitude du périmètre (P) et de la surface (S) du bassin versant dépendent de l'échelle de la carte; plus cette dernière est bien marquée, plus la délimitation est bien nette et plus le calcul des divers paramètres est précis.

a) Caractéristiques de forme

- Indice de compacité de Gravelius

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire (Musy et al., 2004). Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu parmi lesquels l'indice de compacité de Gravelius (1914), défini comme le rapport du périmètre du

bassin (km) au périmètre du cercle ayant la même surface (km²) :

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (2.1)$$

- Le rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche (1963), permet de comparer facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. L et l représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent tel que :

$$L = K_c \frac{\sqrt{S}}{1,128} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_c} \right)^2} + 1 \right] \quad (2.2)$$

$$l = \frac{P}{2} - L \quad (2.3)$$

b) Caractéristiques des altitudes (relief)

- La courbe hypsométrique

Cette courbe permet de préciser l'influence de l'altitude sur les facteurs climatiques qui régissent l'écoulement des eaux et qui sont les précipitations et la température, elle fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Par ailleurs, dans un contexte d'évolution géomorphologique, elle renseigne sur le niveau de maturité d'un cours d'eau (Hadj-Said, 2007). Les tableaux et figures donnant les courbes hypsométriques des sous bassins sont donnés en annexe A.

- Indice de pente globale

Cet indice est déterminé comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin versant et la longueur du rectangle équivalent (Touaibia, 2004).

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (2.4)$$

Avec: $D = H_{5\%} - H_{95\%}$ (2.5)

$H_{5\%}, H_{95\%}$: altitudes lues sur la courbe hypsométrique (m) ;

L: la longueur du rectangle équivalent (Km).

- Indice de pente moyenne

L'indice de pente moyenne est le rapport entre la dénivelée et la longueur du rectangle équivalent.

$$I_{pm} = \frac{\Delta}{L} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \quad (2.6)$$

c) Densité de drainage

Elle est définie comme étant le rapport entre la longueur totale de tous les talwegs ($\sum L_i$) du bassin versant, à la surface totale de ce dernier (S).

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S} \quad (2.7)$$

d) Temps de concentration

Le temps de concentration est le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reculé du bassin versant jusqu'à l'exutoire. Pour évaluer ce paramètre; trois méthodes ont été utilisées, ces dernières sont détaillées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Modèles de calcul du temps de concentration

Modèle	Equation
Kirpich	$tc = 0,02 \cdot L_p^{0,77} / I^{0,385}$
Giandotti	$tc = (4 \cdot S^{0,5} + 1,5 \cdot L_p) / (0,8 \cdot (H_{\text{moy}} - H_{\text{max}}))$
Sogreah	$tc = 3 \cdot (S \cdot L_p) / (I \cdot 10)^{1,5} \cdot 0,25$

I : pente moyenne du bassin versant (m/m) ;

S : surface du bassin versant en (Km) ;

L_p : longueur du talweg principal en (Km) ;

$H_{\text{moy}}, H_{\text{min}}$: respectivement l'altitude moyenne et minimale du bassin versant (m).

Les caractéristiques morphométriques et hydrologiques des sous bassins étudiés sont résumés au tableau 2.2.

Tableau 2.2. Caractéristiques des sous bassins élémentaires du lac Fetzara.

Code BV	Oued	S (Km ²)	P (Km)	L _p (km)	H _{max} (m NGA)	H _{min} (m NGA)	I _{pm} (m/Km)	Kc	I _g (m/Km)	D _d (Km/Km ²)	Tc (h)
01	Oued Mellah	61,30	64,60	14,30	140	12	5,28	2,31	4,13	0,54	5,06
02	Chaabat Sadaraia	17,60	20,26	9,87	220	15	34,97	1,35	30,19	1,73	3,19
03	Chaabat Bou Ksaiba	21,30	24,80	13,05	220	16	26,50	1,50	24,69	1,64	3,52
04	Chaabat Bou Messous	24,20	28,00	13,50	319	16	33,74	1,59	30,73	1,84	4,58
05	Chaabat El Guat	11,80	14,11	6,70	194	16	49,86	1,15	40,62	3,10	2,46
06	Oued El Hout	82,60	85,20	21,00	350	10	10,24	2,62	9,73	3,68	4,83
07	Chaabat Bouada	24,80	27,10	10,85	196	12	21,71	1,52	21,24	3,93	3,43
08	Chaabat	12,50	16,19	6,51	190	12	39,54	1,28	31,32	2,79	2,47
09	Chaabat Nachem	17,10	20,24	8,20	85	14	12,01	1,37	8,46	2,10	2,96
10	Chaabat El Olga	4,80	8,10	5,95	50	16	18,58	1,04	16,45	0,43	2,27
11	Oued Zied	31,00	35,00	9,23	268	12	21,68	1,76	33,87	2,07	3,01
12	Oued Bou Hadjar	18,30	21,78	5,42	410	12	53,43	1,43	41,32	2,63	1,77
13	Chaabat Karga	7,50	10,31	4,11	150	12	57,99	1,05	58,83	0,89	1,97
14	Chaabat	5,40	8,21	2,62	220	12	118,71	0,99	97,03	1,23	1,36
15	Chaabat	11,70	15,05	3,45	240	12	56,28	1,23	52,22	0,81	1,73

2.3.4. Aperçu géologique

Si l'on s'en réfère à Joleaud (1977), la région littorale fut, durant le Quaternaire, l'objet d'une succession d'oscillations vers le haut et vers le bas, correspondant à des mouvements apparents de la mer, positifs (transgressions) lors des affaissements du littoral, négatifs (régressions) lors des exhaussements. En effet, il y'a la présence, sur tout le pourtour du relief gréseux, de terrasses alluvionnaires étagées de 15 à 150 m au-dessus du niveau actuel des fleuves.

A la fin de cette période d'oscillations: le Lac Fetzara était déjà isolé par ses deux bourrelets W et E; le reste des plaines de Bône constituait une immense lagune comprise entre un cordon dunaire côtier et la base du relief argilo-gréseux. Suivent alors, au Quaternaire récent, un comblement rapide du marécage par les matériaux détritiques arrachés au relief par un ruissellement important, et la formation d'un alluvionnement de galets, de cailloutis, de sables et de limons superposés ou étagés, tant dans le sens horizontal que vertical, suivant la violence et l'intensité des érosions.

Les terrains bas constituant la majorité de la zone humide se sont formés durant l'Halocène. Les alluvions se sont formés à l'Ouest vers la côte de Skikda et, à l'Est, jusqu'à la région côtière de la plaine d'Annaba. Les montagnes, au Nord de la zone, sont formées de roches éruptives et métamorphiques du Trias. Ces roches sont des schistes cristallins et des granites.

Les collines, au Sud du lac, formées au Miocène, sont constituées de flysch et de grès, et parfois de schistes mélangés aux alluvions. Des affleurements de roches se sont formés dans les montagnes situées au Nord du site, clivables, la désagrégation physique y est importante, ceci est à l'origine de la nature sableuse des terrasses.

2.3.3.1. Litho-stratigraphie de la région

Les études de M. Jean-Marie Vila, permettent de proposer une rapide esquisse géologique des différents terrains (figure 2.4).

- Terrains sédimentaires

- **Alluvions actuelles du Fetzara** : terrains limoneux, marécageux ; occupant le fond des dépressions inondées à la saison des pluies.
- **Alluvions récentes** : dépôts limoneux occupant la plaine de Seybouse , la plaine de Bône et le pourtour du lac Fetzara.
- **Alluvions anciennes** : des vallées, terrasses caillouteuses localisées dans quelques vallées secondaires.

- **Soltanien** : sables, limons et cailloux de teinte gris-brunâtre ou brune bien développés au Sud –Ouest du Fetzara.
 - **Grés de Numidie** : grés quartzeux, souvent friables; développés dans les parties culminantes de la région Nord-Ouest, ou ils correspondent à des massifs boisés dont les sommets sont plus au moins déchiquetés et montrent des crêtes dénudées. Ces grés sont intercalés, notamment dans les parties inférieures, de minces lits argileux verdâtres et ils passent le plus souvent en transition ménagée et toujours en concordance parfaite à l'assise suivante; mais l'assise de grés se montre souvent en transgression sur le gneiss ou le schiste correspondant à la bordure du bassin éocène.
 - **Argile et grés** : formant l'assise inférieure de l'étage Numidien, les argiles verdâtres ou brunes, sont feuilletées ou même schisteuses et s'intercalent aux petits lits de grés durs quartziteux, noirs ou de grés feuilletés ; et se trouvent de place en place des calcaires marneux, gris bleuâtres, disposés en lentilles, toujours localisés. Cette assise présente des épaisseurs très variables, qui peuvent atteindre 200 mètres. Dans toute la région Ouest ; elle se montrent dans les dépressions et les vallonnements, depuis les parties les plus basses jusqu'au pied du banc gréseux. Aucune trace de fossiles n'a été signalée dans cette assise d'argiles, les seules traces d'organismes qui aient été reconnue sont des empreintes d'algues ficoïdes.
- **Terrains azoïques**
- **Calcaires cristallins** : ces calcaires jouent un rôle important sur le pourtour du massif ancien où ils se présentent dans les schistes, soit en amas lenticulaires, soit en bandes étroites interrompues çà et là aux affleurements, mais dont la continuité paraît probable aussi la carte indique-t-elle d'une manière théorique la disposition de ces zones qui présentent dans leur direction, une relation extrêmement remarquable avec les contours du noyau principal gneissique du massif ancien.
 - **Schistes et phyllades** : schistes argileux de teinte foncée bleuâtre, peu ou point micacés, généralement satinés, avec intercalation de quartzites.
 - **Schistes micacés et micaschistes** : c'est un complexe de schistes plus ou moins micacés, de micaschistes à biotite, ou à muscovite ou à séricite, mais aussi des schistes amphiboliques, des schistes à minéraux, schistes grenatifères, dont la séparation est impossible sur la carte.
 - **Gneiss** : les roches gneissiques se présentent sous deux types assez différents : le plus ancien, qui constitue toute la masse principale de l'Edough, peut être désigné par *Gneiss de*

l'Edough ou Gneiss inférieur. C'est une succession importante de 1,5 mètres de gneiss à mica noir et blanc qui se désagrègent facilement, donnant lieu à une arène. L'assise supérieure comprend des gneiss schisteux feuilletés très micacés à mica noirs ou blanc. Ces zones occupent les pentes de ces contreforts de l'Edough.

- **Flysch sénonien** : représenté près du village Fetzara, il s'agit d'un flysch atypique, très marneux, peu ou pas gréseux et souvent mal classé, malgré son aspect bien lité, dans les rares coupes favorables à l'observation .

La carte géologique de la figure 2.4 a été réalisée en combinant la carte géologique de Seraidi et celle de Bugeaud au 50 000^{ème} disponibles à l'ANRH.

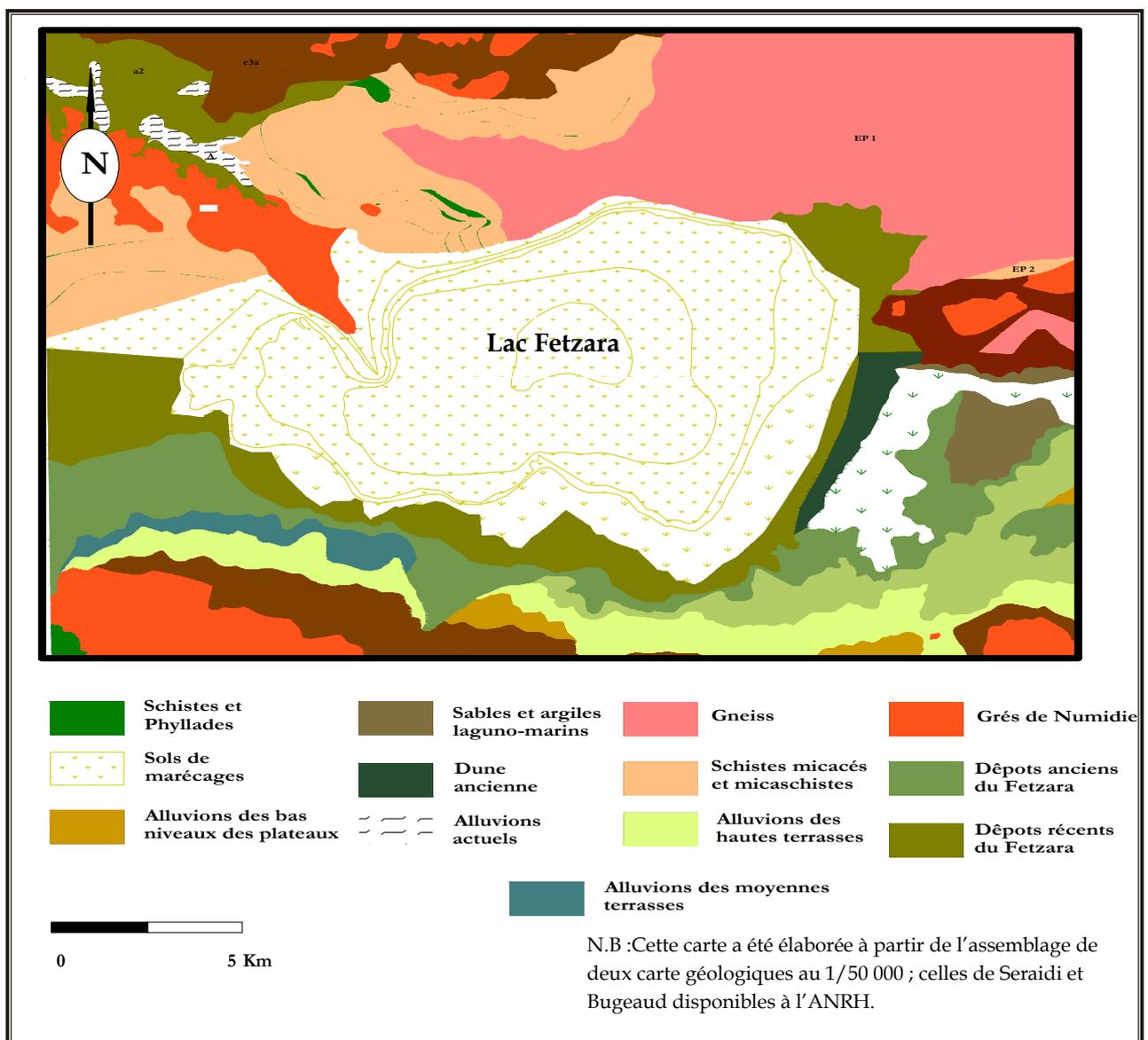


Figure 2.4. Géologie du milieu étudié.

2.3.5. Hydrogéologie de la région

Les grès du Numidien présentent à leur base un niveau aquifère très constant qui alimente des sources ferrugineuses, mais la fragmentation des affleurements, leur plissement s'opposent à la genèse des nappes. Il en va de même pour les grès de type Guerrouch, qui alimentent de faibles suintements, généralement saumâtres, à leur base. Les autres suintants sont associés aux lentilles conglomératiques et aux grands bancs micacés du flysch de Penthièvre et qui tarissent en été.

2.4. Occupation du sol

Le tiers de la superficie totale du site sont des terres agricoles, en grande partie sur les terrains dont la cote est supérieure à 12 mètres. Une large zone herbeuse, utilisée pour le pâturage ovin et bovin, s'étend de la périphérie au centre du lac. Quelques terres incultes sont occupées par de la broussaille dense. Aux alentours du lac une faune remarquable, faite de chêne-liège, olivier, pin maritime, eucalyptus, genêts et oléastre, de végétation palustre diversifiée, essentiellement constituée de roseaux, de massettes, de joncs et une végétation aquatique assez importante.

Les bassins versants sont recouverts de zones herbeuses et de broussailles avec un affleurement de roches calcaires. La zone boisée, constituée de forêts artificielles à base de pin maritime et d'eucalyptus, et de forêts naturelles à base de chêne liège dont la superficie ne dépasse pas 270 ha.

Reconnaissant le besoin d'une carte d'occupation du sol du bassin versant du lac Fetzara, une cartographie de cette dernière a été tentée .

La démarche utilisée repose sur l'assemblage de deux cartes topographiques (1/50 000) de Seraidi (feuille N° 16) et Penthièvre (feuille N° 33) réalisées par l'institut National Géographique Français (1958) qui portent les références suivantes :

- Quadrillage kilométrique Lambert Nord Algérie.
- Equidistance 10 m.

La délimitation des paysages et reproduction des différentes occupations du sol et leurs nomenclatures issues des cartes topographiques ont été faites sur la nouvelle carte d'occupation du sol et pour actualiser cette dernière, une mise à jour partielle a été apportée à partir des images satellitaires fournies par Google Earth (2011). La nature et la date des sources d'information utilisées n'ont pas rendu possible une étude plus poussée et un traitement plus pointu mais ça n'empêche que cette carte illustrée à la figure 2.5 servira de référence dans le prochain chapitre.

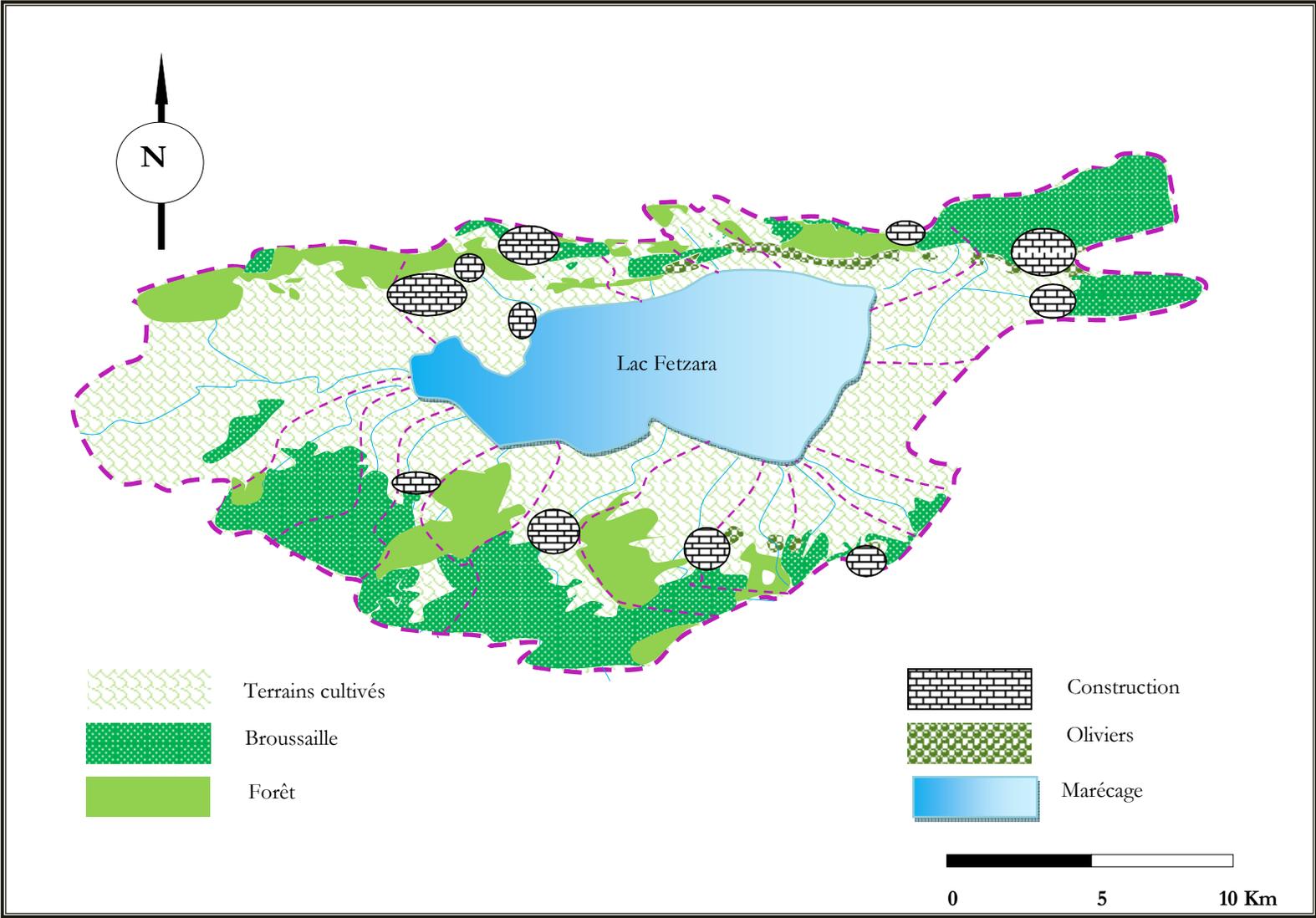
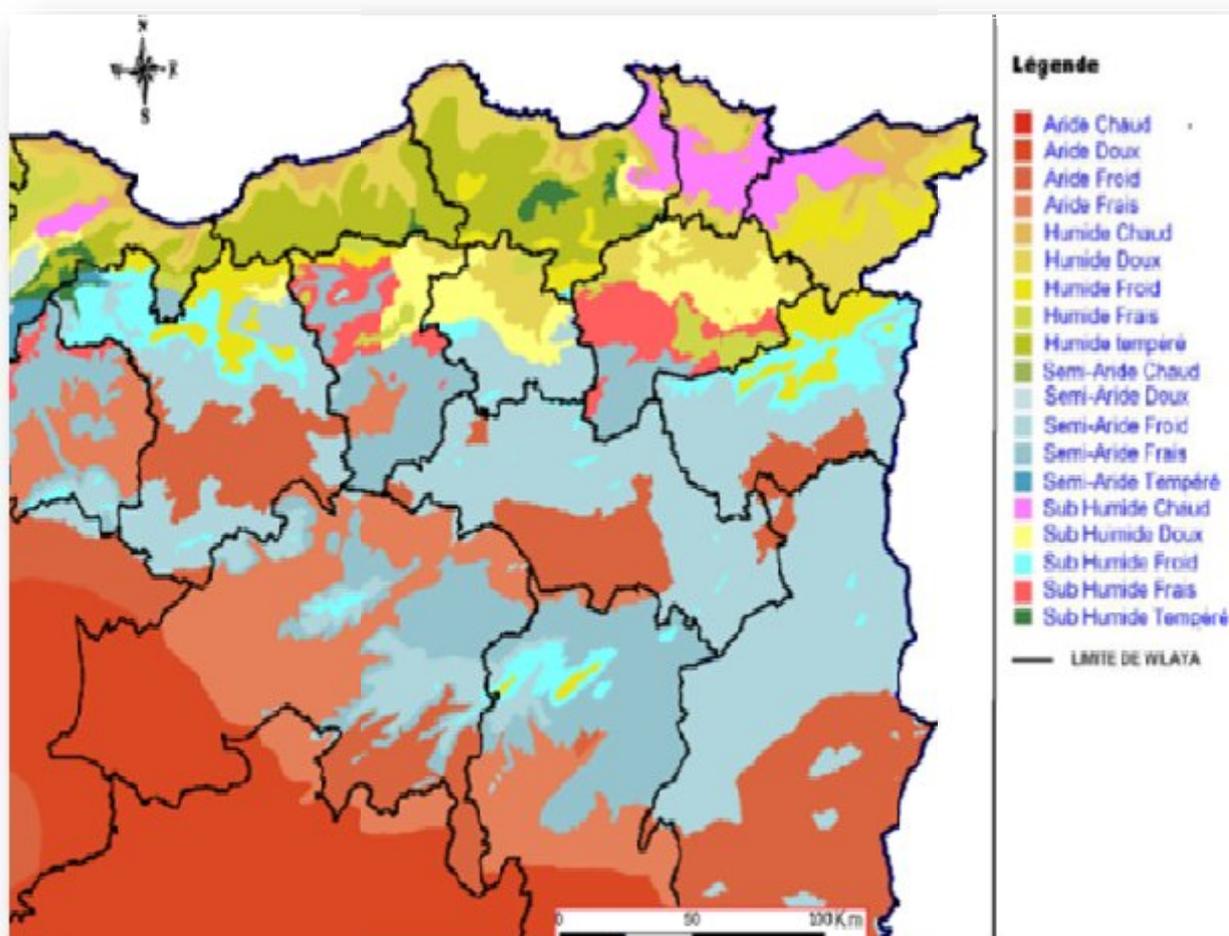


Figure 2.5. Carte d'occupation du sol du bassin versant du lac Fetzara.

2.5. Caractéristiques climatiques

2.5.1. Type de climat

La région est soumise au climat méditerranéen c'est-à-dire caractérisée par une saison pluvieuse allant d'octobre à mai et par un été sec et ensoleillé. Pour une année donnée, la répartition des pluies diffère d'ailleurs le plus souvent du tout au tout de leur répartition moyenne, et cette irrégularité constitue une donnée fondamentale de ce climat. Le relief agit comme un rempart qui provoque la condensation et la précipitation d'une partie de la vapeur d'eau amenée par le vent soufflant de la mer, avec des maxima pluviométriques sur les massifs montagneux les plus élevés et les plus proches de la mer et des minima pluviométriques sous le vent de ces massifs. D'après Emberger, cette région est à la limite de l'étage méditerranéen subhumide, avec un quotient de 91,5 ; correspondant sensiblement à celui de Perth en Australie (Amante, 1955).



2.5.2. Humidité relative

L'humidité relative est un facteur important pour caractériser un climat. Sa variation dépend en partie de la température de l'air et des caractéristiques hygrométriques des masses d'air.

Tableau 2.3. Moyennes mensuelles de l'humidité relative (en %) pour la période (1978/2004) de la station de Annaba (Tir, 2008).

Mois	Sep	Oct.	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
H (%)	72,31	74,73	75,96	76,73	78,04	76,50	74,85	74,23	74,58	72,62	69,54	71,92

L'humidité relative moyenne mensuelle est élevée en hiver qu'en été, elle atteint 78% en Janvier et diminue jusqu'à 71% en mois d'Août ce qui peut être dû à l'effet de la température plus élevée en été qu'en hiver comme l'indiquent le tableau 2.1 et la figure 2.7.

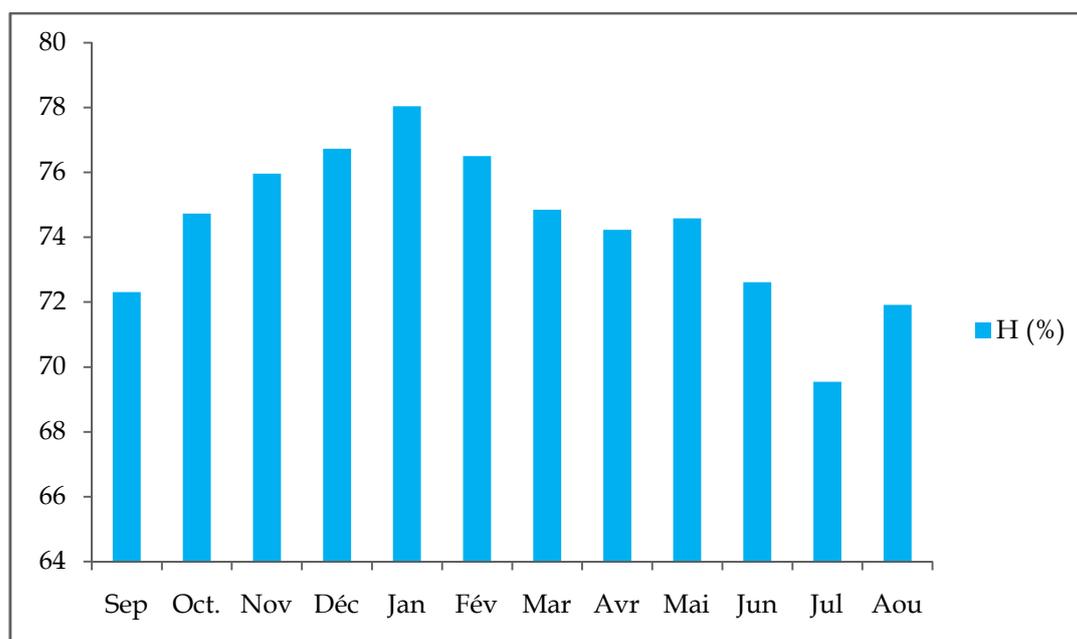


Figure 2.7. Variation mensuelle de l'humidité relative, période 1978/2004.

2.5.3. Température

Ce paramètre est fonction de l'altitude, de la distance de la mer, et de la position topographique (Toubal, 1986) et intervenant dans de nombreux calculs d'évapotranspiration. Une série de températures annuelles allant de 1978 jusqu'en 2005 est disponible ainsi que les moyennes mensuelles sur cette même période (tableau 2.4).

Tableau 2.4. Températures mensuelles (en °C) pour la période (1976/2005) de la station de Annaba (ONM).

Mois	Température °C		
	Minimum	Moyenne	Maximum
Septembre	18,2	23,6	28,9
Octobre	14,9	20,4	25,9
Novembre	10,9	15,9	20,8
Décembre	8,1	12,9	17,6
Janvier	6,9	11,6	16,3
Février	7,0	11,9	16,8
Mars	8,2	13,4	18,6
Avril	9,8	15,2	20,5
Mai	13,0	18,4	23,7
Juin	16,5	22,0	27,5
Juillet	19,0	24,8	30,5
Août	20,0	25,7	31,3

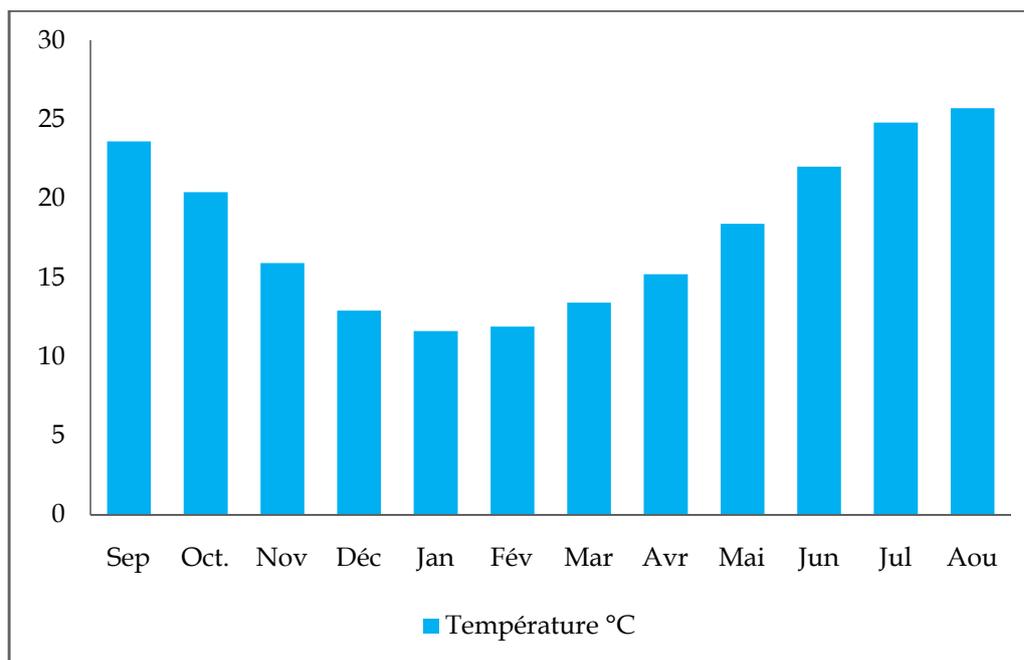


Figure 2.8. Variation mensuelle de la température, période 1976/2005.

2.5.4. Evaporation

Les données disponibles sont celles de la station météorologique de Annaba (Aéroport- Les Salines), qui se situe à environ 25 Km du lac Fetzara et sont réparties comme l'indique le tableau 2.5.

Tableau 2.5. Moyennes mensuelles de l'évaporation (mm) pour la période (1986/1996) de la station de Annaba .

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
E (mm)	147	107	93	79	73	66	88	93	127	142	169	175

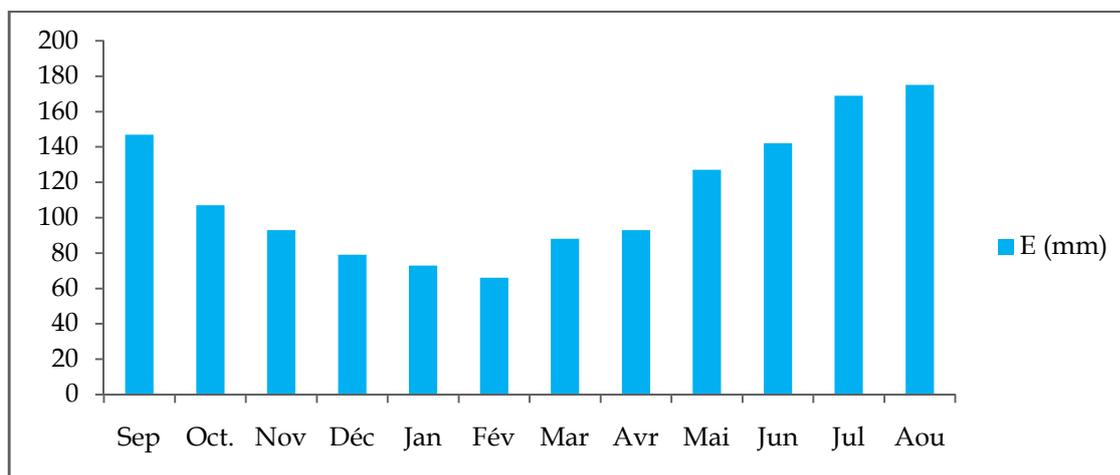


Figure 2.9. Variation mensuelle de l'évaporation, période (1986/1996).

2.5.5. Vent

Les données disponibles sont celles de la station météorologique de Annaba (Aéroport- Les Salines) et sont réparties comme l'indique le tableau 2.6.

Tableau 2.6. Moyennes mensuelles de la vitesse du vent pour la période (1986/1996) de la station de Annaba .

Mois	Sep	Oct.	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aout
V (m/s)	18	23	21	20	22	23	21	21	19	17	18	19

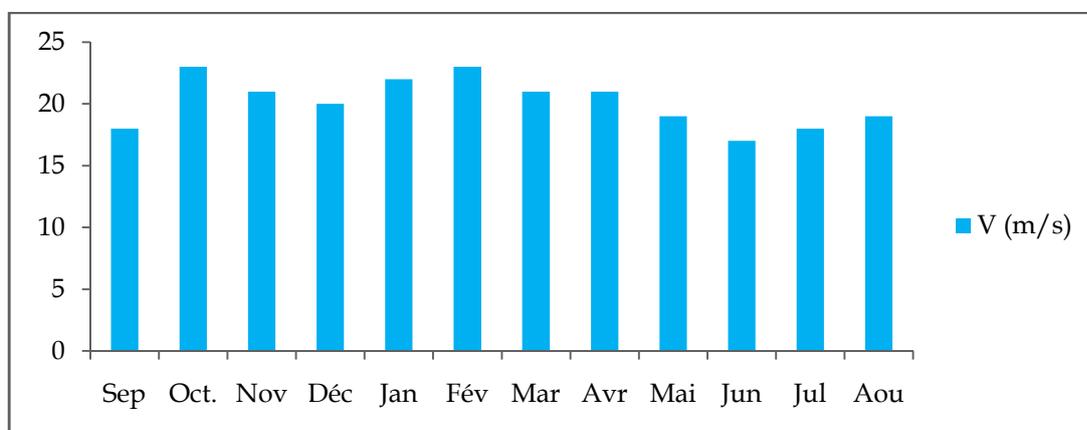


Figure 2.10. Variation mensuelle de la vitesse du vent, période 1986/1996.

2.6. Le lac lui-même

2.6.1. Aperçu historique, chronique des niveaux lacustres

Au milieu du XIX^{ème} siècle, le niveau du lac Fetzara aurait atteint une altitude de +16 m au dessus du niveau de la mer et la superficie inondée aurait dépassé 14 000 ha, considéré comme l'un des plus grands lac du Maghreb. Bordé de joncs et de roseaux où nichaient des oiseaux migrateurs, le lac avait des eaux suffisamment riches en poisson pour justifier la concession des droits de pêche et de chasse (1^{er} février 1859).

Mais l'insalubrité était telle que le projet d'un canal émissaire de 16 Km se déversant dans l'Oued Meboudja est mis à l'étude. La Société Générale Algérienne qui, contre obligations d'assainissement et de peuplement, recevait les rives Nord et Est du lac, ne fit rien. En 1877, la compagnie Mokta El Hadid, qui exploitait la mine d'Ain Mokra où les mineurs mouraient de fièvres, obtint à son tour l'autorisation d'assécher la région contre cession gratuite des terrains du lac.

Un canal partant du centre du lac (6890 m) traversa alors le bourrelet occidental de 22 m et rejoignit la Meboudja (8839 m); mais si l'eau baissait à + 12 m au dessus du niveau de la mer en (1880), le lac restait marécage en été, et la compagnie abandonna ses droits à la Colonie (1903) qui prit à son compte les travaux achevés en 1935.

Le canal principal élargi, muni d'un ouvrage à vannes, est prolongé (7300 m) jusqu'à la limite occidentale où il reçoit l'Oued Mellah comme le montre la figure 2.11 ; les deux autres affluents sont canalisés à leur arrivée dans l'emprise du lac pour déverser directement dans le canal. Les eaux des torrents continuant à aller inonder les points bas de la dépression.

L'évacuation se fait normalement quand les pluies sont faibles; quand les pluies sont fortes, l'eau remonte, mais la vidange est assurée en trois à quatre semaines, et depuis 1936 le lac n'existait pas pendant neuf mois de l'année jusqu'au début des années 1980, une fermeture annuelle de l'écluse sur le canal de sortie a été créé pour conserver les crues hivernales. L'eau est libérée lentement en aval pour permettre l'irrigation de printemps et la chute lente dans le niveau du lac produit le pâturage d'été au bord du lac. En conséquence, le lac détient aujourd'hui fréquemment de l'eau en hiver .



Figure 2.11. Image Google Earth 2011©, le lac Fetzara et son canal de d'assèchement.

2.6.2. Bathymétrie du lac

La carte bathymétrique indique les profondeurs des cours d'eau, lacs et rivières par des courbes de niveau isobathes, ainsi que les roches émergentes et les îles. Elle donne également quelques fois des informations sur la topographie entourant le plan d'eau et les infrastructures humaines s'y trouvant.

La partie la plus profonde du lac Fetzara est formée par sédimentation à une altitude d'environ 10,25 mètres. Durant la saison pluvieuse, l'eau remonte jusqu'à la cote 12 mètres environ, soit à 2 mètres du niveau du centre du lac.

A partir de l'assemblage de deux cartes topographiques au 50 000^{ème} à savoir celle de Bugeaud ; feuille N°16 et celle de Penthivière; feuille N°33, une modélisation de la carte bathymétrique de la cuvette du lac Fetzara a été reproduite illustrée par la figure 2.12.

La profondeur maximale de la cuvette est de 2,75 mètres qui correspond à une surface inondée de 104 Km² et un volume de remplissage qui avoisine 84 Millions de mètres cubes.

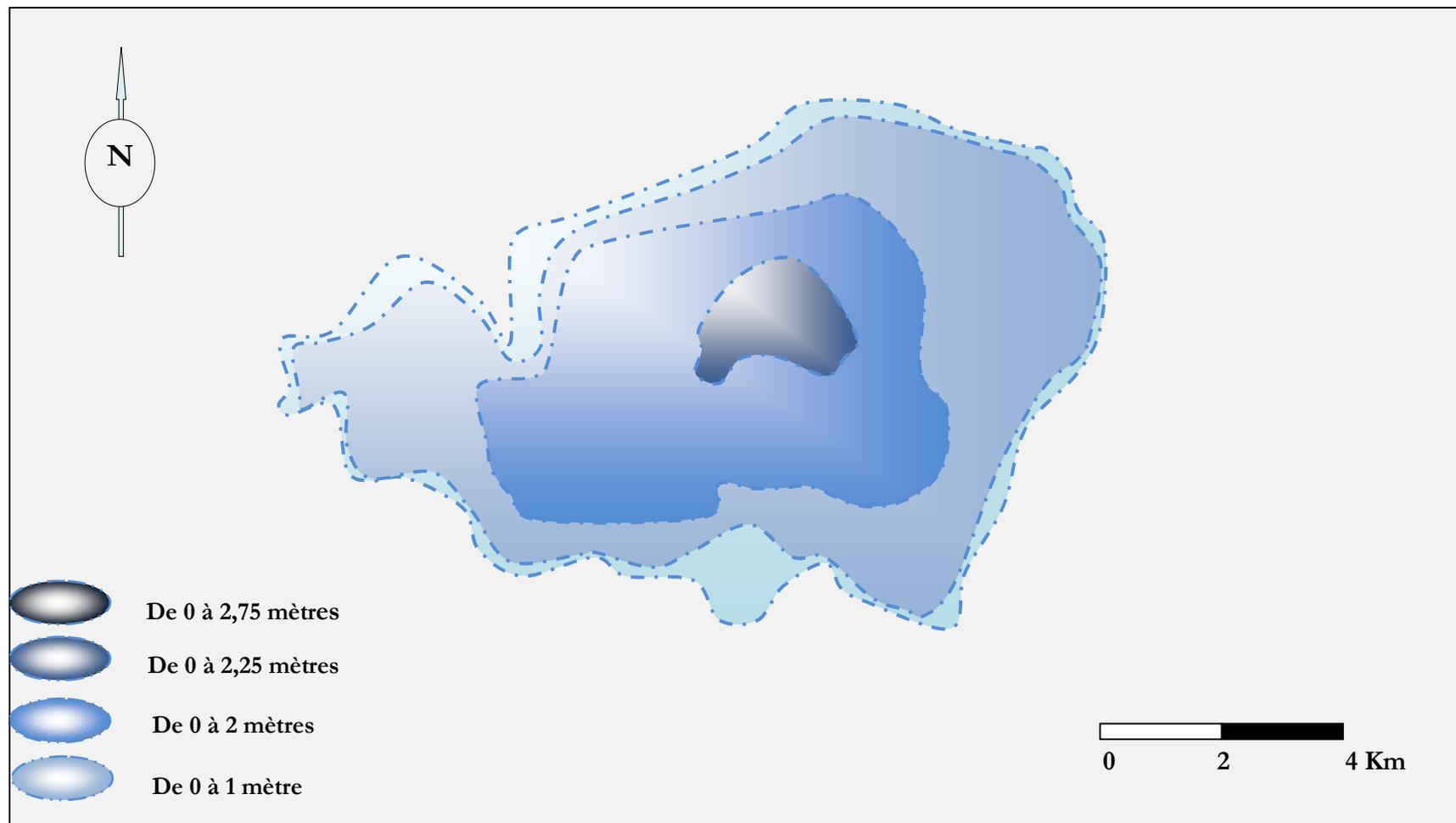


Figure 2.12. Carte bathymétrique de la cuvette du lac Fetzara.

2.6.3. Courbes Hauteur- Volume-Capacité de la cuvette

L'établissement de la relation cote-volume-surface a été effectuée manuellement par planimétrage des aires délimitées sur la carte bathymétrique pour différentes altitudes du niveau du lac figurant sur le tableau 2.7, L'approximation des volumes a été faite selon l'expression (2.8).

$$\Delta V_i = \frac{S_i - S_{i+1}}{2} \Delta H \quad (2.8)$$

S_i : surface du plan d'eau correspondant à la courbe de niveau H_i en m^2 ;

S_{i+1} : surface du plan d'eau correspondant à la courbe de niveau H_{i+1} en m^2 ;

ΔH : différence d'altitude entre les deux courbes de niveaux successives ;

ΔV : volume élémentaire compris entre deux courbes de niveaux successives en m^3 .

Tableau 2.7. Calcul des courbes Hauteur -Surface-Capacité

Hauteur (m)	H (m)	S (m ²)	S moy (m ²)	DH (m)	ΔV (m ³)	Vh (m ³)	hm (m)
10,25	0	0	3525872,22	0,45	1586642,5	0	0
10,7	0,45	7051744,44		1586642,5		0,45	
11	0,75	20468511,11	13760127,8	0,3	4128038,33	5714680,83	0,41
			39844900	1	39844900		
12	1,75	59221288,90	38666755,6	1	38666755,6	45559580,8	1,14
						84226336,4	2,17

Les données nécessaires pour tracer les courbes illustrées par la figure 2.13; sont récapitulées au tableau 2.8.

Tableau 2.8. Cordonnées des courbes Hauteur -Surface-Capacité

Hauteur (m)	Cote (m)	S (Km ²)	V (Mm ³)
10,25	0	0	0
10,7	1	7,05	1,58
11	2	27,52	5,71
12	2,25	86,74	45,55
13	2,75	104,85	84,22

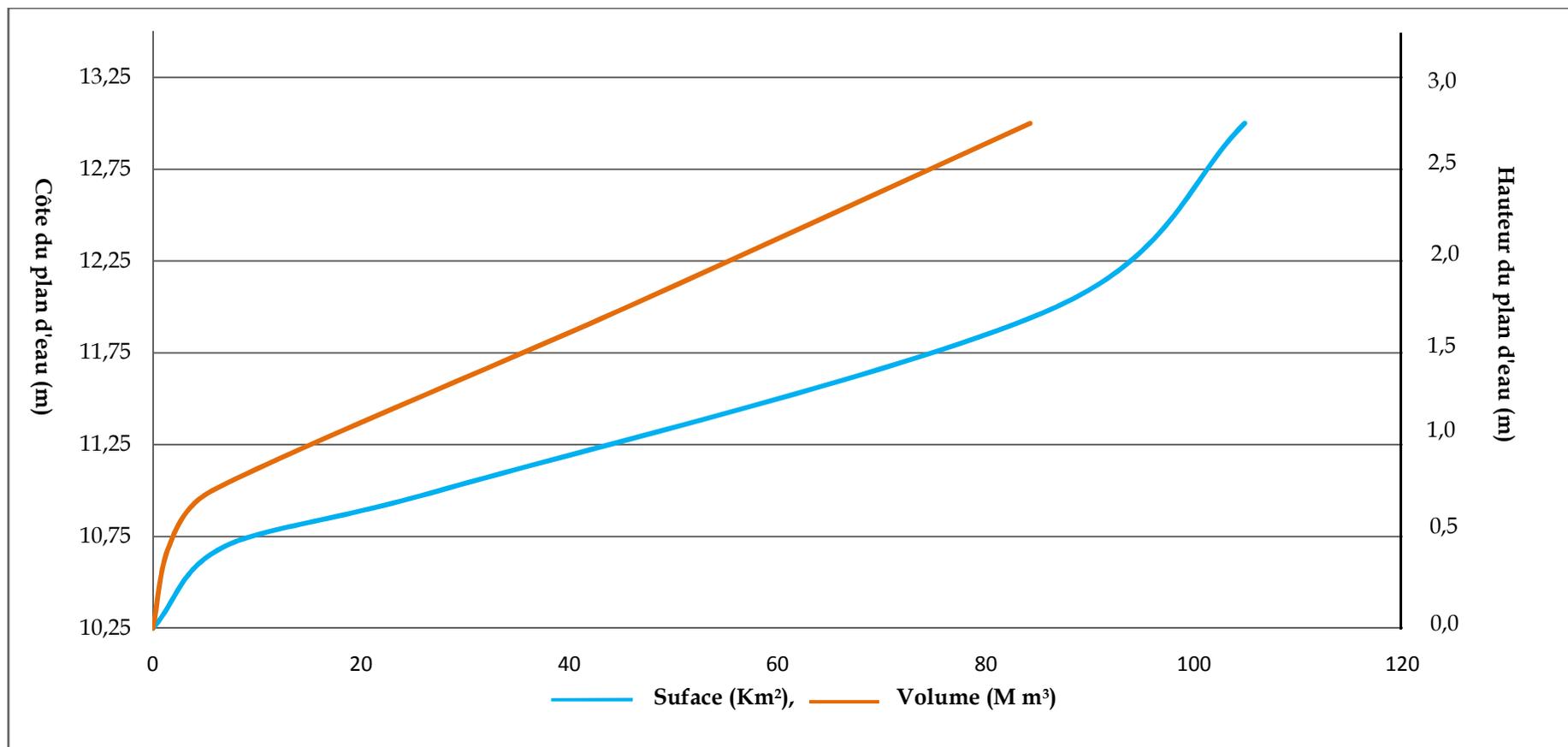


Figure 2.13. Courbes Hauteur-Surface-Volume du lac Fetzara.

2.7. Salinisation du lac Fetzara

Les sols du lac Fetzara présentent une forte variabilité. L'engorgement très fréquent du milieu par l'eau du lac crée une forte variabilité des conditions d'anoxie et les pressions partielles en CO_2 sont très variables dans le temps et dans l'espace. Lorsque les solutions de sols se concentrent, le complexe adsorbant fixe du potassium, du sodium et du magnésium et libère du calcium. Il en résulte une inversion du signe de l'alcalinité résiduelle calcite et l'alcalinité résiduelle calcite + gypse.

Les variations des concentrations subies par les principaux cations, peuvent être attribuées aux différents échanges ioniques entre la solution du sol et le complexe argilo-humique du sol. Après la précipitation de la calcite, la teneur en calcium augmente et l'alcalinité aussi, puis la teneur en sulfates contrôlée par le gypse diminue. Divers processus affectent probablement les teneurs en sulfates, cependant le principal phénomène est celui de la salinisation. D'autre part, l'adsorption du sodium indique une sodisation du complexe adsorbant du sol (Djamai, 2006).

L'observation faite par Belhamra et Djabri (2005) a porté sur dix mois avec un pas de temps hebdomadaire. Le dépouillement des mesures a montré une salinité de l'ordre de 300 mg/l et moins au niveau de l'Oued mellah, Oued El Hout, Oued Zied (Entrées). A la sortie du lac (pont vanne), une augmentation de la salinité a été remarquée, celle-ci atteint 2200 mg/l. Cette augmentation serait liée à la géologie (cuvette argileuse) ou aux facteurs climatiques (forte évapotranspiration).

2.8. Conclusion

Le comportement hydrologique du bassin versant du lac Fetzara est fonction des mécanismes hydrologiques qui vont s'y développer. Ces processus sont contrôlés par les différents aspects climatiques (précipitation, évaporation, vent...) et physiques détaillés dans ce chapitre (géométrie du bassin versant et de la cuvette lacustre, le réseau hydrographique, l'occupation et la nature du sol, la géologie et l'hydrogéologie du milieu...etc).

3.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de constituer une petite monographie hydrologique du bassin versant du lac Fetzara, une vision critique sur les données pluviométriques ayant servi à l'élaboration du présent travail a été faite pour mieux cerner le comportement hydrologique du bassin versant et ceci en portant l'accent sur l'estimation des apports liquides et solides qui alimentent la cuvette lacustre en utilisant différentes méthodes empiriques ainsi que l'analyse et la prédétermination des crues fréquentielles et des hydrogrammes de crues correspondants.

3.2. Etude des précipitations

L'étude des précipitations du bassin versant du lac Fetzara est basée principalement sur les relevés de neuf stations présentes sur la zone d'étude comme le montre la figure 3.1. La quantité et la qualité de ces derniers conditionnent les résultats obtenus .

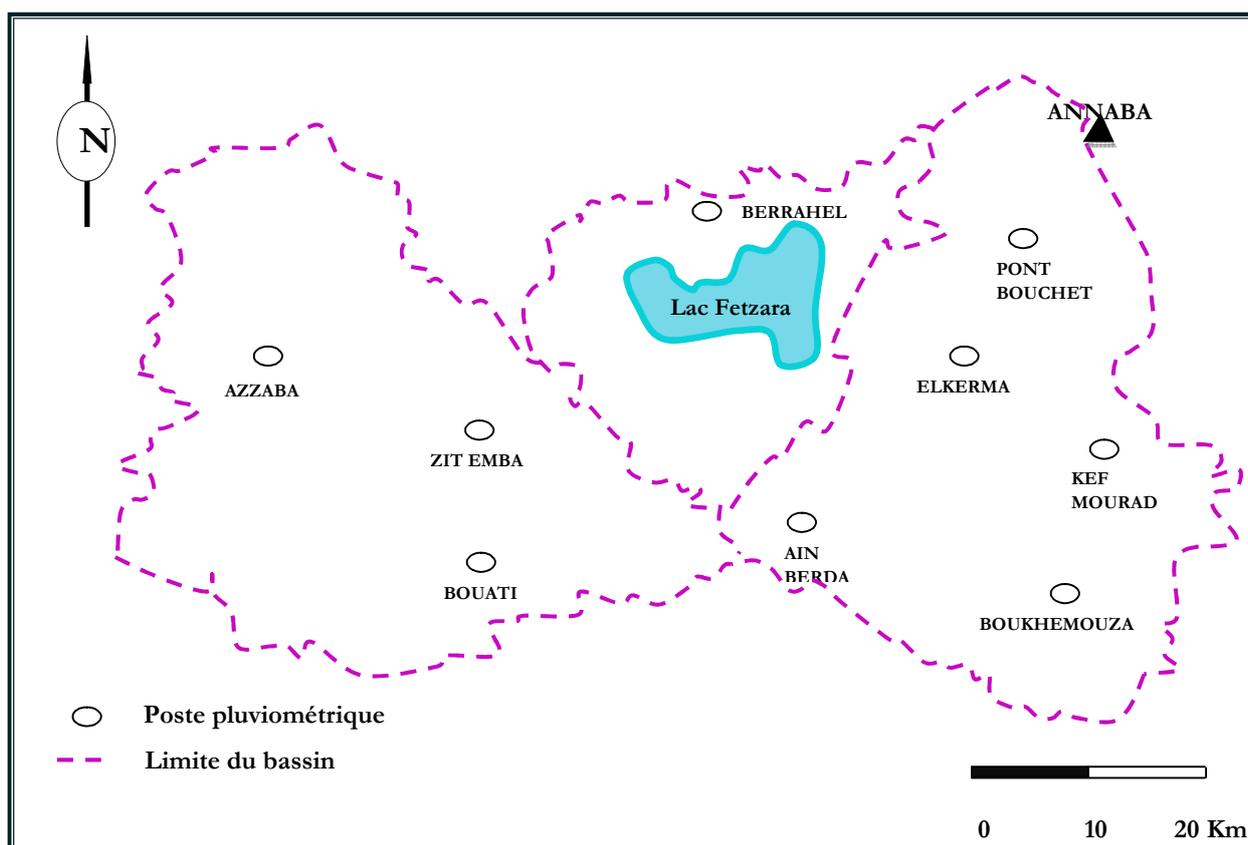


Figure 3.1. Carte de situation des stations pluviométriques.

Les stations étudiées fournissent des renseignements sur la pluviométrie, qui demeure un paramètre très important conditionnant l'écoulement saisonnier, le régime des cours d'eau et l'alimentation des nappes d'eau souterraines. Une seule station est située dans le sous bassin du

lac, les huit autres stations sont éparpillées dans les deux sous bassins avoisinants de part et d'autres du lac comme l'indique la figure 3.1.

L'altitude des stations varie de 3 m (Pont Pouchet) à 150 m (Bouati). Les données climatologiques ont été recueillies au niveau des services de l'A.N.R.H d'Alger.

Tableau 3.1. Caractéristiques des stations pluviométriques étudiées.

Station	Longitude (m NGA)	Latitude (m NGA)	Altitude (m)
Ain Berda	937,60	387,75	73
Berrahel	923,35	403,10	40
Boukhemouza	951,70	376,45	40
Pont Pouchet	950,25	402,80	3
Elkerma	944,60	395,50	14
Bouati	914,15	375,60	150
Azzaba Pépinière	892,30	391,35	91
Zit Emba	911,40	385,30	58
Kef Mourad	953,80	389,50	19

3.2.1. Qualité et critique des données recueillies

L'examen visuel des données pluviométriques annuelles des stations à étudier; a révélé que seule la station de Ain Berda présente une série complète allant de 1970 à 2004, les autres stations présentent quelques lacunes qui vont être complétées par la suite.

Une série chronologique est dite homogène si elle présente le caractère aléatoire simple ce qui suppose l'absence de toute organisation à l'intérieur de la série ou si la propriété statistique de l'erreur affectant ces mesures est restée invariable au cours de la période d'observation. A cette fin, il existe de nombreux tests statistiques; la corrélation double masse et la régression linéaire sont utilisées pour déceler les éventuelles anomalies.

- Test d'homogénéité ou corrélation double masse

Le principe de la méthode consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées dans deux stations, l'une est la station de référence, supposée correcte, l'autre est la station à contrôler. Le calcul des pluies cumulées doit être effectué pendant un nombre d'années successives dans des stations de la région, puis comparer les résultats par groupe de deux stations.

Pour des stations soumises au même régime pluviométrique, la corrélation entre deux stations doit être linéaire, ceci permettra de pallier aux lacunes d'une des stations compte tenu des valeurs obtenues pour le coefficient de corrélation. La méthode a été appliquée sur la période (1970 /2004) pour les couples de stations: Bouati-Zit Emba, Ain Berda-Boukhemouza, Ain

Berda-Kef Mourad, Elkerma- Pont Bouchet, Elkerma-Berrahel et Bouati-Azzaba dont le graphique de corrélation double-masse a été illustré par la figure 3.2.

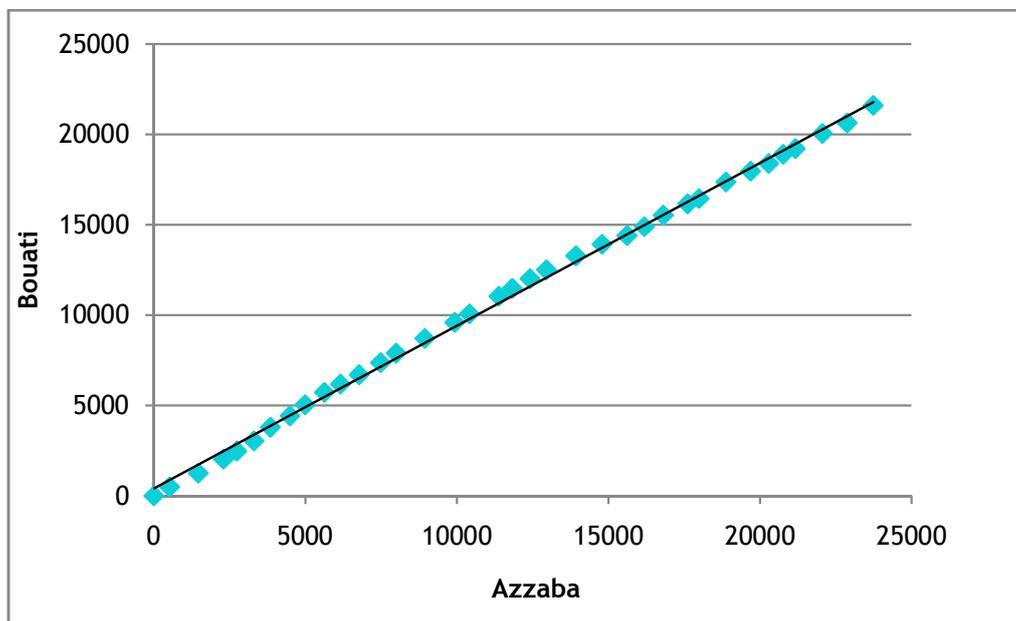


Figure 3.2. Corrélation double-masse des précipitations entre Bouati et Azzaba , période (1970/2004).

La figure 3.2 montre qu'il y'a une forte corrélation entre la station de Bouati et Azzaba. Les graphiques des corrélation double – masse des couples de stations cités ci-dessus sont donnés en Annexe B, après analyse de ces derniers, il ressort que les différentes stations peuvent être complémentaires .

- La régression linéaire

En utilisant la régression linéaire simple, le but est d'étudier la corrélation entre les stations , et si une relation linéaire a un sens. les couples de stations étudiés sont : Bouati - Azzaba, Ain Berda - Kef Mourad , Boukhemouza - Zit Emba et enfin Elkerma- Pont Bouchet.

La modélisation a été faite avec le logiciel XLSTAT, pour expliquer la démarche utilisée, l'exemple de la régression linéaire entre Bouati (variable quantitative) et Azzaba (variable dépendante) a été détaillé.

Le premier tableau 3.2 de résultats fournit les coefficients d'ajustement du modèle. Le R^2 (coefficient de détermination) donne une idée du % de variabilité de la variable à modéliser, expliquée par la variable explicative. Plus ce coefficient est proche de 1, meilleur est le modèle.

Tableau 3.2. Coefficients d'ajustement

R (coefficient de corrélation)	0,817
R ² (coefficient de détermination)	0,667
R ² aj. (coefficient de détermination ajusté)	0,657
SCR (somme des carrés résiduels)	351120,532

Dans ce cas, les deux variables sont en accord à 66%. Le tableau 3.3 d'analyse de la variance est un résultat qui doit être analysé attentivement. C'est à ce niveau que l'on teste si l'on peut considérer que la variable explicative sélectionnée (Bouati) apporte une quantité d'information significative au modèle (hypothèse nulle H₀) ou non. En d'autres termes, c'est un moyen de tester si la moyenne de la variable à modéliser (Azzaba) suffirait à décrire les résultats obtenus ou non.

Tableau 3.3. Evaluation de la valeur de l'information apportée par les variables (H₀= Y=Moy(Y))

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	F de Fisher	Pr > F
Modèle	1	704738,456	704738,456	66,235	< 0,0001
Résidus	33	351120,532	10640,016		
Total	34	1055858,987			

Le test du F de Fisher est utilisé, qui permet de tester l'égalité de deux variances en faisant le rapport des deux variances et en vérifiant que ce rapport ne dépasse pas une certaine valeur théorique que l'on cherche dans la table de Fisher. Etant donnée que la probabilité associée au F est dans ce cas inférieure à 0,0001, cela signifie que l'on prend un risque de se tromper de moins de 0.01% en concluant que la variable explicative apporte une quantité d'information significative au modèle.

Le tableau 3.4 fournit les détails sur le modèle, il est essentiel dès lors que le modèle doit être utilisé pour faire des prévisions, des simulations ou s'il doit être comparé à d'autres résultats. Il est à souligner que le paramètre de Bouati a un intervalle de confiance assez étroit contrairement à celui de la constante du modèle qui est assez large. L'équation du modèle est donnée au tableau 3.4.

Tableau 3.4. Paramètres du modèle

Paramètre	Valeur	Ecart-type	t de Student	Pr > t	Borne inf 95 %	Borne sup 95 %
Constante	99,696	65,964	1,511	0,140	-34,510	233,901
BOUATI	0,764	0,094	8,138	< 0,0001	0,573	0,954

$$L'équation du modèle s'écrit : X_{AZZABA} = 99,695 + 0,763 * X_{BOUATI}$$

Une attention particulière doit être portée aux résidus centrés réduits, qui, étant données les hypothèses liées à la régression linéaire, doivent être distribués suivant une loi normale $N(0,1)$. Cela signifie, entre autres, que 95% des résidus doivent se trouver dans l'intervalle $[-2, 2]$.

La figure 3.3 permet de visualiser les données, la droite de régression, et les deux intervalles de confiance (le plus proche de la courbe est l'intervalle autour de la moyenne de l'estimateur, le second est l'intervalle autour de l'estimation ponctuelle aussi appelé intervalle de prédiction).

Une tendance linéaire est clairement observée avec une forte variabilité autour de la droite avec trois valeurs en dehors du deuxième intervalle de confiance .

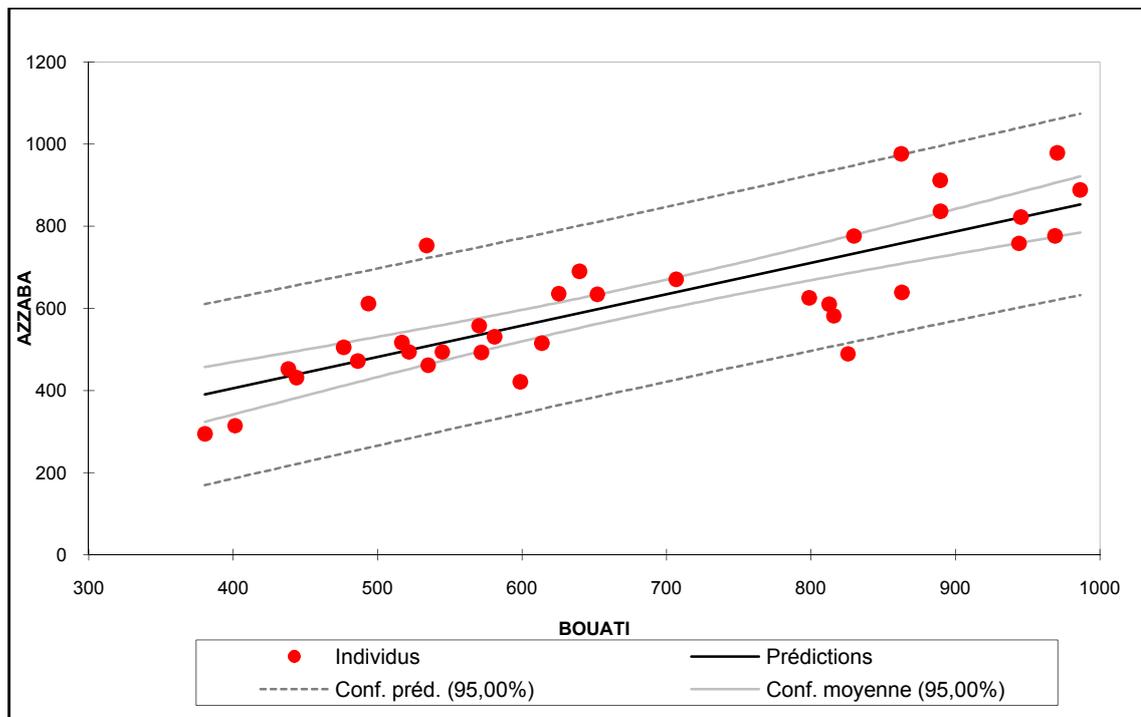


Figure 3.3. Données et droite de régression entre Azzaba et Bouati.

L'histogramme des résidus centrés réduits permet quant à lui de repérer rapidement et visuellement la présence de valeurs hors de l'intervalle $[-2, 2]$. C'est le cas des trois valeurs (Ind 6, Ind 23 et Ind 35) qui se distinguent à la figure 3.4.

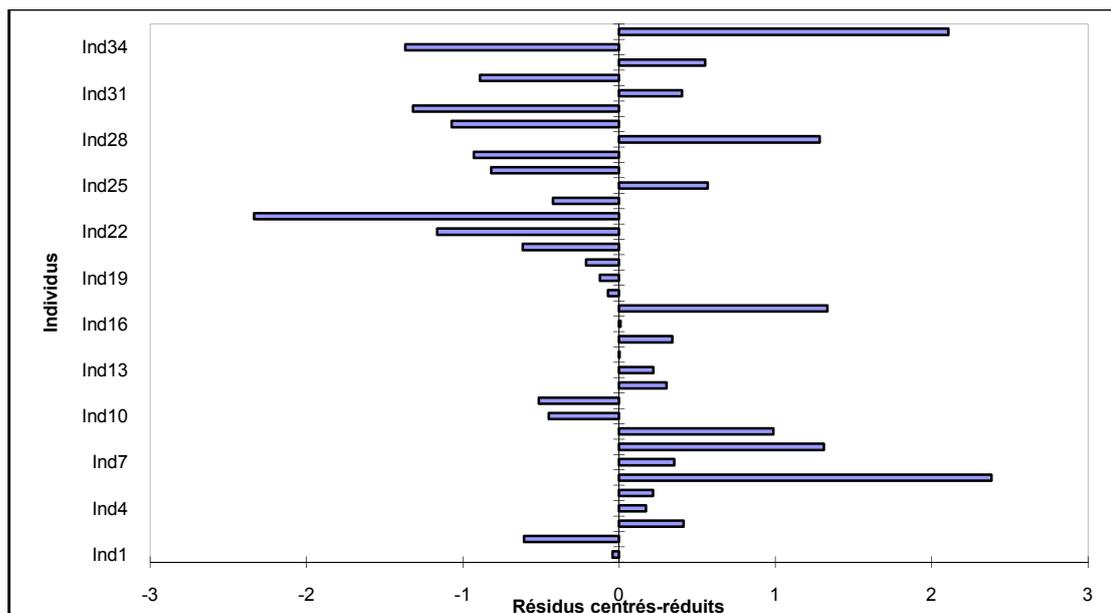


Figure 3.4. L'histogramme des résidus centrés réduits.

En conclusion, dans le cas des stations Azzaba et Bouati, la variance est expliquée à 66 % et la relation linéaire s'est avérée assez forte (81%), pourtant le graphique met en évidence des points écartés de la droite dépassant l'intervalle de confiance. Ces points sortants de cet intervalle ont une probabilité d'être dus au hasard suffisamment faible pour mériter d'être vérifié; Il s'agit d'anomalies ponctuelles.

La même démarche a été appliquée aux autres couples de stations, le détail de ces dernières est en annexe C ; le récapitulatif des résultats est dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5. Résultats des corrélations entre les stations par la régression linéaire.

Stations	Coefficient de corrélation	Equation de la droite de régression
Azzaba –Bouati	0,84	$Y = 0,76 x + 99,69$
Zit Emba–Ain Berda	0,80	$Y = 0,87 x - 4,73$
Boukhemmouza –Ain Berda	0,92	$Y = 1,02 x + 6,02$
Kef Mourad –Ain Berda	0,88	$Y = 0,96 x - 12,72$
Berrahel- Elkerma	0,86	$Y = 0,76 x + 223,70$
Pont Bouchet –Elkerma	0,90	$Y = 0,84x + 120,30$

3.2.2. Comblement des lacunes

Les observations au niveau de la majorité des stations sont incomplètes, ce qui amène à procéder à un comblement des lacunes. Une méthode simple et rapide proposée par J.P Laborde

(1998) a été utilisée, elle permet de rattraper ces lacunes à l'aide des observations disponibles. L'objectif de cette commande est de combler des lacunes dans une matrice de données. Les variables sont comme toujours disposées suivant des colonnes et les observations suivant des lignes. Dans cette matrice de données certaines valeurs absentes seront remplacées par un texte contenant la lettre A (par exemple : "Abs.", "Lacune", ...). Le nombre de composantes principales à prendre en compte est au libre choix de l'utilisateur. Pour des données pluviométriques par exemple, il est recommandé de ne retenir que les composantes présentant une structure spatiale. L'opérateur a également le choix du nombre d'itérations à effectuer (10 à 15 sont généralement suffisantes).

La matrice des données pour un nombre de postes pluviométrique (nv) se présente généralement ainsi :

$$[x] = \begin{pmatrix} x(1,1) & \text{inconnu} & \dots & x(1,j) & \dots & x(1,nv) \\ x(2,1) & x(2,2) & \dots & x(2,j) & \dots & \text{inconnu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(i,1) & x(i,2) & \dots & x(i,j) & \dots & x(i,nv) \\ \text{inconnu} & \dots & \dots & \text{inconnu} & \dots & \dots \\ \dots & \text{inconnu} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(\text{no},1) & x(\text{no},2) & \dots & x(\text{no},j) & \dots & x(\text{no},nv) \end{pmatrix}$$

Si le nombre de poste nv est grand, il est quasiment impossible de "boucher" les trous un par un par des techniques de régression. Le choix des variables explicatives est vite inextricable et de plus les erreurs accidentelles ou systématiques qui ne manquent pas d'affecter certaines observations, sont ainsi répétées. Cette méthode permet de combler rapidement et simplement les lacunes avec la partie la plus fiable de ce tableau de données.

Tout d'abord les moyennes expérimentales $M_{xo}(j)$ et les écart-types expérimentaux $S_{xo}(j)$ des précipitations sont calculés pour chaque station j et sur les seules années réellement observées

$$\begin{aligned} [M_{xo}] &= \begin{pmatrix} M_{xo}(1) & M_{xo}(2) & \dots & M_{xo}(j) & \dots & M_{xo}(nv) \end{pmatrix} \\ [S_{xo}] &= \begin{pmatrix} S_{xo}(1) & S_{xo}(2) & \dots & S_{xo}(j) & \dots & S_{xo}(nv) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

La matrice des valeurs centrées réduites est donnée par la formule (3.1)

$$u(i, j) = \frac{x(i, j) - M_{xo}(j)}{S_{xo}(j)} \quad (3.1)$$

Et calculer pour chaque observation la moyenne des valeurs centrées réduites disponibles : \bar{u} (i)

$$[u] = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccc} u(1,1) & \text{inconnu} & \dots & u(1,j) & \dots & u(1,nv) \\ u(2,1) & u(2,2) & \dots & u(2,j) & \dots & \text{inconnu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u(i,1) & u(i,2) & \dots & u(i,j) & \dots & u(i,nv) \\ \text{inconnu} & \dots & \dots & \text{inconnu} & \dots & \dots \\ \dots & \text{inconnu} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u(\text{no},1) & u(\text{no},2) & \dots & u(\text{no},j) & \dots & u(\text{no},nv) \end{array} \right| \begin{array}{l} \bar{u} (1) \\ \bar{u} (2) \\ \dots \\ \bar{u} (i) \\ \dots \\ \dots \\ \bar{u} (\text{no}) \end{array} \end{array}$$

Dans une première étape; chaque valeur inconnue $x(i,j)$ est remplacée par une valeur $x(i, j) = \frac{\bar{u}(i, j) - Mx_0(j)}{\partial x_0(j)}$ correspondant à la variable réduite moyenne pour cette observation.

Une première matrice complète $[x_0]$: $x_{e_0}(i,j)$ est obtenue

$$[x_0] = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccc} x_{e_0}(1,1) & x_0(1,1) & \dots & x(1,j) & \dots & x(1,nv) \\ x(2,1) & x(2,2) & \dots & x(2,j) & \dots & x_{e_0}(2,nv) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(i,1) & x(i,2) & \dots & x(i,j) & \dots & x(i,nv) \\ x_{e_0}(i+1,1) & \dots & \dots & x_{e_0}(i+1,j) & \dots & \dots \\ \dots & x_{e_0}(\text{no}-1,2) & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(\text{no},1) & x(\text{no},2) & \dots & x(\text{no},j) & \dots & x(\text{no},nv) \end{array} \right| \end{array}$$

Une A.C.P. est effectuée sur cette matrice $[x_0]$ pour obtenir les projections des variables $[a_1]$ et des observations $[c_1]$ sur les k seules premières composantes principales pouvant avoir une signification physique :

$$[a_1] = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccc} a_1(1,1) & a_1(1,2) & \dots & a_1(1,j) & \dots & a_1(1,nv) \\ a_1(2,1) & a_1(2,2) & \dots & a_1(2,j) & \dots & a_1(2,nv) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1(k,1) & a_1(k,2) & \dots & a_1(k,j) & \dots & a_1(k,nv) \end{array} \right| \end{array}$$

$$[c_1] = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} c_1(1,1) & c_1(1,2) & \dots & c_1(1,k) \\ c_1(2,1) & c_1(2,2) & \dots & c_1(2,k) \\ c_1(i,1) & c_1(i,2) & \dots & c_1(i,k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_1(\text{no},1) & c_1(\text{no},2) & \dots & c_1(\text{no},k) \end{array} \right| \end{array}$$

Ainsi que les matrices des moyennes et écarts-types :

$$\begin{aligned} [Mx1] &= \begin{vmatrix} Mx1(1) & Mx1(2) & \dots & Mx1(j) & \dots & Mx1(nv) \end{vmatrix} \\ [Sx1] &= \begin{vmatrix} Sx1(1) & Sx1(2) & \dots & Sx1(j) & \dots & Sx1(nv) \end{vmatrix} \end{aligned}$$

Il est alors possible de reconstituer chaque observation manquante $x(i,j)$ par une nouvelle valeur estimée $xe1(i,j)$ donnée par la formule (3.2)

$$xe1(i,j) = Mx1(j) + Sx1(j) * \{ a1(1,j) c1(i,1) + a1(2,j) c1(i,2) + \dots + a1(k,j) c1(i,k) \} \quad (3.2)$$

Cette estimation n'est pas très correcte puisque l'A.C.P. a été effectuée sur une matrice "bouchée" à partir de moyennes interannuelles, cependant $xe1(i,j)$ est une meilleure estimation que $xe_0(i,j)$ puisqu'elle tient compte des observations aux autres stations pour cette année j. On peut donc réitérer le processus en remplaçant dans la matrice $[x_0]$ chaque $xe_0(i,j)$ par les $xe_1(i,j)$ adaptés. Une nouvelle matrice $[x_1]$ est obtenue :

$$[x_1] = \begin{vmatrix} x(1,1) & xe_1(1,2) & \dots & x(1,j) & \dots & x(1,nv) \\ x(2,1) & x(2,2) & \dots & x(2,j) & \dots & xe_1(2,nv) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(i,1) & x(i,2) & \dots & x(i,j) & \dots & x(i,nv) \\ xe_1(.,1) & \dots & \dots & xe_1(i,j) & \dots & \dots \\ \dots & xe_1(.,2) & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(no,1) & x(no,2) & \dots & x(no,j) & \dots & x(no,nv) \end{vmatrix}$$

Alors une nouvelle A.C.P. est entamée sur la matrice $[x_1]$ permettant d'obtenir de nouvelles matrices $[c_2]$, $[a_2]$, $[Mx_2]$ et $[Sx_2]$ d'où sont tirées de nouvelles estimations $xe_2(i,j)$. A chaque itération les estimations seront modifiées pour les observations manquantes.

Le tableau récapitulatif du comblement des lacunes des neuf stations étudiées après 10 itérations sur la période 1970/2004 est mentionné en annexe D.

3.2.3. Ajustement des précipitations annuelles à une loi log-normale

La formulations de la fonction de répartition la loi log normale est donnée par l'équation (3.3)

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (3.3)$$

$$u = a \log(x - x_0) + b \quad (3.4)$$

Intervalle de définition : $x \in] x_0, + \infty[$

C'est à dire que l'on passe de la loi de Gauss à la loi de Galton en faisant le changement de variable de x en $\log (x - x_0)$. Cette loi fait intervenir trois paramètres dont x_0 est le paramètre de position. Une autre formulation qui fait mieux ressentir le rôle des paramètres est donnée par la formule (3.5)

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\Pi}} \int_0^u \frac{1}{u} e^{-\frac{\text{Ln}^2(u)}{2\sigma^2}} du \quad \text{et} \quad u = \frac{x - x_0}{s} \quad (3.5)$$

x_0 : paramètre de position (identique au précédent) ;

s : paramètre d'échelle positif différent de zéro ;

σ : paramètre de forme positif différent de zéro.

Les données pluviométriques annuelles sont portées sur un diagramme de Gauss, sur lequel l'axe des abscisses représente les probabilités et l'axe des ordonnées les logs des modules pluviométriques. Les distributions des précipitations pour les neuf stations à différentes périodes fournissent un alignement des points comme c'est le cas de la station de Berrahel illustrée par la figure 3.5, les bornes supérieure et inférieure représentent les limites de l'intervalle de confiance à 95%. La qualité d'ajustement s'est avérée bonne et ceci pour toutes les stations, les graphiques d'ajustement à la loi log normale des autres stations sont donnés en annexe E .

Tableau 3.6. Précipitations annuelles fréquentielles des stations étudiées

Station	Période de retour (an)					
	2	5	10	50	100	1000
Ain Berda	600	747	838	1020	1100	1340
Berrahel	658	791	871	1030	1090	1290
Boukhemouza	535	782	884	1100	1180	1460
Pont Bouchet	598	742	830	1010	1080	1320
Elkerma	566	720	816	1020	1100	1370
Bouati	652	828	938	1170	1260	1570
Azzaba	592	758	862	1080	1170	1460
Zit Emba	507	681	794	1040	1140	1490
Kef Mourad	558	729	839	1070	1170	1490

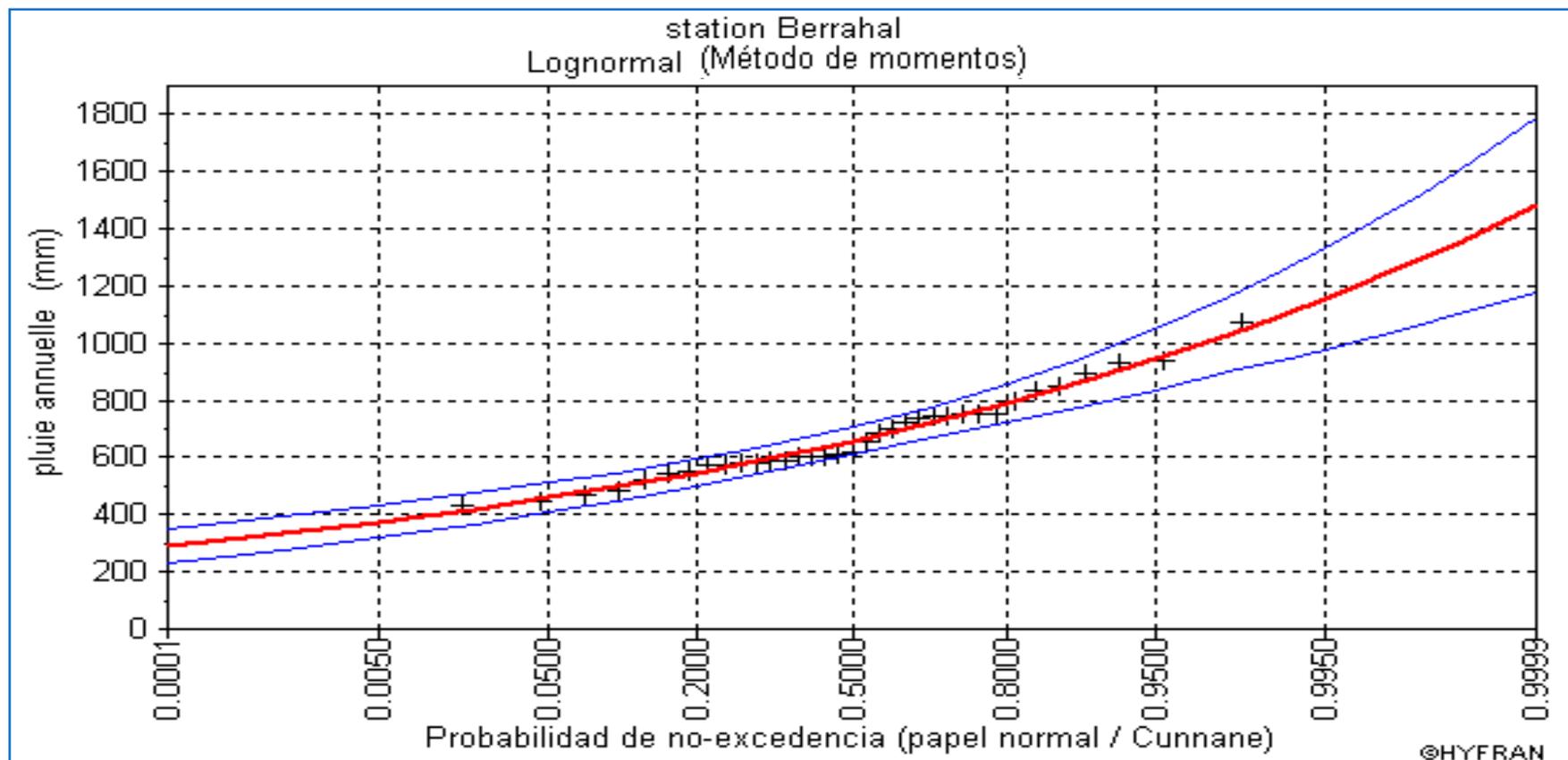


Figure 3.5. Ajustement des précipitations annuelles à une loi log-normale (Berrahal , période 1970/2004).

3.2.4. Variation interannuelle de la pluviométrie

Les figures 3.6 et 3.7 visualisent l'évolution de la pluviométrie annuelle sur une période de 35 ans (1970/2004) pour les stations Azzaba, Bouati, Kef Mourad, Berrahel, El Kerma, Pont Bouchet, Zit Emba, Boukhemmouza et Ain Berda; où la hauteur maximale des précipitations atteinte est de 1074 mm à la station de Berrahel en 2004; tandis que la hauteur minimale est de l'ordre de 187 mm a été enregistrée à la station de Zit Emba en 2001.

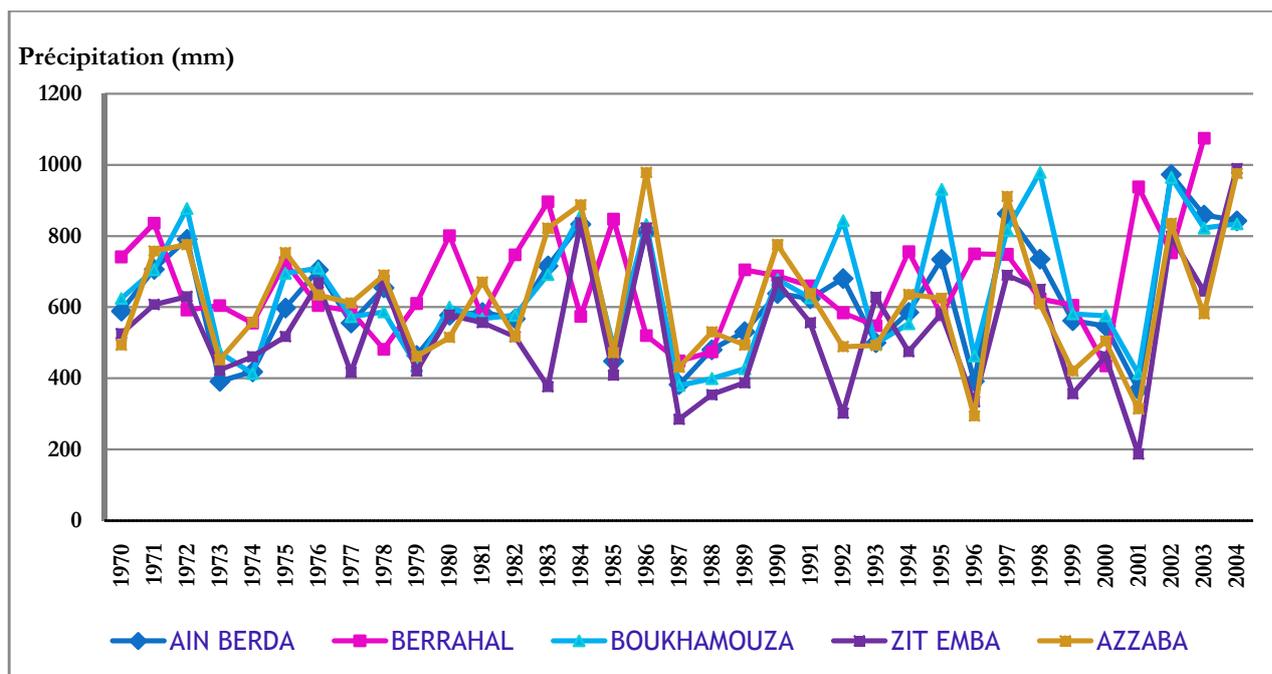


Figure 3.6. Variation interannuelle des précipitations des stations Ain Berda, Berrahal, Boukhemmouza, Zit Emba et Azzaba (1970/2004).

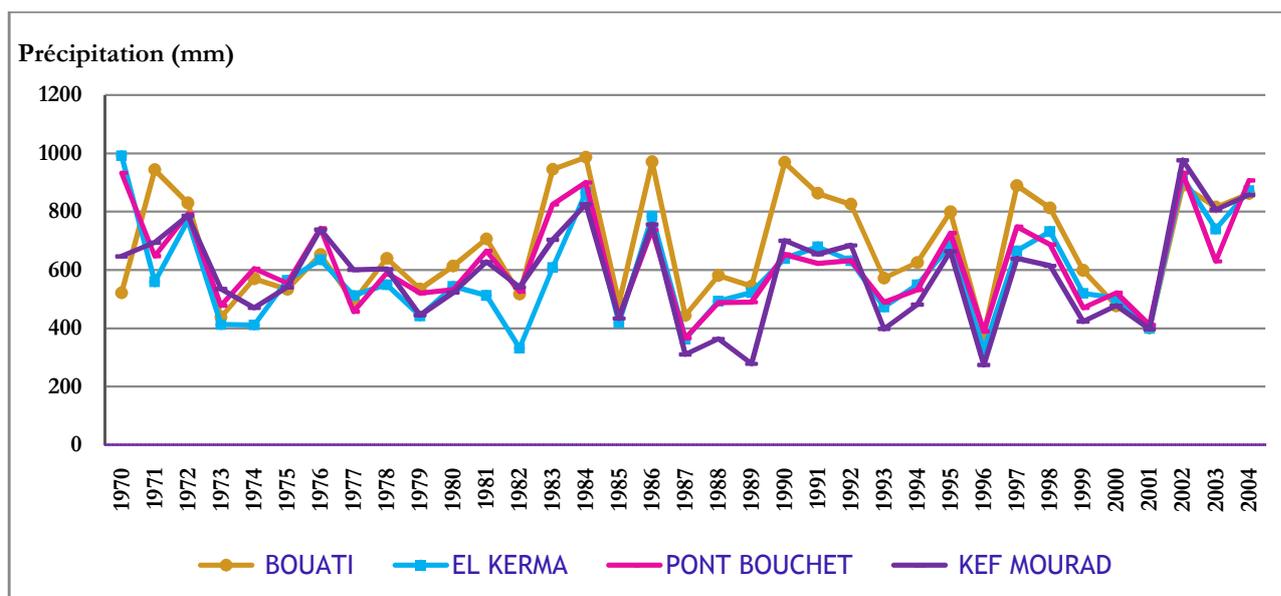


Figure 3.7. Variation interannuelle des précipitations des stations Bouati, El Kerma, Pont Bouchet et Kef Mourad (1970/2004).

3.2.5. Précipitation moyenne annuelle sur le bassin versant

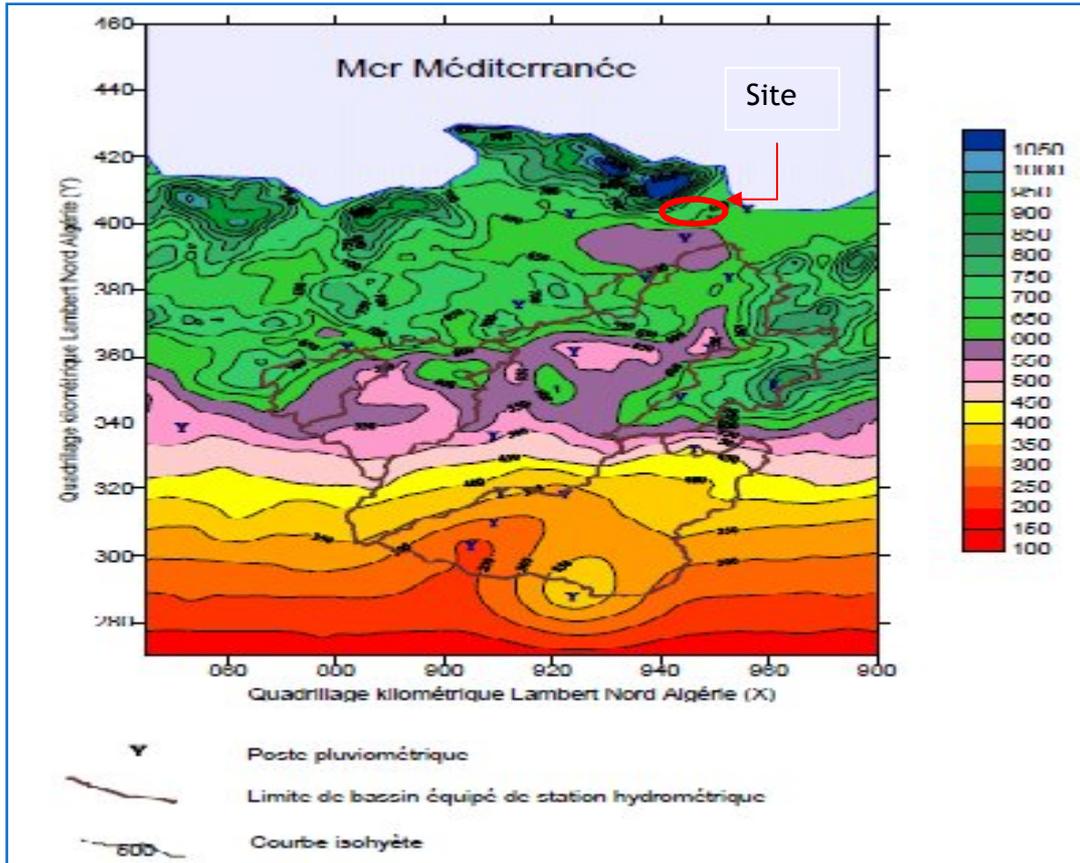


Figure 3.8. Carte pluviométrique moyenne interannuelle du Nord- Est Algérien (Septembre 1969- août 1998) (Louamri, 2009).

La figure 3.8 représente la carte des précipitations médianes du Nord Algérien pour la période (1969/1998) établit par Louamri (2009), indique que les précipitations sur la région d'étude oscillent entre 600 et 700 mm .

Pour estimer avec exactitude la lame d'eau précipitée sur le bassin versant, trois méthodes ont été choisi à savoir la moyenne arithmétique des stations, la méthode de Thiessen et celle des isohyètes.

a. Moyenne arithmétique des stations

Si la pluie est répartie de façon relativement homogène, si la topographie n'est pas trop accidentée et si la répartition des postes est suffisamment homogène sur la région d'étude, la moyenne arithmétique des observations faites à tous les postes pourra être appliquée. Sur la période étudiée (1970/2004), la moyenne interannuelle de la lame tombée à l'échelle du bassin versant est de l'ordre de 646 mm.

b. Moyenne de Thiessen

Cette méthode, basée uniquement sur les pluies observées aux pluviomètres, suppose que la fonction $P(x, y)$ varie discrètement. Pour cela, sur tout élément de surface $dx dy$, on admet que $P(x, y)$ est égal à la valeur enregistrée au poste le plus proche ce qui consiste à attribuer à chaque pluviomètre une zone d'influence présumée telle qu'un point situé dans cette zone soit plus près en distance horizontale de ce pluviomètre que de toute autre (figure 3.9). Les éléments de surface plus proches d'un pluviomètre que de tout autre, sont déterminés par le réseau des médiatrices des segments joignant les postes 2 à 2.

La hauteur de précipitations choisie est celle relevée à la station située à l'intérieur du polygone (tableau 3.7), en considérant les précipitations uniformément réparties. La hauteur des précipitations recherchée sur le bassin est donnée par la formule (3.5)

$$\bar{P}_{BV} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i \quad (3.6)$$

Avec

$$\alpha_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (3.7)$$

P_i : précipitation de la station à l'intérieur du polygone ;

S_i : surface du polygone ;

S : surface totale du bassin versant.

Tableau 3.7. La lame d'eau annuelle précipitée obtenue à partir de la méthode Thiessen .

Stations	Surface des polygones		Pluviométrie (mm)
	(Km ²)	(%)	
Ain Berda	78,208	15,04	620
Berrahel	316,108	60,79	674
Elkerma	31,512	6,06	589
Pont Bouchet	26,156	5,03	584
Zit Emba	68,016	13,08	536

La moyenne de la lame d'eau précipitée obtenue par cette méthode est de 638 mm .

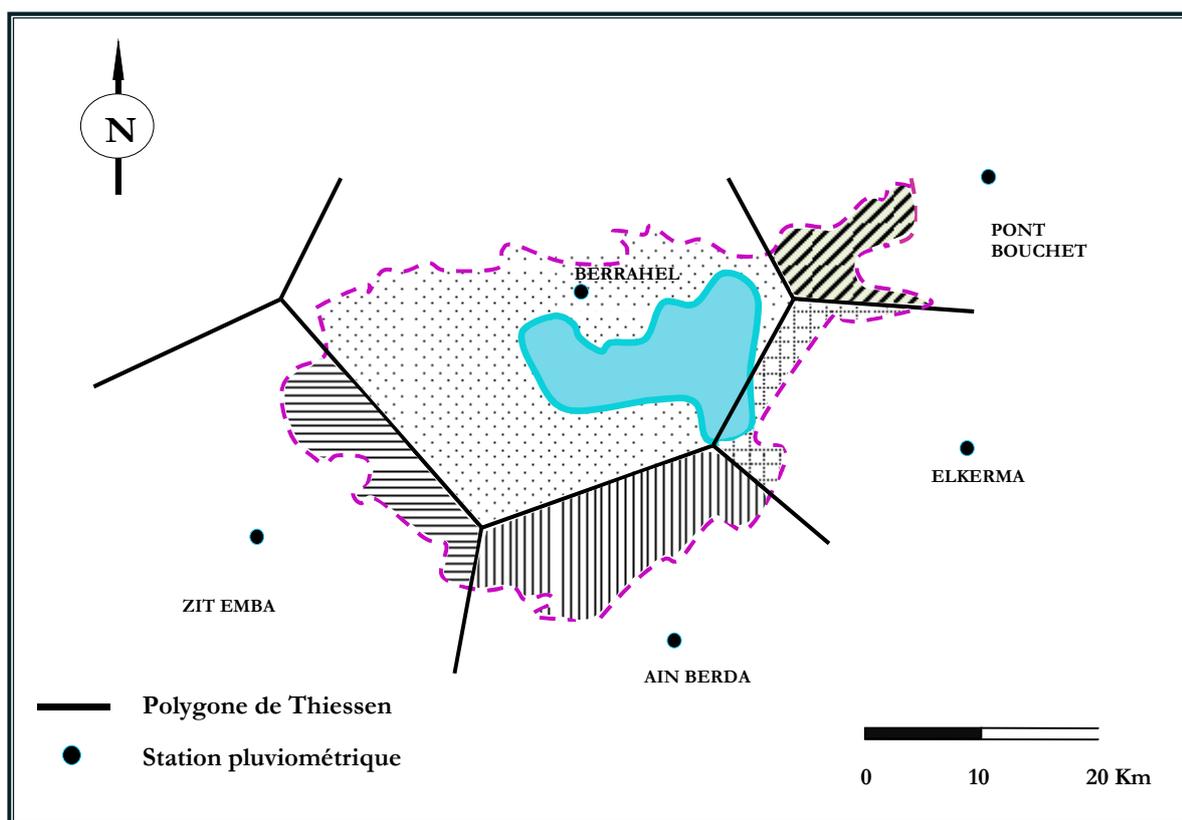


Figure 3.9. Découpage de la surface du bassin versant en zones d'influences des stations pluviométriques.

c. Méthode des isohyètes

Il existe manifestement un rapport étroit entre le relief et la répartition spatiale des précipitations (Benichou et Le Breton, 1987; Daly et al., 1994; De Montmollin et al., 1980; François et Humbert, 2000 ; Humbert et Perrin, 1993; Humbert et al., 1998; Laborde, 1982; Laborde et Traboulsi, 2002; Shérier, 1977). La mise au point de la carte des isohyètes pour la zone d'étude repose sur la démarche suivante :

- Déterminer la valeur des précipitations annuelles selon l'échelle de temps adoptée. Cette valeur est, bien plus qu'une simple opération mathématique. Elle est le résultat d'une critique des données extrêmement fine, sans laquelle la fiabilité de l'information serait compromise et le modèle de régionalisation de la pluie douteux!
- Rechercher une liaison entre cette variable et l'un des facteurs géographiques quantifiable (la longitude, la latitude, l'altitude) responsable de la pluie sur l'espace considéré (Laborde, 1982);

- Interpoler en chaque nœud d'une grille régulière, les variations de la pluie en fonction du facteur géographique essentiel préalablement défini et de la correction apportée à partir des résidus de la régression linéaire;
- Cartographier par interpolation linéaire les isohyètes obtenues en traçant des lignes de même valeur à partir de la grille élaborée;
- Calculer les précipitations à partir de la grille sur une surface donnée.

Les stations pluviométriques utilisées sont au nombre de 9, ayant une période d'observation de 35 ans, l'homogénéisation de ces stations a été vérifiée et les lacunes ont été comblées précédemment, donc il a été possible d'entreprendre une modélisation des précipitation sur le bassin versant du lac Fetzara ainsi que les sous bassins avoisinants.

Par étapes successives, les liaisons mathématiques et graphiques éventuelles entre les précipitations moyennes interannuelles et le facteur géographique retenu, ont pu être établies. Lorsque la liaison entre les 2 variables est la meilleure et correspond en outre à une réalité sur le terrain, on peut alors estimer que le paramètre intervenant dans la corrélation est celui qui influence le plus sûrement la pluie sur la région étudiée.

Une première liaison entre la latitude de chaque station et le module interannuel correspondant détermine un coefficient de corrélation 0,54, dont la faiblesse corrobore la dispersion graphique obtenue. La même démarche globale appliquée à la longitude aboutit à un coefficient de corrélation encore plus faible 0,17.

La relation entre la pluviométrie et l'altitude des postes exprimée en mètres est plus évidente comme le montre la figure 3.10. Le coefficient de corrélation 0,94 le confirme.

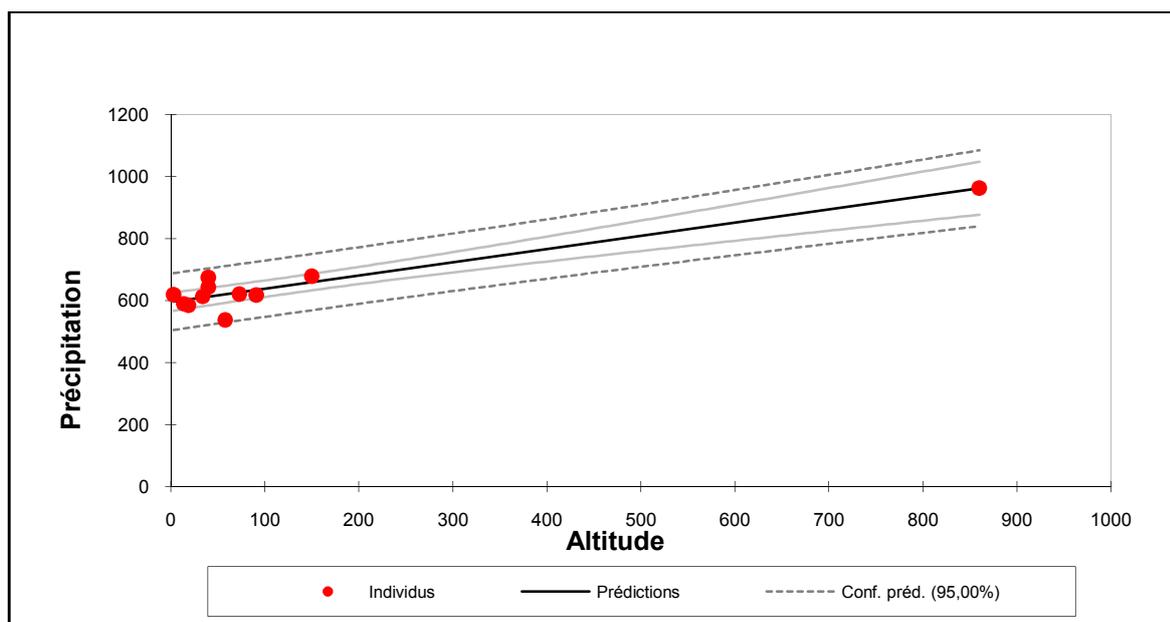


Figure 3.10. Relation : précipitation moyenne interannuelle, altitude.

L'étape suivante consiste à interpoler les résidus (pluie observée – pluie estimée) qui représentent la part de la pluie qui ne s'explique pas par le modèle de régression et qui par construction sont une fonction aléatoire stationnaire d'ordre 2.

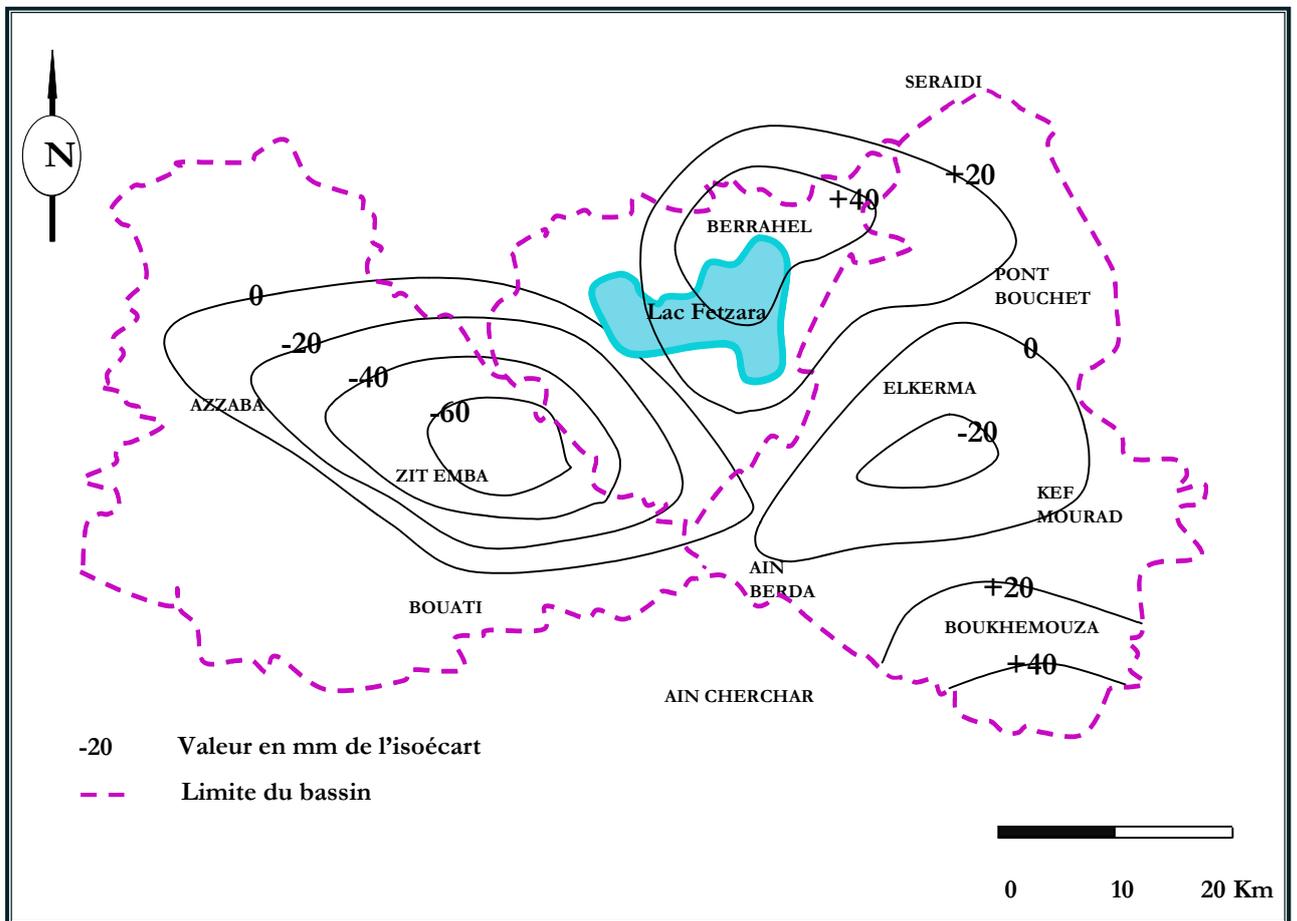


Figure 3.11. Répartition spatiale des résidus de régression.

L'interpolation des résidus de régression est dans ce cas de figure, comme le montre la figure 3.11, est assez délicate car il y'a peu de valeurs de résidus à interpoler ce qui mène à commettre des erreurs lors du tracé.

Pour les 9 postes pluviométriques, la pluie observée est connue ainsi que son estimation grâce à la régression linéaire avec une variance expliquée de 88%. La dernière étape consiste à interpoler les valeurs de la pluie annuelle en tout point de la carte en leur rajoutant les valeurs des résidus déjà interpolés et enfin tracer les isohyètes illustrées par la figure 3.12.

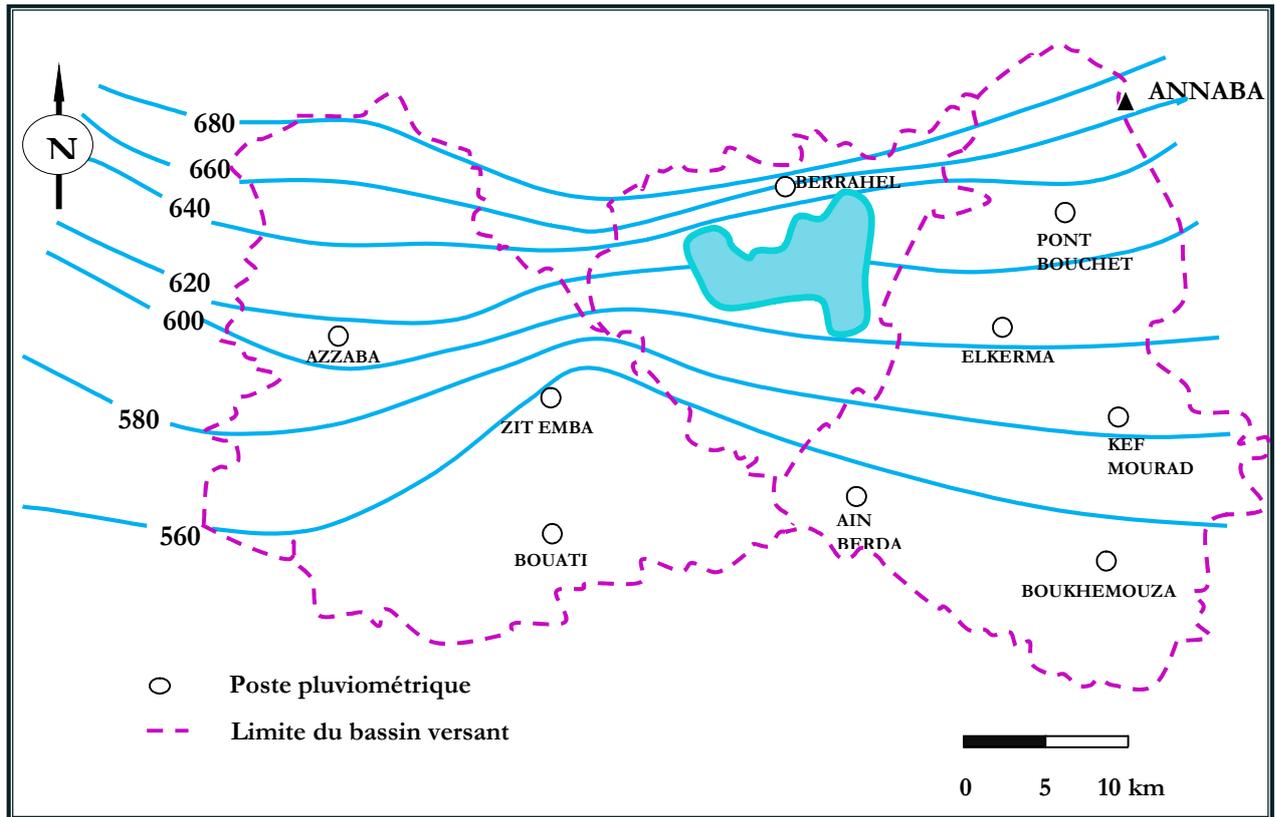


Figure 3.12. Carte des isohyètes annuelles établie pour la période 1970/2004.

Les surfaces comprises entre deux courbes isohyètes successives sont mesurées. En supposant que la hauteur de pluie tombée sur cette surface est égale à la moyenne des valeurs des deux isohyètes qui la délimitent. La lame d'eau tombée sur le bassin versant est donnée par la relation (3.8)

$$P = \frac{\sum (S_i \cdot P_i)}{S} \quad (3.8)$$

P_i : pluviométrie moyenne entre deux isohyètes ;

S_i : surface entre deux isohyètes ;

S : surface totale du bassin versant.

Tableau 3.8. Estimation de la lame d'eau moyenne annuelle par la méthode des isohyètes.

isohyètes (m)	Surface entre isohyètes		Pluviométrie moyenne (mm)
	(Km ²)	(%)	
540-560	35,20	6,77	550
560-580	89,59	17,42	570
580-600	100,60	19,35	590
600-620	76,43	15,08	610
620-640	62,00	11,92	630
640-660	58,54	11,26	650
660-680	38,10	7,33	670
680-700	59,60	11,46	690

Le calcul de la pluviométrie moyenne interannuelle pondérée par la méthode des isohyètes établie pour la période 1970/2004 a été estimé à 620 mm .

d. Discussion des résultats

Les résultats obtenus ne sont pas très différents. Toutefois, il faut retenir que pour ce bassin dont le relief n'est pas tout à fait homogène et les stations mal réparties dans l'espace, la méthode de la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées n'est pas recommandée. Il faut lui préférer les deux autres méthodes graphiques qui permettent de donner un poids différents à chacun des points de mesures (moyennes pondérées), mais la méthode des isohyètes reste la plus précise et la plus fiable et son intérêt réside dans l'analyse comparée mathématique et graphique affinée par une étude des résidus dans l'évaluation des isohyètes. Donc la valeur de la précipitation moyenne interannuelle retenue est de 620 mm pour l'ensemble du bassin.

3.3. Etude des apports liquides et solides

3.3.1. Les apports liquides

Alors que des mesures de débits sont disponibles pour les bassins versants de grandes superficies, il n'y en a fréquemment pas pour les petits ($< 10 \text{ km}^2$) et moyens (10 à 50 km^2) et c'est le cas des affluents du lac Fetzara. Il existe actuellement de nombreuses méthodes permettant l'évaluation des débits. Dans la pratique se pose par conséquent le problème du choix de la plus appropriée pour résoudre un problème concret.

3.3.1.1. Evaluation de l'apport et la lame d'eau annuels

L'estimation de la lame d'eau écoulée ainsi que l'apport moyen annuel du bassin versant s'est faite au moyen des formules empiriques résumées au tableau 3.7, qui dépendent du relief et de la pluviométrie.

Tableau 3.9. Formules utilisées pour l'évaluation de la lame d'eau écoulée

Formules	
Samie	$L_e = P^2 (293 - 2,2\sqrt{S})$
Urgiprovodkhoz	$L_e = 0,03(P/340)2,24$
Medinger	$L_e = 1,024 (P - 0,26)^2$
Coutagne	$L_e = P - P(1 - P \frac{1}{0,8 + 0,14 T})$
ANRH	$L_e = 0,915 \cdot \bar{P}^{2,684} \cdot S^{0,158}$

Chapitre 3. Etude hydrologique

P : précipitation moyenne annuelle (m) ;

S : superficie du bassin versant ;

T : température moyenne dans la zone d'étude. T = 18°C.

Pour obtenir l'apport moyen annuel pour chacun des sous bassins, il suffit de multiplier la lame d'eau écoulée obtenue par la superficie de ces derniers. Les résultats obtenus pour chacun des sous bassins en utilisant les différentes méthodes sont récapitulés au tableau 3.10, ainsi que l'apport et la lame d'eau annuels sur l'ensemble du bassin versant .

Tableau 3.10. Estimation de la lame d'eau écoulée et l'apport moyen annuel sur l'ensemble du bassin versant.

Code BV		Samie	Medinger	Couatgne	Urgiprovdkhoz	ANRH
01	L _e (mm)	110,8	92,1	121,1	127,3	140,5
	A (hm ³)	6,8	5,6	7,4	7,8	8,6
02	L _e (mm)	114,1	94,1	121,1	127,3	171,2
	A (hm ³)	2,0	1,7	2,1	2,2	3,0
03	L _e (mm)	113,7	93,9	121,1	127,3	166,1
	A (hm ³)	2,4	2,0	2,6	2,7	3,5
04	L _e (mm)	113,4	93,7	121,1	127,3	162,8
	A (hm ³)	2,7	2,3	2,9	3,1	3,9
05	L _e (mm)	114,7	94,5	121,1	127,3	182,3
	A (hm ³)	1,4	1,1	1,4	1,5	2,2
06	L _e (mm)	109,7	91,4	121,1	127,3	134,1
	A (hm ³)	9,1	7,5	10,0	10,5	11,1
07	L _e (mm)	113,4	93,7	121,1	127,3	162,1
	A (hm ³)	2,8	2,3	3,0	3,2	4,0
08	L _e (mm)	114,6	94,5	121,1	127,3	180,7
	A (hm ³)	1,4	1,2	1,5	1,6	2,3
09	L _e (mm)	114,1	94,1	121,1	127,3	172,0
	A (hm ³)	2,0	1,6	2,1	2,2	2,9
10	L _e (mm)	115,8	95,2	121,1	127,3	210,2
	A (hm ³)	0,6	0,5	0,6	0,6	1,0
11	L _e (mm)	112,8	93,3	121,1	127,3	156,5
	A (hm ³)	3,5	2,9	3,8	3,9	4,9
12	L _e (mm)	114,0	94,1	121,1	127,3	170,1
	A (hm ³)	2,1	1,7	2,2	2,3	3,1
13	L _e (mm)	115,4	94,9	121,1	127,3	195,9
	A (hm ³)	0,9	0,7	0,9	1,0	1,5
14	L _e (mm)	115,7	95,2	121,1	127,3	206,3
	A (hm ³)	0,6	0,5	0,7	0,7	1,1
15	L _e (mm)	114,7	94,5	121,1	127,3	182,6
	A (hm ³)	1,3	1,1	1,4	1,5	2,1
Total	L _e (mm)	112	93	124	127	157
	A (hm ³)	39	32	43	44	55

Ces méthodes utilisées, reflètent bien l'influence de la pluviométrie et la surface du bassin versant sur l'apport liquide tout en négligeant d'autres paramètres jugés indispensables pour une éventuelle estimation (la lithologie, le couvert végétal, la pente...). Les résultats obtenus sont assez rapprochés entre eux avec une certaine surestimation de l'écoulement par la méthode de l'ANRH.

Il sera judicieux de prendre la méthode qui donne la valeur la plus proche de la moyenne, un apport de 43 hm^3 donné par la formule de Coutagne sera donc adopté.

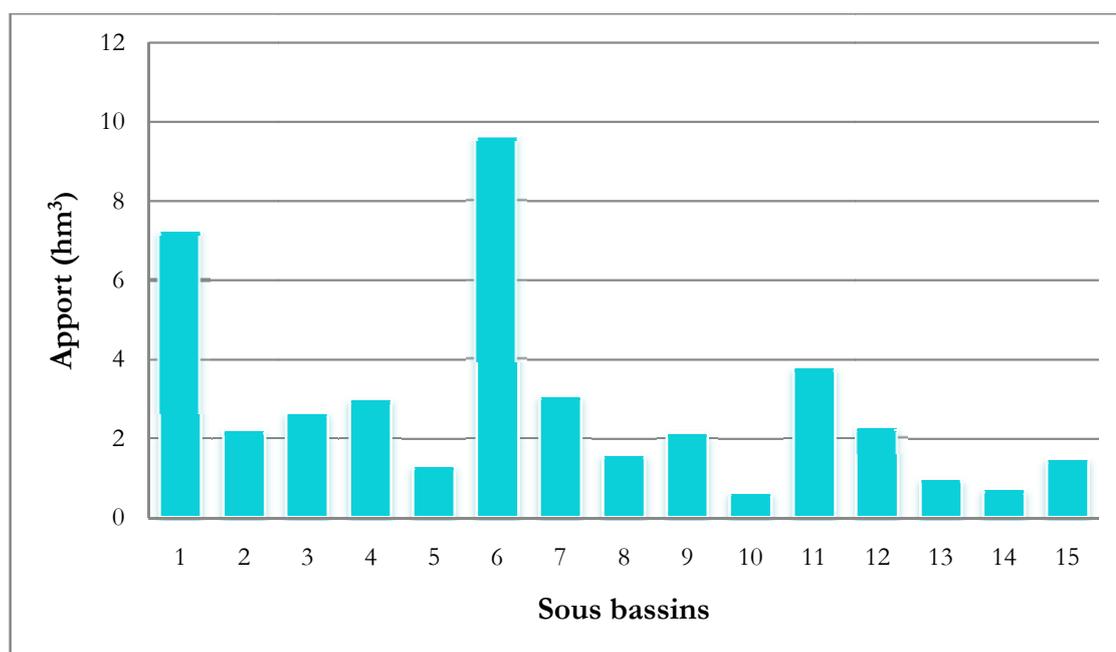


Figure 3.13. Contribution des sous bassins élémentaires du bassin versant du lac Fetzara dans l'écoulement annuel (méthode de Coutagne).

Le figure 3.13 a mis en évidence la contribution importante de Oued El Hout (BV 06) avec 22% de l'écoulement total, suivi de Oued Mellah (BV 01) avec 17% et Oued Zied (BV 11) avec 9% dans l'alimentation du lac Fetzara.

Une cartographie de la lame d'eau écoulee annuelle a été réalisé par Mebarki (2010) en utilisant un modèle conceptuel à réservoirs « LOIEAU » (dérivé du GR2M de l'institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement [CEMAGREF]). Il permet de reconstituer mois par mois les écoulements en alimentant le modèle de pluies et ETP mensuelles estimées sur le bassin versant.

Chapitre 3. Etude hydrologique

Les précipitations mensuelles médianes, calculées par ajustement à des lois «racine normale» de la série trentenaire de septembre 1965 à août 1995, sont cartographiées en tenant compte du relief et de la distance à la mer. L'évapotranspiration potentielle mensuelle interannuelle, est évaluée à l'aide de la formule dite «ETP ANRH» (calée sur le modèle de Penman).

Le calage a été entrepris de façon satisfaisante sur les stations hydrométriques Algériennes (plus de 42 stations de jaugeage contrôlant des bassins plus ou moins emboîtés de superficies allant de 16 Km² à 8 735 Km²). La carte de la figure 3.14, permet d'estimer en tout point de l'espace les apports annuels moyens avec 70 % de chance de rester dans une fourchette (multipliée ou divisée par 1,2) (Mebarki, 2010).

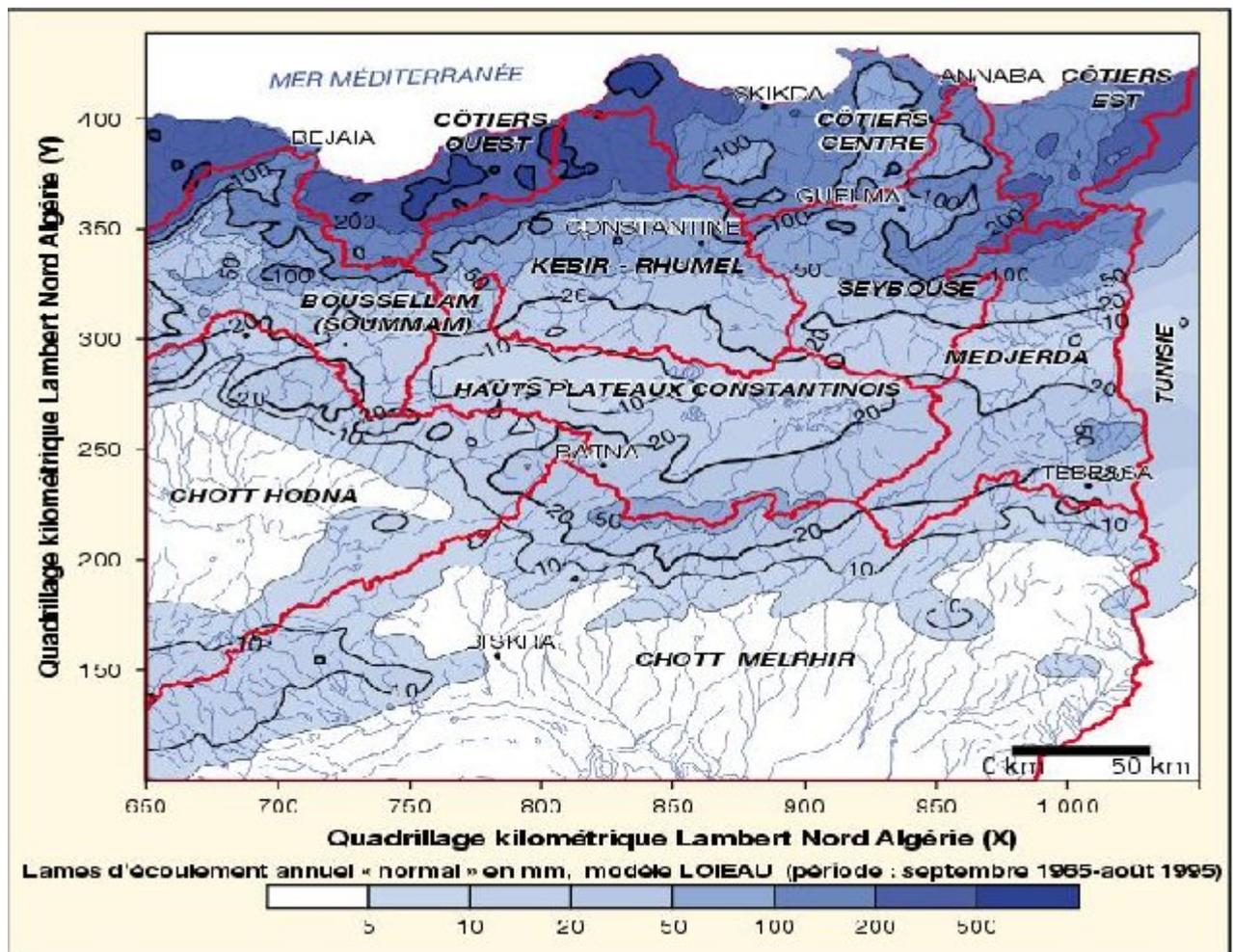


Figure 3.14. Carte de l'écoulement annuel moyen de l'Est Algérien (période moyenne : 1965/1966–1994/1995) (Mebarki, 2010).

La lame d'eau moyenne interannuelle écoulée sur le bassin du lac Fetzara, estimée par les formules empiriques est de 124 mm et celle estimée par le modèle global à réservoirs (LOIEAU) est entre 100 et 200 mm, ce qui amène à valider le résultat obtenu .

3.3.2. Les apports solides

Face à un risque d'érosion ou lorsque le processus érosif est déjà engagé, il est souhaitable de disposer d'instruments permettant, dans un premier temps, d'évaluer l'intensité du phénomène afin de juger de la pertinence d'éventuelles mesures de prévention ou de correction, puis, le cas échéant, de tester l'efficacité qu'il est permis d'attendre des divers types d'interventions envisagées. Les instruments requis sont des modèles qui reposent sur une description plus ou moins affinée des processus à l'œuvre et qui doivent permettre une estimation des pertes en terre pour une gamme étendue de conditions, tant du point de vue climatique que topographique ou pédologique.

En général, les modèles les plus simples, de nature empirique, ne s'appliquent valablement que pour des échelles d'espace et de temps suffisamment grandes, soit le bassin versant et les pertes annuelles, échelles qui s'avèrent souvent suffisantes dans un contexte d'aide à la décision (Soutter et al., 2007). Des modèles plus élaborés de nature mécaniste et basés sur une équation de continuité, permettent de dépasser ces limitations et d'estimer la distribution spatiale des flux solides pour chaque événement météorologiques mais le principal inconvénient de ce type de modèles réside bien entendu dans le nombre élevé de paramètres qu'ils font intervenir, d'où le recours à l'utilisation de formules empiriques et de type boîte noire par défaut de manque de données .

3.3.2.1. Estimation de l'apport solide annuel

L'estimation de l'apport solide qui arrive au lac Fetzara a été faite en utilisant des formules empiriques et de types boîte noire calées sur l'Algérie.

a- Formule de Fournier (1960)

$$Ass = (1/36) (Pm^2/Pam)^{2,65} (h^2/S)^{0,46} \quad (3.9)$$

Ass : apport solide spécifique (t/km³) ;

Pm : précipitation moyenne mensuelle du mois le plus pluvieux (mm) ;

Pam : précipitation moyenne interannuelle (mm) ;

h : dénivelée moyenne (m) ;

S : superficie du bassin versant (km²).

b- Formules de type boîte noire

- Formule de Tixeront

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

$$- \text{Ass} = 354.E^{0.15} \text{ pour les bassins tunisiens} \quad (3.10)$$

$$- \text{Ass} = 92.E^{0.21} \text{ pour la région Est algérien} \quad (3.11)$$

$$- \text{Ass} = 200. E \text{ pour la région Centre algérien} \quad (3.12)$$

Avec :

Ass : apport solide spécifique (t/km^2) ;

E : Ecoulement (mm).

- Formule de la Sogreah

Basée sur les données de 30 bassins Algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 km^2 , soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000 mm.

$$\text{Ass} = \alpha .E^{0.15} \quad (3.13)$$

Ass : apport solide spécifique (t/km^2) ;

E : écoulement (mm) ;

α : coefficient dépendant de la perméabilité du sol comme le montre le tableau 3.11.

Tableau 3.11. Valeurs de α pour différentes perméabilités

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

La valeur de α prise en considération est de 350 qui correspond à une perméabilité moyenne à faible pour l'ensemble du bassin versant.

Tableau 3.12. Résultats de l'estimation du transport solide

Formule	Erosion spécifique (t/Km ²)
Fournier	350
Tixeront	114
Sogreah	721
Moyenne	395

Les méthodes employées n'ont pas donné des résultats semblables, l'érosion spécifique du bassin versant adoptée est celle de Fournier car elle est proche de la moyenne des résultats obtenus par toutes les formules. Le secteur du lac Fetzara est donc une zone susceptible à l'érosion.

Malgré la faible topographie du secteur, le ravinement et le décrochement des berges sont choses fréquentes dans le bassin versant. De plus, le paysage des cours d'eau provient directement d'un cycle érosif constant. Sous forme de coulées, les cours d'eau ont charrié les sédiments formant des vallées encaissées. Outre ces coulées, le paysage du bassin versant est essentiellement agricole. L'agriculture ayant profondément modifié le paysage et ayant subi un développement intensif, les boisés se font de plus en plus rares et ne correspondent plus qu'aux coulées de certains cours d'eau du bassin versant. L'absence de végétation au système racinaire profond prive ainsi le bassin versant d'une retenue importante des sédiments et des rôles attribués aux bandes riveraines notamment. L'absence de bande riveraine favorise l'apport au cours d'eau d'éléments ruisselés et un débit de pointe plus élevé lors de précipitations. Le ruissellement accentue le phénomène d'érosion, tant aux champs que dans les cours d'eau qui ne possèdent pas la capacité physique pour accueillir ce débit de pointe plus important.

3.4. Etude des crues

La connaissance des débits de crues pour une période de retour donnée est d'une grande importance pour la protection et l'exploitation des ressources en eau ainsi que la défense contre les effets néfastes des hautes eaux. Les hydrologues savent qu'il n'existe pas de méthode universelle pour estimer les crues et qu'il n'en existera pas dans un avenir proche néanmoins grâce aux grands progrès réalisés ces dernières années dans le domaine du traitement des données par ordinateur, plusieurs méthodes peuvent être utilisées tout en analysant leurs résultats. L'estimation des crues est actuellement beaucoup mieux fondée et par conséquent plus plausible.

Et tirer du profit du fait que chaque méthode a ses avantages et ses défauts, différents suivant le type de bassin étudié (Spreafico et all., 2003).

3.4.1. Méthodologie générale

Plusieurs étapes sont nécessaires pour parvenir à la compréhension du système hydrologique des bassins versants et réussir à générer les hydrogrammes de crue de ces derniers. La méthodologie utilisée se découpe en quatre principales étapes :

- L'analyse historique des événements de crue passées se fait grâce à la bibliographie, aux arrêtés de catastrophe naturelle et à l'enquête de terrain, permettant de comprendre le type de problèmes rencontrés, le fonctionnement hydraulique du réseau hydrographique au sein de la commune etc... ;
- La caractérisation des bassins versants pour comprendre leur fonctionnement et réaction lors d'un événement pluvieux important;
- L'analyse des pluies pour définir les pluies caractéristiques des bassins versants pour les périodes de retour recherchées;
- La définition d'hydrogrammes de crues. Toutes ces parties sont fortement liées les unes aux autres afin d'amener la définition d'un hydrogramme de crue.

3.4.2. Analyse historique des crues

La connaissance des événements de crue passées constitue l'un des préalables de la gestion des risques d'inondation. Elle fournit des éléments sur les caractéristiques des événements observés, telles que les cotes et hauteurs atteintes au cours des crues (« laisses de crues »), ainsi que sur les dommages qui en résultent.

La fréquence et l'ampleur des inondations touchant la wilaya de Annaba démontrent bien qu'une grande partie de la population et ses terres sont réellement exposées à ce risque. D'après les témoignages, les inondations ont provoqué plusieurs fois la remontée du niveau du lac Fetzara qui envahit les terres riveraines et détruit des cultures maraîchères.

3.4.3. Etude des pluies extrêmes

Dans les études relatives au phénomène des crues et des transports solides, les pluies extrêmes présentent beaucoup d'intérêt. Il est impératif de procéder à une analyse minutieuses de ces dernières. Les valeurs extrêmes des variables hydro climatiques, présentent un intérêt tout particulier lorsqu'on parle en terme de risque. L'estimation de la récurrence de pluies extrêmes fournit des éléments indispensables pour la construction et la protection d'infrastructures telles les digues et les ouvrages d'assainissement, afin de protéger efficacement les populations et leurs

biens. Très tôt les statisticiens ont essayé de trouver les distributions de ces valeurs extrêmes. Le problème n'est pas simple. Ainsi en hydrologie, pour estimer par exemple la pluie maximale relative à un risque donné, on retient, pour chacune des n années observées, la valeur maximale de la pluie, et l'analyse statistique porte seulement sur l'échantillon de ces n valeurs de hauteur de précipitation maximale annuelle.

Les lois des valeurs extrêmes, régulièrement utilisées, sont la loi de Jenkinson ou loi généralisée des valeurs extrêmes et la loi de Gumbel, qui est un cas particulier de la première loi. La loi de Gumbel est utilisée par la plupart des services météorologiques officiels, pour décrire la fréquence des pluies extrêmes. La simplicité du calcul de la distribution de Gumbel et la configuration géométrique du tracé sur échelle linéaire de probabilité a été un élément qui a contribué à sa popularité (Benkhaled, 2007). Donc l'ajustement des précipitations maximales journalières s'est fait selon une distribution Gumbel qui s'est avérée adéquate et ceci pour les cinq stations : El-Kerma, Ain Berda, Pont Bouchet, Zit Emba et Berrahel (séries de 35 années de mesure) qui sont représentatives du bassin versant (selon les zones d'influence des pluviomètres). La fonction de répartition de la loi de Gumbel $F(x)$ s'exprime selon la formule (3.13)

$$F(x) = \exp \left(- \exp \left(- \frac{x - a}{b} \right) \right) \quad (3.13)$$

avec la variable réduite suivante : $u = \frac{x - a}{b}$ où a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel.

La distribution est donné alors par la relation (3.14)

$$F(x) = \exp \left(- \exp (-u) \right) \quad (3.14)$$

$$u = - \ln \left(- \ln (F(x)) \right) \quad (3.15)$$

L'avantage d'utiliser la variable réduite est que l'expression d'un quantile est alors linéaire : $x_q = a + bu_q$. En conséquence, dès lors que les valeurs de la série à ajuster peuvent être reportés dans un système d'axes $(x - u)$; il est possible d'ajuster une droite qui passe le mieux par ces points et d'en déduire les deux paramètres a et b de la loi. Il existe de nombreuses formules d'estimation de la fonction de répartition à l'aide de la fréquence empirique $\frac{r - 0,5}{n}$. Elles reposent toutes sur un tri de la série par valeurs croissantes permettant d'associer à chaque valeur son rang r . Des simulations ont montré que pour la loi de Gumbel, il faut utiliser la fréquence empirique de Hazen où r est le rang dans la série de données classées par valeurs croissantes, n est la taille de l'échantillon, $x[r]$ la valeur de rang r .

Les résultats de cet ajustement sont résumés au tableau (3.13) et les graphiques d'ajustement figurent dans l'annexe F.

Tableau 3.13. Pluies maximales journalières fréquentielles

Pluie maximale journalière (mm)				
Période de retour (an)		10	100	500
Stations	Berrahel	102	163	182
	El-Kerma	74	109	118
	Ain Berda	81	123	142
	Pont Bouchet	83	136	168
	Zit Emba	72	107	123

3.4.4. Elaboration des courbes IDF

Les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) sont un outil de premier ordre pour quiconque œuvre dans le domaine de la conception ou de la gestion d'ouvrages hydrauliques. Pour élaborer les courbes IDF, il faut repérer plus particulièrement, pour chaque épisode pluvieux d'un poste pluviographe donné, la hauteur de pluie maximale en un pas de temps donné. Les couples « Hauteur – pas de temps » sont alors transformés en intensité de pluie. Ensuite, il est retenu les intensités maximales annuelles pour chaque pas de temps et ce pour toutes les années où la pluie a été enregistrée.

Il s'agit ensuite d'attribuer une fréquence expérimentale F aux valeurs de l'échantillon. Une fois les pluies journalières maximales déterminées pour chaque fréquence, la démarche consiste à en déduire les pluies de courte durée en fonction des pluies maximales calculées précédemment ($P_j\%$), de la durée (t) et d'un, exposant climatique (b); de ce fait, la pluie de durée t et de fréquence voulue.

$$P_{tc} = P_{\max j} \left(\frac{t}{24} \right)^b \quad (3.16)$$

P_{tc} : pluies de courte durée (mm) de fréquence égale à celle de $P_{\max j}$;

$P_{\max j}$: pluies maximales fréquentielles (mm) ;

t : temps (heure) ;

L'exposant climatique (b) est donné par la formule (3.17) d'après (Benchaïba, 2006)

$$b = 1 + \frac{\ln(P_{max} / 24) - \ln(25)}{\ln(24) - \ln(0,5)} \quad (3.17)$$

Les valeurs de l'exposant climatique pour les différentes stations sont données au tableau 3.14.

Tableau 3.14. Valeurs de l'exposant climatiques des stations pluviométriques

Stations	Exposant climatique (b)
Berrahal	0,40
El-Kerma	0,35
Ain Berda	0,36
Pont Bouchet	0,39
Zit Emba	0,34

L'intensité des pluies est alors $I_t = \frac{P_{ct}}{t} \quad (3.18)$

La courbe intensité-durée-fréquence de la station de Berrahal est prise comme exemple illustrée sur la figure (3.15) , les courbes IDF des stations étudiées sont en annexe G.

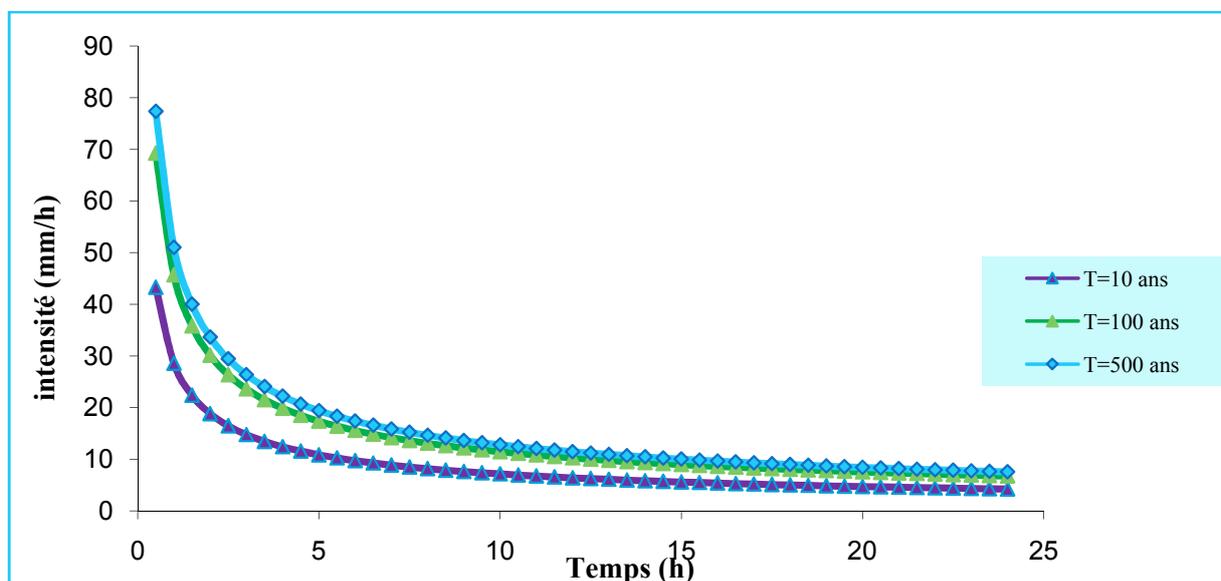


Figure 3.15. Courbe des intensités fréquentielles (station de Berrahal).

3.4.5. Evaluation des crues

Dans le cas des petits bassins versants non jaugés, l'évaluation des débits de crues repose quasi-exclusivement sur l'information pluviométrique. Les formules empiriques classiques sont employées afin d'estimer le débit de crue des sous bassins à différentes périodes de retour.

- Formule de Mallet et Gauthier

Etablie sur la base d'observations faites au Nord de l'Algérie et en Tunisie, elle a été appliquée pour des périodes de retour différentes.

$$Q_i(T) = 2K \cdot S \cdot \log(1+AP) \cdot (1+4\log T \cdot \log S)^{0,5} / L^{0,5} \quad (3.19)$$

$Q_i(T)$: débit max instantané (m^3/s);

K, A : coefficients topographiques, $K = 1$ et $A = 20$;

P : pluie moyenne annuelle (m);

S : surface du bassin versant (km^2);

L : longueur du talweg principal (km);

T : période de retour (an).

- Méthode rationnelle

Les bases de la méthode appelée rationnelle remontent au milieu du 19^e siècle (Mulvaney, 1851). En Amérique du Nord, c'est à Emil Kuichling (1889) qu'est généralement attribuée la paternité du concept, qui a survécu jusqu'à nous à peu près dans sa forme originale. L'équation s'écrit habituellement comme suit :

$$Q_i(T) = \frac{C * I(T) * S}{3,60} \quad (3.20)$$

$Q_i(T)$: débit de pointe du bassin versant pour une période de retour T (m^3/s);

C : coefficient de ruissellement (pas d'unité). Afin d'assurer un dimensionnement suffisant des structures, il est préférable de choisir une valeur du coefficient C qui représente les pires conditions de ruissellement du bassin versant;

$I(T)$: intensité de la précipitation pour une durée de précipitation égale au temps de concentration et pour une période de retour T (mm/h);

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

- Méthode de Sogreah

Les paramètres de cette méthode ont été calés dans l'Est Algérien dans le cadre d'une étude régionale réalisée par Sogreah pour le compte de l'ANRH. Le débit de pointe est calculé en fonction du coefficient de ruissellement, du temps de base de la pluie journalière maximale fréquentielle :

$$Q(t,f) = CQ \cdot (P_{jmax}(f) - P_0) \quad (3.21)$$

$Q(t,f)$: débit de pointe fréquentiel (m^3/s);

$P_{jmax}(f)$: pluie journalière maximale fréquentielle en mm;

P_0 : seuil statistique de ruissellement ($P_0 = 20$ mm);

Chapitre 3. Etude hydrologique

CQ : coefficient de ruissellement $CQ = S \cdot T_b^{-0,77} / 6$;

S : surface du bassin versant en Km^2 ;

T_b : temps de base , $T_b = 2,33 + L^{1,7} \cdot (Pa \cdot I^{0,5})^{0,77} / 1000$;

Pa : pluie moyenne annuelle en mm ;

I : pente en % ;

L : longueur du talweg principal.

- Synthèse des résultats

Les résultats obtenus pour les méthodes citées ci-dessus pour différentes périodes de retour ; sont récapitulés au tableau 3.15

Tableau 3.15. Débits des crues (m^3/s) des sous bassins pour différentes périodes de retour .

BV	Méthode Mallet et Gauthier			Méthode rationnelle			Méthode Sogréah		
	Période de retour (an)								
	10	100	500	10	100	500	10	100	500
1	104	143	174	46	73	100	103	201	296
2	30	41	50	17	27	37	25	52	78
3	33	45	54	19	31	43	26	53	79
4	38	51	62	19	30	42	34	67	99
5	23	31	38	11	16	21	10	23	35
6	119	164	199	50	73	97	47	91	134
7	43	59	71	18	27	36	22	46	69
8	25	34	41	11	17	22	11	24	38
9	32	44	53	14	21	27	16	34	52
10	8	11	13	4	7	9	4	9	15
11	60	82	100	25	37	49	26	55	84
12	43	59	71	21	31	41	11	27	43
13	17	23	28	9	15	21	10	23	36
14	14	19	23	8	14	19	5	13	22
15	32	44	52	16	26	36	14	33	52

L'examen des résultats obtenus au tableau 3.13 ; pour les sous bassins moyennant les formules empiriques, a permis de constater ce qui suit :

Pour certains sous bassins (BV 01, BV 03, BV 04), la formule de Mallet et Gauthier donne en général la moyenne des deux autres méthodes ; et elle a donné des valeurs nettement supérieures aux valeurs des deux autres méthodes pour le reste des sous bassins. La méthode de Sogreah ; a donné des valeurs très rapprochées avec celles de la méthode rationnelle (BV 02, BV

05, BV 06, BV 11, BV 12, BV 14, BV15), mais dans certains sous bassins; elle a surestimé le débit (BV 01, BV 04, BV10) par rapport aux deux autres méthodes. Quant à la méthode rationnelle; les débits ont été sous estimés pour la plupart des sous bassins car elle est valable uniquement pour les bassins de faibles superficies.

Plus un bassin est petit, plus le rôle des facteurs influant sur les écoulements est important. Les effets d'amortissement, qui peuvent améliorer le résultat lors de l'évaluation des crues dans les bassins de moyenne grandeur, ont une moins grande influence dans les petits bassins. On ne procédera donc pas de la même façon pour évaluer les crues dans les bassins très petits (< 10 km²) que pour les bassins de grandeur moyenne (10 à 500 km²). En résumé, les valeurs obtenues par la méthode de Mallet et Gauthier vont être adoptées pour les sous bassins BV 01, BV 03 et BV 04. Les débits obtenus par la méthode de Sogreah pour les sous bassins BV 02, BV 05, BV 06, BV07, BV08, BV 11, BV 12 et BV15 et pour le reste des sous bassins; les valeurs de la méthode rationnelle seront adoptées et qui représentent les petits bassins (BV10, BV14 et BV 13) , la récapitulation des débits de crues retenus est dans le tableau 3.16.

Tableau 3.16. Débits de crues fréquentielles (m³/s) retenus pour les sous bassins .

Débits de crues (m³/s)			
BV	Périodes de retour (an)		
	10	100	500
01	104	143	165
02	25	52	60
03	33	45	52
04	38	51	59
05	10	23	42
06	47	91	164
07	22	45	51
08	11	24	28
09	14	21	22
10	4	7	4
11	26	55	56
12	11	27	51
13	9	15	21
14	8	14	19
15	14	33	39

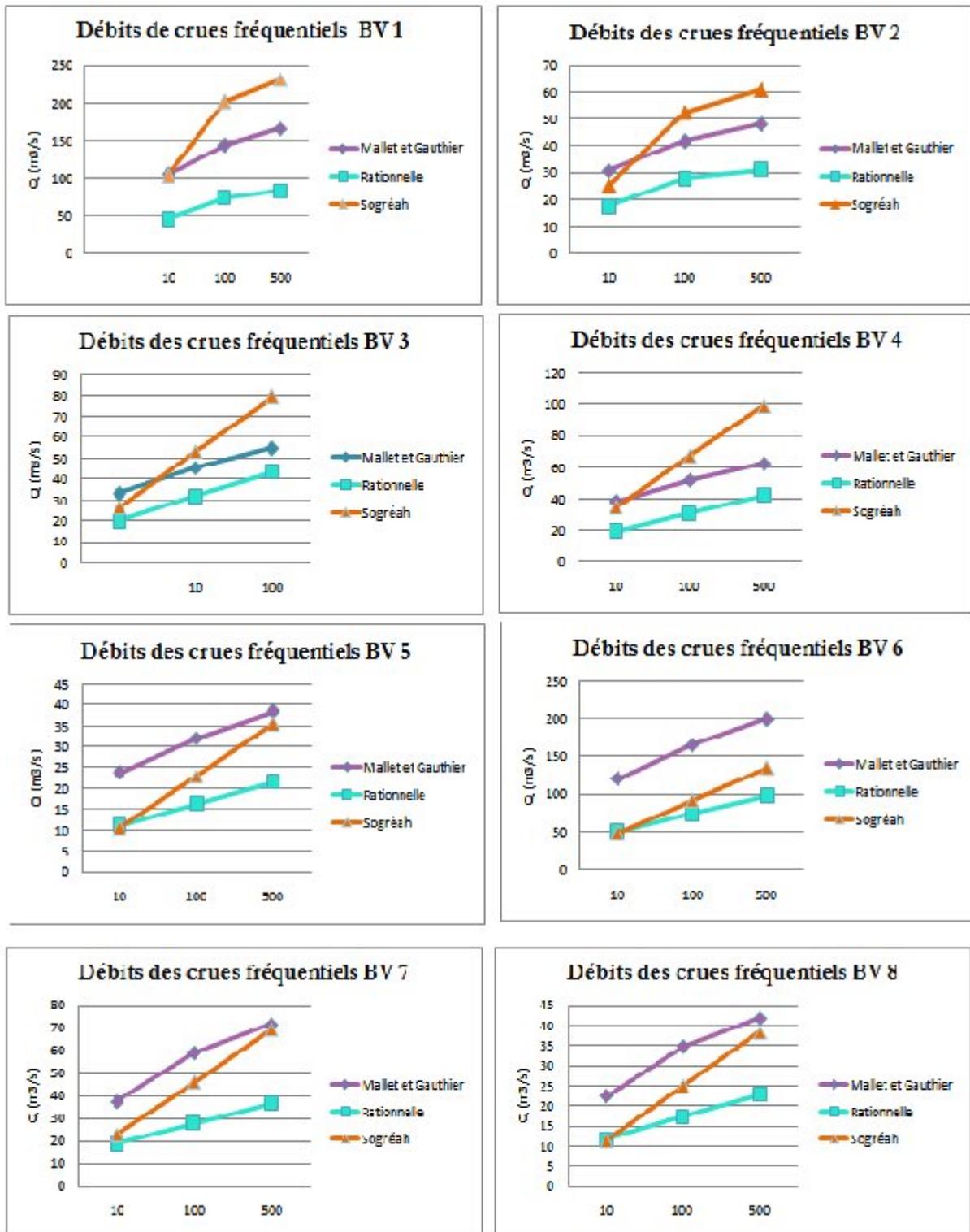


Figure 3.16. Comparaison des débits de crues fréquentiels des sous bassins versants.

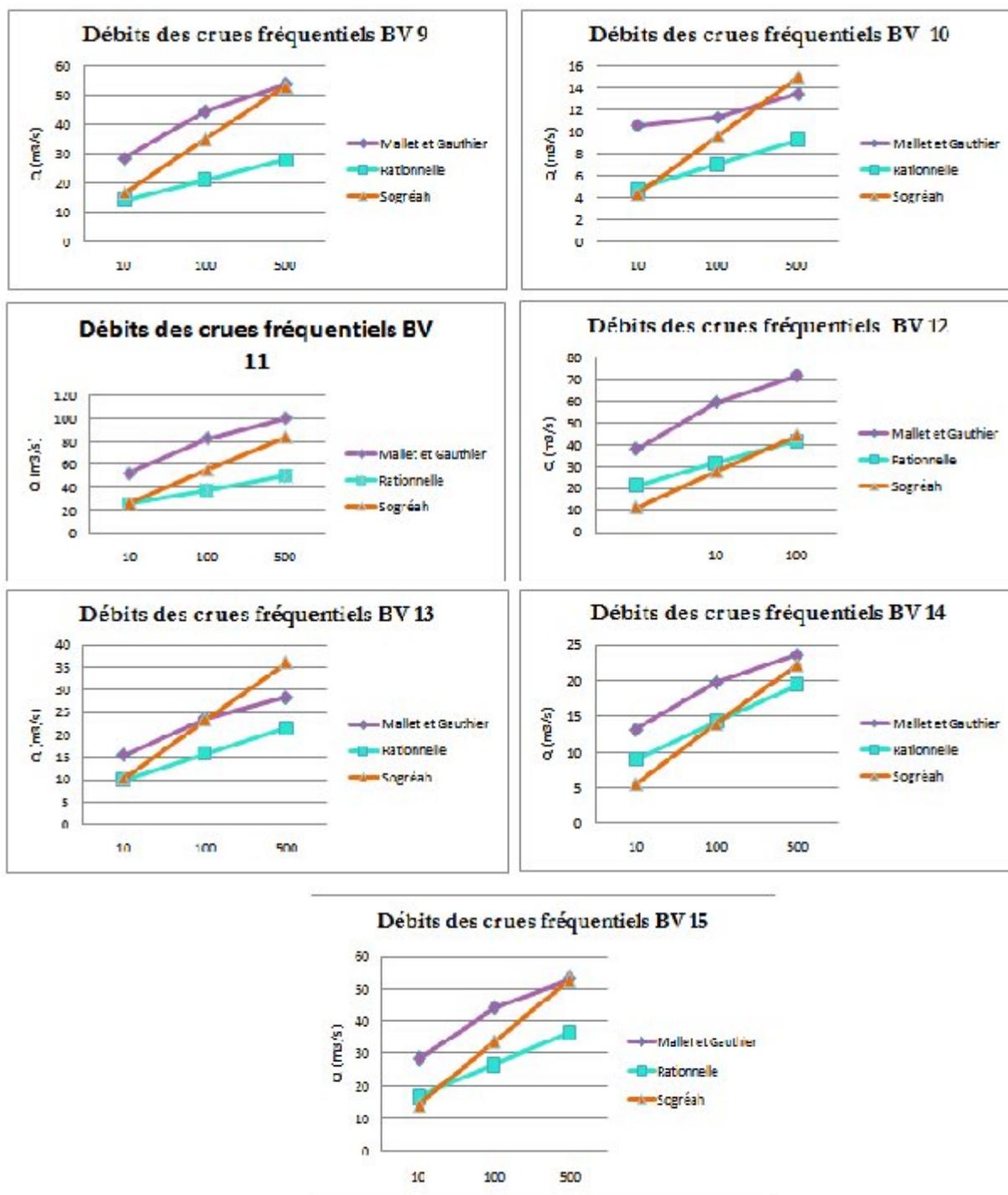


Figure 3.16. Comparaison des débits de crues fréquentielles des sous bassins versants (suite).

Cette étude a permis de présenter des méthodes employées en ingénierie dans le cadre de l'estimation des débits. Ces formules sommaires ont le mérite d'exister en l'absence totale d'informations hydrologiques (bassins non jaugés), elles permettent une estimation des débits, c'est leur principal avantage. Malheureusement, la variabilité des résultats est souvent très forte d'une formule à l'autre. De plus, les estimations réalisées sont parfois très éloignées des valeurs réelles. Le choix du débit caractéristique de crue est donc difficile. Dans ces conditions, Hegg et Forster (2002) suggèrent d'utiliser conjointement plusieurs formules et de faire la moyenne des résultats qui paraissent corrects d'un point de vue hydrologique.

3.4.6. Définition des hydrogrammes de crues

Connaissant la pluie brute, il faut désormais déterminer la pluie efficace, les méthodes SCS Curve Number (appliquée pour des conditions moyennes d'infiltration) et la méthode des isochrones ont été utilisées pour chacun des sous bassins et pour les différentes périodes de retour.

3.4.6.1. Méthode du SCS Curve Number

En 1972, le US Soil Conservation Service a proposé un modèle empirique élaboré à partir du suivi du ruissellement de certains bassins expérimentaux, qui s'appuie sur le concept que la précipitation totale tombant sur un bassin est basée sur le potentiel absorbant du sol d'une certaine quantité d'humidité. Sur la base des observations du terrain, ce potentiel de stockage maximal S (millimètres ou en pouces) était lié à CN (courbe numérotée) qui est une caractéristique du type de sol, l'utilisation du sol et le degré initial de saturation connu sous le nom de l'état d'humidité initiale ou pertes initiales (I_a), en admettant que $I_a = 0,2.S$. La valeur de S (millimètres) est définie par l'expression empirique (3.22)

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3.22)$$

Le CN est donc simplement une transformation non-linéaire de S qui est un paramètre de stockage; il est déterminé en considérant essentiellement les types de sol en présence dans le bassin et le couvert végétal. Il est important de noter toutefois que la méthode du NRCS a été développée à l'origine comme un indice de ruissellement pour des précipitations de 24 h et qu'elle doit être utilisée avec précaution pour analyser les quantités de ruissellement pour des durées autres que 24 h.

Elle est par ailleurs moins appropriée pour l'analyse de petites précipitations et il est reconnu qu'elle devient moins précise pour des quantités de pluie inférieures à 10 mm. Le NRCS a par ailleurs classé les sols en quatre catégories en ce qui concerne le potentiel d'infiltration :

- **Groupe A** (faible potentiel de ruissellement) : Sols présentant des taux élevés d'infiltration même lorsque saturés et étant principalement constitués en profondeur de sable ou gravier bien drainés ou excessivement bien drainés. Ces sols possèdent un haut taux de transmission de l'eau infiltrée.
- **Groupe B** : Sols avec des taux d'infiltration moyen lorsque saturés, composés essentiellement de sable ou gravier modérément drainés à bien drainés sur des profondeurs modérées à importantes, avec des textures modérément fines à modérément grossières. Ces sols possèdent un taux modéré de transmission de l'eau.
- **Groupe C** : Sols présentant des taux d'infiltration lents lorsque saturés, composés principalement de sols avec une couche qui retarde le mouvement vertical de l'eau ou de sols avec une texture modérément fine à fine. Ces sols ont un taux de transmission de l'eau qualifié de faible.
- **Groupe D** (potentiel élevé de ruissellement) : Sols avec de très faibles taux d'infiltration lorsque saturés, constitués principalement d'argile en surface ou à une faible profondeur ou de sols avec une nappe phréatique haute en permanence. Ces sols présentent un très faible taux de transmission de l'eau.

Le tableau donnant les valeurs du CN suivant les surfaces drainées, les conditions d'humidité antécédentes et pour différents types de sol est en annexe H. Le ruissellement est exprimé par la relation (3.23)

$$Q(t) = \frac{(P(t) - Ia)^2}{(P(t) + S - Ia)} \quad (3.23)$$

Cette relation est l'équation de base permettant de calculer le ruissellement Q à partir de la précipitation P, chaque millimètre de la pluie nette déterminée par la fonction de production est

transformée en débit à l'exutoire par un hydrogramme unitaire.

3.4.6.2. Méthode des courbes isochrones

La naissance de cette méthode date de 1960 en Angleterre dans BRRL (British Road Research Laboratory). Son principe est d'établir une relation entre la surface du bassin et le temps de ruissellement (temps de concentration), ce qui permet de définir des courbes isochrones. Ces

dernières sont des lignes montrant des temps de ruissellement identiques vers le point considéré (pourcentage de la surface qui contribue au ruissellement en fonction du temps de ruissellement). La forme des lignes est dictée par la géométrie des bassins.

L'isochrone la plus éloignée représente le temps de concentration du bassin, c'est-à-dire le temps mis pour que toute la surface du bassin contribue à l'écoulement dans l'exutoire après une averse supposée homogène. Le tracé du réseau consiste à déterminer le temps à partir de la vitesse d'écoulement et la longueur du talweg.

$$t_i = \frac{d_i}{V_m} \quad (3.24)$$

d_i : distance mesurée suivant le trajet de l'eau ;

V_m : vitesse moyenne de l'écoulement ;

La contribution maximale de la surface A_k comprise entre deux courbes isochrones successives est donnée par la relation (3.25)

$$Q_k = \alpha \cdot C_{rk} \cdot i \cdot A_k \quad (3.25)$$

Q_k : débit maximal au temps $t+\Delta t$ provoqué par les précipitations tombant sur le secteur A_k entre t et $t+ \Delta t$ (m^3/s)

C_{rk} : coefficient de ruissellement de la surface A_k ;

i : intensité pluviométrique entre t et $t+ \Delta t$ (mm/h) ;

α : coefficient multiplicatif fonction des unités choisies, ici 0,28.

- Synthèse des résultats

L'application des méthodes SCS Curve Number et celle des isochrones aux différents sous bassins a généré des hydrogrammes de crues en réponse à des évènements pluvieux synthétiques ayant des périodes de retour de 10 ans, 100 ans et 500 ans .

Les courbes numérotées (CN) et les coefficients de ruissellement (Cr) utilisés pour chaque sous bassin sont pondérés en fonction des pourcentages d'occupation du sol; comme l'indique le tableau 3.17.

Tableau 3.17. Débits maxima obtenus par la méthode SCS et celle des isochrones.

BV	CN	Cr	Q_{\max} (m ³ /s)					
			SCS Curve Number			Isochrones		
			10 ans	100 ans	500 ans	10 ans	100 ans	500 ans
01	89	0,40	35	104	132	34	53	60
02	86	0,37	8	28	36	13	21	23
03	86	0,36	11	35	44	11	17	23
04	84	0,34	14	41	52	17	28	31
05	79	0,32	8	24	32	8	13	15
06	85	0,37	23	66	81	43	64	95
07	84	0,33	6	19	23	14	21	31
08	89	0,39	4	12	15	8	12	18
09	89	0,39	5	15	19	9	13	20
10	91	0,40	1	4	4	4	6	8
11	85	0,37	9	26	33	14	20	30
12	87	0,36	3	10	12	13	19	27
13	91	0,39	2	8	10	6	9	11
14	84	0,38	7	22	28	5	8	10
15	90	0,40	5	15	19	11	17	19

Les figures 3.17 et 3.18, illustrent les hydrogrammes de crues du sous bassin 01 pour une période de retour de 10 ans obtenu respectivement avec les méthodes SCS et celle des courbes isochrones.

Les hydrogrammes de crues des sous bassins pour les périodes de retour 100 ans et 500 ans sont donnés en annexe I.

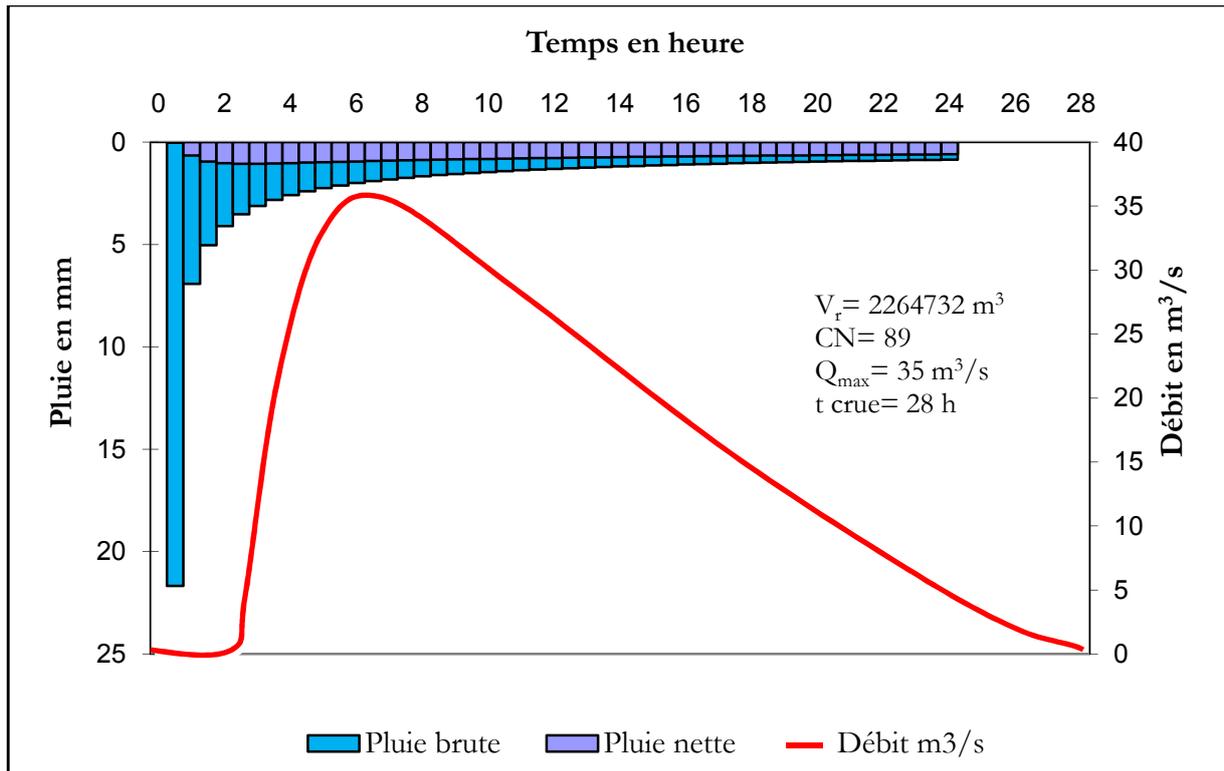


Figure 3.17. Hydrogramme de crue obtenu par la méthode SCS pour une période de retour de 10 ans pour le sous bassin BV 01.

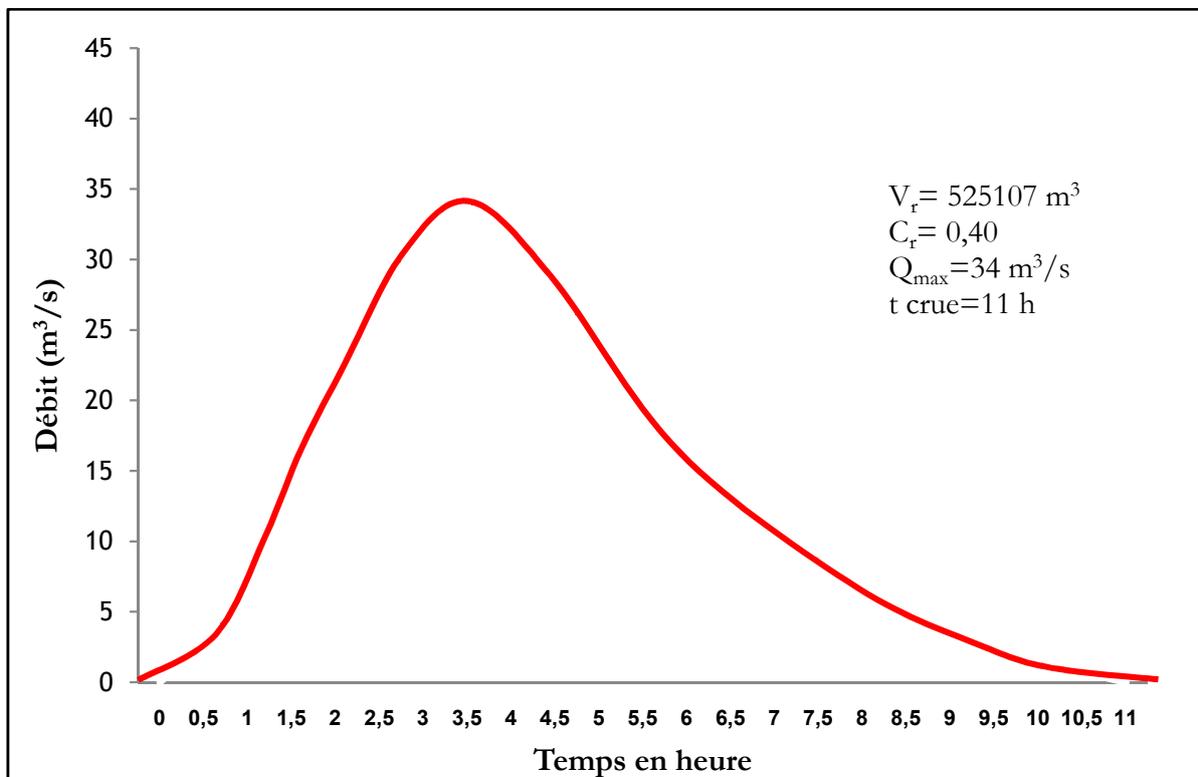


Figure 3.18. Hydrogramme de crue obtenu par la méthode des isochrones pour une période de retour de 10 ans pour le sous bassin BV 01.

Les valeurs des débits de pointe des crues estimés par la méthode des courbes isochrones et celle du SCS - CN sont en général différentes pour la plupart des sous bassins et ceci est tout à fait prévisible vu qu'elles ne sont pas basées sur les mêmes hypothèses ni qu'elles utilisent les mêmes paramètres, l'allure des hydrogrammes de crues générés est assez étalée dans le temps dans le cas du modèle SCS (plus de 24 h) et le sont beaucoup moins pour la méthode des courbes isochrones.

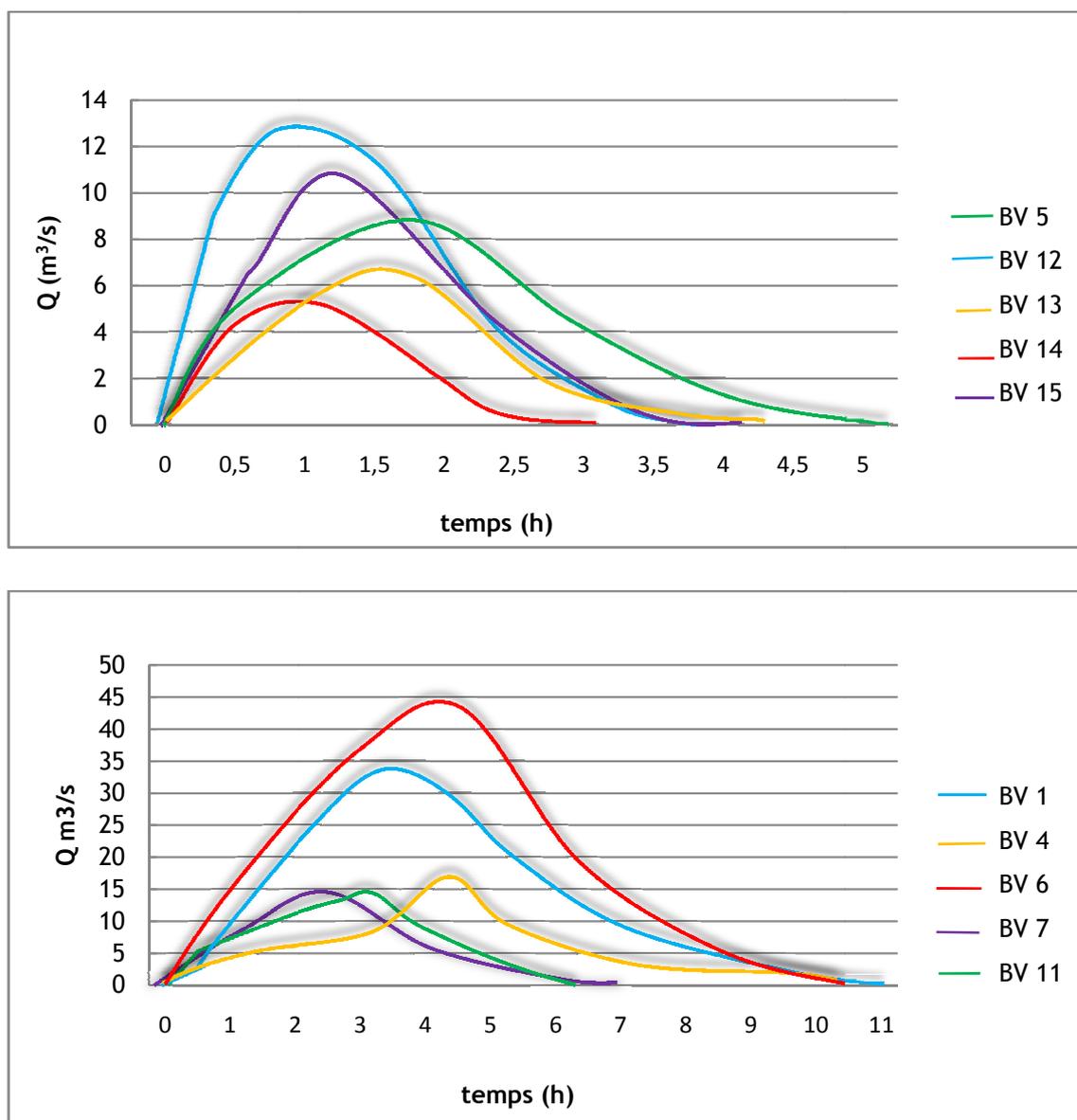


Figure 3.19. Hydrogrammes des crues des sous bassins obtenus par la méthode des isochrones pour une période de retour de 10 ans .

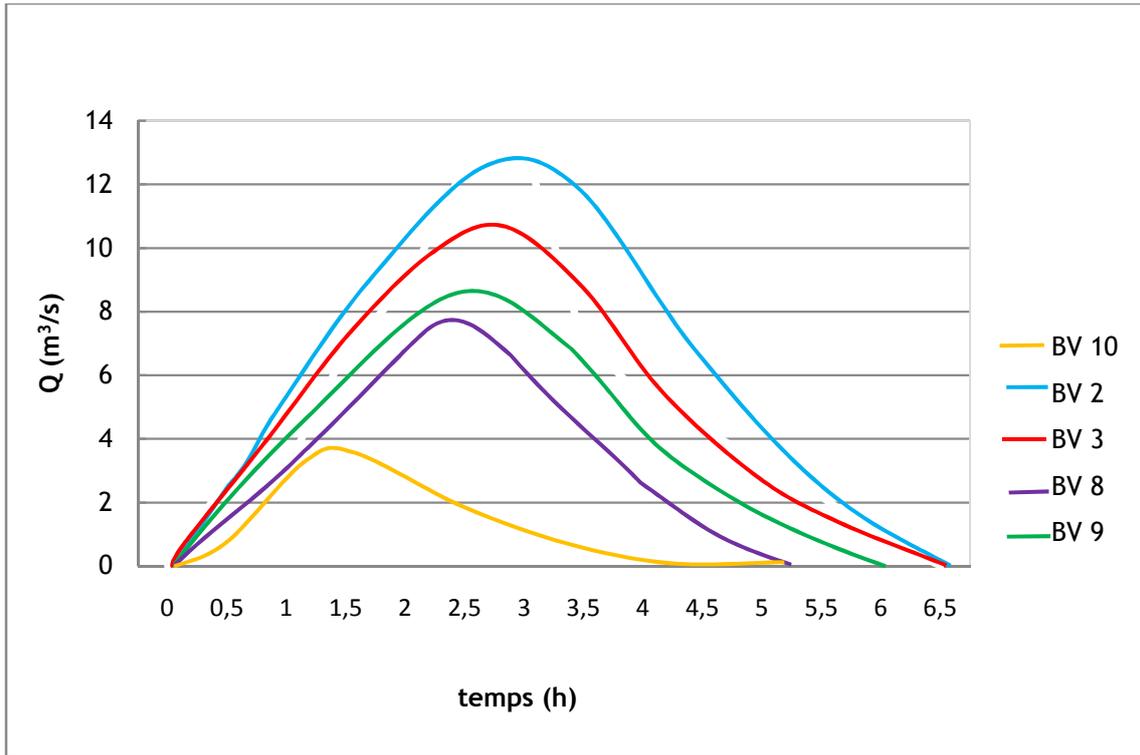


Figure 3.19. Hydrogrammes des crues des sous bassins obtenus par la méthode des isochrones pour une période de retour de 10 ans (suite).

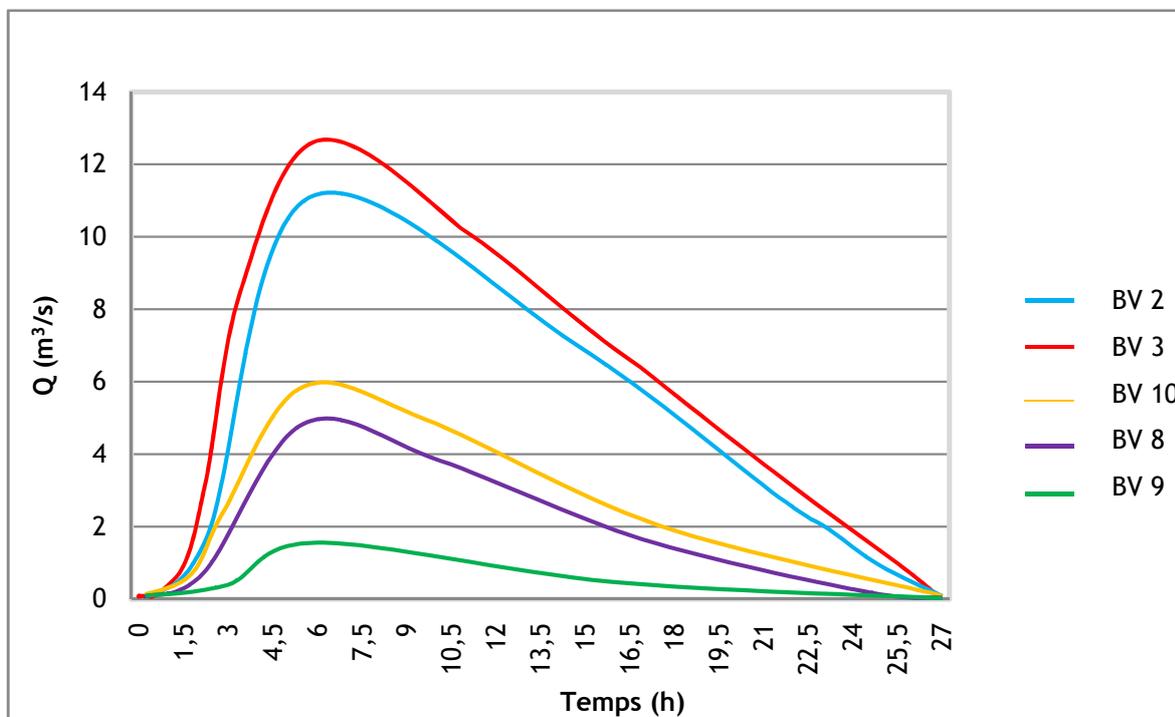


Figure 3.20. Hydrogrammes des crues des sous bassins obtenus par la méthode SCS –CN pour une période de retour de 10 ans .

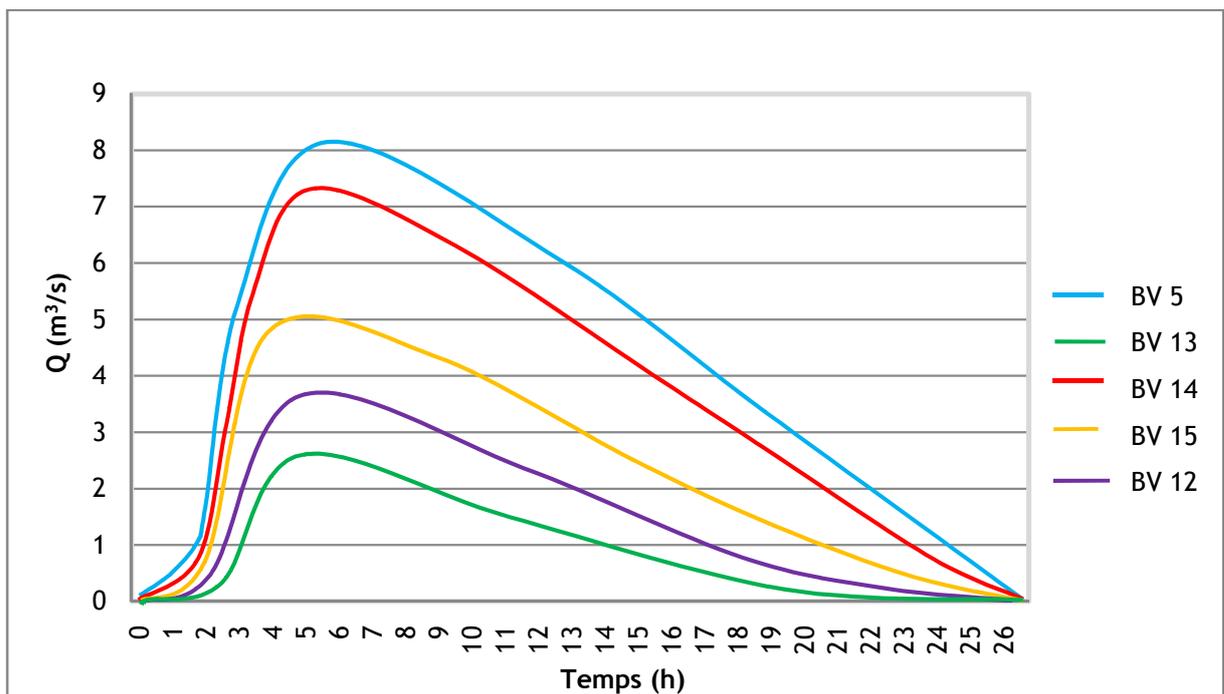
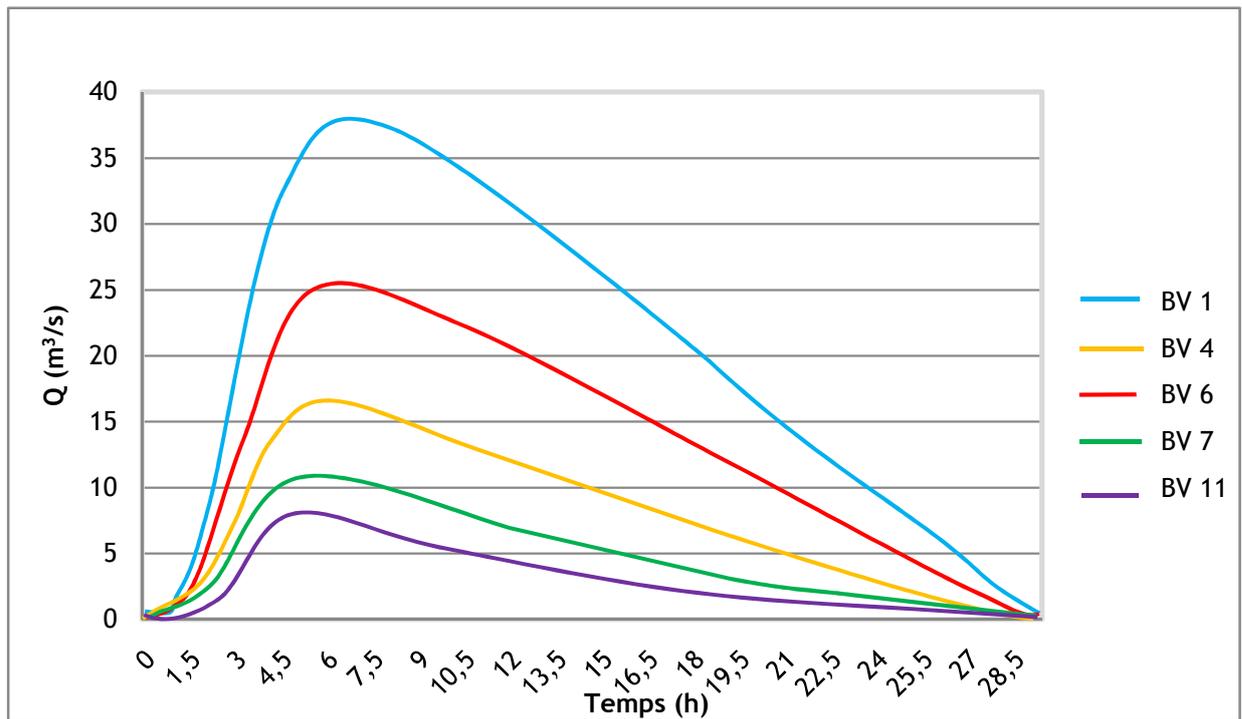


Figure 3.20. Hydrogrammes des crues des sous bassins obtenus par la méthode SCS – CN pour une période de retour de 10 ans (suite) .

Le choix de la méthode à adopter qui représente le mieux la réponse des sous bassins versants du lac Fetzara s'avère difficile, chacune des méthodes présente des avantages et des inconvénients. L'inconvénient majeur de la méthode des isochrones réside dans le coefficient de ruissellement qui est supposé constant sur toute l'averse hors qu'il peut varier beaucoup en fonction de l'intensité de cette dernière, en ce qui concerne la méthode du SCS-CN; son avantage principal c'est qu'elle tient compte de l'état initial du sol, en effet le ruissèlement ne débute qu'après avoir comblé les aspérités à la surface du sol.

Mais en contre partie, la méthode des courbes isochrones pourrait bien refléter la réponse des sous bassins versants du lac Fetzara face aux averses où la perméabilité est faible et les sous bassins sont de faibles superficies présentant des pentes assez fortes qui influencent l'écoulement par le biais de la gravité, ainsi, elles contribuent à une augmentation des volumes écoulés, par augmentation des apports latéraux, et à une accélération des écoulements dans le réseau de drainage et atteindre l'exutoire dans quelques heures, mais rien qu'en examinant les débits obtenus, on remarque que le ruissellement a été sous estimé par cette méthode. Donc la méthode SCS-CN semble la plus représentative de la réalité.

3.5. Réaction du lac Fetzara face aux crues

Avant d'aborder la réaction du lac face aux sollicitation des crues, il est plus judicieux de rappeler que l'un des rôles du lac Fetzara est l'écrêtement des crues. La capacité maximale de stockage de la cuvette lacustre est estimée à environ 84 millions de mètres cubes qui correspond à une hauteur d'eau de 2,75 mètres, pour l'évacuation des fortes précipitations; un dispositif de vidange sous forme de canal muni d'un ouvrage à vannes a été crée reliant l'oued Mellah à l'oued Meboudja, le débit maximum évacué par ce dernier peut atteindre $18 \text{ m}^3/\text{s}$ en période de hautes eaux (Hani et al, 2007), mais à priori, ce canal ne suffit pas pour évacuer les eaux collectées d'un bassin versant de plus de 500 Km^2 .

Le lac est l'exutoire unique pour quinze sous bassins dont les hydrogrammes de crues sont connus, ceux obtenus par la méthode SCS-CN qui ont semblé les plus corrects ont été retenus dans cette partie de l'étude.

Pour avoir estimé le volume total entrant vers le lac lors d'une crue de récurrence de 10 ans, 100 ans et 500 ans; le tableau 3.16 récapitule les volumes engendrés par chacun des sous bassins.

Tableau 3.16. Volume et durée des crues fréquentielles atteignant le lac Fetzara

BV	Tc (h)	Durée crue (h)	Volume de la crue (m ³)		
			10 (an)	100 (an)	500 (an)
1	5	29	525108	5158534	6140295
2	3	27	126377	1481080	1762956
3	4	27	113525	1792443	2133577
4	5	28	208840	2036485	2424064
5	2	26	73642	992997	1181982
6	5	28	532941	3460940	4006513
7	3	27	146750	4190000	1202924
8	2	26	63201	523750	606313
9	3	27	92156	716490	829436
10	2	26	24269	201120	232824
11	3	27	154671	1298900	1503655
12	2	26	86042	766770	887642
13	2	26	42239	631142	751260
14	1	26	27472	454422	540907
15	2	26	67354	984581	1171965
Volume total (Mm³)			2,3	24,7	25,4

Il est à remarquer que le délai d'arrivée des débits de crues maxima vers le lac sont assez courts variant d'une heure (1h) pour BV 14 qui est l'un des plus petits bassins à cinq (5 h) heures pour les BV1 et BV2 qui représentent respectivement oued Mellah et oued El Hout; qui sont les plus grands affluents du lac Fetzara, ces deux oueds réunis engendrent un volume de crue qui atteint 5 Millions de mètres cubes pour une crue centennale. La durée des crues varie entre 26 et 29 heures, pendant toute cette période le lac Fetzara reçoit de l'eau sans interruption .

Lors d'une crue survenant à une certaine période de l'année, le volume du lac (V_{lac}) est composé d'un volume initial (V_0), du volume total de crue (V_c) et d'un volume provoqué par les précipitations directes sur le lac au moment de la crue (si elles ont eu lieu). Ces différents volumes sont reportés sur le profil en travers du lac Fetzara réalisé à partir de la carte bathymétrique de la cuvette lacustre comme le montre la figure 3.21.

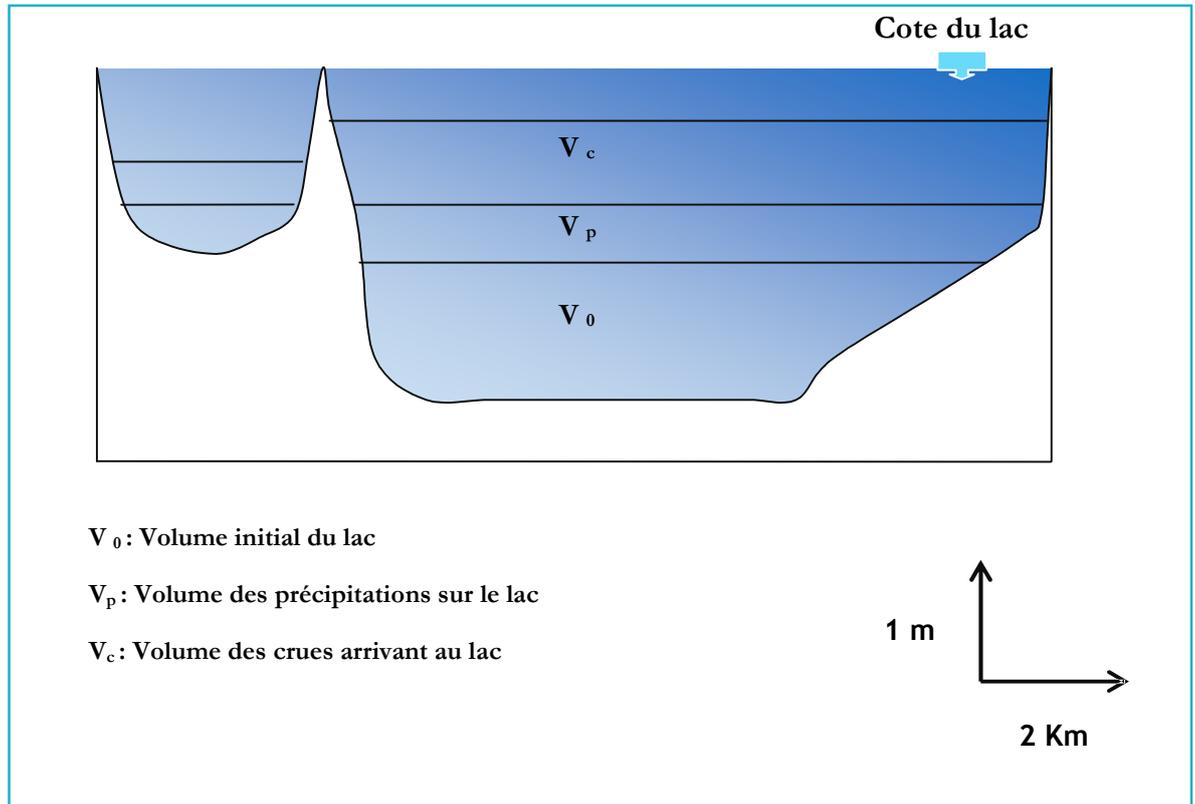


Figure 3.21. Profil en travers du lac Fetzara.

Donc la cote d'eau dans le lac s'exprime par la relation (3.26)

$$\text{Cote totale} = \text{Cote initiale} + \text{Cote précipitation} + \text{Cote crue} \quad (3.26)$$

En reportant les volumes de crues pour chaque période de retour sur la courbe Hauteur-Surface-Capacité élaborée dans un chapitre précédent, les hauteurs d'eau engendrées par ces crues sont illustrées par la figure 3.22.

Les surélévations du niveau engendrées par les crues sont récapitulées au tableau 3.17.

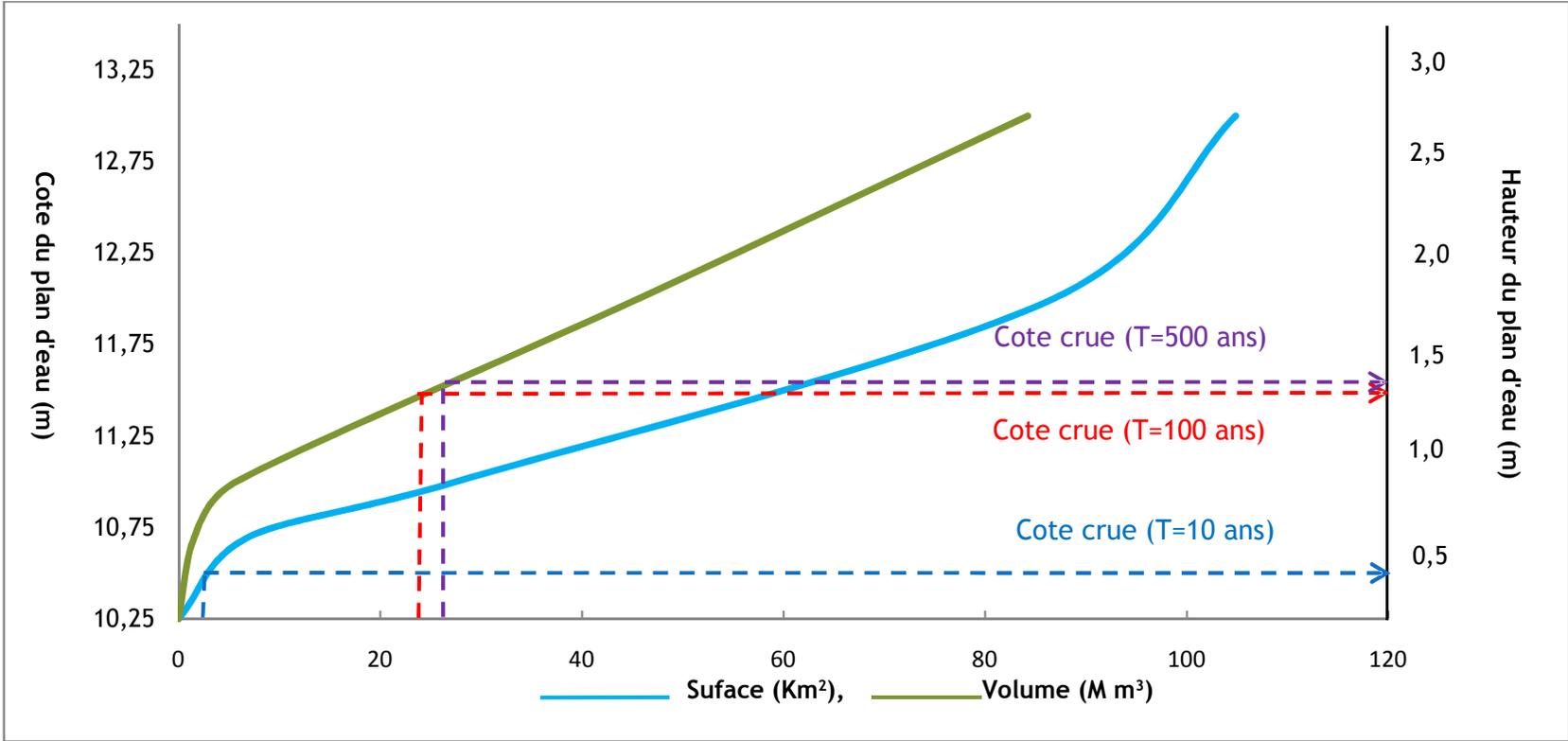


Figure 3.22. Hauteurs d'eau engendrées par les crues de récurrence de 10 ans, 100 ans et 500 ans.

Tableau 3.19. Surélévation de la hauteur d'eau lors des crues

T (an)	10	100	500
Lame d'eau (mm)	400	1340	1400

D'après les résultats obtenus, les volumes de crues fréquentielles étudiés ne provoquent pas eux même l'inondation du lac, mais si le lac était déjà rempli à un certain niveau comme c'est expliqué par la relation (3.26), dans ce cas là; la surélévation du niveau d'eau provoquée par les crues pourrait engendrer une inondation du lac et des terrains avoisinants et ceci est valable surtout en période de hautes eaux. Mais ceci peut être expliqué aussi par une sous-estimation des volumes des crues par la méthode du SCS – CN dû à une mauvaise adaptation de ce modèle au bassin versant, ou peut être bien que des erreurs ont été commises lors de l'établissement des courbes IDF .

Pour résumer, d'après les témoignages; le lac Fetzara subit fréquemment des inondations provoquant la perte des terrains avoisinants et détruisant les cultures. Afin d'éviter la reproduction de ce scénario; une gestion du risque d'inondation s'impose. La gestion du risque d'inondation se décompose en trois phases

- La phase de prévention, c'est la phase préliminaire de la gestion du risque qui consiste à déterminer l'aléa. Il s'agit de déterminer une hauteur ou un débit de retour donné en chaque endroit du territoire (éventuellement à partir d'outils statistiques basés sur des chroniques de données de pluie ou de débit). Au cours de cette phase, une cartographie des zones à risques est réalisée pour décider de l'occupation du territoire et de l'autorisation de construire. C'est également au cours de cette phase que se fait le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (barrages, ponts ...) et que des études géographiques et socio-économiques permettent de localiser et de quantifier la vulnérabilité des territoires.
- La phase de gestion de la crise au cours de laquelle les organismes spécialisés (SPC : Service de Prévision de Crue) observent l'événement en cours et émettent des prévisions de la crue potentielle afin de minimiser les risques et organiser un service de secours (Sécurité Civile). Au cours de cette phase, les météorologues et les hydrologues utilisent des modèles de prévision opérationnelle.
- L'analyse post crise consiste à analyser un événement passé pour en dresser le bilan des conséquences et éviter certaines des erreurs passées. Cette analyse constitue une aide aux

deux premières phases car elle permet d'accroître la qualité de ces deux phases grâce au retour d'expérience (Gaume, 2003).

3.6. Conclusion

L'inexistence de l'équipement hydrométrique et le manque de données précises ont été largement ressentis dans la compréhension de certains phénomènes hydrologiques, particulièrement liés aux formes de l'écoulement.

En dépit du manque de données de débits, néanmoins, les grands traits du régime d'écoulement des sous bassins ont été dégagés en utilisant des formules empiriques qui; malgré leur apparente simplicité, n'indiquent pas un manque de garantie puisque dans des régions soumises à un même régime météorologique, la corrélation entre le bassin et le débit maximum est peut – être l'une de celles qui possèdent une grande garantie entre toutes qui sont causes des crues.

L'interprétation graphique et statistique des données a permis de saisir les variations spatiales de l'écoulement superficiel en liaison avec les données climatiques et physiographiques des sous bassins de même sa forte variabilité temporelle, annuelle et surtout saisonnière et journalière. Le lac Fetzara est sujet aux inondations donc une gestion des risques d'inondation doit être prise au sérieux afin de minimiser les dégâts et surtout de protéger les terrains agricoles.

4.1. Introduction

Ce chapitre vise à estimer et interpréter les grandes lignes du bilan hydrologique du lac Fetzara dont la surface représente plus de 100 km². Il est donc important de connaître le plus précisément possible les relations des niveaux lacustres avec les paramètres climatiques actuels, afin de gérer au mieux les ressources naturelles de cet écosystème. Des erreurs dans le choix de projets de développement, notamment dans le domaine agricole où l'on favorise aujourd'hui une irrigation intensive associée à des pompages excessifs, pourraient entraîner à terme une grave déstabilisation de ce milieu. Par ailleurs ces lacs sont des témoins environnementaux extrêmement précieux, qui intègrent de nombreux paramètres hydroclimatiques et y régissent rapidement. Connaître leur fonctionnement permet par là-même de mieux appréhender l'évolution actuelle de ces régions semi-arides. Le remplissage de la cuvette du lac Fetzara s'effectue principalement par le ruissellement et les précipitations reçues par son bassin-versant.. Dans le bilan hydrologique proposé, les pertes par infiltration sont considérées comme négligeables car le fond lacustre est recouvert d'une épaisse couverture sédimentaire argileuse imperméable .

4.2. Bilan hydrologique annuel des lacs

Le renouveau actuel de l'hydrologie lacustre permet une meilleure connaissance des bilans hydrologiques annuels des lacs et de leurs variations effectives. Si peu de travaux ont été consacrés aux lacs des montagnes de type alpin, de nombreuses publications concernent les bilans hydrologiques des lacs des régions continentales et froides des moyennes latitudes (lac Baikal, lac Ladoga) et des régions semi-arides et arides des moyennes latitudes (mer d'Aral, lac Balkach) et des basses latitudes (lac Tchad). L'analyse des bilans moyens annuels conduit à préciser le rôle des conditions originales propres à chaque domaine hydroclimatique : apports en eau affluents, qu'ils soient indigènes ou allogènes, pertes en eau dues à l'évaporation physique à la surface des lacs et aux cours d'eau émissaires, en cas d'exorésisme. L'étude des variations interannuelles des bilans met en valeur quant à elle, l'influence des oscillations climatiques brèves spécifique à chaque domaine considéré; ces variations entraînent des fluctuations des volumes des eaux lacustres et donc des niveaux limnimétriques.

4.3. Bilan climatique du lac Fetzara

Le bilan hydrologique du lac Fetzara n'a fait objet d'aucune évaluation auparavant, néanmoins une simulation du bilan climatique sur la région a été faite par Djamaï et all. (2006) avec le modèle AQUA; utilisé comme moyen pour vérifier les hypothèses sur les mécanismes de transferts d'eau mesurés sur le terrain, et, permet de prédire l'évolution de ces systèmes à long

terme et ceci pour un jeu de données des précipitations et de l'évaporation, disponibles sur la station météorologique de Annaba pour les périodes (1954-1971) et (1975-1984) en moyennes mensuelles, les résultats sont sous forme de corrélogrammes illustrés par les figures 4.1 et 4.2.

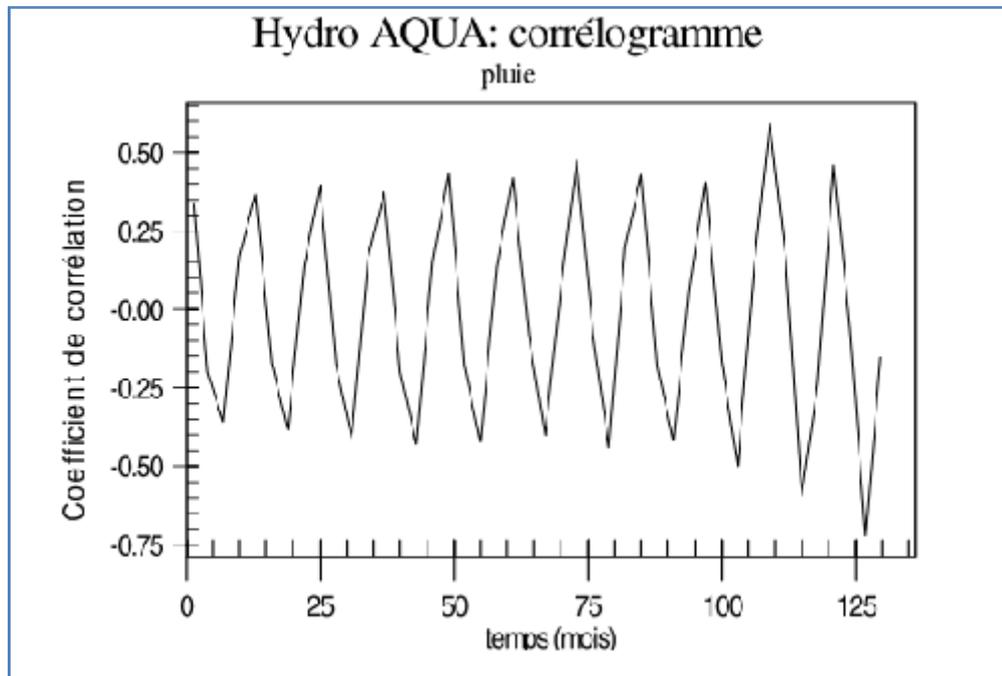


Figure 4.1. Corrélogramme pluie (Djamai et all., 2006)

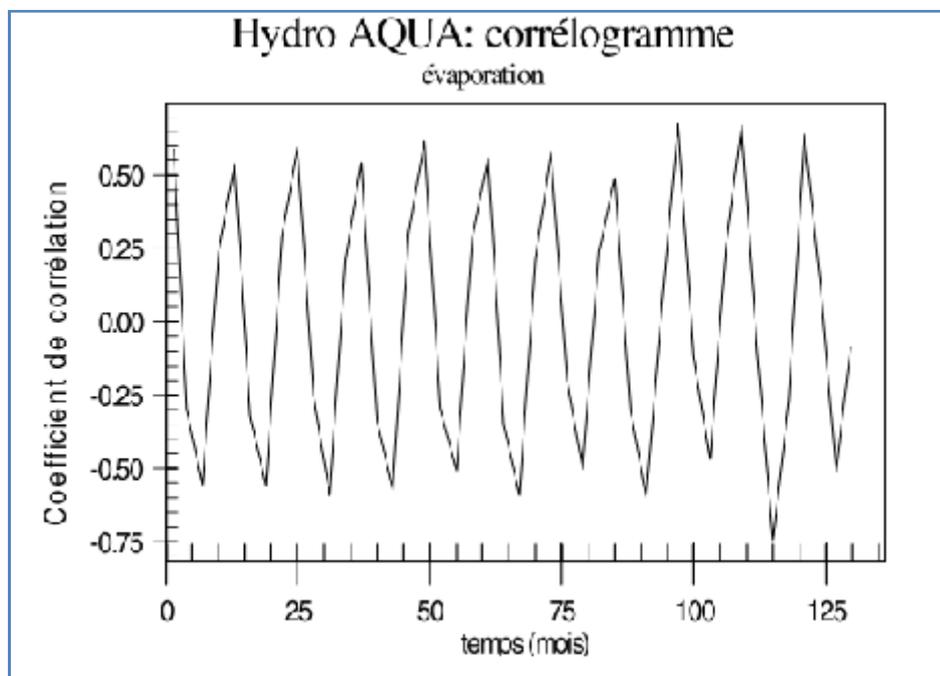


Figure 4.2. Corrélogramme évaporation (Djamai et all., 2006).

En résumé, la pluie et surtout l'évaporation présente des variations cycliques annuelles avec une saisonnalité indiscutable. Un ajustement a permis d'établir les relations mathématiques suivantes (Djamai et al., 2006) :

- Pluviométrie mensuelle (mm) = $50 + 50\cos(\pi(t-0,5)/6)$ avec t exprimé en mois.
- Évaporation mensuelle (mm) = $125 + 55\cos(\pi(t+4,5)/6)$ avec t exprimé en mois.

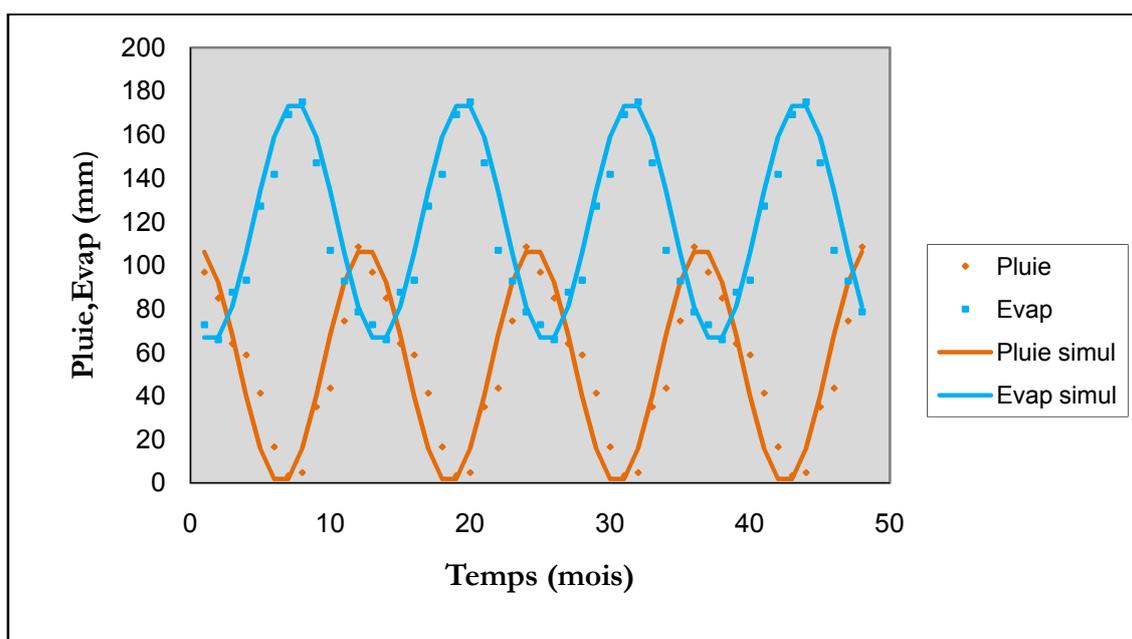


Figure 4.3. Comparaison entre les valeurs moyennes mensuelles de la pluviométrie et de l'évaporation et leur ajustement par une fonction circulaire (Djamai et al., 2006).

Djamai et al., ont constaté que ce soit pour les données réelles, c'est-à-dire observées, ou pour les fonctions ajustées, le bilan est toujours négatif, à l'exception de trois mois s'étalant sur les deux saisons automne-hiver. Ces mois permettent une recharge importante des nappes du bassin versant et joueront un rôle majeur dans la simulation.

L'étude du bilan climatique du lac n'est pas suffisante pour comprendre le régime hydrologique du lac Fetzara d'autant plus qu'elle ne prend pas en considération les écoulements (affluents et émissaires du lac), c'est pour cela qu'une tentative de modélisation du bilan hydrologique du lac Fetzara va être envisagée en fonction des données disponibles.

4.4. Bilan hydrologique annuel du lac Fetzara

Le principe du bilan d'eau est fondé sur une équation de continuité qui consiste à comparer la quantité d'eau totale arrivant dans un bassin versant avec la quantité d'eau totale sortant et s'inscrit dans sa forme la plus générale donnée par la relation (4.1)

$$\Sigma \text{ Entrées} - \Sigma \text{ Sorties} = \Delta R \quad (4.1)$$

Avec ΔR ; la variation des réserves en eau qui cumulent les variations de stockage de l'eau dans le sol et celle des stockages superficiels (dépressions, retenues d'eau, etc.). Le remplissage de la cuvette du lac Fetzara; s'effectue principalement par la précipitation tombée sur le lac lui-même et le ruissellement des précipitations reçues par son bassin versant.

Dans le bilan hydrologique proposé, les pertes par infiltrations sont considérées comme négligeables à cette échelle car le fond lacustre est recouvert d'une épaisse couverture sédimentaire argileuse imperméable.

En déterminant l'échange horizontal, le mouvement de surface et le mouvement souterrain de l'eau n'ont pas été pris séparément, mais pendant l'évaluation du bilan pour chaque année ces valeurs ont été évaluées ensemble ou du côté « recettes » ou du côté « dépenses » en tant qu'une valeur qui ferme l'équation. L'équation du bilan du lac peut donc être présentée par la relation (4.2):

$$\underbrace{(\mathbf{L-H})}_{\text{échange horizontal}} + \underbrace{(\mathbf{P-E})}_{\text{échange vertical}} \pm \underbrace{\Delta \mathbf{R}}_{\text{différence de la rétention}} = 0 \quad (4.2)$$

Où :

L : eaux issues du ruissellement sur le bassin-versant du plan d'eau ;

H : l'écoulement des eaux du lac par l'émissaire (l'oued Meboudja);

P : précipitations reçues par le plan d'eau;

E : perte par évaporation du plan d'eau ;

ΔR :différence de la rétention du lac.

4.4.1. Quantification des différents termes du bilan hydrologique

4.4.1.1. Evaporation

Pour évaluer le bilan hydrologique du lac, le taux d'évaporation du lac (E) doit être connu. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour estimer l'évaporation à partir d'une surface d'eau libre (Brutsaert, 1982; Ikebuchi et al., 1988; Sene et al., 1991):

1. Par la méthode du bilan; utilisée si les autres éléments du bilan lacustre (y compris les variations du stock d'eau du lac) sont connus et gérés avec suffisamment de précision ; pour la période étudiée, l'évaporation est assimilée au déficit du bilan.
2. A partir des bacs d'évaporation, utilisés par les stations météorologiques; cette technique fournit une information, la plus facile à obtenir, sur l'ordre de grandeur du flux d'évaporation.
3. Par la méthode du bilan d'énergie; elle est considérée comme la plus précise mais nécessite une instrumentation sophistiquée pour mesurer le bilan de chaleur de la surface évaporante.
4. A partir d'un profil aérodynamique; Cette méthode implique la mesure des vitesses du vent, de la température de l'air et de l'humidité à au moins deux hauteurs différentes au dessus de la surface évaporante.
5. Par la technique de corrélation des tourbillons; C'est une méthode directe pour accéder au flux d'évaporation; elle repose sur les mesures des fluctuations au cours du temps des composants de la vitesse du vent, respectivement, la température de l'air et du réservoir humide; les mesures sont difficiles à réaliser et sont conduites uniquement sur des stations expérimentales.
6. À partir de l'approche de Penman, qui repose sur une formule empirique dérivée du bilan d'énergie et de la méthode aérodynamique.

Dans le cas de cette présente étude, les données de l'évaporation annuelle de la station météorologique de Annaba, disponibles pour deux périodes de 1986 à 1996 et de 2001 à 2006 ont été utilisées, la variation annuelle de l'évaporation est illustrée par la figure 4.4 .

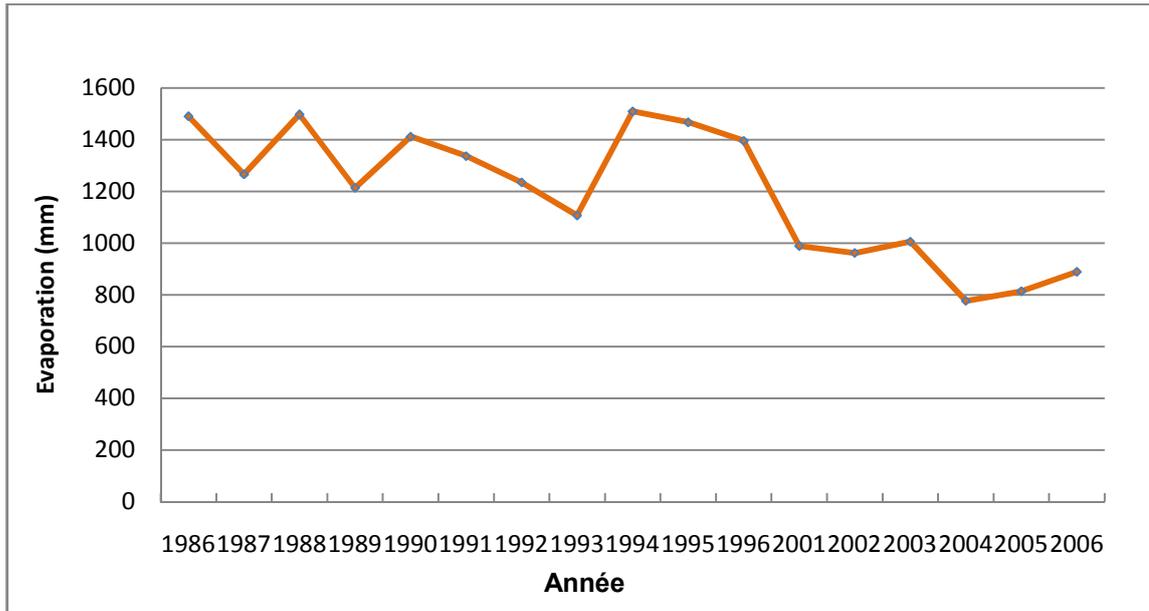


Figure 4.4. Variation annuelle de l'évaporation, périodes 1986/1996 et 2001/2006.

4.4.1.2. Le ruissellement

La détermination d'un bilan hydrologique nécessite de calculer les volumes d'eau susceptibles d'alimenter le lac par ruissellement et écoulement fluvial mais comme le bassin versant du lac Fetzara n'est pas jaugé alors une modélisation des débits moyens annuels s'avère nécessaire et ceci en utilisant un modèle ne nécessitant pas de calage.

Au cours des dernières années, de nombreuses études ont été menées sur la façon de représenter le comportement hydrologique d'un bassin versant sans station hydrométrique. L'approche favorite des modélisateurs a consisté à rechercher un modèle n'utilisant que des paramètres physiques qui peuvent être observés ou déduits de mesures simples. Face à l'impossibilité d'aboutir dans cette voie, d'autres efforts ont été déployés pour chercher à relier les paramètres des modèles hydrologiques et les caractéristiques physiques ou climatiques du bassin. Dans ce qui suit, une description globale des travaux réalisés dans ce domaine vont être décrits.

a- Intérêt de considérer une région homogène

Beaucoup de chercheurs ont voulu se placer dans un environnement homogène avant de mettre au point leur solution pour les bassins non jaugés. Un type de régionalisation qui a été largement étudié et est utilisé régulièrement s'appuie sur la similarité des comportements et des caractéristiques des bassins, pour le transfert des paramètres d'un modèle, des bassins jaugés aux bassins non jaugés. De nombreuses études ont été faites sur cette approche à l'échelle régionale, avec l'établissement de liens statistiques entre les valeurs des paramètres et des descripteurs

climatiques ou physiques des bassins. Une liste non exhaustive par ordre chronologique est présentée ci-dessous :

- Sefton et al. (1995) ont appliqué le modèle IHACRES à 100 bassins jaugés du Royaume Uni. Ils ont utilisé les caractéristiques physiques des bassins, telles que la superficie, géologie, topographie et climat pour analyser la réponse dynamique. Ils ont extrapolé les résultats des 100 bassins jaugés, à 8 bassins non jaugés.
- Uhlenbrook et al. (1998) ont appliqué le modèle HBV dans une région de 257 km² au sud-ouest de l'Allemagne (4 bassins avec des superficies de 0.1 à 40 km², avec de conditions physiographiques et climatiques similaires) pour relier les paramètres optimisés du modèle ainsi que sa sensibilité aux caractéristiques du bassin. Le modèle a été calé avec 10 ans de données.
- Post et al. (1998) mentionnent l'influence des phénomènes à grande échelle, comme le climat et la végétation, sur le comportement hydrologique de bassins voisins. Ils ont démontré que les simulations de débits peuvent être plus correctes quand on considère un pas de temps plus grand (rendement inter annuel). Ils ont appliqué ces considérations pour obtenir le paramètre de rendement du modèle IHACRES sur 17 petits bassins non jaugés (superficies de 4 à 65 ha) à Victoria en Australie et sur 3 bassins des États Unis.
- Burn, (1997) et Burn et Goel (2000) ont appliqué des tests d'homogénéité sur 59 bassins au Canada en utilisant l'information de 25 sites jaugés. Ils ont considéré les quantiles de crue et des indices de saisonnalité des régimes, pour estimer la fréquence des crues à l'échelle régionale sur de sites jaugés ou non jaugés.
- Micovic et Quick (1999) mentionnent que l'hétérogénéité entre bassins ne permet pas de relier le débit aux caractéristiques des bassins.
- Haché et al. (2002) ont analysé des corrélations pour la détermination de régions homogènes et la régression multiple comme méthode d'estimation des variables hydrologiques. L'étude a montré que l'utilisation d'un voisinage améliore significativement les estimations des quantiles du débit maximum printanier, par rapport à une approche classique utilisant toutes les stations des régions géographiques fixes.

b- Approches de type régressif

L'approche régionale la plus couramment utilisée est l'utilisation de régressions simples ou multiples pour relier les paramètres du modèle hydrologique aux caractéristiques physiques du bassin. dans les paragraphes suivants, des études qui ont utilisé ce type de régionalisation hydrologique sont présentées.

- Vandewiele et al. (1991) ont trouvé des équations régionales pour évaluer le bilan d'eau avec un modèle mensuel. Ils ont considéré des caractéristiques lithologiques (perméabilité du sous-sol) de 60 bassins jaugés, avec des superficies de 16 à 3100 km² au nord de la Belgique. Ils ont appliqué ces équations sur 5 des 60 bassins de l'échantillon avec de très bons résultats.
- Braun et Renner (1992) ont obtenu des relations a priori pour les paramètres du modèle HBV3, sur 5 petits bassins suédois (de 40 à 200 km²) situés dans différentes régions physiographiques. Ils ont utilisé des caractéristiques des bassins (végétation, type de sol, etc.). Ils mentionnent que les relations entre les paramètres du modèle et les caractéristiques des bassins ont pu être établies grâce à la petite taille de l'échantillon.
- Servat et Dezetter (1992, 1993) ont étudié 20 bassins dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, avec des surfaces de 100 à 4500 km². Les auteurs ont déterminé les paramètres des modèles CREC et GR3J, respectivement à 7 et 3 paramètres. Ils ont utilisé des régressions multiples en utilisant des variables physiques et climatiques (reliées à l'usage du sol et à la distribution de la pluie au cours de l'année) dans les bassins. GR3J a donné de meilleurs résultats grâce à son petit nombre de paramètres.
- Johansson (1994) a trouvé une corrélation significative entre l'évapotranspiration et des caractéristiques géologiques de 11 bassins suédois entre 1.6 et 350 km², pour estimer leurs débits avec le modèle HBV.
- Makhoulf (1994) a cherché des relations pour les quatre paramètres de la version proposée par Nascimento (1995) du modèle GR4J, en considérant 13 caractéristiques physiques et climatiques des bassins. L'analyse sur 23 bassins versants en Bretagne des caractéristiques, telles que : la superficie, la géologie, la végétation, etc., lui a permis de construire un modèle régional à deux paramètres avec des relations assez satisfaisantes et deux paramètres fixes.
- Abdulla et Lettenmaier (1997) ont estimé les paramètres du modèle VIC-2L (two-layer Variable Infiltration Capacity), pour une grande région de 637000 km² du bassin de la rivière Arkansas-Red. Ils ont utilisé l'information de 34 bassins de la région analysée pour estimer les équations régionales. Ensuite, ils ont appliqué ces équations à 6 bassins non jaugés. La superficie des bassins varie entre 258 et 5278 km².
- Yeh et al. (1997) ont comparé des procédures de régression pour arriver à des relations entre les paramètres du modèle HUI de Nash sur 42 bassins à Taiwan. Ils mentionnent

que le choix de variables dépendantes peu corrélées, devrait augmenter l'efficacité des équations régionales.

- Yeh et al. (1997) ont relié des caractéristiques des bassins jaugés aux paramètres de 9 modèles pour estimer des quantiles de crues. Ils ont appliqué ces équations sur un petit bassin (5 km²) en Louisiane.
- Post et Jakeman (1996, 1999) ont utilisé six caractéristiques (dont la densité de drainage et la pente) de 16 petits bassins jaugés (moins de 1km² de superficie) dans la région de Victoria en Australie, pour obtenir les six paramètres du modèle IHACRES. Ils mentionnent que les relations peuvent être appliquées à d'autres bassins de superficie similaire dans la région qui a été étudiée
- Seibert (1999) a relié les paramètres du modèle HVB de 11 bassins en Suède à trois caractéristiques physiques (la superficie et les pourcentages de lac et de forêt).
- Fernandez et al. (2000) ont appliqué des équations régionales de régression pour le modèle « abcd » calé sur 33 bassins versants du sud-est des États Unis, sur trois autres bassins. Ils mentionnent qu'il n'a pas été possible de créer un modèle permettant d'estimer les débits sur des sites sans mesures physiques.
- Campbell et Bates (2001) ont régionalisé les paramètres du modèle RORB pour 39 bassins au sud-ouest d'Australie, en utilisant une méthode Bayésienne.
- Yokoo et al. (2001) ont utilisé des régressions multiples pour les 12 paramètres du modèle Tank sur 12 bassins du Japon, avec des superficies entre 100 à 800 km². Ils ont utilisé 16 caractéristiques géographiques, telles que la topographie, le type et occupation du sol et la géologie.
- Drogue et al. (2002) ont utilisé le modèle MHR pour régionaliser des débits dans le bassin transfrontalier de l'Alzette (Luxembourg-France-Belgique). Ils ont calibré le modèle sur des sous-bassins et ils ont obtenu un jeu de paramètres régional grâce à des corrélations significatives avec les caractéristiques des bassins. Ils ont notamment mis en évidence l'influence de la perméabilité des formations géologiques.
- Blazkova (2002) a utilisé la méthode de Monte Carlo pour estimer les paramètres du modèle TOPMODEL sur un bassin traité comme non jaugé (26 km²) situé dans la République Tchèque, pour estimer la fréquence des inondations.
- Xu (2003) a calé sur 26 bassins (de 6 à 4000 km²) de Suède, les paramètres du modèle NOPEX-6. Ensuite l'auteur a obtenu des équations pour relier les paramètres du modèle aux caractéristiques physiques de 22 des bassins. Les équations ont été testées sur les 4

autres bassins pour estimer ses débits. Le transfert des équations de régression des petits bassins à des grands bassins, a été jugé possible.

c- Utilisation de modélisations à différents pas de temps

Un modèle mensuel à deux paramètres a été mis au point par Makhoulouf (1994) pour chercher à relier les paramètres difficiles à expliquer du modèle journalier GR4J. Ainsi, pour les bassins de Bretagne, il a obtenu de bons résultats en régionalisation. La parenté des structures des modèles mensuel GR2M et journalier GR4J, a permis d'établir des relations significatives entre les paramètres des deux modèles. Ceci a montré qu'un modèle à plus grand pas de temps qui accorde plus d'importance aux fonctions du rendement du modèle, permet l'établissement des relations plus fiables des deux paramètres correspondants du modèle GR4J.

Dans ce même ordre d'idées, l'étude de Vandewiele et Elias (1995) peut être citée qui dans un échantillon de 75 bassins versants en Belgique, ont interpolé les paramètres d'un modèle mensuel à partir des paramètres de bassins voisins (avec un écart maximum de 30 km entre les centres de gravité du bassin étudié et les bassins voisins) et avec la méthode du krigeage. Ils ont mis en évidence l'intérêt de créer des familles de modèles pouvant présenter des liens entre leurs paramètres.

d- Utilisation d'un modèle physique distribué

L'utilisation d'un modèle physique distribué, permet de caler un grand nombre de paramètres utilisables sur l'ensemble d'une région. Ensuite, les débits sont simulés sur n'importe quel sous-bassin non jaugé de la même région. Le modèle physique distribué MODCOU utilise une approche conceptuelle à l'échelle de la zone de production dont le bassin est discrétisé. Le modèle a été testé pour des sous bassins du Rhône disposant d'une station de mesure, les paramètres du modèle ont été calibrés avec les données de 3 ans des stations retenues. Morvan considère que le modèle MODCOU calé sur un domaine initial, est transposable à chacun des sous-bassins du Rhône, cela à condition que l'ensemble des types de sols et de végétations des bassins voisins soit représenté sur le domaine initial. Il a considéré le type de sol, le mode d'occupation et la pente du terrain pour établir 14 zones de production pour le Rhône. Le modèle MODCOU a obtenu des résultats encourageants de simulations de débit dans plusieurs sous-bassins non jaugés du Rhône.

e- Méthode globale (Perrin, 2000; 2002)

Perrin a effectué une classification hiérarchique ascendante de 429 bassins répartis en France, aux États Unis, en Australie, en Côte d'Ivoire et au Brésil. Il a utilisé des descripteurs hydro-climatiques simples pour classer les bassins, tels que l'évapotranspiration potentielle, la

pluie, la lame d'eau écoulée, les débits disponibles, les crues, les étiages et la superficie. L'auteur mentionne que, dans la démarche classique des régressions, on minimise l'erreur d'estimation des paramètres du modèle. Cependant, cette approche n'effectue pas une maximisation sur les performances des modèles. C'est pourquoi, il a proposé une méthodologie améliorée où les relations entre les descripteurs des bassins ont pour objectif de maximiser les performances du modèle. Perrin a sélectionné les meilleurs bassins pour lesquels le modèle GR4J donne lieu à de bons calages. Il a ainsi retenu 131 bassins pour estimer et caler les paramètres issus des régressions. Ces paramètres ont été utilisés sur l'échantillon de 429 bassins considérés comme non jaugés. Les 4 variables explicatives qu'il a utilisées sont : la superficie, la pluie annuelle moyenne, l'évapotranspiration annuelle moyenne et un coefficient saisonnier d'irrégularité des pluies. Les résultats restent assez encourageants. L'auteur mentionne que « l'établissement d'équations de régression pouvant apporter un gain par rapport à l'utilisation de paramètres constants réside probablement dans le fait que l'on est très loin de pouvoir identifier toutes les caractéristiques qui trahiraient le comportement réel d'un bassin vis-à-vis de la transformation pluie-débit, et qui puissent en même temps être pertinentes pour le modèle considéré ».

En conclusion, Parmi les procédures les plus largement utilisées sont les régressions liant les paramètres du modèle aux caractéristiques physiographiques mesurables du bassin. Toutefois, les régressions ne sont pas toujours très claires à interpréter et des précautions doivent par conséquent être prises en interprétant la signification physique des descripteurs du paramètre trouvé par les régressions.

La considération des similarités entre bassins a été, en général, explorée par un voisinage entre bassins (études menées dans une zone où des sous-bassins sont considérés). Les limites géographiques ne sont pas les mêmes que celles correspondant à une même réponse hydrologique.

L'intérêt de créer une famille de modèles à différents pas de temps a été démontré avec des résultats très encourageants. Mais il reste à effectuer la régionalisation sur les modèles à grand pas de temps. Il semble que les approches basées sur une proximité spatiale (voisinage de bassins) fournissent de meilleures performances que celles basées sur les attributs physiographiques des bassins (analyse de régressions). Généralement les modèles appliqués sur des bassins non jaugés ne sont pas assez performants. Il faudra donc veiller à bien définir les performances annoncées sur les bassins non jaugés. Dans le cas de cette présente étude la régionalisation basée sur la similarité des comportements et des caractéristiques des bassins, pour le transfert des paramètres d'un modèle, des bassins jaugés aux bassins non jaugés ne sera pas possible car les bassins

versants avoisinant celui du lac Fetzara ne présentent pas de similitudes avec ce dernier (présence de cuvette lacustre) et pour des raisons diverses (topographie, géologie, pédologie, précipitation, perméabilité...).

L'hydrologie quantitative vise à fournir des représentations cohérentes des transferts d'eau et de grandeurs associées dans le cycle de l'eau d'un système considéré. Le choix de l'outil adapté à la fois à la question posée et aux données est essentiel. (Beven ,1989) propose une certaine méthodologie à suivre pour le choix du modèle hydrologique. En premier lieu, il conseille de faire le point sur les données disponibles, sur leur utilité et leur crédibilité. Ensuite, nous devons nous interroger sur la possibilité qu'elles offrent en terme de validation. Enfin, il faut choisir un degré de complexité du modèle en essayant de respecter le principe de parcimonie. Ce principe consiste à éviter la sur-paramétrisation (Perrin, 2000). Ainsi, un outil trop simple reproduira difficilement les informations disponibles alors qu'un outil trop complexe sera impossible à mettre en œuvre.

- Modélisation de l'écoulement annuel

Le modèle pluie-débit annuel retenu pour la région d'étude est établi par Touazi et Laborde (2004) pour l'Algérie du Nord, la mise au point du modèle a nécessité une base de données incluant la carte des pluies médianes, la carte des perméabilités et le modèle numérique du terrain. Afin de compléter cette base de données, la cartographies des pluies des différentes années où les mesures de débit sont disponibles a été réalisée en utilisant une méthodologie intitulée « cartographie de la pluie centrée réduite » (Touazi et Laborde, 2000). Ainsi les données de 467 postes pluviométriques ont été traitées et ont permis de tracer la carte des isohyètes annuelles.

L'étude de la relation pluie-débit à l'échelle annuelle est basée sur les données de 50 stations hydrométriques réparties à travers le Nord d'Algérie, la démarche utilisée est inspirée de la fonction de production du SCS (Soil Conservation Service).

$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad (4.3)$$

P : pluie moyenne annuelle (mm) ;

S : capacité maximale de rétention du sol (mm) ;

Q : débit moyen annuel (m³/s).

L'application de cette méthode sous sa formulation de base n'a pas été d'un grand apport, d'où la nécessité d'introduire certains paramètres de calage du modèle.

$$Q = a \frac{P^2}{P + S} S_{BV}^\alpha \quad (4.4)$$

S_{BV} : Surface du bassin versant (Km^2) ;

α : coefficient régional ;

P : pluie moyenne annuelle (mm) ;

S : capacité maximale de rétention du sol (mm)

a : paramètre du modèle, sa variation spatiale est expliquée sur la figure 4.5 .

Après calage et amélioration du modèle, les résultats ont permis de mettre en évidence l'influence de la pluie annuelle, la surface et la pente moyenne du bassin versant. La formule (4.5) a été retenue

$$Q = a \times P^2 \times S_{BV}^{0,8} \quad (4.5)$$

L'avantage de ce modèle réside dans la facilité de sa mise en œuvre. En effet, il est basé sur une équation à trois paramètres, il permet ainsi d'estimer le débit des bassins jaugés et surtout non jaugés. La figure 4.5 illustre la variabilité spatiale du paramètre de calage du modèle (a)

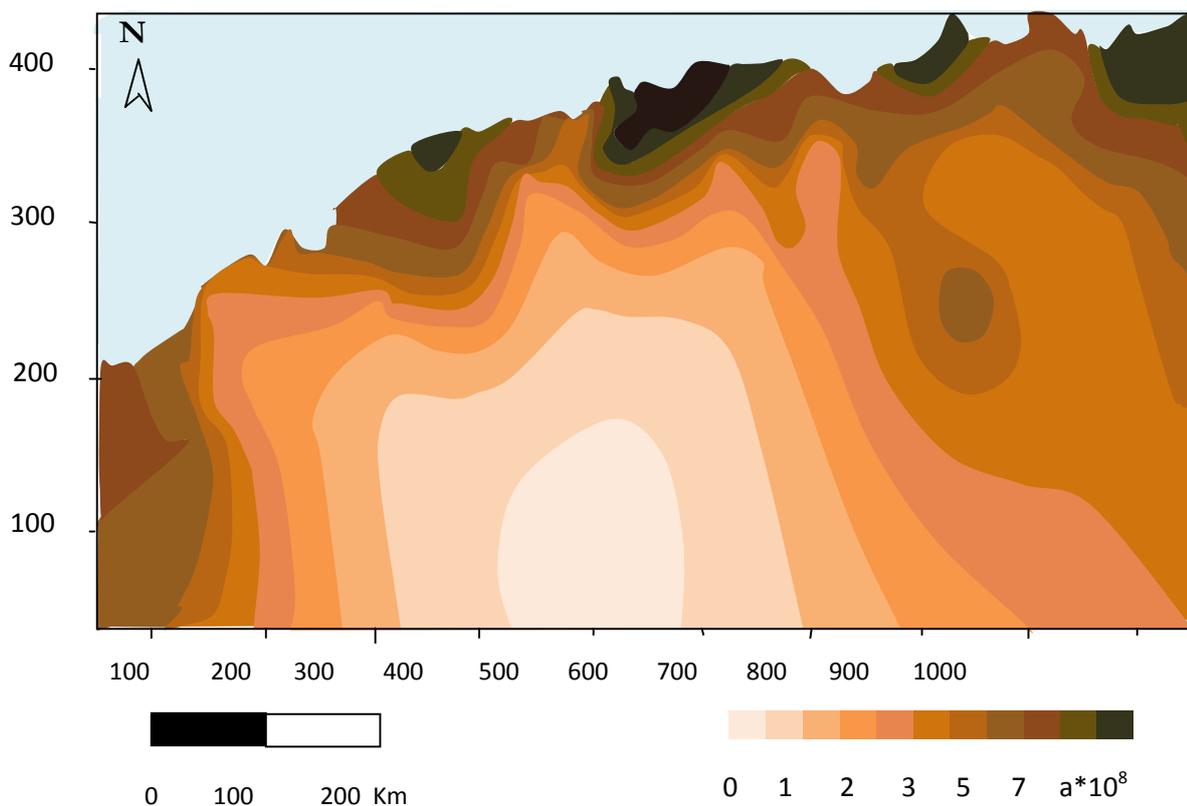


Figure 4.5. Variabilité spatiale du paramètre de calage du modèle (a) d'après (Touazi et Laborde, 2006).

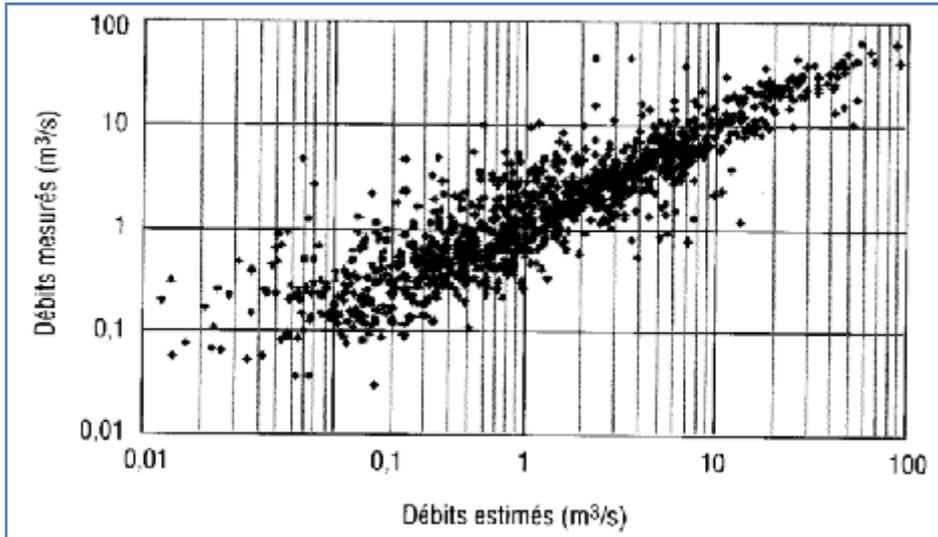


Figure 4.6. Corrélation entre les débits mesurés et les débits simulés ((Touazi et Laborde,2006).

Le coefficient de corrélation entre les débits mesurés et ceux estimés est de 0,87 ce qui implique que 75% de variance est expliquée par la pluie.

La valeur de (a) déduite de la figure 4.5 pour la région d'étude, est égal à $3,9 \cdot 10^{-8}$. Ce paramètre a prouvé une forte corrélation avec la pente moyenne du bassin versant (Touazi et Laborde, 2004), et ceci s'explique par le rôle important de la pente dans l'écoulement. La variation des débits (m^3/s) simulés par ce modèle sont illustrés sur la figure 4.7.

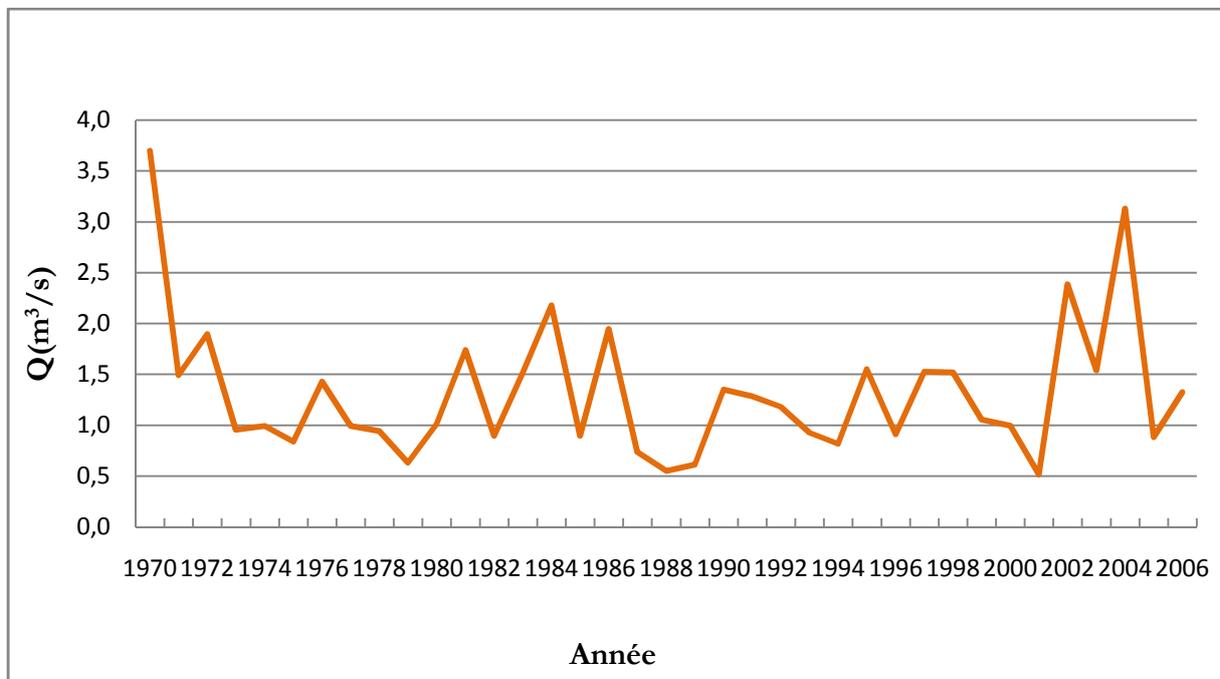


Figure 4.7. Variation annuelle du débit simulé avec le modèle (a) .

4.4.1.3. Les précipitations sur le lac

La connaissance du bilan hydrologique et des ressources en eau de cette cuvette suppose au préalable une bonne connaissance de la répartition des champs de précipitations. La majeure partie de la cuvette se trouve dans la zone d'influence de la station pluviométrique de Berrahel donc les précipitations annuelles tombées sur le lac étant prises comme étant celles de la station de Berrahel .

La figure 4.8 visualise la variation annuelle de la pluviométrie pour la période 1986/2006.

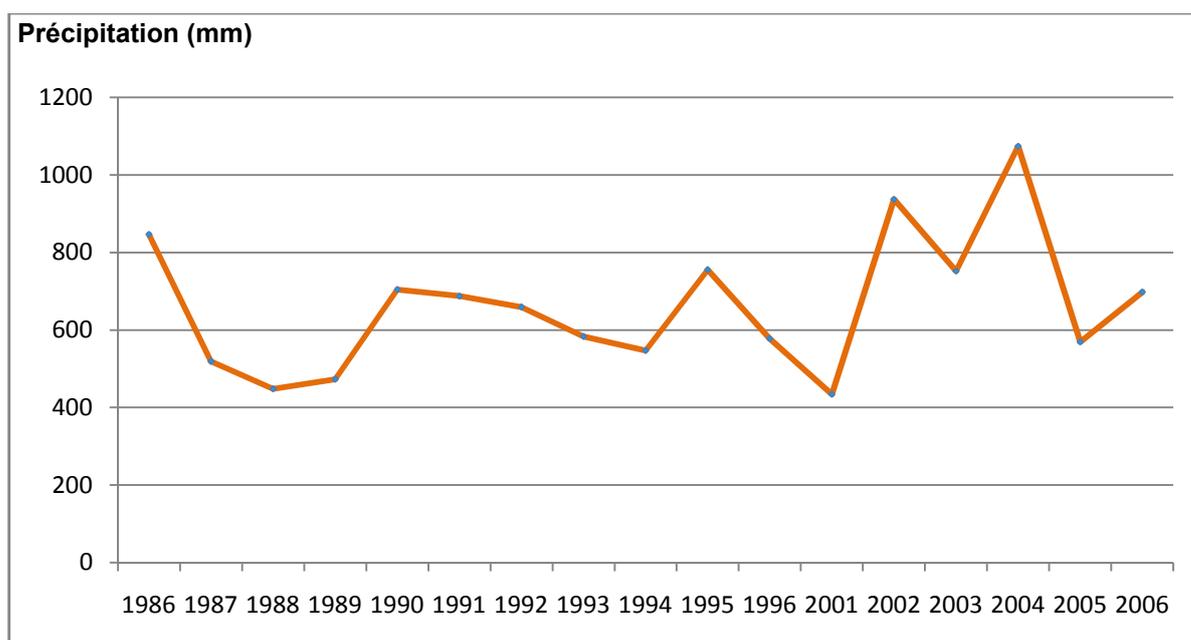


Figure 4.8. Variation annuelle de la pluviométrie, périodes 1986/1996 et 2001/2006.

4.4.1.4. Ecoulement par l'émissaire

L'existence du canal d'assèchement du lac Fetzara relié à l'Oued Meboudja, permet l'évacuation des hautes eaux , le débit peut atteindre $18 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis que ce dernier varie de 1 à $5 \text{ m}^3/\text{s}$ en période de basses eaux (Hani et all, 2007), mais ceci n'est plus le cas de ces dernières années car la demande en eau a augmenté ce qui incite les gestionnaires de cette réserve à emmagasiner au maximum pendant l'hiver pour pouvoir l'utiliser au printemps et à l'été donc l'ouverture des vannes se fait rarement pendant l'année ;sauf pour évacuation des grandes crues ou curage du canal.

Le lac a donc retrouvé son caractère endoréique d'avant ce qui fait que les écoulements émissaires sont négligés dans ce bilan.

4.4.2. Résultats et discussion

L'établissement d'un bilan hydrologique suppose l'unification des unités des différents termes utilisés dans ce bilan ; l'unité adéquate la plus utilisée est la lame d'eau en (mm). Les bilans annuels obtenus pour les deux périodes sont résumés aux tableaux 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1. Bilan annuel du lac pour la période 1986/1996.

Année	E (mm)	P (mm)	L (mm)	ΔH (mm)
1986	1491	847	590	-53
1987	1266	519	222	-524
1988	1498	448	165	-884
1989	1214	473	184	-555
1990	1412	704	409	-298
1991	1337	687	389	-259
1992	1235	659	358	-217
1993	1107	584	280	-242
1994	1509	547	246	-715
1995	1467	755	470	-241
1996	1396	578	275	-542
Moyenne	1357	618	326	-412

Tableau 4.2. Bilan annuel du lac pour la période 2001/2006.

Année	E (mm)	P (mm)	L (mm)	ΔH (mm)
2001	989	434	155	-398
2002	962	937	723	699
2003	1006	752	466	212
2004	777	1074	950	1247
2005	814	569	267	22
2006	889	698	401	211
Moyenne	906	744	494	332

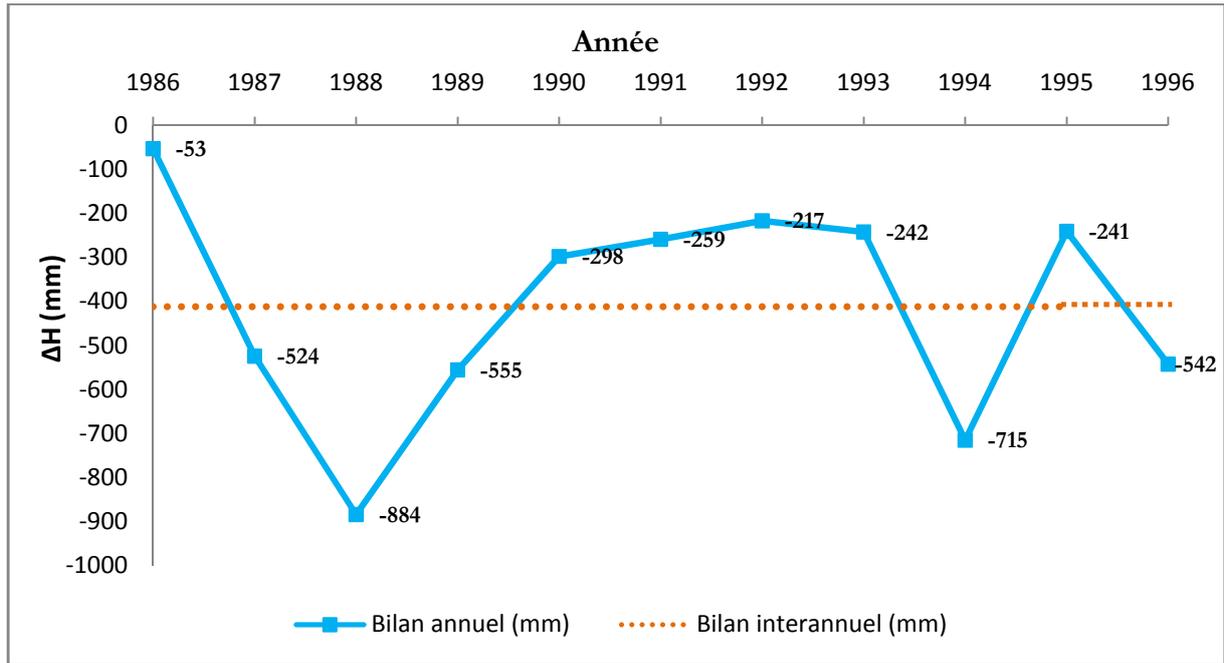


Figure 4.9. Bilan annuel et interannuel du lac Fetzara pour la période 1986/1996.

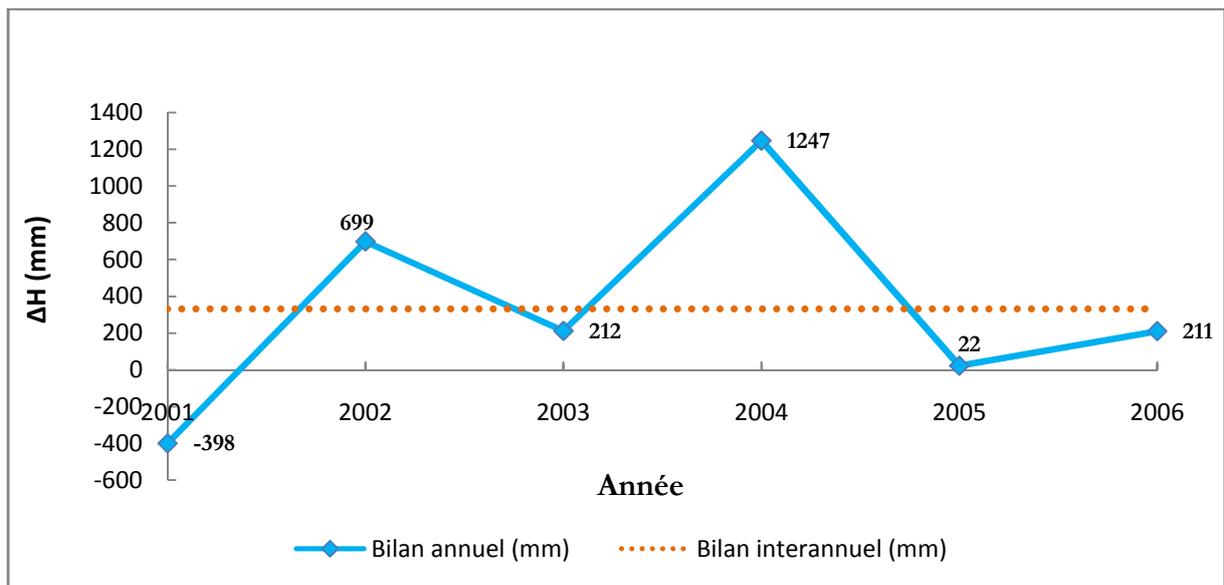


Figure 4.10. Bilan annuel et interannuel du lac Fetzara pour la période 2001/2006.

L'analyse des résultats des figures 4.9 et 4.10, montre que le bilan annuel du lac Fetzara est déficitaire sur toute la période allant de 1986 jusqu'en 1996 avec une moyenne d'environ 413 mm, l'année 1988 est la plus déficitaire suivie de l'année 1994. L'année 1986 quant à elle présente le déficit le moins important qui est de 53 mm.

Sur la deuxième période s'étalant de 2001 à 2006, le bilan présente une prédominance des valeurs excédentaires, l'excédent annuel moyen est estimé à 332 mm, avec un maximum de 1248 mm en 2004. L'année 2001 est la seule qui a un comportement déficitaire .

La variabilité des précipitations constitue à priori le premier élément susceptible d'entraîner des variations des excédents lacustres; le cas de l'année hydrologique 2004 le montre clairement; c'est l'année la plus arrosée (1074,4 mm) de toutes la série étudiée mais comme le lac se trouve en zone semi-aride l'évaporation aussi à son rôle dans les chroniques de l'excédent annuel; la forte évaporation enregistrée en 1994 a conduit elle aussi à un grand déficit hydrique.

4.5. Conclusion

L'existence du lac Fetzara dépend donc d'un compromis subtil entre les apports hydriques et l'évaporation. La détermination du bilan hydrologique permet ainsi de mettre en avant le caractère semi-aride de cette région par l'existence d'un déficit pluviométrique important couplé à des données climatiques aggravantes (Djamai et al., 2006) (insolation élevée, températures fortes...) .

Le niveau le plus important atteint par le lac à la fin d'une année hydrologique est de 1,25 mètres et c'est en 2004 ce qui correspond à un volume de plus ou moins 28 millions de mètres cubes (en négligeant les infiltrations, les écoulements émissaires et les fuites marginales), néanmoins on est arrivé à simuler le bilan annuel pour ces dernières années de manière logique.

Les fluctuations interannuelles du niveau du lac traduisent peut être l'évolution climatique de la région avec sa succession de phases humides et de phases sèches mais ceci reste une hypothèse à prouver car la période étudiée est insuffisante pour permettre d'en tirer une conclusion.

Un bilan mensuel est essentiel pour mieux comprendre le régime du lac néanmoins le bilan climatique établi a montré que même si le bilan hydrique annuel est largement déficitaire, l'existence d'une période excédentaire (période hivernale) permet la recharge des nappes et donc un écoulement souterrain lent et continue du bassin versant vers le lac Fetzara. Par ailleurs, la structure temporelle des termes du bilan hydrique est assez complexe.

La pluie et surtout l'évaporation présentent des variations cycliques annuelles avec une saisonnalité indiscutable (Djamai et al. , 2006), c'est une caractéristique des climats semi arides,

ceci conduit habituellement à la concentration des éléments solubles dans les sols se traduisant par la salinisation de ces derniers (Belhamra et Djabri, 2005). Cependant, les pluies peuvent être importantes pour certaines années, le bilan est plus positif, favorisant ainsi le lessivage des éléments solubles vers cette dernière ou en dehors de l'exutoire ou encore tout au moins leur redistribution dans le profil du sol.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Les lacs sont des écosystèmes fragiles qui demandent beaucoup d'attention et de réflexion afin de les gérer, le cas du lac Fetzara est un exemple de la mauvaise gestion et du manque d'attention apportées aux lacs en Algérie. L'étude hydrologique de ce lac a montré qu'il est tributaire des précipitations et de l'évaporation, son alimentation se fait principalement par oued El Hout et oued Mellah.

Le lac Fetzara subit fréquemment des inondations provoquant la perte des terrains et des cultures en aval. L'étude des hydrogrammes de crues a été faite par deux méthodes celle des courbes isochrones et la méthode SCS-CN qui a été choisie pour expliquer le comportement du lac face aux sollicitations des crues. Les contraintes liées au lac sont les suivantes :

- Sa faible profondeur par rapport à la superficie du bassin versant qu'il doit drainer et assurer l'écrêtement de ses crues
- La déforestation joue un rôle majeur, permettant d'augmenter le ruissellement après une pluie ce qui provoque les inondations.
- Le manque de dispositifs de vidange lors des crues, le canal d'assèchement n'est pas suffisant et son état est détérioré.

Le bilan hydrologique annuel du lac Fetzara a révélé que son existence dépend donc d'un compromis subtil entre les apports hydriques et l'évaporation. Il a mis en évidence le caractère semi-aride de la région par l'existence d'un déficit pluviométrique important couplé à des données climatiques aggravantes.

Afin de préserver le lac Fetzara, une étude intégrée relative à son aménagement a été lancée depuis le début de l'année 2008 dans le but de protéger des inondations les localités situées en aval de cette dépression. Cette étude vise également la protection du lac contre la pollution, l'assainissement et le drainage des eaux excédentaires, ainsi que la mise en place d'un plan de gestion intégré de cet espace. Confiée à un bureau d'études espagnol GHI, celle-ci devra intégrer tout le réseau hydrographique, y compris l'oued Seybouse avec tous les ouvrages hydrauliques réalisés ou projetés, mais d'ici là, et pour clore cette étude, quelques recommandations sont à suggérer :

Les crues, qui régulièrement inondent de larges superficies agricoles au niveau des plaines alluvionnaires, menacent les habitations et coupent les voies de communication, pourraient être atténuées et même évitées si, avec une meilleure connaissance des épandages, on arrive à contrôler les extensions des agglomérations par la maîtrise de l'urbanisation et faire des choix rigoureux pour les impacts des équipements et des infrastructures (Benyacoub et al, 1998) et des

cultures. Ainsi, une partie seulement des eaux pourrait être mobilisée par des ouvrages de petite dimension telles que les retenues collinaires ou des réservoirs au niveau des oueds Mellah et El Hout, et qui seraient sans incidence sur le fonctionnement naturel des réseaux hydrographiques et sur la capacité d'autorégulation du lac.

D'autres solutions possibles pour atténuer les crues qui arrivent au lac comme la déviation des cours d'eau ou encore augmenter la capacité hydraulique de l'oued Meboudja. Cette augmentation de capacité hydraulique peut être obtenue principalement de deux différentes manières. Premièrement, en augmentant la section mouillée du cours d'eau par l'élargissement ou le rehaussement des rives ou l'abaissement local du fond du lit, et deuxièmement en diminuant la résistance à l'écoulement et donc en permettant l'augmentation de sa vitesse. La Suisse exploita ce moyen à grande échelle dès le début du 19^e siècle sur le plateau lors de la première correction des eaux du Jura et lors de la première correction du Rhône.

Or l'absence de cette régulation des niveaux d'eaux au niveau du lac est à l'origine de son envahissement par la végétation qui se répercute à son tour sur la diminution de sa profondeur par comblement et envasement et diminue ses capacités d'accueil de l'avifaune durant la saison hivernale.

A

Amante, G. (1955) Les travaux d'assainissement des plaines de Bône , Série économique : Documents Algériens, 15 pages , n°114.

Amat, J.P., Dorize, L., Le Cœur, C., Gautier, E. (2002) Éléments de géographie physique, Paris, Bréal, coll. Grand Amphi, p 206.

B

Belhamra, A., Djabri, L. (2005) Origine de la salinité d'un lac, cas du lac Fetzara (Est Algérien), W. Annaba, 3ème Journées Internationale des Géosciences de l'Environnement. les 8, 9 et 10 juin , El Jadida.

Benchaba, L. (2006) Les écoulements et impact sur la mobilisation des ressources en eau du bassin versant de l'oued Bouhamdene w. Guelma , Mémoire Magister, U. Batna, 180 p.

Benichou, P., et Le Breton, O. (1987) Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques, La Météorologie, N° 9, pp 23-34.

Benkhaled, A. (2007) Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Chélif, Comparaison des techniques et des résultats , Courrier du Savoir, N°08, pp 83-91.

Benyacoub et al . (1998) Plan directeur de gestion du Parc National d'El Kala et du complexe des zones humides, Projet Banque Mondiale, 200 p.

Beven, K. (1989) Changing ideas in hydrology - The case of physically - based models, Journal of Hydrology, N°105, pp 157-172.

Brutsaert, W. (1982) Evaporation in the atmosphere, Theory, history, and applications, D. Reidel, Higham, MT, USA.

D

Daly, C., Neilson, R.P., Philips, D.L. (1994) Statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, J. Appl, Meteorol, N°33, pp 140-158.

De Montmollin, F.A., Olivier, R.J., Simard, R.J., Zwahlen, F. (1980) Evaluation of a precipitation map using a smoothed elevation-precipitation relationship and optimal estimates (kriging), Nordic hydrology, N°11, pp 113-120.

Djamai R. (1993) Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Annaba). Thèse Magister, INA Alger, 78p.

Djamai, R., Daoud, Y., Ouardi, J., Valles, V., Fadel, D., Laifa, A., Benslama, M. (2006) Alcalinité et apport de la géochimie, Cas des sols du lac Fetzara (nord-est Algérien), Physical and chemical News, N°32, pp 137-143 .

Djamai et all. (2006) Mathematical Simulation the Climatic Variability. Estimation of the Water Balance of the Overturning Pond of the Fetzara Lake (Algerian North East), European Journal of Scientific Research, Vol 13, N° 2 .

F

François, D., Humbert, J. (2000) Quantification spatiale des précipitations, Application au nord-est de la France, Revue de Géographie de l'Est, pp 1-16.

Frey, D.G. (1963) Limnology in North America, University of Wisconsin Press, Madison Sellery, G.C. E.A. Birge: A Memoir. Madison, WI: The University of Wisconsin–Madison Press, 1956.

G

Gaume E., Payrastre O., Rosa da Silva B. (2003) Analyse hydrologique des crues du 8 & 9 septembre 2002 dans le Gard, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, République Française, Paris, 94p.

H

Hadj-Said, S . (2007) Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone côtière cas de la nappe de Guerbes, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 175 p.

Hani, A., Djorfi, S., Djabri, L., Lamouroux, Lallahem, S. (2007) Impact of industrial rejections on water of Annaba aquifer (Algeria), European water, pp 3-14.

Hutchinson, G.E. (1957) A treatise on limnology. Vol. 1. Geography, physics, and chemistry, John Wiley & Sons.

Humbert, J. et Perrin, J.L . (1993) Précipitations et relief, le cas du versant oriental des Hautes Vosges. In : L'eau, la terre et les hommes, Presses Universitaires de Nancy, pp 147-154.

Humbert, J., Drogue, N., Mahr, N. (1998) Cartographie des précipitations par paramétrisation omnidirectionnelle du relief : la méthode Pluvia, Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie.

I

Ikebuchi, S., Seki, M., Ohtoh, A. (1988) Evaporation from lake Biwa, J. Hydrol, vol. 102(1), pp 427-449.

J

Jacquet, S. (2009) Obituary Bernard Dussart (1922-2008).

Joleaud, I. (1977) Annaba et sa région .

K

Kalff, J. (2002) Limnology, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 608 pp.

L

Laborde, J.P. (1982) Cartographie automatique des caractéristiques pluviométriques, prise en compte des relations pluviométrie-morphométrie, La Houille Blanche, (4) : 330338.

Laborde, J.P. et Traboulsi, M. (2002) Cartographie automatique des précipitations : application aux précipitations moyennes annuelles du Moyen-Orient, Publications de l'Association Internationale de Climatologie, N°14, pp 296-303.

Lacroix, G. (1991) Lacs et rivières : milieux vivants, Editions Bordas, Paris, 255 p.

Lemmin U. (1995) Limnologie physique, p 61-106 in Pourriot R. and M. Meybeck (eds), Limnologie générale, Masson, Paris.

Louamri, A. (2009) Cartographie des pluies annuelles dans le bassin versant de l'oued Seybouse (Nord-est Algérien), Sciences & Technologie, N°30, pp 43-52.

M

Margoum, M., Oberlin, G., Lang, M., Weingartner, R. (1994) Estimation des crues rares et extrêmes: principes du modèle AGREGEE. In: Hydrologie Continentale, Paris, vol. 9 (1), pp 85-100.

Mouelhi, S. (2003) Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier, Doctorat Sciences de l'eau, Cemagref d'Antony, Paristech ENGREF, 323 p.

Mulvaney, T. J. (1851) On the use of self-registering rain and flood gauges in making observation of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment, Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland, 4, 19–31.

Musy A., Higy C. (2004) Hydrologie, une science de la nature, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 326 p.

N

Nemec, J. (1993) Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales, KHR-Bericht II-7, Lelystad.

P

Perrin, C. (2000) Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Paris.

Pourriot, R., Meybeck, M. (1995) Limnologie générale, Paris, Masson, 956 p.

R

Raachi, L. (2007) Etude préalable pour la gestion intégrée des ressources du bassin versant du lac Tonga au Nord-est Algérien, Université du Québec, Montréal, 155 p.

S

Sene, K.J., Gash, J.H.C., McNeil, D. D. (1991) Evaporation from a tropical lake: Comparison of theory with direct measurements, J. Hydrol, Vol 127, pp193-217.

Shérier, J.-C. (1977) Une méthode d'extrapolation dans l'espace de données pluviométriques moyennes. Application à une partie des Vosges, Recherches Géographiques, Strasbourg, N°4, pp 69-85.

Spreafico, M., Weingartner, R., Barben, M., Ryser A. (2003) Evaluation des crues dans les bassins versants de Suisse: Guide Pratique, Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, Suisse, 114 p.

Soutter, M., Mermoud A., Musy A. (2007) Ingénierie des eaux et du sol : processus et aménagements, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 294 p.

T

Thienemann , A . F. (1959) Erinnerungen und Tagebuchblätter eines Biologen, Ein Leben im Dienste der Limnologie, Stuttgart, Germany, 500 p.

Tir, K. (2008) Climagramme d'Emberger: analyse et corrections dans quelques stations météorologiques de l'Est Algérien, Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine, 95 p.

Touaibia, B. (2004) Manuel pratique d'hydrologie, Edition Madani, Blida, Algérie, 166 p.

Toubal-Boumaza, O. (1986) Phytoécologie, biogéographie et dynamique des principaux groupements végétaux du massif de l'Édough (Algérie nord-orientale). Cartographie à 1 /25 000. Thèse de doctorat de 3ème cycle, Grenoble, Université des sciences et technologie méditerranéenne, 110 p.

Touazi, M., Laborde, J.P. (2005) Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du nord, Revue des sciences de l'eau, pp 503–516.

Travers, L. (1958) La mise en valeur du lac Fetzara, Annales de Géographie, Volume 67, Numéro 361, pp 260-262.

W

Wetzel, R.G. (2001) Limnology, Academic Press.