

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Hadj Lakhdar BATNA



Institut de Génie Civil, d'Hydraulique et d'Architecture

Département d'Hydraulique

*Thèse*

En vue de l'obtention du diplôme de

**DOCOTRAT EN SCIENCES**

Option : **Hydraulique**

*Présentée par :*

**Mme Tebbi Fatima Zohra**

(Ingénieur d'État en Hydraulique , Magister en Constructions Hydrauliques )

Thème

***MODÉLISATION DE LA RÉGULARISATION DES BARRAGES  
DANS LA RÉGION DES AURÈS***

Soutenue publiquement à Batna, le 23/06 / 2014

**Devant le jury**

Mr BOUDOUKHA Abderrahmane ,	Président	Professeur, UHL Batna
Mme DRIDI Hadda ,	Rapporteur	Professeur, UHL Batna
Mr REMINI Boualem,	Examineur	Professeur, USD Blida
Mr MEBARKI Azzedine,	Examineur	Professeur, UMC Constantine
Mr BENKHALED Abdelkader,	Examineur	Professeur, UMK Biskra
Mr HOUICHI Larbi,	Examineur	Professeur, UHL Batna
Mr KALLA Mahdi ,	Invité	Professeur, UHL Batna



*À la mémoire de mes parents*

*À Hamid, Nour El Yakine et Moutaki Errahmane*

*À mes frères et sœurs*

*À toutes les familles Jebbi et Ghenam partout dans ce monde*

الحمد والشكر لله رب العالمين

## **Remerciements**

*Je remercie ma directrice de thèse Professeur Hadda Dridi de m'avoir encadré, guidé par ses conseils et surtout par ses grandes qualités humaines. Je remercie également Professeur Mahdi Kalla pour son soutien et sa confiance le long de toutes ces années.*

*Je voudrais témoigner ma reconnaissance et gratitude extrême à mon enseignant Docteur Houichi Larbi pour toute l'aide et la sollicitude qu'il a éprouvé à mon égard tout le long de l'élaboration de cette thèse.*

*Je tiens vivement à remercier Docteur Larbi Houichi , Professeur Abdelkader Benkhaled, Professeur Boualem Remini et Professeur Azzedine Mebarki pour avoir accepté spontanément de se joindre au jury de la thèse ainsi que pour leurs lectures et corrections minutieuses. Je suis très reconnaissante à Monsieur le Professeur Abderrahmane Boudoukha d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.*

*Mes remerciement vont à toute l'équipe de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts ANBT pour leur aides précieuses.*

*Mr H. Habchi ANBT Alger*

*Mr A. Khmouli ANBT Barrage Foum El Kherza*

*Mr A. Chorfi ANBT barrage Babar*

*Mr R. Falek ANBT Barrage Foum El Gueiss*

*Mr Sfair et toute l'équipe de l'ANBT Barrage Fontaine des Gazelles*

*Je n'oublierais jamais l'aide et la confiance de la part de mes amies surtout Fouzia, Nawel, Ouafa, Houria, Wassila, Djemaa et Ouarda.*

*J'exprime enfin ma gratitude extrême à tous mes enseignants et collègues, dans tous les cycles.*

## *Aknowledgments*

*I would like to express my deepest gratitude to all that accept to give me support and wonderful academic knowledge and discussions.*

*Doctor Gregroy L. Morris      GLM Enginneering Coop Puerto Rico, USA*

*Professor Benina Touaibia      ENSH Blida, Algeria*

*Professor Mujumdar Pradeep      Indian Institute of Science, Department of civil Engineering*

*Professor Nagesh Kumar      Indian Institute of Science, Department of civil Engineering*

*Professor Desmond Walling      University of Exeter, United Kingdom*

*Professor Daniel P. Loucks      School of CEE Cornel University ,USA*

*Professor Jerry R. Stedinger      School of CEE Cornel University, USA*

*Iwan Hardaja Faculty of Civil and Environmental Engineering, Bandung; Indonesia*

## **Résumé**

*La régularisation des barrages à long et moyen terme consiste en la dérivation des courbes consignes pour une gestion optimale de la ressource disponible. Le présent travail s'intéresse à la régularisation ou gestion des barrages situés dans la région des Aurès très connue pour sa vulnérabilité à l'érosion.*

*Comme exemple, le réservoir de Foum El Kherza a été choisi afin de lui appliquer l'approche proposée, qui consiste à évaluer en premier lieu tous les termes du bilan hydrique, surtout ceux à caractère aléatoire comme les apports liquides. Par la suite, et en se basant sur les mesures bathymétriques effectuées au niveau du réservoir conjointement avec l'approche de la courbe de tarage en sédiments, une courbe cumulative en sédiments piégés est élaborée, cette courbe a donné lieu à une relation puissance débit solide-débit liquide qui sera utilisée pour l'estimation future du volume des sédiments piégés dans le réservoir.*

*Implicitement, cette estimation du volume utile est introduite dans le modèle de gestion par optimisation en utilisant la Programmation Dynamique Stochastique Explicite PDSE afin de dériver les règles de gestion optimales pour chaque horizon. Les lâchers optimaux issus de cette optimisation sont introduits par la suite dans un modèle neuronal afin d'extraire une relation plus flexible exprimant les lâchers en fonction du volume dans le réservoir et les apports liquides. Les résultats obtenus de cette optimisation ont montré une zone de gestion optimale en fonction du volume utile du réservoir et ainsi une flexibilité de la gestion du réservoir s'avère nécessaire afin de veiller à la durabilité de la ressource.*

*La confrontation de ces consignes à un réel fonctionnement du réservoir même étant optimales, a fait apparaître les défaillances d'un tel système surtout celles relatives au déversement engendré par la diminution du volume utile.*

## ***Abstract***

*Long term and mid-term reservoir operation consists in the derivation of rule curves for optimal management of the available resource. The present work deals with reservoirs operation in Aures region well known for its vulnerability to erosion.*

*As an example, Foum El Kherza reservoir is selected in order to apply the proposed approach which estimates all the water balance terms, especially those which are random as water inflows. Thereafter, based on bathymetric surveys at the reservoir, together with the approach of the sediment rating curve, a cumulative curve for trapped sediment volume was developed. This curve has resulted in sediment-water power relationship and will be used for future estimation of trapped sediment in the reservoir. Implicitly, this estimate of the useful volume is introduced into the reservoir operation optimization model using Explicit Stochastic Dynamic Programming, in order to derive optimal rule curves for each horizon. Optimal releases from this optimization are subsequently introduced in a neural model to extract a more flexible relation expressing the releases according to storage in the reservoir and water inflows. The results of this optimization showed optimal region-based management of the useful volume of the reservoir and thus flexibility of reservoir management is necessary to ensure the sustainability of the resource.*

*These optimized rule curves and actual operation of the same reservoir, has showed failures of such system especially those relating to the spill events caused by the decrease in volume.*

## Sommaire

<i>Liste des figures</i> .....	iv
<i>Liste des tableaux</i> .....	vii
<i>Introduction générale</i> .....	i
Introduction générale .....	1
Enoncé du problème .....	3
Objectif de l'étude .....	3
Contenu et organisation de la thèse .....	4
Contributions apportées par la thèse .....	4
<i>Etat de l'art</i> .....	7
1.1 Introduction .....	8
1.2 Méthodes d'optimisation .....	8
1.2.1. Programmation linéaire (PL) .....	9
1.2.2. Programmation Non Linéaire (PNL) .....	9
1.2.3 Programmation Dynamique (PD) .....	9
1.2.2.1 Principe de la Programmation Dynamique .....	10
1.1.2.2 Programmation Dynamique Stochastique .....	13
1.1.2.2. La poisse de dimentionnalité ‘ ‘ Curse of dimentionnality ‘ ‘ .....	16
1.2.2.3. Autres dérivées de la programmation dynamique stochastique .....	16
1.3 Modèles de simulation .....	17
1.4 Modèles combinés .....	18
1.5 Réseaux de Neurones Artificiels .....	19
1.5.1 Apprentissage du réseau de neurones par rétro-propagation ( <i>backpropagation</i> ) .....	21
1.5.2 Simulation de l'opération du réservoir par Réseaux de Neurones .....	22
1.6 Conclusion .....	23
<i>Les Aurès, Réservoirs et Gestion</i> .....	24
2.1 Contexte physique de la région des Aurès .....	25
<b>2.1.1 Synthèse géologique</b> .....	25
2.1.1.1 Anticlinaux .....	26
2.1.1.2 Synclinaux .....	26
2.1.1.3 Hydrographie : Ecoulement endoréique .....	28
2.1.2 Aperçu climatique .....	28
2.1.2.1 Précipitations .....	29

2.1.2.2	<i>Facteur thermique</i> .....	30
2.1.2.3	<i>Evapotranspiration</i> .....	31
2.1.2.4	<i>Le vent</i> .....	32
2.1.3	Couvert végétal.....	32
2.1.4	Apports annuels des cours d'eau .....	34
2.1.5	Les crues dans la région des Aurès.....	35
2.1.6	Apport solide .....	41
2.2	Les barrages réservoirs dans la région des Aurès.....	43
2.2.1	<b><i>Fiches techniques des barrages</i></b> .....	44
2.2.1.1	<i>Barrage Foum El Kherza</i> .....	44
2.2.1.2	<i>Barrage de Fontaine des Gazelles</i> .....	47
2.2.1.3	<i>Barrage de Babar</i> .....	48
2.2.1.4	<i>Barrage de Koudiet M'daouar</i> .....	49
2.2.1.5	<i>Barrage Foum El Gueiss</i> .....	50
2.3	<b>Gestion actuelle des barrages de la région</b> .....	51
2.3.1	<b><i>Gestion du barrage de Foum El Kherza</i></b> .....	51
2.3.2	<b><i>Gestion du réservoir de Babar</i></b> .....	53
2.3.3	<b><i>Gestion du réservoir de Foum El Gueiss</i></b> .....	54
2.3.4	<b><i>Gestion du réservoir de Fontaine des Gazelles</i></b> .....	56
2.3.5	<b><i>Gestion du réservoir de Koudiet M'daouar</i></b> .....	58
2.4	<b>Conclusion</b> .....	58
	<b><i>Deuxième partie</i></b> .....	60
	<i>Termes du bilan hydrique</i> .....	61
3.1	Introduction .....	62
3.2	Apports liquides.....	62
3.2.1	Données disponibles .....	62
3.2.2	Les modèles de prévision des apports liquides mensuels.....	63
3.2.2.1	<i>Modèle autorégressif</i> .....	63
3.2.2.2	<i>Réseau de neurones à temps retard ou Time Delay Neural Network TDNN</i> .....	68
3.3	Pertes par évaporation et par infiltrations.....	72
3.3.1	Pertes par évaporation .....	72
3.3.1.1	<i>Relation Volume évaporé -Volume d'eau dans le réservoir par RNA</i> .....	73
3.3.3	Modélisation des pertes par infiltrations .....	76
3.4	Pluviométrie directe au dessus du réservoir .....	76

3.4.1 Modélisation des pluies mensuelles.....	77
3.5 Demande en eau et lâchers historiques.....	79
<b>3.5.1 Besoins en eau du palmier dattier</b> .....	81
3.6 Conclusion.....	83
<i>Sédimentation du réservoir</i> .....	84
4.1 Introduction.....	85
4.3 Méthodes.....	88
4.3.1 Levés bathymétriques.....	88
4.3.2 Courbe de tarage en sédiments (SRC).....	88
4.3.3 <i>Efficacité de piégeage ‘ Trap efficiency’</i> .....	89
4.3.4 Apport solide piégé historique.....	89
4.3.5 Chasse de fond, évacuation durant les crues et dévasement.....	89
4.3.6 Concentration journalière en sédiments.....	90
4. 4 Optimisation de la Courbe Cumulative en Sédiments Piégés.....	90
4.4 Résultats de l’Optimisation de la Courbe Cumulative.....	91
4.5 Conclusion.....	95
<i>L’optimisation de la gestion du réservoir</i> .....	96
<i>et la contrainte sédimentation</i> .....	96
5.1 Introduction.....	97
5.2 Méthodologie adoptée.....	97
5.2.1. Programmation Dynamique Stochastique Explicite.....	98
5.2.1.1 <i>Discretisation des apports</i> .....	98
5.2.2 Matrices de transition.....	99
5.2.3 Discretisation du volume de la retenue.....	100
5.2.4 La fonction « objectif ».....	100
5.3 Optimisation de l’opération par PDSE et la sédimentation du réservoir.....	101
5.3.1 Résultats de l’optimisation.....	101
5.3.2 Application des résultats de l’optimisation aux états historiques du réservoir.....	106
5.4 Simulation de l’opération du réservoir par Réseaux de Neurones Artificiels.....	106
5.5 Conclusion.....	110
<i>Conclusion générale</i> .....	111
<i>Références bibliographiques</i> .....	114

## Liste des figures

Figure 1.1 Bilan hydrologique pour un réservoir (cas simplifié d'un réservoir isolé)	11
Figure 1.2 processus multi-états de l'équation de Bellman (forme descendante)	12
Figure 1.3 Neurone biologique	20
Figure 1.4 Perceptron MultiCouches (MLP)	20
Figure 1.5 Neurone simple	21
Figure 2.1 Limites du massif des Aurès	25
Figure 2.2 Synthèse géologique des Aurès proposée par Benmessaoud	26
Figure 2.3 Extrait de la carte localisant les stations pluviométriques et codes correspondants relatifs à la région des Aurès.	27
Figure 2.4 Extrait de la Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien établie par l'ANRH.	30
Figure 2.5 Extrait de la carte des températures moyennes annuelles	31
Figure 2.6 Extrait de la carte d'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne de l'Est algérien	32
Figure 2.7 Extrait de la carte établie par Gaussen et Vernet	33
Figure 2.8 Extrait de la Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien	34
Figure 2.9 Réseau hydrométrique de l'Est algérien et bassins jaugés	34
Figure 2.10 Extrait de la carte des apports annuels moyens des bassins jaugés de l'Est algérien (période moyenne : 1972/73-1983/84).	35
Figure 2.11 Effet saisonnier des crues observées à Foum El Kherza	36
Figure 2.12 Variation mensuelle des classes de crues supérieures à 20 (m <sup>3</sup> /s) à Foum El Kherza	36
Figure 2.13 Crues observées à El Kantara et Djemorah	37
Figure 2.14 Crues observées à Chemorah	37
Figure 2.15 Crues observée à Foum El Gueiss saison chaude	37
Figure 2.16 Crues observées à Foum El Kherza (a) saison froide, (b) saison chaude	38
Figure 2.17 Hydrogramme de crue observé à Foum El Kherza le 15/05/2011	38
Figure 2.18 TSS moyen annuel estimé dans quelques stations hydrométriques de la région des Aurès.	41
Figure 2.19 Barrages réservoirs dans la région des Aurès	42
Figure 2.20 Courbes Capacité-Hauteur (1967, 1975, 2004 et 2007)	44
Figure 2.21 Réservoir Foum El Kherza	45

Figure 2.22 Réservoir Fontaine des Gazelles	46
Figure 2.23 Réservoir Babar	47
Figure 2.24 Réservoir Koudiet M'daouar	48
Figure 2.25 Réservoir Foug El Gueiss	49
Figure 2.26 Bilan hydrique (en %) du barrage Foug El Kherza (1967/2010)	50
Figure 2.27 Bilan hydrique du réservoir Foug El Kherza (2000/2010)	51
Figure 2.28 Bilans hydriques mensuels (1987/1988 et 2003/2004)	52
Figure 2.29 Bilan hydrique (en %) du réservoir Babar (2002/2013)	52
Figure 2.30 Bilan hydrique interannuel du réservoir Babar (2002/2013)	53
Figure 2.31 Bilans des années 2002 et 2010 du réservoir de Babar.	53
Figure 2.32 Bilan hydrique (en %) du barrage Foug El Gueiss (2001/2013)	54
Figure 2.33 Bilan interannuel du barrage de Foug El Gueiss (1993-2013).	54
Figure 2.34 Bilan hydrique mensuel du réservoir de Foug El Gueiss (2013).	55
Figure 2.35 Bilan hydrique Bilan hydraulique (en %) du réservoir Fontaine des Gazelles (2002/2011).	55
Figure 2.36 Bilan hydrique interannuel du réservoir Fontaine des Gazelles (2002/2011)	56
Figure 2.37 Bilan hydrique mensuel du réservoir Fontaine des Gazelles (2008/2009)	56
Figure 2.38 Bilan hydrique mensuel du réservoir Koudiet M'daouar (2008/2009)	57
Figure 3.1 Apports liquides mensuels à Foug El Kherza (Sept 1967- Aout 2010)	61
Figure 3.2 Moyennes et Ecart type mensuels des apports liquides (1967-2010)	62
Figure 3.3 Q-Q plot normale des débits mensuels d'apprentissage (1967-2004)	64
Figure 3.4 Q-Q normale de la série normalisée	64
Figure 3.5 Corrélation et Auto corrélation partielle relatives à la série transformée	65
Figure 3.6 Analyse des résidus du modèle AR(5)	66
Figure 3.7 Analyse des résidus du modèle ARMA(1,1)	66
Figure 3.8 Prévisions pour une année par X-12-ARIMA et celles observées	67
Figure 3.9 Architecture d'un TDNN unidimensionnel	68
Figure 3.10 Apports simulés et apports Observés (phase de validation)	70
Figure 3.11 Structure du modèle hybride SARIMABP.	70
Figure. 3.12 Volumes annuels évaporés.	72

Figure 3.13 Moyennes mensuelles des volumes évaporés	73
Figure 3.14 Volumes évaporés estimés par réseaux de neurones et ceux observés	74
Figure 3.15 Volumes annuels des fuites	75
Figure 3.16 Volumes mensuels des fuites en fonction du volume d'eau dans le réservoir	75
Figure 3.17 Pluies annuelles (mm) (Sept1967- Aout 2010)	76
Figure 3.18 Moyennes mensuelles des pluies à Foum El Kherza	76
Figure 3.19 Pluies mensuelle à Foum El Kherza (Sept 1967- Aout 2010)	77
Figure 3.20 Q-Q plot normale des pluies mensuelles à Foum El Kherza	77
Figure 3.21 Q-Q plot normale de la série prénormalisée	78
Figure 3.22 Historique des lâchers annuels au niveau du réservoir de Foum El Kherza	79
Figure 3.23 Historique des lâchers moyens mensuels au niveau du réservoir Foum El Kherza	79
Figure 3.24 Lâchers historiques, Apports liquides et Besoins en eau du palmier dattier	82
<b>Figure 4.1</b> Apports liquides journaliers à Foum El Kherza (Septembre 1967-Mai 20011).	87
Figure 4.2 Levés bathymétriques effectués à Foum El Kherza.	87
<b>Figure 4.3</b> Optimisation de la courbe cumulative des sédiments piégés	91
<b>Figure 4.4</b> Bilan sédimentaire annuel	93
<b>Figure 4.5</b> Perte du volume de stockage du réservoir Foum El Kherza.	93
Figure 4.6 <b>Courbe cumulative optimisée au pas de temps annuel</b>	94
Figure 5.1 Approche proposée	95
Figure 5.2 PDSE appliquée aux états du système et apports historiques (1967-2009)	103
Figure 5.3 Schéma du MLP considéré pour la simulation de l'opération du réservoir	104
Figure 5.4 Résultats de la simulation de l'opération du réservoir par MLP (phase de validation)	104
Figure 5.5 Résultats de la simulation par réseaux de neurones pour les états historiques	105
Figure 5.6 Courbes consignes en fonction de l'envasement du réservoir	106

## **Liste des tableaux**

Tableau 1 Le parc des grands barrages Algériens dont la capacité est supérieure à millions de m <sup>3</sup>	10
Tableau 2.1 Principales crues enregistrées dans les Aurès	39
Tableau 2.2 Valeurs moyennes et maximales saisonnières du TSS.	40
Tableau 2.3 Barrages en exploitation et en construction dans la région des Aurès	42
Tableau 2.4 Fiche technique du barrage Foum El Kherza	44
Tableau 2.5 Fiche technique du barrage Fontaine des Gazelles	46
Tableau 2.6 Fiche technique du barrage de Babar	47
Tableau 2.7 Fiche technique du barrage de Koudiet M'daouar	48
Tableau 2.8 Fiche technique du barrage de Foug El Gueiss	49
Tableau 3.1 Résultats de simulation pour le modèle TDNN	69
Tableau 3.2 Résultats de simulation par le modèle SARIMABP	71
Tableau 3.3 Estimation de l'évaporation par réseaux de neurones et régression	73
Tableau 3.4 Statistiques descriptives de la série	77
Tableau 3.5 Résultats de simulation du modèle hybride SARIMABP.	78
Tableau 3.6 Besoins en eau du palmier dattier (sur la base de 120 palmiers/ha)	81
Tableau 4.1 Statistiques descriptives de la série d'apports journaliers	87
Tableau 4.2 Quelques valeurs du coefficient $\alpha$ pour des bassins algériens.	90
Tableau 4.3 Capacité de piégeage du réservoir Foug El Kherza.	92
Tableau 5.1 Série synthétique générée.	96
Tableau 5.2 Matrices de transitions	97
Tableau 5.3 Stocks et lâchers objectifs	98
Tableau 5.4 Indice (I*) des lâchers optimaux (Aout, Juil, Juin, Mai)	99
Tableau 5.5 Indice (I*) des lâchers optimaux (Avril, Mars, Fev, Janv)	99
Tableau 5.6 Indice (I*) des lâchers optimaux (Dec, Nov, Oct, Sept)	99
Tableau 5.7 Indice (I*) des lâchers optimaux (Aout, Juil, Juin, Mai)	100
Tableau 5.8 Indice (I*) des lâchers optimaux (Avril, Mars, Fev, Janv)	100
Tableau 5.9 Indice (I*) des lâchers optimaux (Dec, Nov, Oct, Sept)	100
Tableau 5.10 Indice (I*) des lâchers optimaux (Aout, Juil, Juin, Mai)	101
Tableau 5.11 Indice (I*) des lâchers optimaux (Avril, Mars, Fev, Janv)	101
Tableau 5.12 Indice (I*) des lâchers optimaux (Dec, Nov, Oct, Sept)	101
Tableau 5.13 Indice (I*) des lâchers optimaux (Aout, Juil, Juin, Mai)	102
Tableau 5.14 Indice (I*) des lâchers optimaux (Avril, Mars, Fev, Janv)	102

Tableau 5.15 Indice (I*) des lâchers optimaux (Dec, Nov, Oct, Sept)	102
Tableau. 5.16 Indices de performance pour différents volumes du réservoir	106

## *Introduction générale*

## **Introduction générale**

Bien que l'eau occupe près de 70% de la terre, seulement 2,5 % de cette eau est douce, et dont les deux tiers sont bloqués sous forme de glaciers situés dans les régions polaires (Simonovic 2009), elle n'est généralement pas disponible au bon moment au bon endroit, parfois même elle se trouve au mauvais endroit au mauvais moment (Jain and Singh 2003), de plus elle n'est pas de la qualité qu'on espère.

Dans les pays en voie du développement tout particulièrement, un problème multiple lié à l'eau : disponibilité, quantité, qualité et aussi impacts des inondations, entrave le développement économique et social surtout avec la pression sur la demande en eau à cause de la croissance démographique, l'intensification des activités économiques, et l'amélioration du niveau de vie. Dans le sens d'un développement durable, une intégration intersectorielle : (socio-économique, environnementale, considérations politiques et l'ingénierie) de la gestion et non pas fragmentée des ressources en eau s'avère indispensable ayant pour but : le maintien d'un bon équilibre entre la ressource et l'usage.

Chaque année, plus de 250 nouveaux barrages réservoirs sont construits dans le monde (Nandalal and Bogardi 2007), reflétant l'importance donnée à ces ouvrages de stockage par les états et ceci malgré leurs effets néfastes sur l'écosystème (Dams 2000).

Autrefois, leur but était de stocker l'eau pendant la saison humide pour l'utiliser dans la saison sèche, Aujourd'hui, ils jouent un rôle majeur dans le développement économique et constituent le pôle d'intérêt des milieux politiques, des grandes agences gouvernementales centralisées, des institutions internationales de financement et de l'industrie de construction de barrages (Dams 2000) convaincus de leur contribution efficace à la gestion des ressources mondiales en eaux qui sont limitées, mal réparties et pouvant présenter de grandes variations saisonnières.

L'état algérien, conscient de l'importance économique de ces ouvrages, leur accorde un intérêt primordial et insiste aussi sur la nécessité de la formation d'un encadrement de haut niveau afin d'assurer dans les meilleures conditions, l'exploitation et l'entretien de ces infrastructures importantes aux incidences financières lourdes. (Tableau 1).

**Tableau 1** L'état des grands barrages algériens dont la capacité est supérieure à 10 millions de m<sup>3</sup>(source :MRE)

Désignation	Nombre	Volume régularisé (Hm3/an)
Etudes : 1- en cours de lancement	20	
2- en cours	14	190,62
3- Achevées	22	640,15
En construction	14	1141,68
En exploitation	58	3063,67
Total	128	5036,12

Dans le monde, on peut distinguer deux types de réservoirs : les barrages à buts multiples et ceux à but unique, ces derniers sont en plus grand nombre (48 % environ) destinés à l'irrigation (Lecornu 1998). Pour les barrages à but multiples, l'irrigation tient également la première place, l'hydroélectricité, l'alimentation en eau domestique et industrielle, la protection contre les crues, les loisirs et à un moindre degré, l'élevage de poissons et la navigation. Ces ouvrages nécessitent de grands efforts, aussi bien sur les plans techniques et environnementaux que sur le plan financier, par conséquent, la phase d'exploitation ou de gestion des réservoir devient nécessaire, en temps réel ou à long terme elle doit faire face aux risques et aux incertitudes liées à la fois au climat et à la société (Bogardi and Kundzewicz 2002). Le développement de l'informatique et sa puissance de calcul a fait introduire la modélisation des systèmes de ressources en eau permettant de simuler des situations réelles et vérifier la validité des stratégies de gestion dans le but d'opter pour la plus optimale, et d'aider à mieux saisir et évaluer les principaux facteurs à l'origine d'un problème typique de gestion ceci, d'une manière relativement rapide et sûr.

Faisant partie des systèmes de ressources en eau, les bénéfices attendus d'un réservoir sont fortement influencés par la façon avec laquelle il sera géré, il ne suffit pas seulement de bien concevoir mais surtout de bien exploiter (Jain and Singh 2003). Depuis que Maass et al. (1962) ont proposé l'utilisation des modèles mathématiques pour la régularisation des systèmes de ressources en eau, les courbes consignes qui définissent le niveau de stockage idéal à chaque saison ou année ont été largement utilisées. L'exploitant est tenu à maintenir le niveau d'eau préfixé par la courbe consigne aussi étroitement que possible tout en satisfaisant les besoins en aval (Nandalal and Bogardi 2007).

Ces courbes consignes montrent une certaine rigidité lorsque des situations imprévues surviennent et responsabilisent le gestionnaire qui va agir selon ces compétences qui ne sont pas forcément idéales. Aujourd'hui, une variété de méthodes est disponible afin de donner une certaine flexibilité aux courbes consignes, elles peuvent être classées en deux catégories : Méthodes basées sur la simulation et celles basées sur l'optimisation (Vedula and Mujumdar 2005) qui font généralement l'objet d'une combinaison une bonne analyse des systèmes de réservoirs.

### **Enoncé du problème**

La sédimentation des réservoirs algériens provenant de la forte érosion des bassins versants est spectaculaire (Remini and Hallouche 2004). Elle diminue considérablement le volume d'eau régularisé et pose aussi beaucoup de problèmes techniques dans l'exploitation des ouvrages spécialement l'obstruction des vidanges de fond et aussi elle influence la qualité des eaux stockées.

La région des Aurès connue par son agressivité climatique, sa topographie accidentée, ainsi que beaucoup de facteurs favorisant l'érosion, est dotée de plusieurs barrages réservoirs dont le but est de satisfaire les besoins de la région en eau principalement d'irrigation. La plupart de ces barrages sont sous l'emprise d'un envasement important. Cependant, lors de l'élaboration des courbes consignes à long terme, la prise en compte de l'éventuelle sédimentation des réservoirs est négligée, ce qui peut conduire à des courbes consignes ne pouvant pas répondre à une régularisation future meilleure, efficace et surtout « durable » de ces réservoirs.

### **Objectif de l'étude**

Le principal objectif visé dans cette thèse, est l'élaboration des courbes consignes en tenant compte de la diminution du volume du réservoir par sédimentation d'une part, et d'autre part, des aléas climatiques pour un barrage situé en zone aride. Le réservoir barrage de Foum el Kherza (W. Biskra) a été retenu du fait de l'importance qu'il occupe pour la durabilité des palmeraies dans la région des Zibans d'une part, et d'autre part, du fait de la disponibilité des données relatives notamment celles du bilan hydrique et aussi celles concernant la sédimentation recueillies durant la longue période de son exploitation.

La Programmation Dynamique Stochastique Explicite sera retenue comme méthode d'optimisation de la gestion du réservoir. Les Réseaux de Neurones Artificiels sont choisis comme outil de simulation de l'opération du réservoir.

### **Contenu et organisation de la thèse**

Le présent travail s'articule autour de deux parties dont la première traite :

- **Au premier chapitre** l'état de l'art relatif à la modélisation de la gestion des réservoirs et différentes méthodes d'optimisation et traite aussi les méthodes de simulation de l'opération des réservoirs accentuée sur celle effectuée par les réseaux de neurones combinés à l'optimisation.
- **Au deuxième chapitre**, la caractérisation générale de la région des Aurès et qui en grande partie est basée sur des études antérieures. En deuxième lieu, la présentation, l'analyse et les différentes critiques concernant le mode actuel de la gestion de ces réservoirs.

La deuxième partie de ce manuscrit se concentre principalement sur l'application de la Programmation Dynamique Stochastique à l'optimisation de la gestion du réservoir Foum El Kherza choisi comme un cas représentatif des réservoirs de la région des Aurès soit:

- **Au troisième chapitre** sur les différents termes du bilan hydrique et leurs modèles correspondants.
- **Au quatrième chapitre** sur le modèle destiné à l'estimation à long terme du volume de la vase accumulée dans le réservoir par optimisation d'une courbe cumulative des sédiments piégés.
- **Au cinquième chapitre** sur l'application de la PDSE comme outil d'optimisation, et la simulation par Réseau de Neurones Artificiels, tout en incluant la diminution du volume utile du réservoir par sédimentation d'une manière implicite.

### **Contributions apportées par la thèse**

Les principales contributions apportées par le présent travail sont :

- Elaboration de deux courbes cumulatives en sédiments piégés CTSC (Cumulative Trapped Sediment Curve)<sup>1</sup> par optimisation, ceci, en combinant deux méthodes ; la courbe de tarage et levés bathymétriques effectués au niveau du réservoir tout le long

---

<sup>1</sup> Méthode proposée par Dr G.L. Morris

de son exploitation. Le premier résultat obtenu avec cette approche a été publié dans la revue des sciences hydrologiques (HSJ) volume 57 issue 7. Le deuxième, a été présenté à la 6<sup>ème</sup> Conférence sur la Recherche sur les Ressources en Eau et l'Environnement ICWRER (juin 2103 Koblenz, Allemagne).

- Application des Réseaux de Neurones Artificiels seuls ou combinés pour la modélisation de plusieurs termes du bilan hydrique ainsi que pour la simulation de la gestion du réservoir.
- Prise en compte de la diminution de la capacité active du réservoir à long terme dans l'élaboration des courbes consignes optimales pour une gestion durables et optimale de la ressource.

*Première partie*

*Optimisation de la gestion des  
réservoirs : Etat de l'art*

*Les Aurès, Réservoirs et Gestion*

*Chapitre I*  
*Etat de l'art*

## 1.1 Introduction

L'optimisation est une technique cherchant à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes, et consiste à déterminer le meilleur choix parmi un nombre d'alternatives possibles au sens d'un critère donné appelé souvent : “*fonction objectif ou objective function*” en admettant des hypothèses et des contraintes prédéfinies. Concernant les réservoirs, leur gestion doit s'effectuer dans le souci d'assurer les étiages et écrêter les crues éventuels.

## 1.2 Méthodes d'optimisation

Les techniques d'optimisation connues aussi sous le nom de “*programmation mathématique*” peuvent être classées selon plusieurs critères, le plus souvent, elles sont classées selon le problème et les équations impliquées (Jain and Singh 2003; Loucks and Beek 2005; Simonovic 2009; Wurbs 1997).

La forme générale d'un problème d'optimisation est :

$$\text{Min ou Max } f(x) \qquad 1.1$$

Sujet de:

$$g_j(x) \leq b_j, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$x \geq 0; \quad i = 1, 2 \dots n$$

où :

$x$  = vecteur des variables de décision pour un réservoir par exemple les lâchers.

$n$  = Nombre total de variables de décision.

$g$  = contraintes.

$b$  = valeurs données.

$j$  = contrainte  $j$ .

$m$  = Nombre total de contraintes.

Nous distinguons la programmation linéaire et non linéaire, la programmation dynamique déterministe et stochastique, programmation géométrique etc. Les méthodes les plus

communément utilisées pour la gestion des réservoirs sont la programmation linéaire et celle dynamique avec ces différentes formes (Yeh 1985).

### **1.2.1. Programmation linéaire (PL)**

La méthode d'optimisation sous contraintes la plus simple et la plus populaire est la programmation linéaire (PL) dite du "simplexe" (Jain and Singh 2003; Loucks and Beek 2005; Nandalal and Bogardi 2007; Reddy 2006; Simonovic 2009; Vedula and Mujumdar 2005), dans cette technique, la fonction objectif ainsi que les contraintes sont des fonctions linéaires des variables de décision, cette méthode tient sa popularité du fait de la disponibilité d'une large gamme de codes pour la résolution d'optimisation des problèmes linéaires.

Seule ou combinée, cette méthode trouve son application dans les problèmes de gestion des barrages réservoirs (Foued and Sameh 2001; Regulwar and Kamodkar 2010; Reis et al. 2006; Satishkumar et al. 2010; Sudha et al. 2006).

### **1.2.2. Programmation Non Linéaire (PNL)**

Contrairement à la Programmation Linéaire, dans la Programmation Non Linéaire (PNL) la fonction objectif ainsi que les contraintes sont toutes fonctions non linéaires des variables de décision (Jain and Singh 2003; Loucks and Beek 2005). Cette méthode bien que moins célèbre que la programmation linéaire, trouve son application dans les problèmes de gestion des réservoirs (Chu and Yeh 1978; Duren and Beard 1972; Lee and Waziruddin 1970).

Les principaux inconvénients de cette méthode sont l'espace important qu'elle requière et la vitesse relativement lente pour la convergence.

### **1.2.3 Programmation Dynamique (PD)**

La Programmation Dynamique a été élevée au rang de méthode générale de résolution avec les travaux de Bellman (1962) qui la justifie avec le principe d'optimalité. Elle consiste à aborder les problèmes d'optimisation avec une stratégie consistant en deux points essentiels:

1. Décomposer un problème de  $n$  variables de décision en  $n$  sous problèmes avec une variable de décision.
2. établir une relation de récurrence entre les solutions optimales des problèmes.

L'avantage le plus marquant de cette technique est qu'elle permet de prendre en compte des fonctions objectif non linéaires ou non linéarisables (Parent 1991), et aussi tenir compte des aléas hydrologiques.

Yakowiz (1982) a présenté l'état de l'art en la matière de l'application de la programmation dynamique.

Dans leur excellent ouvrage Nandalal et Bogardi (2007) ont présenté l'applicabilité et les limites de la programmation dynamique dans la gestion des systèmes de réservoirs en se basant sur des exemples dans le monde entier.

Loucks et al. (2005; 1981) ont introduit sous une forme didactique très simple la programmation dynamique en tant que technique d'optimisation traditionnelle et efficace pour la gestion des systèmes de ressources en eau en général, et pour la gestion des barrages en particulier.

Vedula et Mujumdar (2005) ainsi que Karamouz(2003a) ont présenté l'application de la théorie de la programmation dynamique principalement pour les système de réservoirs.

### 1.2.2.1 Principe de la Programmation Dynamique

La formulation utilise trois types de variables :

- **Variable d'état du système** : définit l'état du système, dans un système de réservoir, la variable d'état peut être le niveau de l'eau dans le réservoir S.
- **Variable temps** : définit l'ordre avec lequel un changement d'état du système survient.
- **Variable de décision** : la variable donnée à l'action du gestionnaire (ex. les lâchers R)

La programmation dynamique est aussi définie par :

- **la fonction d'évolution du système** : Elle représente la fonction de passage d'un état S(t) à l'instant t vers un état S(t+1) à l'instant t+1 suite à une décision R(t) prise à l'instant t.

Dans le cas d'un réservoir, cette fonction d'évolution ne peut être que l'équation du bilan hydrique ou de continuité (Figure1.1). En négligeant l'évaporation, le volume déversé, les infiltrations on a:

$$S(t+1) = S(t) + I(t) - R(t) \quad 1.2$$

Où :

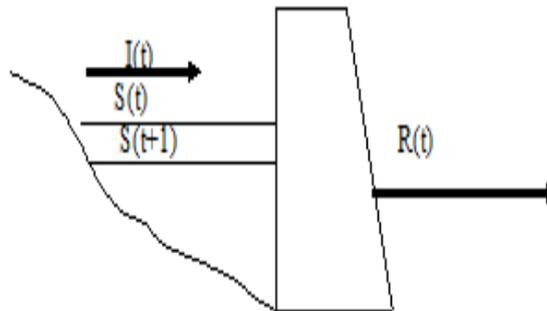
S(t+1) : Volume restant dans le réservoir à l'instant t+1 après la décision du lâcher

R(t).

$S(t)$  : Volume initial à l'instant  $t$  dans le réservoir

$I(t)$  : Apport liquide au réservoir à l'instant  $t$ .

$R(t)$  : Décision d'un lâcher à l'instant  $t$ .



**Figure 1.1** Bilan hydrologique pour un réservoir (cas simplifié d'un réservoir isolé en négligeant l'évaporation, le volume déversé et les infiltrations)

- **Contraintes du système** : L'équation du bilan hydrique ne peut s'effectuer que sous contraintes, ces dernières peuvent être d'ordre physique (capacité maximale du réservoir, débit maximal à lâcher etc. ) ou écologique ex. maintien d'un débit minimal dans le réservoir pour préserver le milieu aquatique (Pabiot 1999).
- **Fonction « objectif »** : afin d'optimiser les lâchers on se fixe a priori un ou plusieurs objectifs. Ces objectifs visent à optimiser la performance du système en termes de coût ou de gain (min ou max). Un réservoir destiné à l'irrigation peut avoir comme fonction « objectif » la minimisation du carré de l'écart demande-lâcher. Un réservoir destiné à la production d'électricité peut avoir comme objectif l'augmentation de la production de l'énergie électrique etc. lorsqu'il s'agit d'un réservoir à but multiples ces objectifs sont sommés afin de trouver un compromis entre différents usages qui sont parfois contradictoires.
- On note deux formes de résolution de l'équation récursive de Bellman : la résolution ascendante (**Foreward**) ou descendante (**Backward**), compte tenu des conditions initiales données du système de réservoirs (Geng 2009). La figure 1.2 montre un exemple d'un processus multi-états forme descendante: Soit  $S(t)$  l'état du système à l'instant  $t$ , et  $R(t)$  la décision prise à l'instant  $t$ , et  $C(t)$  le coût à cet instant correspondant à l'état  $S(t)$  et la décision  $R(t)$ . le résultat de cette décision et le passage du système de l'état  $S(t)$  à l'état  $S(t-1)$ , ce qui représente la donnée d'entrée à l'instant  $t-1$ .

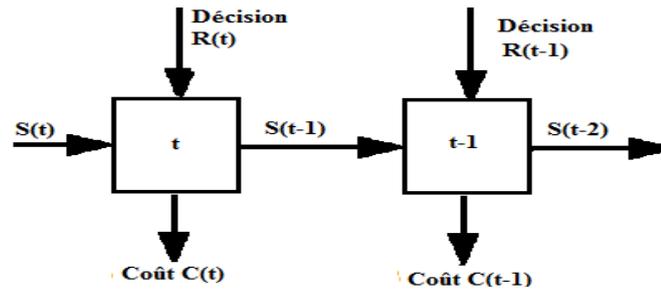


Figure 1.2 processus multi-états (forme descendante).

Equation réursive de Bellman (descendante) :

$$f_j^*(S_j) = \underset{R_j}{\text{Max (ou min)}} [B_j(S_j, R_j) + f_{j+1}^*(S_{j+1})] \quad 1.3$$

Où :

$f_j^*(S_j)$  : Coût optimal à l'état  $j$  étant donné un stock  $S_j$

$B_j(S_j, R_j)$  : Coût ou contribution de la décision du lâcher  $R_j$  étant donné un stock  $S_j$

$f_{j+1}^*(S_{j+1})$  : Coût optimal cumulé à partir des états :  $j+1, j+2, j+3 \dots, N$

$S_j$  : Etat du système (réservoir) (stock  $j$ )

$S_{j+1}$  : Transformation de l'état du système (réservoir) suite à la décision  $R_j$

$R_j$  : Décision prise à l'état  $j$

$j$  : Etat du système

L'équation 1.3 décrit une approche déterministe de l'optimisation, en d'autres termes, ce qui est arrivé dans le passé arrivera dans l'avenir ce qui n'est pas exact lorsqu'il s'agit des systèmes de ressources en eau où des incertitudes sont multiples :

- Des incertitudes liées aux paramètres hydrologiques principalement les apports, les précipitations et même l'apport solide etc.
- Des incertitudes liées aux changements des objectifs durant l'exploitation des réservoirs.
- Des incertitudes liées à la demande si elle est bien définie dans le future ou non.
- Des incertitudes liées aux contraintes.

A cause de ces incertitudes, l'application de la Programmation Dynamique avec l'approche déterministe est restée assez limitée, ci-après quelques exemples de l'application de cette méthode :

Harley et Chidley (1978) ont utilisé la Programmation Dynamique Déterministe (PDD) afin de déterminer les lâchers optimaux à long terme pour un système de réservoirs et ont montré l'effet de la taille des données et du réservoir sur les résultats. Ces derniers comparés à ceux de la simulation ont été satisfaisants.

Karamouz et Houck (1987) ont présenté les principaux résultats issus de l'application de la Programmation Dynamique Déterministe (PDD) et celle Stochastique (PDS) et ont montré que la PDS est plus performante pour les réservoirs de capacité inférieure à 20% des apports annuels moyens.

Philbrick et Kitanidis (1999) ont vérifié à partir d'un exemple d'application l'erreur induite par l'approche déterministe de la Programmation Dynamique qui sous estime les consignes d'exploitation e.

En effectuant une analyse comportant deux fonctions objectifs différentes, et en appliquant la Programmation Dynamique Déterministe, Khan (1996) a élaboré la courbe consigne à court et à long terme pour les réservoirs Mangla et Tarbela en Pakistan.

Karamouz et al. (2003b) ont utilisé la Programmation Dynamique Déterministe afin de déterminer les lâchers optimaux pour le réservoir Lar en Iran.

Dong (2005) a conclu en appliquant la Programmation Dynamique Déterministe couplée à long terme et à court terme pour le réservoir Geheyan en Chine, la performance du système selon le choix du modèle de prévision des apports liquides.

#### 1.1.2.2 Programmation Dynamique Stochastique

Les systèmes de ressources en eau requièrent une prise en compte adéquate de la nature stochastique des différents paramètres qui interviennent dans l'optimisation (Vedula and Mujumdar 2005).

*Approche implicite (PDSI)*, Connue aussi sous le nom de la méthode de Monte Carlo (Celeste and Billib 2009), cette approche utilise une série temporelle des apports pour générer

plusieurs séquences d'apports synthétiques et résoudre par la suite le problème pour chaque séquence comme étant un modèle déterministe.

Cette méthode a été utilisée pour la première fois par Young (1967) afin d'obtenir les règles de gestion d'un réservoir.

Opricovic et Djordjevic (1976) ont utilisé la PDSI afin d'élaborer les consignes de gestion d'un système de réservoirs à but multiples situés dans le bassin de Vardar (Yougoslavie).

Mathlouthi et Lebdi (2008) ont étudié la fiabilité de la politique de gestion d'un barrage par la méthode de la Programmation Dynamique Stochastique implicite par événements secs.

Celeste, Curi et al. (2009) ont utilisé la Programmation Dynamique Stochastique Implicite afin d'en tirer les règles de gestion pour le système Coremas-Mãe d'Água (Bresil).

Kim, Heo et al. (2008) ont appliqué la Programmation Dynamique Stochastique Implicite combinée à un modèle d'Algorithmes Génétiques (NSGA-II) pour optimiser la gestion du réservoir Soyanggan (Korea).

Draper (2001) a présenté un modèle modifié de la PDSI (CALVIN) en incorporant le facteur risque pour la dérivation des règles de gestion pour plusieurs types de systèmes de réservoirs.

**Approche Explicite (PDSE)**, au lieu de considérer des séquences d'apports synthétiques, cette approche considère la distribution de probabilités des apports et génère des règles de gestion pour chaque combinaison stock-apport possible. L'application de cette approche donc nécessite la connaissance de la manière avec laquelle l'incertitude liée aux apports, aux précipitations etc. sera introduite (Rani and Moreira 2010).

### **Formulation du modèle**

L'équation réursive descendante de Bellman dans le cas de la Programmation Dynamique Stochastique Explicite s'écrit:

$$f_j^n(S_j) = \min_{R_j} \left[ \{B(S_j, S_{j+1}, I_j)\} + \sum_q P_{p,q}^j f_{j+1}^{n-1}(S_{j+1}) \right] \quad 1.4$$

Où :

$B(S_j, S_{j+1}, I_j)$  Coût ou contribution de la décision du lâcher  $R_j$  étant donné un stock  $S_j$  et un apport  $I_j$

$$f_{j+1}^{n-1}(S_{j+1})$$

Coût optimal cumulé à partir des états :  $j+1, j+2, j+3 \dots, N$

$P_{p,q}^j$  Probabilités de transition (la probabilité que l'apport à l'instant  $j+1$  soit  $q$  en étant  $p$  à l'instant  $j$  :

$$P_{p,q}^j = P [I_{j+1} = q | I_j = p]$$

Le terme ci-dessus joue un rôle très important dans la résolution de l'équation de Bellman étant donné que ceci concerne les hypothèses admises pour les variables aléatoires (Apports, Evaporation, Précipitations etc.) (Jha et al., 2008)

- **Indépendance des variables aléatoires**: Si l'indépendance de ces variables est admise, ceci implique l'inexistence d'une corrélation entre la variable à l'instant  $j$  et celle à l'instant  $j+1$  la probabilité de transition s'écrit alors :  $P_q^j = P(I_{j+1})$
- **Dépendance des variables aléatoires** : Si par contre l'hypothèse de l'indépendance des variables aléatoires n'est pas admise, ce qui est plus prudent (Nandalal and Bogardi 2007; Siqueira et al. 2006), ces dernières sont généralement considérées suivre une chaîne de Markov de premier ordre (Lloyd 1963; Phatarfod 1976).

Nombreux sont les ouvrages détaillant l'application de la Programmation Stochastique Explicite et Implicite pour la gestion des réservoirs e. g.(Loucks and Beek 2005; Loucks et al. 1981; Vedula and Mujumdar 2005)

Siqueira, Zambelli et al.( 2006) ont comparé différentes hypothèses concernant les apports liquides afin d'en tirer l'utilité d'admettre des hypothèses qui compliqueraient le modèle dans l'élaboration des règles de gestion des réservoirs Sobradinho et Furnas (Brésil) et ont conclu que stochastiques ou déterministes ces modèles donnent des résultats similaires.

De même, Jha, Yorino et al. (2008) ont étudié l'effet des différentes hypothèses concernant les apports liquides sur les règles de gestion d'un réservoir destiné à la production de l'électricité (Japon) et ont conclu que la dépendance des apports en les considérant suivre une chaîne de Markov d'ordre 1 donne des résultats meilleurs.

De nombreuses applications de la Programmation Dynamique Stochastique Explicite pour l'optimisation de la gestion des réservoirs sont présentes dans la littérature:

Oven-Thompson et al (1982) ont élaboré un modèle de gestion du réservoir Aswan (Egypt ) afin d'étudier le compromis entre la satisfaction des besoins en irrigation et ceux en électricité. Les résultats ont montrés que les règles d'exploitation optimisées pour les demandes agricoles augmentent de 11-20% la production mensuelle de l'hydroélectricité alors que les allocations d'irrigation d'été sont réduites de 25%. Une simple analyse coûts / bénéfice conclut que les gains obtenus dans l'hydroélectricité mensuelle sont presque égaux aux pertes dans le secteur agricole où les lâchers en été sont réduits de 5-10%.

Sule (1988) a utilisé la PDSE avec dépendance des apports liquides afin d'élaborer les règles de gestion du réservoir Shiroro (Nigeria). Les résultats de simulation recommandent que deux à trois turbines peuvent être mises en service avec un rendement de 45 à 50%.

Pabiot (1999) a utilisé la PDSE en admettant l'indépendance des apports et en introduisant une pondération afin de tenir compte de deux objectifs différents afin de définir les règles de gestion de la retenue collinaire El Morra (Tunisie). Ces règles de gestion ont été par la suite simulées pour apprécier leurs impacts sur l'évolution du réservoir et sur les événements dommageables éventuels qu'elles entraînent.

#### 1.1.2.2. La poisse de dimensionnalité " Curse of dimensionality "

L'élaboration simultanée des règles de gestion pour un système de plusieurs réservoirs ne peut se faire de manière isolée pour chaque réservoir. Pour la Programmation Dynamique, la discrétisation dense des états du système est faite afin de s'approcher le plus possible de l'optimum global, en appliquant cette discrétisation à un système de plusieurs réservoirs cela impliquerait l'augmentation exponentielle du nombre total des variables d'état discrétisés, ce phénomène est connu sous le nom de la « **poisse de dimensionnalité** ».

Plusieurs alternatives qui consistent en des dérivées de la programmation dynamique stochastique visant à maîtriser ce problème telles que la stratégie d'aggrégation/désaggrégation de Turgeon et Charbonneau (1998) et Serrat-Capdevilla et Valdès(2007).

Wang, Yushitani et al. (2005) ont présenté un modèle de gestion du système Tones (Japon) constitué des plusieurs réservoirs en parallèles à buts multiples basé sur la technique d'itération décomposition.

#### 1.2.2.3. Autres dérivées de la programmation dynamique stochastique

Ces dérivées de la PDS sont utilisées afin de surmonter le problème de « la poisse de dimensionnalité », les plus répandues d'entre elles sont : Programmation Dynamique

Incrémentielle IDP (Larson 1968; Nandalal and Bogardi 2007), Programmation Dynamique Stochastique Bayésienne (Karamouz et al. 2003a; Karamouz and Vasiliadis 1992; Mujumdar and Nirmala 2007), la Programmation Dynamique Différentielle à Contraintes (Murray and Yakowitz 1979). Folded Dynamic Programming (Kumar and Baliarsingh 2003). La Neuro-Programmation Dynamique (Bertsekas 2007) qui est une méthode récente qui utilise les réseaux de neurones afin de résoudre l'équation récursive de Bellman (Lamond et al. 2002).

### 1.3 Modèles de simulation

Wurbs (1991) a indiqué que les modèles d'analyse des systèmes sont communément classés comme étant descriptifs (simulation) ou prescriptifs (optimisation). Les modèles descriptifs décrivent le comportement du système pour une décision spécifiée, contrairement aux modèles prescriptifs qui déterminent quelles décisions doivent être prises pour parvenir à un objectif donné. Cependant, une simulation d'un système de réservoirs peut être intégrée à un algorithme d'optimisation, comme la Programmation Dynamique Stochastique. De même, un modèle d'optimisation peut être incorporé dans une simulation.

La simulation présente l'avantage de tenir en compte avec précision de nombreux paramètres, qui sont généralement simplifiés par les modèles d'optimisation (Goodier 1997). On peut citer plusieurs modèles de simulation qui sont fortement utilisés dans l'opération des systèmes de réservoirs, surtout les plus complexes d'entre eux.

Harvard Water Program présenté par Mass et al. (1962) est considéré comme l'un des pionniers qui ont introduit l'outil informatique dans la simulation des systèmes de ressources en eau.

Sans doute, les modèles HEC (Hydrologic Engineering Center) de l'USACE (U.S. Army Corps of Engineers) sont les plus utilisés et les plus anciens (1985; 1986; 2003) ces modèles libres sont mis à jour quotidiennement et admettent leur intégration avec des outils de spatialisation, ce qui rend leur utilisation très répandue dans l'analyse des systèmes hydriques.

Wurbs (1991) dans son rapport, cite d'autres modèles tels que BRASS, SUPER, SSARR développés par l'USACE ainsi que CRSS de USBR, DWRSIM, et PRISM de John Hopkins University, MITSIM du Massachusetts Institute of Technology (MIT) etc.

Notons que les modèles sus-cités sont des modèles de simulation « conventionnels » comme définis par Wurbs (1991), et sont basés sur l'application de l'équation de continuité du système à étudier et n'intègrent aucune forme d'optimisation.

Tableau 1.1 Modèles de simulation conventionnels (Wurbs 1991).

"CONVENTIONAL" RESERVOIR SYSTEM SIMULATION MODELS		
Simulation Model	Developer	Primary Purpose
Simulation of Flood Control and Conservation Systems (HEC-5)	USACE Hydrologic Engineering Center	Flood Control, Conservation, and Water Quality
Reservoir System Analysis for Conservation (HEC-3)	USACE Hydrologic Engineering Center	Conservation
Southwestern Division Reservoir System Simulation Model (SUPER)	USACE Southwestern Division	Flood Control and Conservation
Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation (SSARR)	USACE North Pacific Division	Flood Control
NPD Hydropower Models (HYSSR, HLDPA, and HYSYS)	USACE North Pacific Division	Hydropower
Basin Runoff and Streamflow Simulation (BRASS)	USACE Savannah District	Flood Control
Colorado River Simulation System (CRSS)	Bureau of Reclamation	Conservation and Water Quality
Department of Water Resources Simulation Model (DWRSIM)	California Department of Water Resources	Conservation
Potomac River Interactive Simulation Model (PRISM)	John Hopkins University and Potomac River Basin Commission	Conservation
MIT Simulation Model (MITSIM)	Massachusetts Institute of Technology	Conservation
Single Reservoir Operation Simulation (RESQ)	Private Consulting Engineer	Conservation
Interactive River System Simulation Model (IRIS)	Cornell University and International Institute for Applied Systems Analysis	Conservation
Reservoir Operating and Quality Routing Program (RESOP-II)	Texas Water Development Board	Conservation and Water Quality

### 1.4 Modèles combinés

La plus part des modèles actuels combinent l'optimisation et la simulation, pour l'analyse des systèmes de ressources en eaux tels que les systèmes de réservoirs en essayant de trouver les réponses chacune de son coté « simuler quoi ? » et « la solution est elle la meilleure ? (Loucks

and Beek 2005). Cette combinaison utilise à la fois la flexibilité de la simulation et l'efficacité de l'exploration des états des modèles mathématiques d'optimisation (Sechi and Sulis 2007).

Dans la littérature plusieurs modèles et applications utilisant cette approche : Jacoby et Loucks (1972) ont exploré plusieurs stratégies afin de combiner les deux modèles de simulation et d'optimisation pour le système Delaware River. Rani et Moreira (2010) ont présenté un état de l'art sur l'application des modèles combinés Optimisation-Simulation pour la gestion des systèmes de réservoirs.

A titre d'indication, nous pouvons citer quelques exemples récents de l'application de cette approche :

Khan et Tingsanchali (2009) se sont basés sur une approche Optimisation-Simulation afin de dériver les règles de gestion des réservoirs de Mangla et Tarbela (Pakistan) et en considérant l'évacuation de sédiments du réservoir et ont conclu qu'en modifiant les règles de gestion on peut maximiser les bénéfices nets

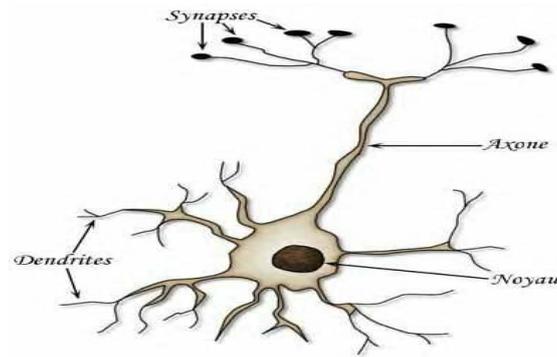
Zahraie et Hosseini (2009) ont appliqué un modèle de gestion intégré basé sur l'optimisation et simulation par algorithmes génétiques afin de dériver les règles de gestion du réservoir de Zayandeh-rud (Iran).

Matcha (2011) en appliquant la PDSE au réservoir Srisaïlam a évalué la performance des règles de gestion issues de l'optimisation grâce à une simulation du système considéré.

Ziaei et al. (2012) ont combiné le modèle d'optimisation LINGO le programme d'optimisation qui utilise la programmation linéaire et le programme de simulation HEC-Res-Sim (USACE 2003) afin de dériver les règles de gestion du réservoir Zayandeh-rud (Iran).

### **1.5 Réseaux de Neurones Artificiels**

Les mécanismes de cette approche reposent sur la réalité biologique en adoptant l'hypothèse que le comportement adaptatif et la faculté d'acquisition des connaissances chez les êtres vivants sont gérés par le système nerveux. Donc, l'objectif est de construire un modèle en s'inspirant du fonctionnement du système nerveux en ne connaissant qu'une partie des données.



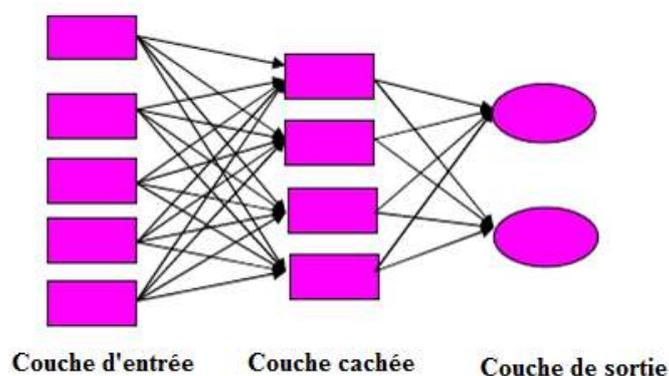
**Figure 1.3** Neurone biologique

Un neurone biologique (Figure 1.3) est une cellule qui se caractérise par :

- Synapses : points de connexion avec les autres neurones.
- Dendrites : signaux d'entrée.
- Axone : signal de sortie.
- Noyau qui active la sortie en fonction des stimuli en entrée.

Par analogie, un neurone formel (ou artificiel) est conçu comme un automate doté d'une fonction de transfert qui transforme ses entrées en sortie selon des règles précises.

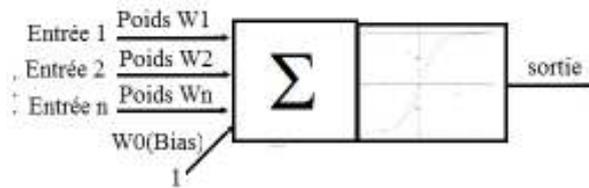
Un réseau de neurones est composé d'une succession de couches composées par un ensemble de neurones et reliées entre elles par un ensemble d'interconnexions pondérées et répétitivement modifiées pendant la phase d'apprentissage jusqu'à ce que la performance du réseau atteigne le niveau désiré. Il existe de nombreux ouvrages traitant de la théorie des réseaux de neurones et surtout leur applications aux problèmes de ressources en eau, nous renvoyons le lecteur à plusieurs références telles que (Abrahart et al. 2004b; Govindaraju and Rao 2000).



**Figure 1.4** Perceptron Multicouches (Multi Layer Perceptron)

La figure 1.4 représente un MLP à 3 couches, une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. Un aperçu sur un simple neurone (Figure 1.5) montre que chaque

neurone a un nombre d'entrées  $x_i$  associés à des poids  $W_{ij}$ . La somme  $\Sigma$  est effectuée sous forme d'une combinaison linéaire des entrées:



**Figure 1.5** Neurone simple

$$v = w_0 + \sum_{i=1}^n W_i x_i \quad 1.5$$

Où

$w_0$  est le biais

La sortie du neurone  $y$  est :

$$y = f(v) = f\left(\sum_{i=0}^N w_i x_i\right) \quad 1.6$$

Où la fonction  $f$  est la fonction d'activation du neurone.

Cette fonction peut être une fonction d'identité, sigmoïde, logistique etc. La fonction sigmoïde étant dérivable, est généralement utilisée afin de permettre l'application de l'algorithme de rétro-propagation, qui est une technique souvent utilisée et reposant sur le calcul du gradient appliqué à toute fonction dérivable.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

### **1.5.1 Apprentissage du réseau de neurones par rétro-propagation (backpropagation)**

Pour un réseau à apprentissage supervisé, la rétro-propagation (backpropagation) ou descente du gradient est la modification des poids  $W_i$  qui consiste à minimiser l'erreur quadratique de sortie  $E_p(W)$  (somme des carrés de l'erreur de chaque composante entre la sortie réelle (théorique)  $y_i^d$  et la sortie désirée (mesurée)  $y_i$  (Chauvin and Rumelhart 2013).

Les poids  $W$  et les biais  $W_0$  doivent être initialisés aléatoirement avant apprentissage (Khalil 2012).

Pour un réseau à (l) couches ayant (n) entrées et (m) sortie :

$$E(W) = \sum_{p=1}^T E_p(W) \quad 1.7$$

$$E_p(W) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [y_i^d(k) - y_i(k)]^2 \quad 1.8$$

$k$  représente le numéro d'itération.

$T$  Longueur de l'ensemble d'entraînement

Après avoir calculé l'erreur issue du premier vecteur d'entrée, on ajuste les poids jusqu'à ce que l'erreur soit inférieure à la valeur fixée à priori.

Les poids seront ajustés de la manière suivante :

$$W_{ij}^l(k+1) = W_{ij}^l(k) - \Delta W_{ij}^l \quad 1.9$$

$$\Delta W_{ij}^l = l_r \frac{\partial E(W)}{\partial W_{ij}^l(k)} \quad 1.10$$

$k$  le nombre d'itérations.

$l_r$  pas d'apprentissage, son choix définit la vitesse de convergence.

Afin d'augmenter la vitesse de convergence pendant l'apprentissage, un algorithme du second ordre tel que celui de Levenberg Marquardt (Ribeiro 2005) est également utilisé.

### **1.5.2 Simulation de l'opération du réservoir par Réseaux de Neurones**

Les Réseaux de Neurones ont récemment eu avec succès une large application dans le domaine des ressources en eau (Abrahart et al. 2004a; ASCE 2000a; ASCE 2000b). Pour la dérivation des règles de gestion des réservoirs :

Saad et al. (1996; 1994) ont utilisé les Réseaux de Neurones du type MLP et à Base Radiale RBF afin de remplacer les relations linéaires dans un problème de désagrégation pour la gestion du complexe La-Grande d'Hydro-Québec.

Raman et Chandramouli (1996) dans leur original travail, ont appliqué un modèle neuronal sur les résultats d'une optimisation par Programmation Dynamique Deterministe et Stochastique pour la gestion du réservoir Aliyar Tamil Nadu, Inde.

Chandramouli et Raman (2001) avec une approche similaire à la précédente, ont dérivé les règles de gestion du projet Parambikulam Aliyar, et ont conclu que la combinaison de la Programmation Dynamique Stochastique au Réseaux de Neurones donne des résultats meilleurs que ceux donné par la régression.

Cancellière et al. (2002) ont dérivé les règles de gestion pour le réservoir Pozzillo, Salso river destiné à l'irrigation basé sur une optimisation par Programmation Dynamique combinée aux Réseaux de Neurones.

Senthil et al. (2000) ont appliqué à la gestion du réservoir Dharoi et pour deux différents objectifs : l'un pour le contrôle des crues et l'autre pour la conservation, et ont conclu que l'utilisation des Réseaux de Neurones améliore la performance de l'optimisation.

Shahidi (2009) a évalué les combinaisons de plusieurs modèles basés sur la Programmation Dynamique et les Réseaux de Neurones pour la gestion du réservoir de Khorasan, Iran.

Senthil et al. (2013) ont comparé les résultats obtenus par Réseaux de Neurones, logique floue, et arbre de décision M5 en utilisant les lâchers optimum pour un réservoir destiné à l'irrigation et à la production électrique.

## **1.6 Conclusion**

Dans cet aperçu sur l'état de l'art dans la gestion des réservoirs, La Programmation Dynamique Stochastique seule ou combinée reste largement utilisée. Toutefois, la poisse de dimensionnalité limite son utilisation à des systèmes peu complexes. Aussi, une attention particulière ascendante portant sur l'utilisation des outils issus de l'intelligence artificielle, combinée aux méthodes classiques d'optimisation, surtout, lorsqu'il s'agit d'une gestion d'un système de réservoirs où la poisse de dimensionnalité est une contrainte pour la convergence.

## *Chapitre II*

### *Les Aurès, Réservoirs et Gestion*

## 2.1 Contexte physique de la région des Aurès

L'Aurès forme le massif principal de l'Atlas présaharien dans l'Algérie orientale, il est compris dans le triangulaire Batna, Biskra et Khenchela (Figure 2.1), et considéré comme une des régions les plus individualisées de l'Afrique du nord, non seulement en offrant un paysage d'une beauté grandiose, mais aussi, en étant le pays de toutes les résistances par sa constitution physique d'une part, et par le caractère de ces habitants d'une autre part. Cette individualité lui a permis d'adopter autrefois une économie autarcique, cette dernière a disparu depuis l'indépendance et le développement en train.

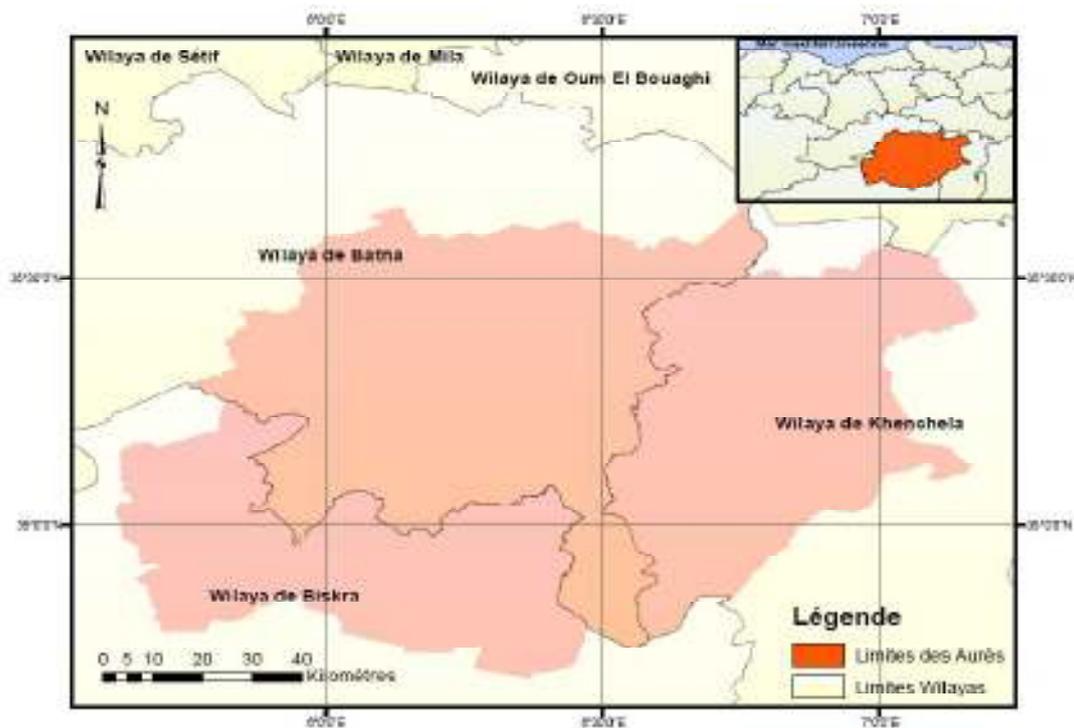


Figure 2.1 Limites du massif des Aurès (Benmessaoud 2009).

### 2.1.1 Synthèse géologique

Les Aurès sont limités par trois façades différentes Mitard (1941) :

- Les plateaux du nord comprenant toute la façade nord et les parties nord des façades ouest (plateau de Mac-Mahon) et est (plateau de Tamagra).
- Le Djebel Cherchar, dans la partie sud du bord est, entre Bled Kalaa-et-Trab et Khangat- Sidi-Nadji.
- L'arc subaurasien semi-désertique, au sud-ouest et au sud, fait alterner trois dépressions profondes (Plaine du Hodna, Plaine des Outayas et Zibans orientaux, de Biskra à Khangat-Sidi-Nadji) avec deux régions de limites moins nettes.

Du point de vue topographique, les traits dominants de la tectonique sont orientés dans l'ensemble sud-ouest ouest-nord est, les lignes principales, vallées et crêtes sont également orientées vers la même direction (Mitard 1941).

Le travail de référence qui a concerné le massif des Aurès est certes la thèse de R. Laffitte (1939), relativement ancienne, mais demeure d'actualité (Boulhais ; Meharzi 2010). Dans cet aperçu, nous nous baserons sur les travaux de synthèse antérieurs de (Benmessaoud 2009; Meharzi 2010).

#### 2.1.1.1 Anticlinaux

- Djbel Metlili culmine à 1496m, le Turonien est représenté par des masses de calcaire compact avec rares intercalations marneuses avec une superposition du Sénonien.
- La limite sud-est de la plaine d'El Kantara est constituée par une série de Djebels moyennement élevés où le Maëstrichtien et le Campanien formés de calcaires et de marnes noires-dominent.
- Le plus long chaînon du massif est celui du Djebel Lazreg, il s'étend de la plaine d'El Outaya au sud-ouest à celle de Médina au nord-est. Djebel Azreg proprement dit culmine à 1937m et il est formé d'une énorme masse de Portlandien (dolomies) et de Kimméridgien supérieur (marnes et calcaires marneux).
- L'Ahmar Khaddou constitue le crêt externe du grand val de Roufi; il domine la retombée aurásienne sur le piémont saharien (Tihay 1973), du point de vue lithologique, les calcaires du crétacé supérieur forment une falaise subverticale reposant sur une épaisse série de marnes à rares bancs calcaires. (Tihay 1973)
- Ichmoul – Chélia est coupé en deux par deux cassures qui encadrent la plaine de Médina. Ces deux Djebel qui culminent respectivement à 2066 m et 2326 m sont occupés progressivement du sud-ouest vers le nord-est par l'Albien, l'Aptien puis le Barrémien c'est-à-dire essentiellement de grès mélangés avec les marnes rouges et vertes ainsi que de calcaires, calcaires gréseux et dolomies (Meharzi 2010).

#### 2.1.1.2 Synclinaux

- El Kantara, un synclinal d'orientation est-ouest célèbre par ses gorges creusées par les eaux au niveau de son flanc Nord dans des formations d'âge Campanien, Maastrichtien et Éocène d'inclinaison sub-verticale.
- Oued Fédhala qui correspond à toute la dépression qui se situe au sud de Batna. Des lentilles de calcaire qui correspondent souvent à des gisements de Rudistes, intercalées dans les marnes Turoniennes formant des escarpements calcaires ou Kefs.

- Bouzina, très allongé, il se suit depuis le bassin Miocène d'El-Outaya jusqu'au bassin Néogène de Timgad, sous lequel il disparaît. Il est constitué du Crétacé supérieur et de l'Eogène autrement dit de calcaires Maëstrichtien, des poudingues au milieu des marnes et des calcaires. Le reste du Paléocène se compose de marnes blanches et de calcaires graveleux. Plus au nord, nous y trouvons le Pontien inférieur constitué de marnes, grès et sables rouges, sans oublier un peu de quaternaires dans sa partie centrale.
- Rhassira, celui-ci est le plus important du massif de l'Aurès. Il naît sur le bord sud-est du bassin d'El-Outaya et comporte essentiellement les dépôts de l'Eocène dans sa partie nord-est (Djebel Arhane et Ras Berdom) et dans sa partie sud-est (au pied du Djebel Ahmar Khaddou) soit des calcaires massifs du Londonien soit des marnes blanches, des calcaires du Paléocène. De l'Oligocène, visible surtout dans sa partie nord - ouest au pied du Djebel El-Krouma et du Djebel Takhounnt où le synclinal est très régulier et formé de marnes rouges à gypse grès, conglomérats , brèches.

De taille plus réduite, on distingue le synclinal d'Aoures dans la partie nord-est du massif de l'Aurès, et celui de Tirhéza Ferradj /Djehfa pied sud et parallèle à l'anticlinal de Khenchela.

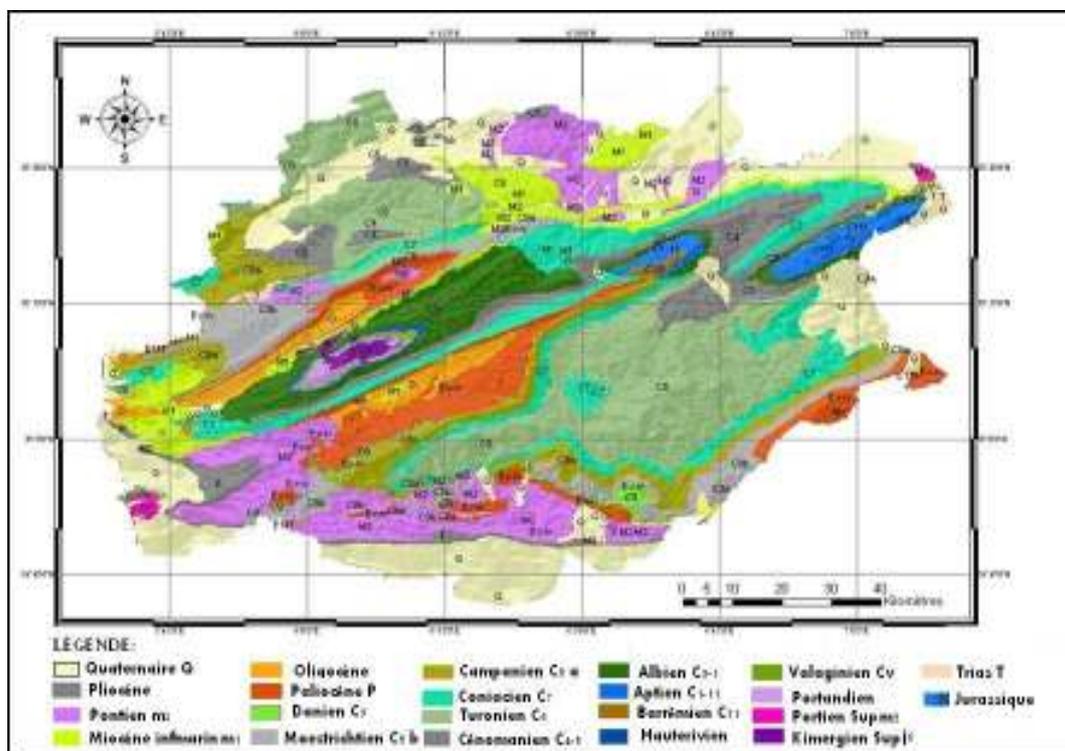


Figure 2.2 Synthèse géologique des Aurès proposée par Benmessaoud (2009)

### 2.1.1.3 Hydrographie : Ecoulement endoréique

Le massif de l'Aurès comprend six bassins versants, tous à écoulement endoréique, à écoulement permanent ou temporaire dans deux directions générales soit quatre au sud et trois au nord :

- Oued El Arab d'une superficie de 2600 km<sup>2</sup>, il résulte de la confluence de l'oued Mellagou et de l'oued Labiod qui prennent leurs sources respectivement au Djebel Chélia et au Djebel Aïdel. Il représente la limite exacte du massif qui le délimite des monts des Nememchas.
- Oued Labiod totalisant une superficie de près de 1300 Km<sup>2</sup>, il représente la confluence de torrents descendants des pentes du Chélia et d'Ichemoul qui traversent Tighanimine, Rhoufi, et M'chouneche et se jetant à la fin dans les gorges du barrage de Foum El Kherza (189m).
- Oued Abdi d'une superficie de près de 600 km<sup>2</sup> prenant sa source au pied du Djebel Mahmel qui culmine à 2321m pour rejoindre l'Oued Biskra dans le sud.
- Oued Fedhala qui se situe plus à l'ouest, au pied du Djebel Ich Ali et qui culmine à 1809m.
- Oued Taga prenant sa source à djebel Mahmel. Au nord de Timgad, il reçoit l'oued Reboa endigué par le barrage de Koudiat M'daouar.
- Oued Boulefreis qui prend sa source dans le Djebel Chélia à 2300m d'altitude Il descend en traversant le Djebel Islef Bou el Arouah, vers la plaine de Boulefreis où il et se perd dans le Garâat el Tarf soixante-dix kilomètre plus loin.
- Oued Issaoul il prend sa source dans le massif de l'Aurès au Djebel Aïdel, à sa sortie de l'Aurès, il prend le nom d'El Gueiss où l'ancien barrage de Foum El Gueiss est érigé.

### **2.1.2 Aperçu climatique**

La mesure quantitative et qualitative des éléments du cycle hydrologique et la mesure des autres caractéristiques de l'environnement qui influent sur l'eau constituent une base essentielle pour une gestion efficace de l'eau". (Déclaration de Dublin, 1992). Donc, une gestion efficace de l'eau se trouve directement influencée par les nuances du climat, plus spécialement par deux paramètres déterminants: pluviométrique (conditionnant l'alimentation en eau des rivières) et évaporométrique. (Mebarki 2004).

Les caractères climatiques de la bordure nord et de la bordure sud des Aurès diffèrent profondément, la température est beaucoup plus élevée et les pluies sont beaucoup moins abondantes à Biskra qu'à Batna Busson (1900).

Le réseau pluviométrique dans la région est assez étoffé puisqu'il compte plus de 14 stations à l'intérieur comme à l'extérieur du massif. Cependant, l'instabilité de fonctionnement de ces stations, les lacunes et les erreurs entachent les séries d'observations (Mebarki 2004).

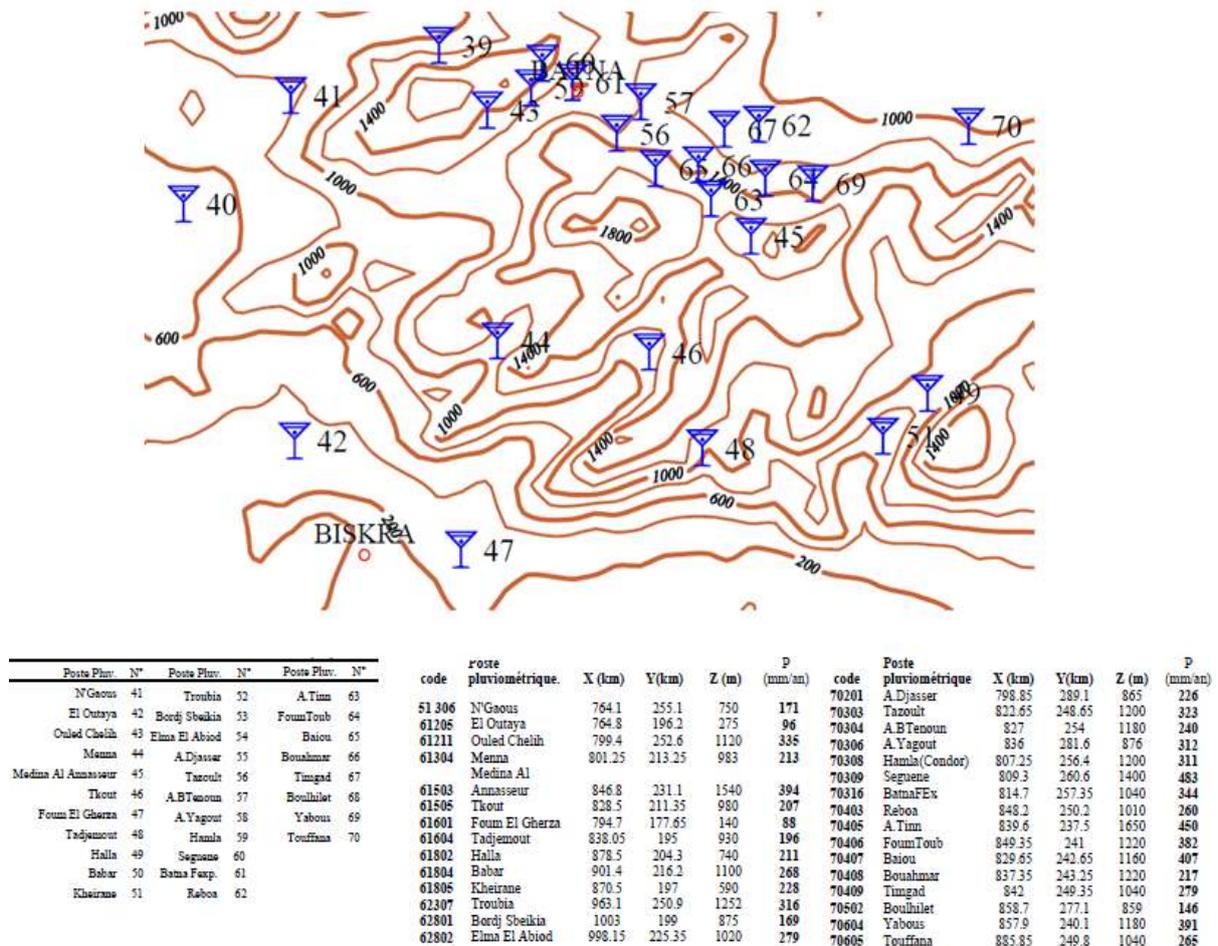


Figure 2.3 Extrait de la carte établie par (Mebarki 2004) localisant les stations pluviométriques et codes correspondants relatifs à la région des Aurès.

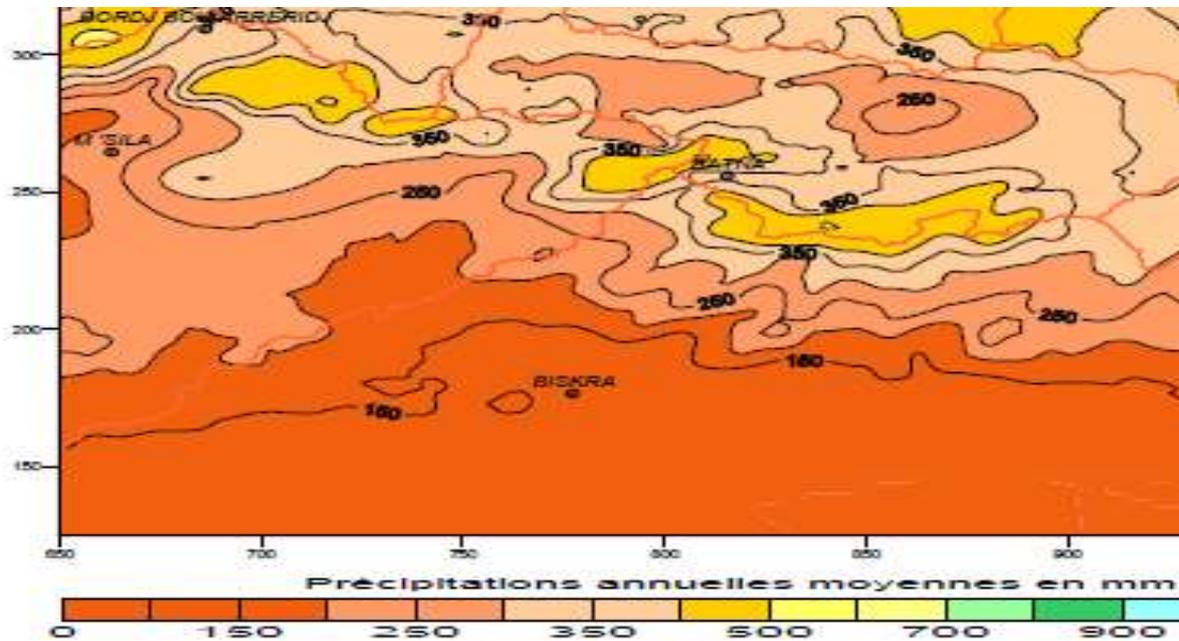
2.1.2.1 Précipitations

La répartition spatiale des pluies obéit à deux paramètres à savoir ; la répartition hypsométrique et la disposition du relief nord-est/ sud-ouest (Meharzi 2010).

Meharzi (2010) a fait ressortir trois secteurs :

- Un secteur humide correspondant aux montagnes et aux sommets dépassant 1800 m d'altitude.
- Un secteur à précipitations moyennes oscillant entre 400 et 800 mm/an et correspondant au versant nord du massif.

- Un secteur sec dont les précipitations moyennes oscillent entre 150 et 400 mm/an et se répartissent aussi bien à l'ouest qu'au sud du massif.



**Figure 2.4** Extrait de la *Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien* établie par l'ANRH (Mebarki 2004)

### 2.1.2.2 *Facteur thermique*

La température joue un rôle très important dans le bilan hydrologique, car elle influence l'évaporation, facteur prépondérant du bilan, de plus, elle conditionne la croissance, l'activité végétative, la reproduction des végétations.

Suite à une analyse en trois étapes, Mebarki (2004) a établi une cartographie des isothermes annuels en fonction du relief dans la région de l'est (Figure 2.5). De cette carte, on peut constater que les moyennes annuelles des températures sur l'ensemble de la région des Aurès se situent entre 11° aux sommets du massif et 15° dans les hautes plaines et atteignent 20° C au piémont sud.

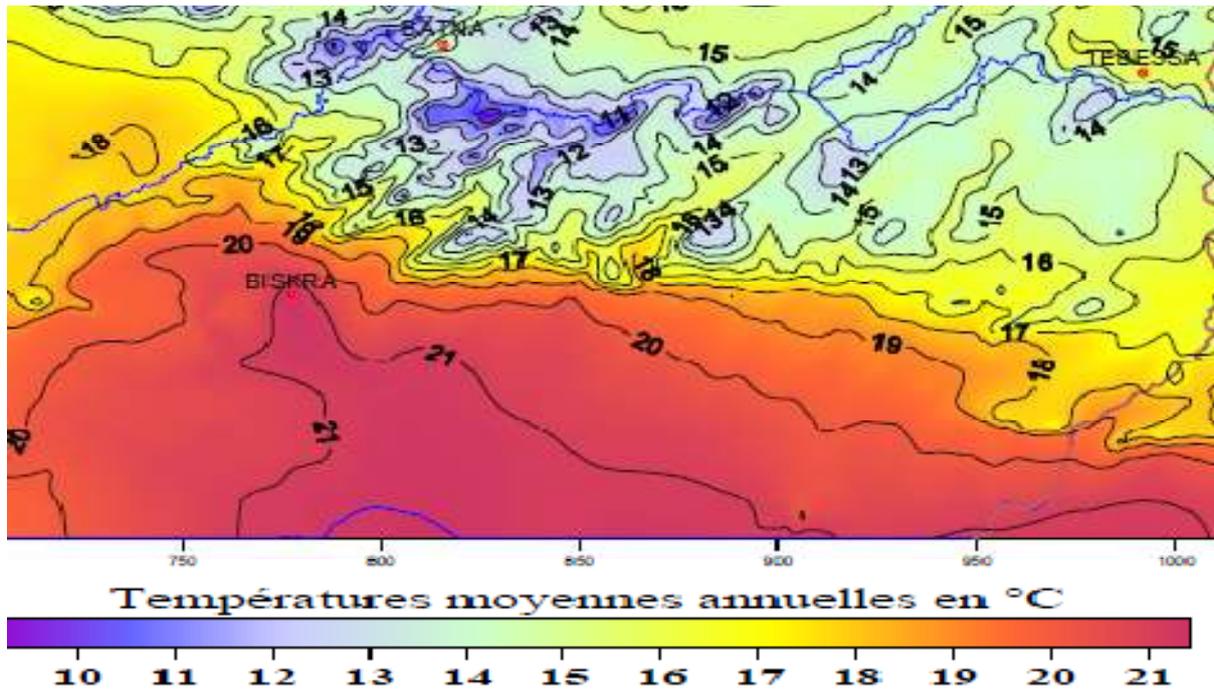


Figure. 2.5 Extrait de la carte des températures moyennes annuelles (Mebarki 2004)

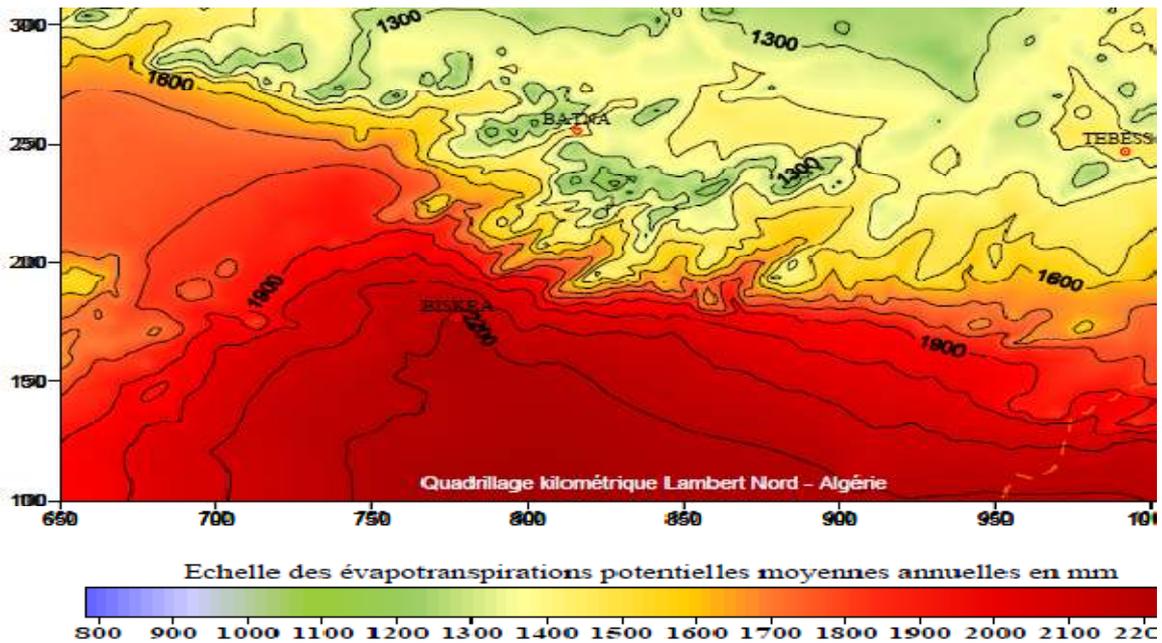
### 2.1.2.3 Evapotranspiration

Faisant appel aux seules observations des températures moyennes mensuelles, donnée climatique disponible, ainsi que la mise au point de deux coefficients correctifs, mensuel ( $K_m$  compris entre 0,90 et 1,22) et régional ( $K_r$  lu sur une carte d'isolignes variant entre 0,85 et 1,25), et enfin la prise en compte de la durée théorique des jours du mois ( $H$  en heures par mois), facteur variable avec la latitude, ont permis à l'Agence Nationale des Ressources Hydriques d'aboutir à la formule suivante de l'E.T.P. (en mm par mois) :

$$E.T.P.ANRH = K_r * K_m * (H - 187) * (0,032 * t + 0,077)$$

Sur la base de cette formule, Mebarki (2004) a construit à partir de la somme des 12 grilles des *E.T.P.* mensuelles la carte de l'*E.T.P.* annuelle moyenne (Figure 2.6).

Sur cet extrait, on peut distinguer les valeurs comprises entre 900 et 1200 mm, qui épousent principalement les sommets les plus élevés de l'Aurès, les hautes plaines se caractérisent par des courbes de 1300 à 1500 mm. Le piémont sud des Aurès est balayé par des lames d'évapotranspiration comprises entre 1600 et plus de 2200 mm.



**Figure 2.6** Extrait de la carte d'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne de l'Est algérien (Mebarki 2004)

#### 2.1.2.4 *Le vent*

Le massif de l'Aurès se trouve juste à la conjonction des deux courants atmosphériques que sont les courants nordiques polaires et les courants subtropicaux qui sont canalisés par les massifs montagneux que sont le Belezma et l'Aurès ainsi que par les monts qui forment les vallées, ce qui justifie la prédominance des vents dirigés dans la direction sud-ouest un peu moins de nord-est (Meharzi 2010).

#### 2.1.3 *Couvert végétal*

La connaissance du couvert végétal d'une région nous renseigne sur son aptitude à l'écoulement, et surtout sa vulnérabilité à l'érosion qui est un facteur décisif de la durée de vie des retenues et réservoirs. La région des Aurès, malgré qu'elle a parachevé une dégradation multiséculaire de son couvert végétal, demeure riche en espèces végétales qui sont principalement conditionnées par l'altitude.

Plusieurs études ont concerné la cartographie du couvert végétal du nord de l'Afrique nous citerons celle établie par Gaussen et Vernet (1958) complétée par la suite par Mebarki (2004) (Figure 2.7). Sur cette carte, on peut constater que le couvert dans la région d'étude est particulièrement conditionné par le facteur altitudinal.

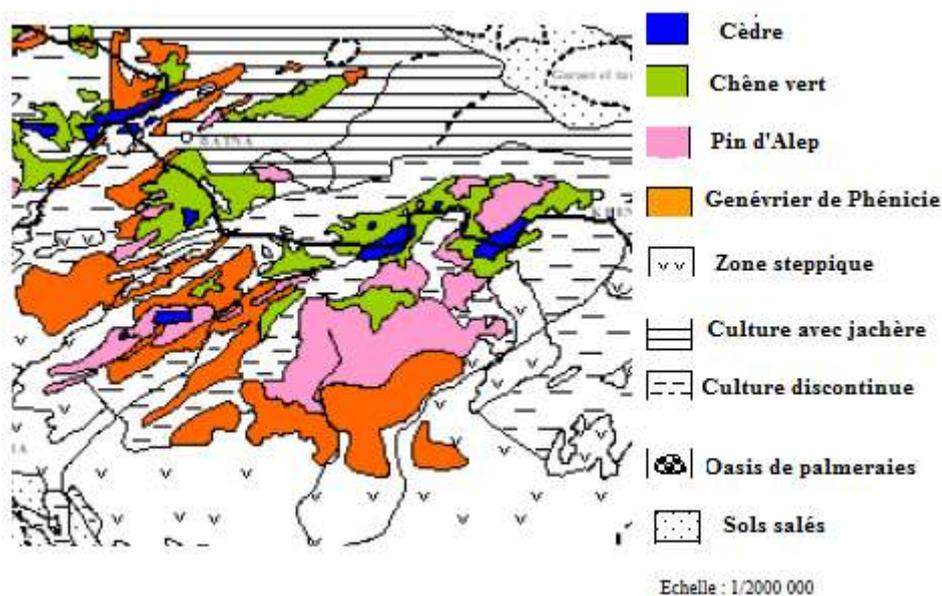
Le cèdre présent au-dessus de 1400 m (Djebel Chélia), et dans le massif de Belezma, caractérisés par une longue durée d'enneigement.

Le chêne vert sur le versant nord, succède au cèdre, au-dessous de 1400-1500 m, par exemple sur le Djebel Chentgouma et à la base du versant nord du Chélia (Ballais 1989).

La forêt de pins d'Alep occupe des espaces considérables, en particulier sur le versant sud et dans l'est où le bloc de la forêt des Beni Meloul, une des plus belles d'Algérie.

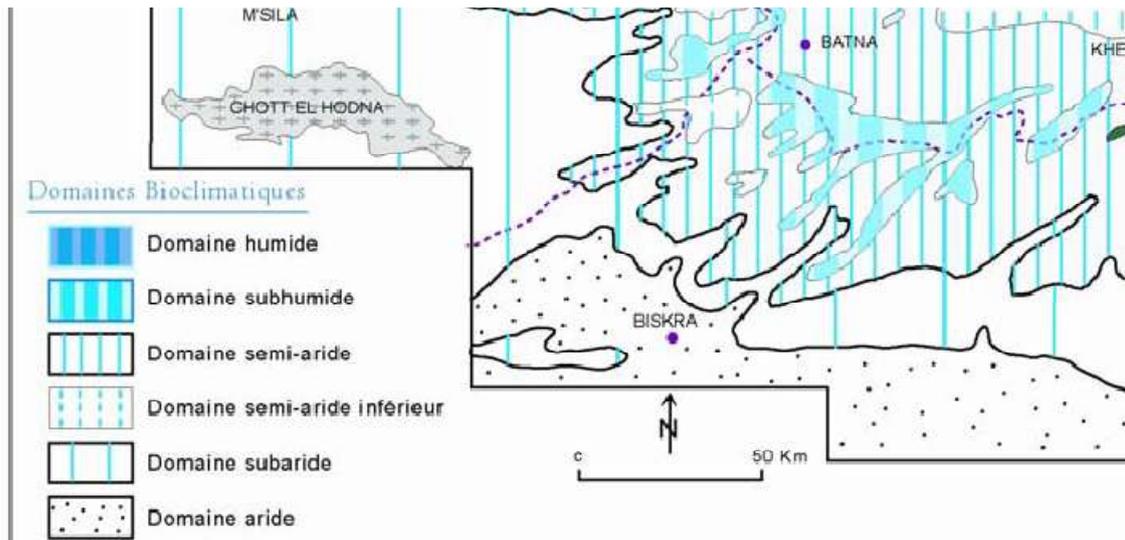
Les « forêts-steppes » de genévrier qui font figure de paysage steppique, se rencontrent principalement dans la partie occidentale des Aurès. Elles couvrent l'essentiel du versant sud du massif, en-dessous de 800 à 1100 m selon l'exposition et elles couvrent la totalité des deux piémonts. Constituant ainsi la plus vaste formation végétale (Ballais 1989).

Les Oasis qui doivent leur puissante originalité à la maîtrise de l'eau. C'est une végétation, totalement artificielle mais très riche. L'arbre privilégié, c'est le palmier-dattier, qui apparaît vers le sud dès El Kantara, Menaâ et Rhoufi.



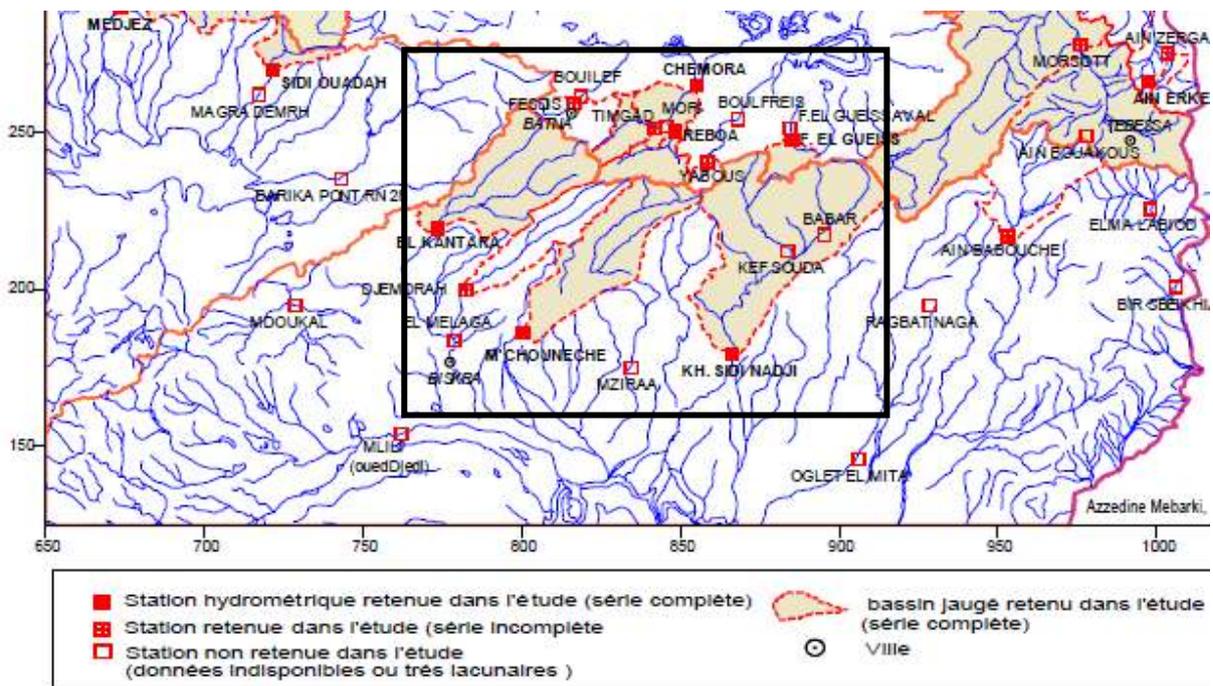
**Figure 2.7** Extrait de la carte établie par Gaussen et Vernet (1958) et complétée par Mebarki (2004).

De tout ce qui précède, on peut conclure sur le plan climatique, qu'avec des altitudes élevées et un couvert forestier relativement dense, et des précipitations supérieures à 600 mm environ, les monts des Aurès sont à climat subhumide (Mebarki 2004). Les piémonts sont à dominance semi aride avec une bande subaride étroite du piémont méridional du massif au sud faisant place à l'aride au sud (Figure 2.8).



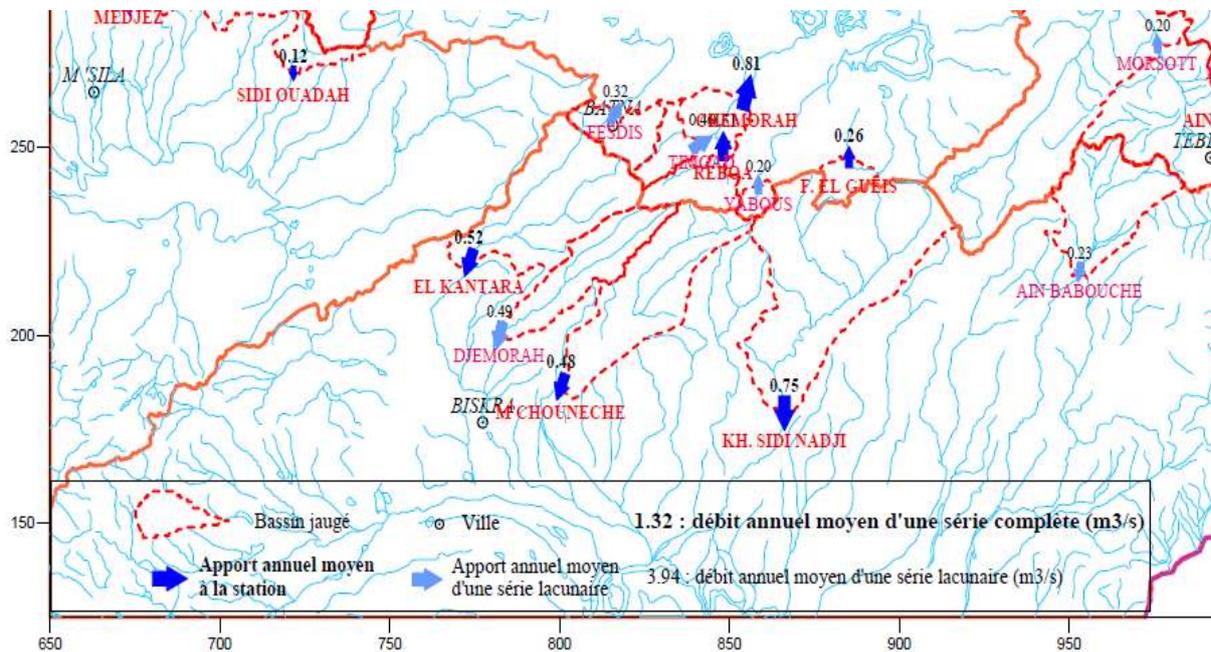
2.1.4 Apports annuels des cours d'eau

L'étude concernant les apports des cours d'eau dans la région des Aurès a été menée par Mebarki (2004). Ceci, dans le cadre de l'étude hydrologique des bassins concernant l'est Algérien tout en prenant le soin d'une sélection d'un nombre de stations hydrométriques représentatives (Figure 2.9). Cette étude a permis d'évaluer les débits acheminés par plusieurs oueds de la région. Ces derniers sont relativement faibles et ce, malgré la contribution des zones montagneuses (Mebarki 2004).



En effet, l'oued El Arab drainant une superficie de 2 085 km<sup>2</sup> vers le chott Melrhir, enregistre un module de 0,67 m<sup>3</sup>/s à la station de Khangat Sidi Nadji. Parallèlement à celui-ci, les oueds Labiod à M'chounèche et El Hai à El Kantara de superficies comparables (1 050 et 1 170 km<sup>2</sup>) écoulent des débits très voisins (0,48 m<sup>3</sup>/s et 0,52 m<sup>3</sup>/s),

Sur le piémont nord de l'Aurès, l'oued Chemora, alimenté à l'amont par l'oued Reboa, apporte un débit de 0,81m<sup>3</sup>/s en drainant une superficie de 765 km<sup>2</sup>. Le petit bassin de l'oued Gueiss avec une superficie de 144 km<sup>2</sup> fournit un apport moyen de 0,26 m<sup>3</sup>/s alimentant le barrage de Foum El Gueiss, situé à l'aval de la station de jaugeage (Figure 2.10).



**Figure 2.10** Extrait de la carte des apports annuels moyens des bassins jaugés de l'Est algérien (période moyenne : 1972/73-1983/84) (Mebarki 2004).

### 2.1.5 Les crues dans la région des Aurès

La maîtrise des crues est un élément essentiel pour la durabilité des barrages réservoirs. Car outre les risques qu'elles constituent sur la sécurité des ouvrages, elles sont les principales causes de la sédimentation en transportant les plus grands volumes de sédiments.

Vue le gradient d'altitude assez élevé entre les monts et les sebkhas ou chotts, aussi, la nature des terrains et le couvert végétal faiblement dense surtout au niveau des piémonts, la région des Aurès est très concernée par l'agressivité des crues, sachant que dans la plus part des cas, les crues qui y surviennent sont des crues éclairs de fin de saison qui s'abattent sur des formations meubles, friables et desséchées par les fortes températures.

Benkhaled, Rezgui et al. (2013), en analysant les événements de crues enregistrés entre 1950 et 2010 concernant l’oued Labiod ont montré l’effet saisonnier sur l’occurrence des crues se produisant la plus part du temps en automne (Figures 2.11 ; 2.12) et que l’intensité de ces crues est accentuée en été.

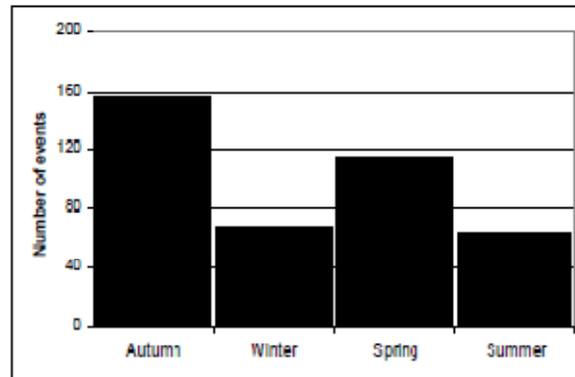


Figure 2.11 Effet saisonnier des crues observées à Foug El Kherza (Benkhaled et al. 2013)

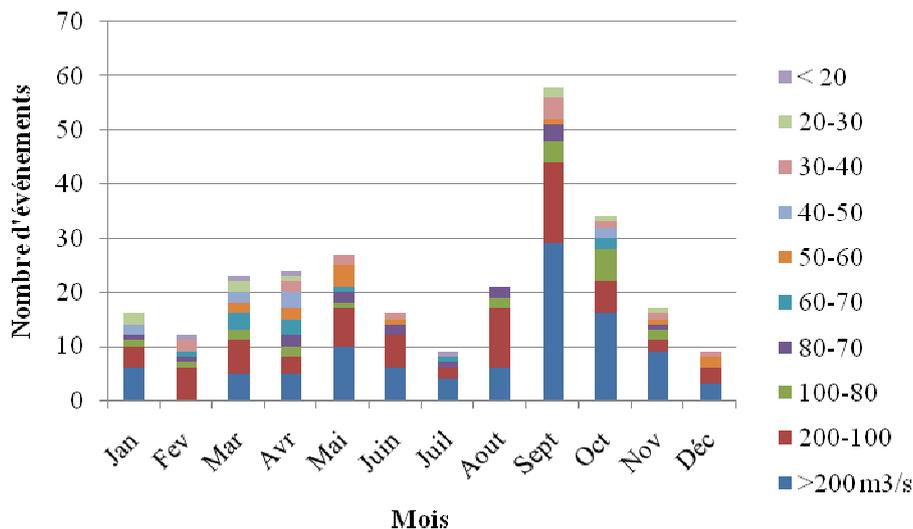
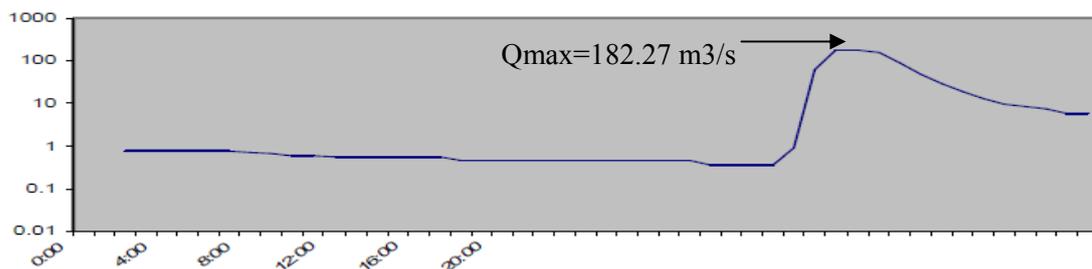


Figure 2.12 Variation mensuelle des classes de crues supérieures à 20 (m<sup>3</sup>/s) à Foug El Kherza (Benkhaled et al. 2013)

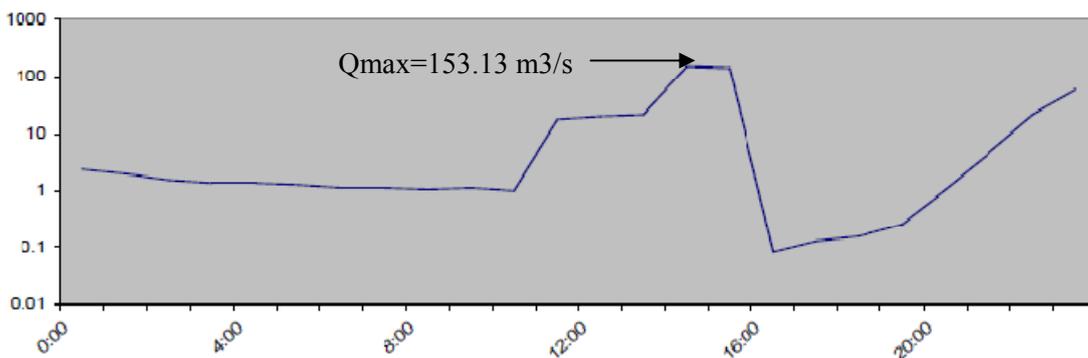
Boumssenagh (2007), dans le cadre de son étude concernant le risque d’inondation de la ville de Biskra, a étudié les crues dans les bassins d’El Kantara et Djemourah et distingue deux types de crues soient : les crues de saison froide durant les mois de février et de mars générées par des précipitations longues, régulières et continues présentant des intensités moyennes à élevées et les crues de saison chaude, brèves et localisées caractérisées par une durée et une extension spatiale plus faible que celle des crues de saison froide. La même constatation peut être extraite concernant les hydrogrammes de crues, Chemorah, Foug El Gueiss, et Foug El Kherza, pendant les saisons chaudes, les pointes sont nettement visibles (Fig. 2.13 ; 2.14 ; 2.15).

Belagoun et Boutoutaou (2013), dans le cadre d'une étude des crues concernant les bassins 05,06, et 07 concluent d'après les crues enregistrées, que les différents bassins de la région ne sont pas affectés de la même puissance par les mêmes crues. Ceci concerne aussi bien les bassins du piémont nord que ceux du piémont sud des Aurès, ce qui démontre la nature localisée des crues qui y surviennent particulièrement en saison chaude.

En analysant les hydrogrammes des crues enregistrés à Foum El Kherza de 1950 à 2010, Rezgui (2014) note que la totalité des crues très aiguës se sont produites en septembre, et que toutes les crues dont le débit max instantané est supérieur à 1000 m<sup>3</sup>/s présentent une forme aigüe très prononcée telles que les crues du 10 octobre 1966, 22 Avril 1995 et 30 septembre 2001.

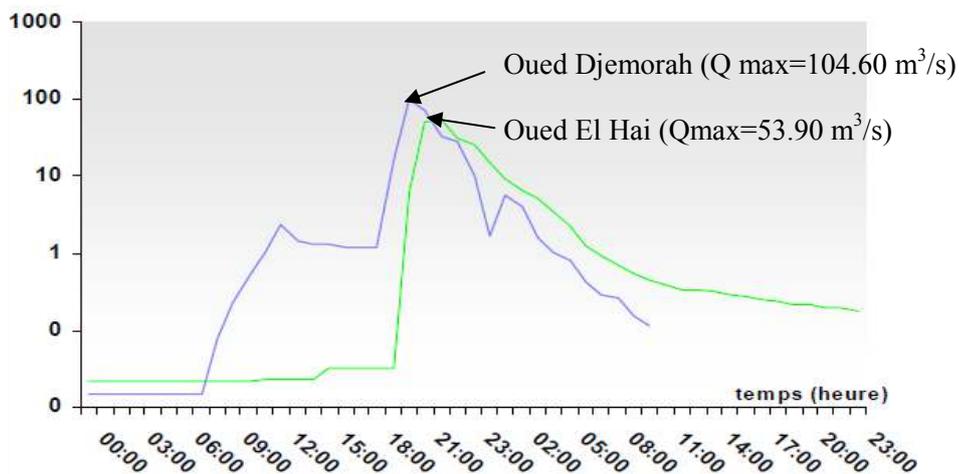


Crue du 03/09/1981

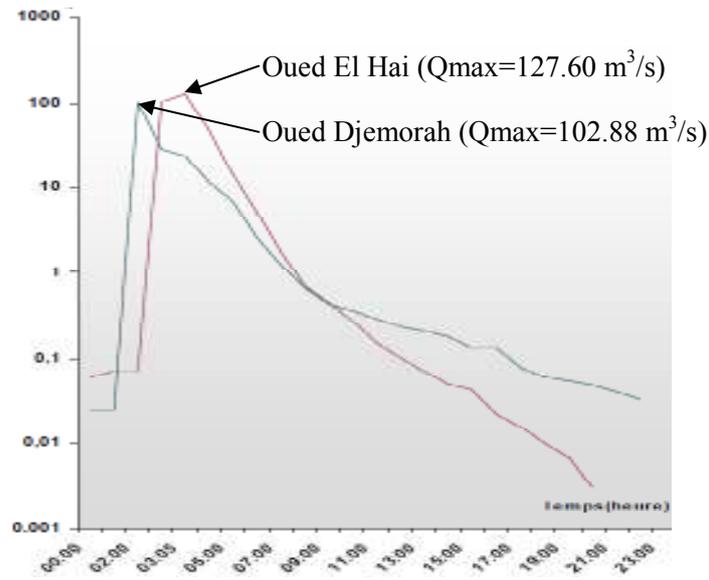


Crue du 14/03/1996

**Figure 2.13** Crues observées à la station de Chemorah (Belagoun 2012)



Crue du 22/12/1981



Cruce du 29/08/1984

Figure 2.14 Cruces observées aux stations d’El Kantara et Djemorah.(Boumssenegh 2007)

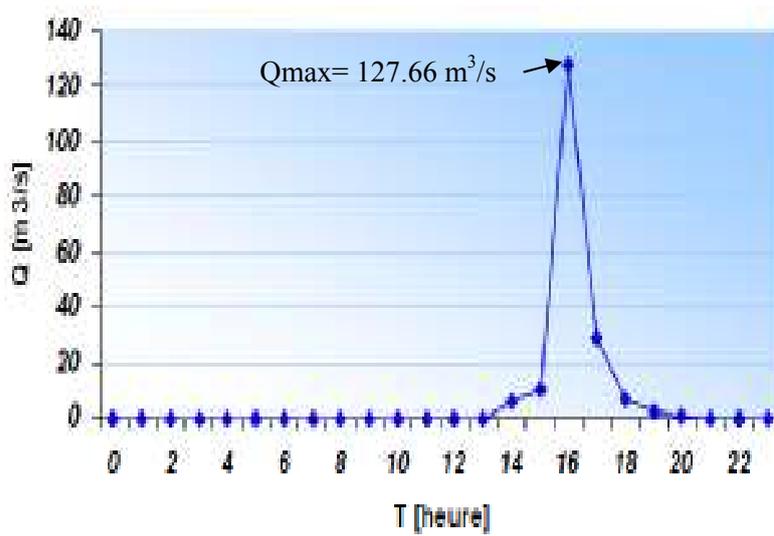
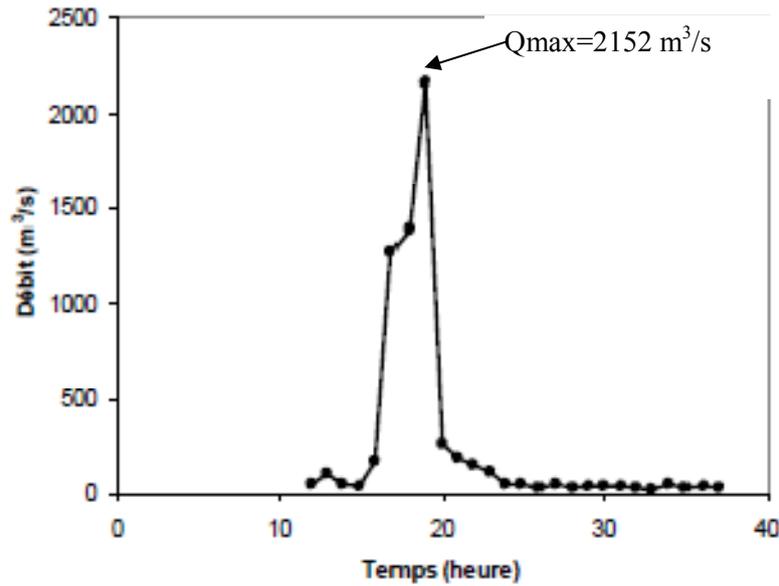
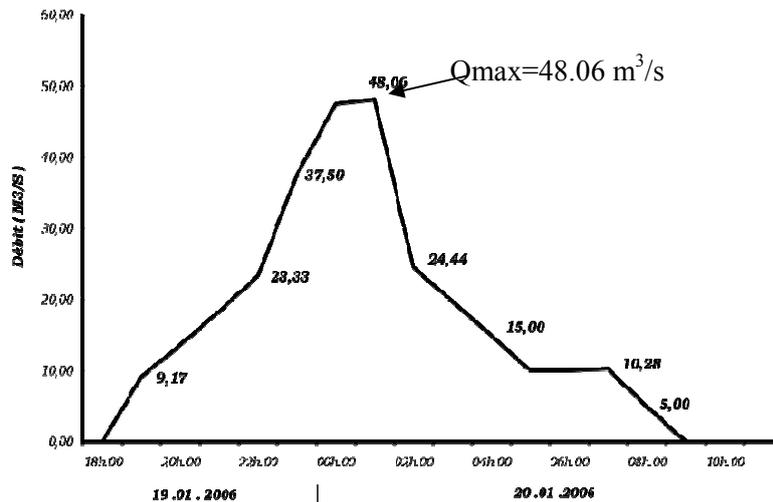


Figure 2.15 Cruce observée le 03/08/1990 à Oued Foug El Gueiss (Mehemai 2009)



Cruce du 10/10/1966 (Rezgui 2014)



Cruce du 19-20 janvier

Figure 2.16 Cruces observées à Foum El Kherza

La crue observée le 15 mai 2011 (figure 2.17) à Foum El Kherza a été très rapide, avec un débit maximal de 413.60 m³/s. Du fait du comblement de la retenue par la vase, il y a eu surverse sur la digue, heureusement que cette dernière est en béton. Ce qui nous amène à réfléchir sur le sort des nouveaux barrages érigés dans la région et qui sont en terre compactée et seront sans doute envasés.

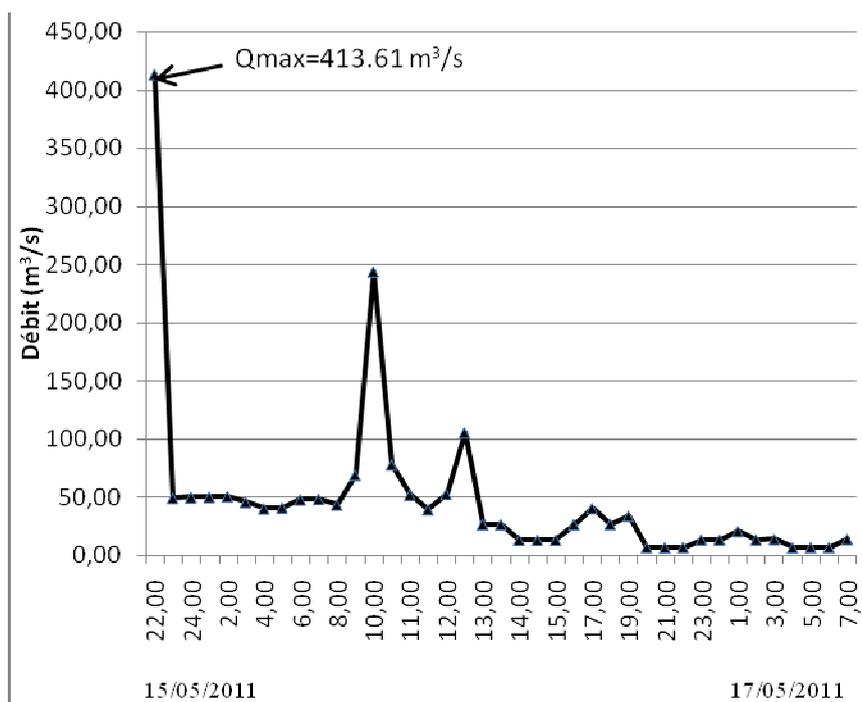


Figure 2.17 Crue observé à Foum El Kherza le 15/05/2011.

Tableau 2.1 Quelques crues enregistrées dans les Aurès (Belagoun 2012)

oued	Date de maximum	Qmax	oued	Date de maximum	Qmax	oued	Date de maximum	Qmax
Labiod (station M'Chounche 06.15.02)	04-sept-72	92.50	Soultez (station Timgad Gue 07.04.01)	06-oct-69	155	Morri (station 07.04.04)	04/09/1972	16.72
	26-août-78	131.00		07-oct-71	103		14-oct-74	7.80
	03-sept-79	148.00		04-sept-72	136		01-juil-76	15.64
	25-juil-81	178.20		02-oct-78	242	02-avr-81	18.16	
	31-oct-82	242.15		02-juin-82	145	02-juin-82	17.73	
	29-août-84	129.00		11-nov-82	140.5	27-mai-89	10.65	
	10-oct-84	127.66		27-mai-89	291.4	Chemorah (station 07.05.01)	29/09/1969	127.60
El Hai (station El Kantara code 06.12.01)	01-oct-69	294		28-mai-90	136		02-juin-81	220.80
	29-sept-70	137.1		15-oct-95	218.06	Chemorah (station 07.05.01)	30-sept-86	163.50
	27-nov-71	130.6		17-sept-97	136		31-mars-91	183.40
	01-juil-76	294		25-août-02	180		20-sept-97	231.00
	18-mai-77	272.6		12-sept-04	136		24-mars-98	104.75
	02-sept-79	467	EL GUEISS (station 07.07.02)	02-juin-70	34.6	Reboa (station 07.04.03)	18/09/1979	227.60
	30-sept-86	147		24-mai-72	53.66		11-nov-82	186.20
Djemorah (station Djemorah code 06.13.01)	22-déc-81	101.6		06-oct-72	66.14		04-oct-88	162.00
	25-juin-81	19.94		15-août-78	72.8		01-sept-89	218.00
	31-oct-82	314.8		12-mai-82	70.3		19-déc-00	281.00
	29-août-84	102.88		03-août-90	127.66		25-juil-01	166.40
	21-sept-89	82.7						
Al Arab (station Khanget Sidi Nadji code 06.18.01)	04-sept-89	468.00						
	30-juin-91	374						
	30-sept-94	175.8						
	15-mars-96	186						
	21-août-97	147.2						

### 2.1.6 Apport solide

Malgré les luttes antiérosives qui sont entreprises lors de toute projection d'un ouvrage hydrotechnique, surtout celle d'un ouvrage de retenue, l'érosion hydrique reste le problème majeur qui contre une gestion durable des barrages réservoirs.

Comme pour les apports liquides, le développement du réseau hydrométrique géré par l'ANRH, a permis l'acquisition d'un nombre important de données sur les transports solides en suspension des oueds algériens. Ce qui a favorisé des études quantitatives assez poussées sur l'érosion actuelle et les écoulements solides.

A cet effet, beaucoup de travaux ont concerné l'étude du transport solide dans des bassins de la région des Aurès (Baazi 2002; Berkane and Yahiaou 2007; Boumssenegh 2007; Bourouba 1996; Mehemaï 2009; Tatar et al. 2012).

Dans l'étude menée par Bourouba (1996), onze stations ont été sélectionnées, dont quatre ont concerné la région des Aurès soient : celles de M'chounèche et Khenguet Sidi Nadji (Chott Melrir), Foum El Gueïss et Reboa (Hauts plateaux constantinois). Ces stations présentaient une série d'observations hydrologiques communes (pluviométrie, débits liquides et turbidité) d'une période allant du 1<sup>er</sup> septembre 1975 au 31 août 1979. Le traitement graphique et l'analyse géographique des phénomènes mesurables à savoir : la pluie, les débits liquides et la turbidité ont fait apparaître les différents régimes de transport solide caractérisant les régions étudiées.

L'automne est la saison d'érosion maximale pour le bassin de l'oued Labiod avec un Transport Solide Spécifique maximal de  $540 \text{ t/km}^2$  et une moyenne annuelle de  $400 \text{ t/km}^2$ . Notons que cette valeur est proche de celle estimée à partir d'un polynôme du quatrième degré en fonction du débit liquide par Baazi (2002) qui est de  $344 \text{ t/km}^2$  sur une série s'étalant de 1974-1988 de débits solides et débits liquides à la station de M'chounèche.

Aussi, l'automne est la saison d'érosion maximale pour oued Reboa avec un TSS max de  $1940 \text{ t/km}^2$  et celui de l'oued Arab avec un TSSmax de  $849 \text{ t/km}^2$ . L'été est la saison d'érosion maximale pour le l'oued El Gueïss avec un TSSmax de  $354 \text{ t/km}^2$ . Ces fortes valeurs de Transports Solides Spécifiques sont expliquées par les orages dans les périodes de l'été et de l'automne.

Au bassin d'EL Kantara ( $1660 \text{ km}^2$ ), le TSSmoyen est de  $366 \text{ t/km}^2$  sur une série de données s'étalant de 1967 à 1993 et celui de Djemoura ( $586 \text{ t/km}^2$ ), il a été estimé à

1413 t/ km<sup>2</sup> ceci dans l'étude menée par Boumssenegh (2007).

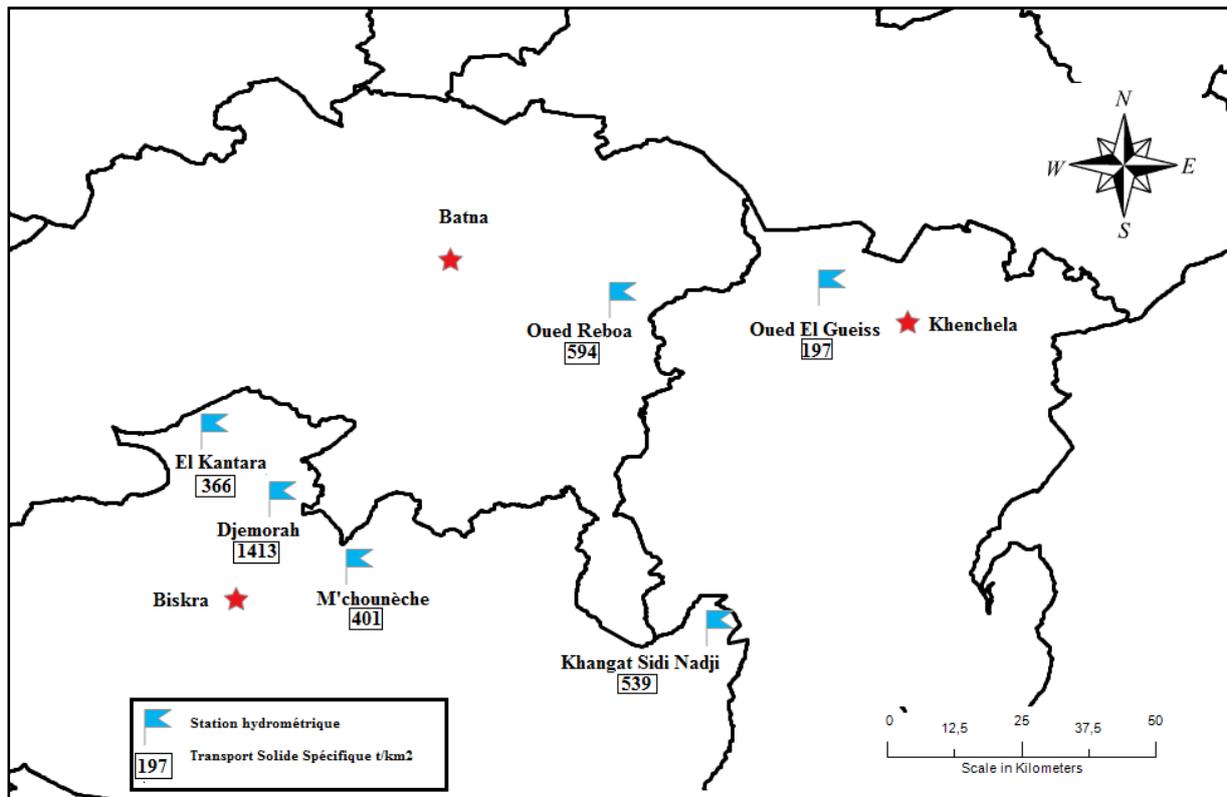
**Tableau 2.2** Valeurs moyennes et maximales saisonnières du TSS. (Bourouba 1996).

Station	Automne				Hiver				TSS moy (1)	
	TSS max (1)	Année	TSS moy (2)	Ecart (1)/(2)	TSS moy (1)	TSS max (1)	Année	TSS moy (2)		Ecart (1)/(2)
Reboa	194	72-73	351	5.5	86	29	73-76	6	4.8	2
Foum El										
Gueiss	342	72-73	61	5.6	14	15	72-73	3	5.0	1
M'chounech	540	75-76	191	2.8	133	310	76-77	46	6.7	2
Khenguet S. N.	849	72-73	254	3.3	155	22	74-75	8	2.8	6

Station	Printemps				Eté				TSS moy (1)	
	TSS max (1)	Année	TSS moy (2)	Ecart (1)/(2)	TSS moy (1)	TSS max (1)	Année	TSS moy (2)		Ecart (1)/(2)
Reboa	202	72-73	112	1.8	97	672	72-73	126	5.3	35
Foum El										
Gueiss	94	75-76	36	2.6	26	354	77-78	97	3.6	54
M'chounech	189	76-77	58	3.2	36	295	75-76	106	2.8	75
Khenguet S. N.	358	75-76	102	3.5	59	538	75-76	175	3.0	115

TSS max (1) : Maximum saisonnier des Transports Solides Spécifiques en t/km<sup>2</sup>.  
 TSS moy(2) : Transport Solides Spécifiques moyens saisonniers en t/km<sup>2</sup>.  
 Ecart (1)/(2) : Rapport des TSSmax(1) aux TSSmoy(2).  
 TSSmoy(1) : Moyenne saisonnière des TSS à l'exception du maximum saisonnier.



**Figure 2.18** TSS moyen annuel estimé dans quelques stations hydrométriques de la région des Aurès (Boumssenegh 2007; Bourouba 1996).

L'aperçu présenté sur la géomorphologie, le climat ainsi que sur le régime hydrologique concernant la région des Aurès, nous renseigne sur les différentes difficultés qui peuvent être rencontrées lors de la gestion efficace des barrages de la région soient : les faibles valeurs des apports liquides, les fortes valeurs de l'évaporation, l'agressivité des crues et leurs charges importantes en apports solides.

Ensembles, ces paramètres vont contraindre une gestion durable des barrages dans la région, particulièrement, avec une demande accrue.

## 2.2 Les barrages réservoirs dans la région des Aurès

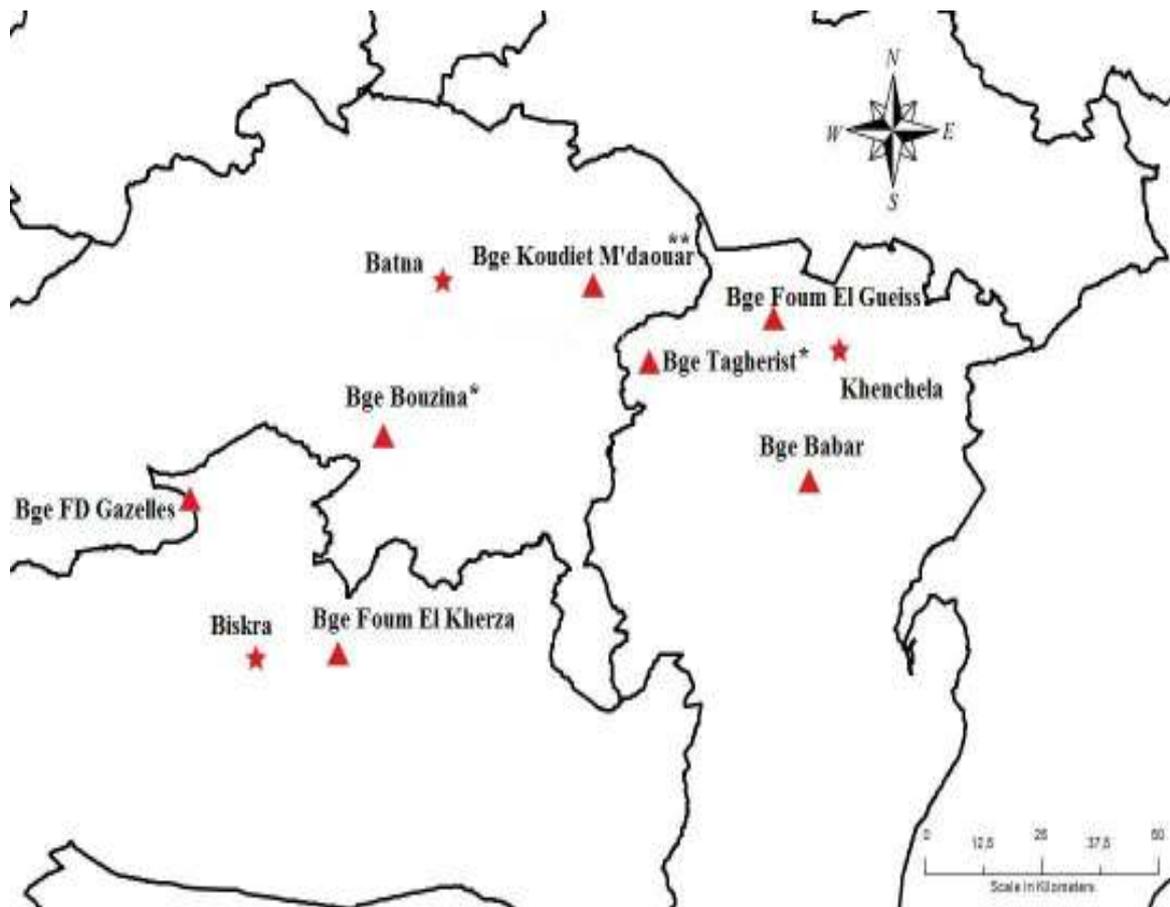
La disponibilité aléatoire de l'eau dans la région des Aurès, ainsi que les besoins accrus en eau pour l'énergie, l'irrigation et la consommation ont engendré des décisions de construction de barrages réservoirs bien avant l'indépendance, soient ceux de Foug El Kherza (1950) sur oued Labiod avec une capacité initiale de 47 hm<sup>3</sup> et celui de Foug El Gueiss sur oued El Gueiss (1939), avec une capacité initiale de 2.5 hm<sup>3</sup>. Après l'indépendance, le barrage de Babar (1995) sur l'oued Arab viendra s'ajouter aux deux premiers avec une capacité initiale de 41 hm<sup>3</sup>.

Au début des années 2000, deux autres barrages réservoirs vont être mis en service, il s'agit du barrage Fontaine de Gazelles (2001) sur oued El Hai avec une capacité de 55.5 hm<sup>3</sup> et celui de Koudiet M'daouar sur oued Reboa avec une capacité de 82 hm<sup>3</sup> ce dernier étant un barrage tampon du grand système Beni Haroun.

Deux autres barrages sont en cours de construction celui de Tagharist sur oued Tagharist et celui de Bouzina sur l'oued Bouzina.

**Tableau 2.3** Barrages en exploitation et en construction dans la région des Aurès

Barrage	wilaya	Oued	Type	Année de mise en eau	Capacité Initiale (hm <sup>3</sup> )	Destination
Foug El Gueiss	Khenchela	Gueiss	Enrochement	1939	2.5	Irrigation
Foug El Kherza	Biskra	Labiod	Voûte-Poids	1950	47	Irrigation Electricité
Babar	Khenchela	Arab	Remblai	1995	41	Irrigation AEP
F.D. Gazelles	Biskra	Hai	Remblai	2001	55.5	Irrigation AEP
Koudiet Mdaouar	Batna	Reboa	Remblai	2003	82	Irrigation AEP
Tagharist	Khenchela	Tagharist	Remblai	En construc	4.6	Irrigation
Bouzina	Batna	Bouzina	Remblai	En construc	22	Irrigation



**Figure 2.19** Barrages réservoirs dans la région des Aurès (\* En construction, \*\* Réservoir tampon).

## 2.2.1 Fiches techniques des barrages

### 2.2.1.1 Barrage Foug El Kherza

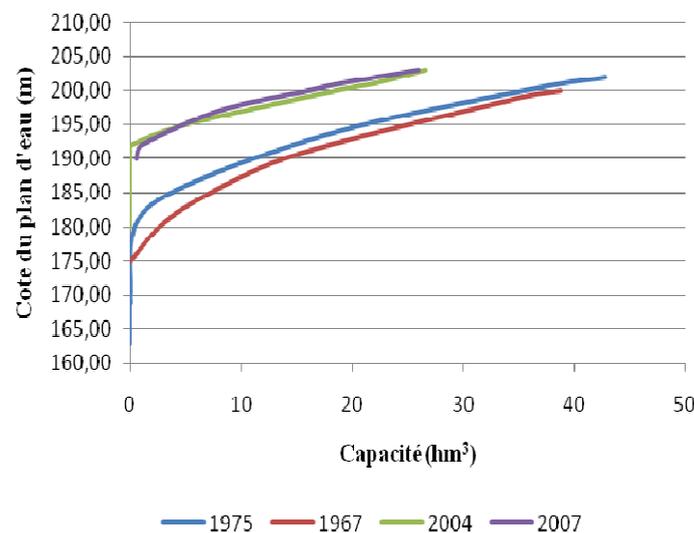
Construit en 1950, le barrage de Foug El Kherza (Figure 2.21) sur l'oued Labiod (1300 km<sup>2</sup>), est considéré comme un patrimoine national et reste un ouvrage glorieux qui mérite bien de lui accorder un intérêt particulier.

Au portes du Sahara, il a servi depuis sa mise en eau à contribuer à la durabilité de l'irrigation des palmeraies de la région défiant le temps et l'aridité du climat. Plusieurs études ont été menées sur ce barrage, concernant surtout les problèmes majeurs rencontrés durant toutes ces années d'exploitations soient: l'envasement, l'évaporation et les fuites par infiltration.

Un diagnostic visant à contrôler « l'état de santé » du barrage ainsi que celui de la cuvette a été établi par le bureau d'Ingénieurs Conseils ISL (2006). Cette étude a précisé en détails tous les problèmes rencontrés lors de l'exploitation du barrage tels que les infiltrations et l'envasement du barrage.

La retenue de Foum el Kherza connaît des fuites d'eau importantes surtout à travers les appuis (Toumi and Remini 2004). Seulement les fuites de la rive droite sont mesurées à partir d'un déversoir à seuil triangulaire placé dans le tunnel d'irrigation. Celles de la rive gauche ne sont plus mesurées à cause de l'envasement du dispositif de mesure.

Depuis sa mise en eau en 1950, le réservoir a été objet de huit campagnes bathymétriques 1950, 1967, 1975, 1986, 1993, 2001, 2004 et la dernière en 2007 (Figure 2.20), qui a révélé une capacité de 12.9 hm<sup>3</sup>, ce qui indique que la vase occupe plus de 72% de la capacité du réservoir, et si des opérations de dévasement ne s'effectuent pas dans un avenir proche, le réservoir ne sera pas en mesure de répondre aux besoins des agriculteurs et donc, sera mis hors service.

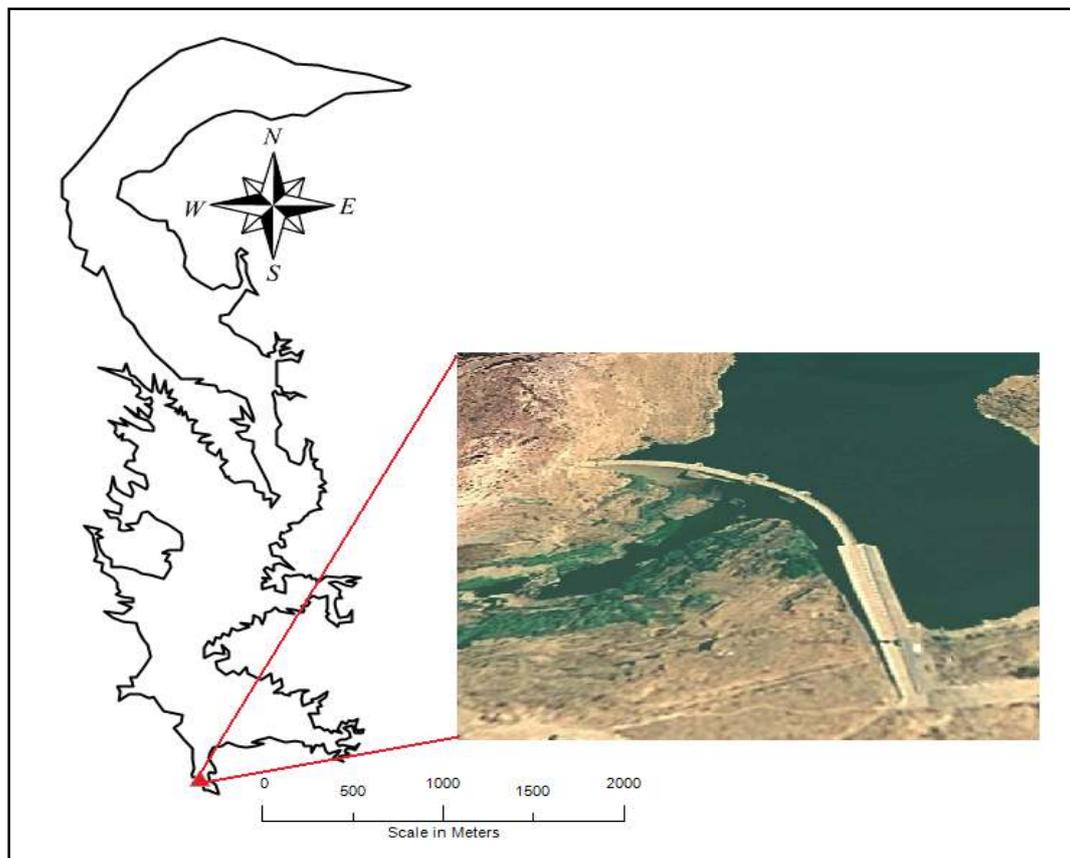


**Figure 2.20** Courbes Capacité-Hauteur ( 1967, 1975, 2004 et 2007) (ANBT)

Vu l'importance de ce réservoir dans la protection et la préservation du patrimoine de la palmeraie de la région du Ziban, une opération de dévasement a été lancée en 2006 afin de récupérer une capacité de 32 hm<sup>3</sup>. Malheureusement jusqu'à ce jour, seulement la première tranche a été achevée juste avant le dernier levé bathymétrique en 2007 où 4hm<sup>3</sup> de vases ont été extraites. Selon le service d'exploitation du réservoir, la deuxième tranche est en train de se préparer.

**Tableau 2.4** Fiche technique du barrage Foum El Kherza

Foum El Kherza (W. Biskra, à 11 km Nord de Sidi Okba)	
Coordonnées	Lat. 35°51'08"N Long. 5°55'30"E
Type	Combiné poids –voûte
Evacuateur de crue	A surface libre dans la partie centrale
Vidange de fond	Galerie blindée 2×2 m, pertuis de vidange.
Prise d'eau	Tour semi-cylindrique accolée à l'amont du barrage à trois niveaux d'une capacité de 4m <sup>3</sup> /s pour chaque prise
Hauteur (m)	73
NNR( m NGA)	198.90
Niveau de la crête (m NGA)	204.25
Niveau max (m NGA)	203.25
Longueur en crête	60 m ( culée ) +126 m ( voute )
Largeur en crête :	6.25 m ( culée ) + 3 m ( voute )
Epaisseur maximale en pied	22.1 m (culée ) + 8.4 m ( voute )
Rayon de courbure	80 m
Capacité initiale (hm <sup>3</sup> )	47
Mise en eau	1950
Capacité actuelle (hm <sup>3</sup> )	12.90
Levé bathymétrique 2007	
Destination	Irrigation des palmeraies Electricité abandonnée



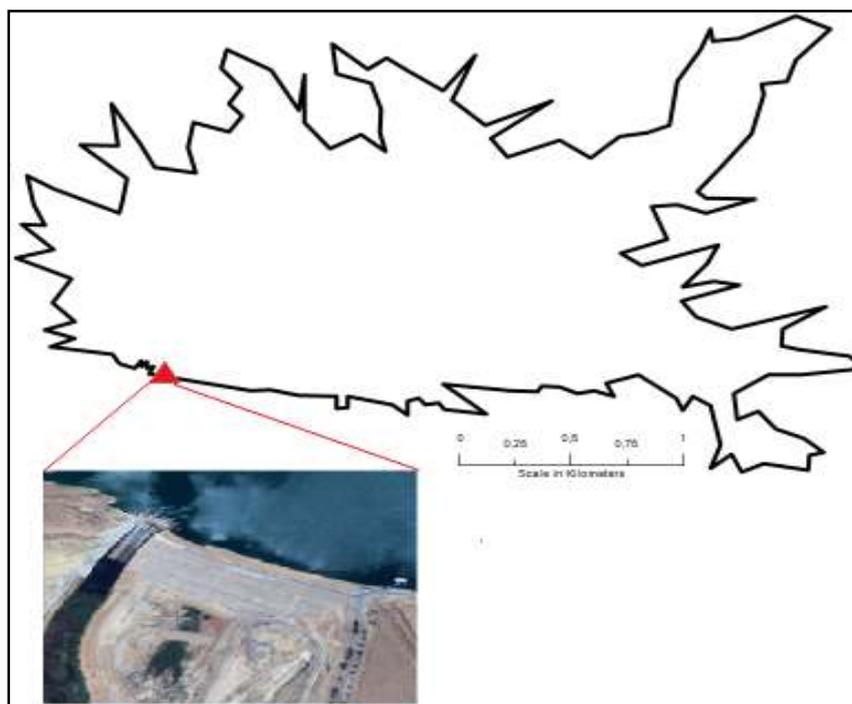
**Figure 2.21** Réservoir Foum El Kherza (Google Earth, 2014)

2.2.1.2 Barrage de Fontaine des Gazelles

Construit en 2000, le barrage de Fontaine des Gazelles (Figure 2.22) sur oued El Hai (1660 km<sup>2</sup>) est à 35 km nord-ouest de la ville de Biskra. Sa construction rentre dans le cadre du développement agricole de la plaine d'El Outaya. C'est un barrage à noyau central doté d'un évacuateur de crues en labyrinthe.

**Tableau 2.5** Fiche technique du barrage Fontaine des Gazelles

Fontaine des Gazelles (W. Biskra, à 35 km Nord de Biskra)	
Coordonnées	Lat. 35° 7 ' ; Long. 5° 34'E
Type	en terre à noyau
Evacuateur de crue	à surface libre type labyrinthe. 3000m <sup>3</sup> /s
Vidange de fond	Galerie de vidange. 25m <sup>3</sup> /s
Prise d'eau	Tour cylindrique de 10 m de diamètre à quatre Niveaux d'une capacité de 4m <sup>3</sup> /s pour chaque prise.
Hauteur (m)	42.5
NNR( m NGA)	384.00
Niveau de la crête (m NGA)	389.00
Niveau max (m NGA)	388.00
Longueur en crête	370 m
Largeur en crête :	8.50 m
Mise en eau	2001
Capacité actuelle (hm <sup>3</sup> )	54.57
Levé bathymétrique 2004	
Destination	Irrigation de 1100 ha

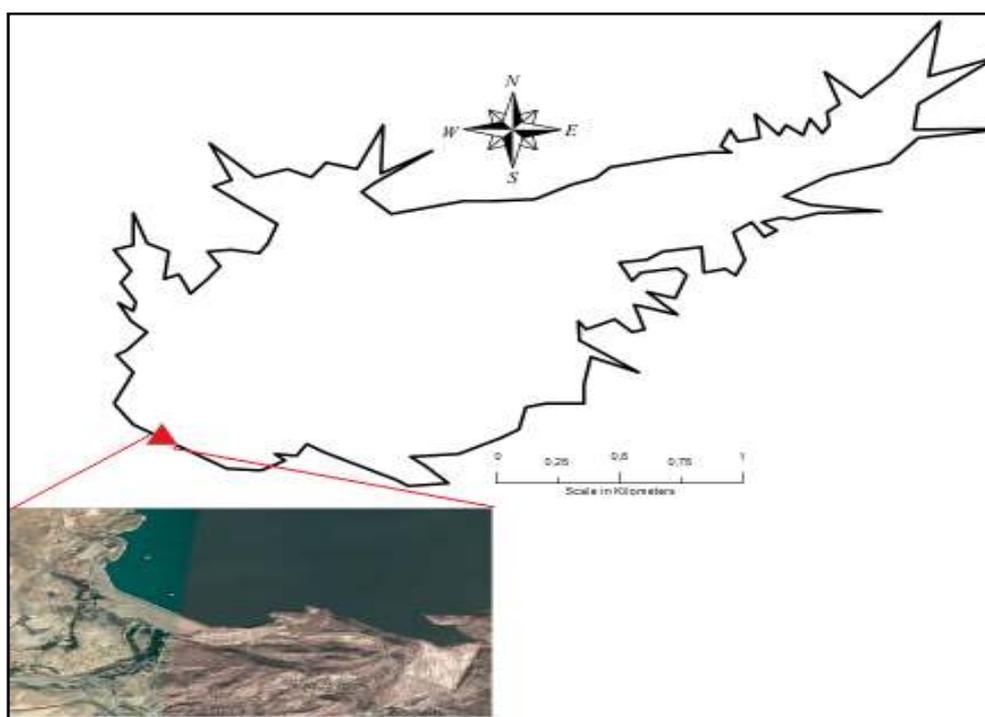
**Figure 2.22** Réservoir Fontaine des Gazelles (Google Earth 2013)

2.2.1.3 Barrage de Babar

Ce barrage draine une superficie de 567km<sup>2</sup> sur oued El Arab à la limite est des Aurès. Il est destiné à l'irrigation des terres limitrophes et aussi l'alimentation en eau potable des communes avoisinantes.

**Tableau 2.6** Fiche technique du barrage de Babar

Barrage Babar (W. Khenchela 12 km de Babar)	
Coordonnées	Lat. 35° 9'N ; Long. 7°1'E
Type	Terre
Evacuateur de crue	A canal découvert. 1310 m <sup>3</sup> /s
Vidange de fond	Galerie de vidange. 25m <sup>3</sup> /s
Prise d'eau	Tour de prise de 6 m de diamètre à trois niveaux
Hauteur (m)	37
NNR( m NGA)	940.00
Niveau de la crête (m NGA)	943.50
Niveau max (m NGA)	942.50
Longueur en crête	673 m
Largeur en crête :	7.5 m
Capacité initiale (hm <sup>3</sup> )	41
Mise en eau	1995
Capacité actuelle (hm <sup>3</sup> )	38
Levé bathymétrique	2004
Destination	Irrigation



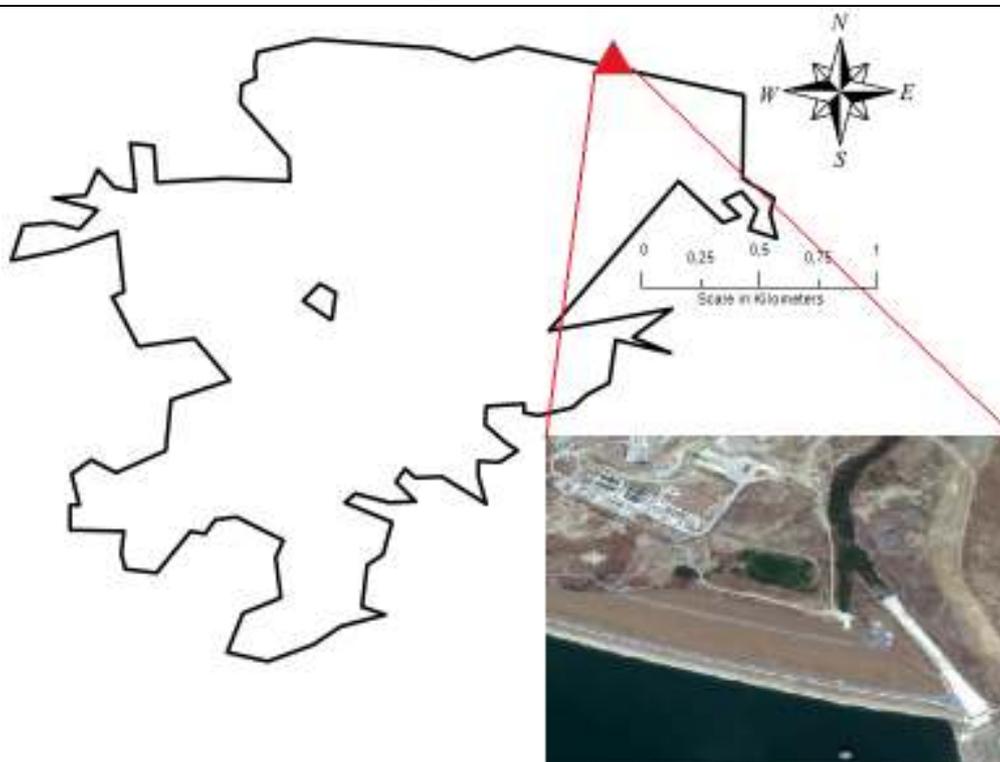
**Figure 2.23** Réservoir Babar (Google Earth, 2013)

### 2.2.1.4 Barrage de Koudiet M'daouar

Le barrage de Koudiet M'daouar est érigé sur oued Reboa, drainant une superficie de 590 km<sup>2</sup> est situé à 7 km au nord-est de la ville de Timgad, ce barrage fait partie du grand système de Beni Haroun et ayant pour objectifs d'assurer les besoins en eau potable et industrielle des villes de Batna, Khenchela et Ain Touta et aussi l'irrigation de plus 15700 ha de terres agricoles dans les plaines de Batna, de Chemora et Ain Touta.

**Tableau 2.7** Fiche technique du barrage de Koudiet M'daouar

Barrage Koudiet Mdaouar (W. Batna 7 km de Timgad)	
Coordonnées	Lat 35° 32' Long 6° 31'
Type	Terre à noyau
Evacuateur de crue	à surface libre 2500 m <sup>3</sup> /s
Vidange de fond	Galerie de vidange.
Prise d'eau	Tour de prise
Hauteur (m)	48
NNR( m NGA)	992.50
Niveau de la crête (m NGA)	997.00
Niveau max (m NGA)	995.00
Longueur en crête	2270 m
Largeur en crête :	10 m
Capacité initiale (hm <sup>3</sup> )	69
Mise en eau	2003
Destination	Irrigation , AEP



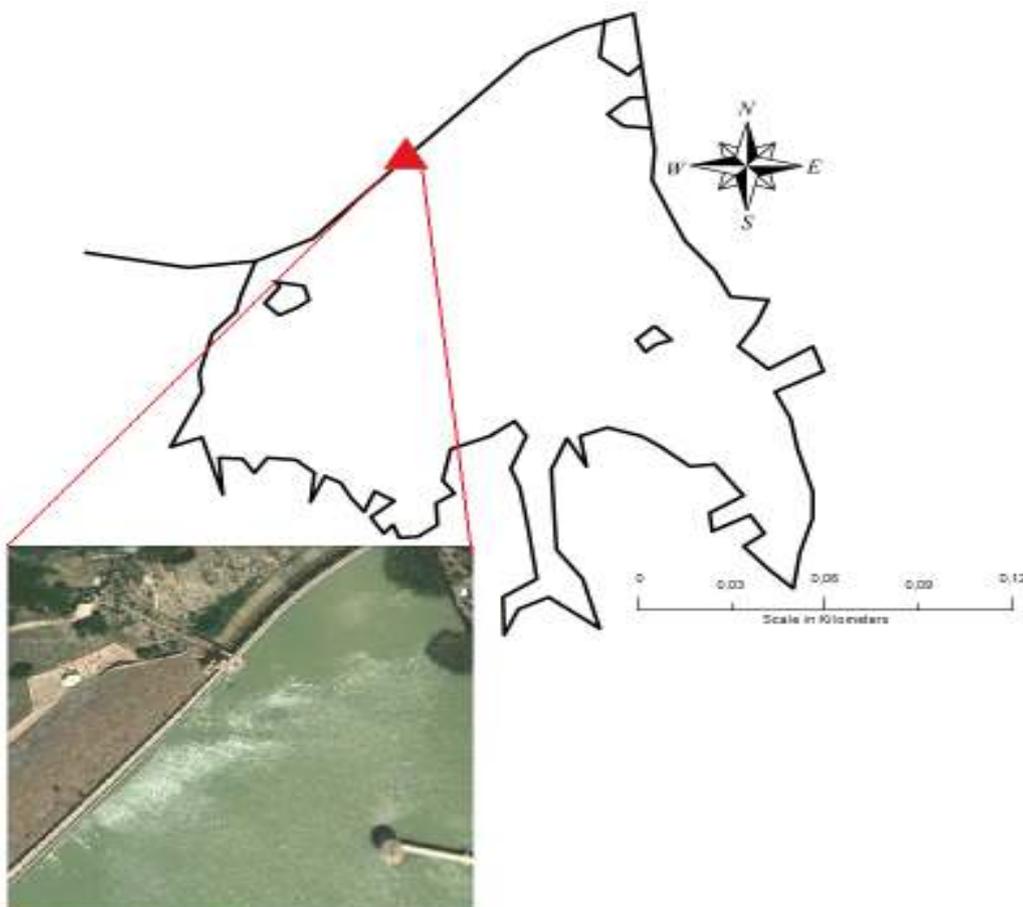
**Figure 2.24** Réservoir Koudiet M'daouar (Google Earth,2013)

### 2.2.1.5 Barrage Foug El Gueiss

Ce barrage très ancien et très beau est érigé sur oued El Gueiss qui draine une superficie de 156km<sup>2</sup>. Il est envasé à plus de 90% , ceci même après la 2<sup>ème</sup> surélévation et l'installation des hausses fusibles en 2005. L'Agence Nationale des Barrages et Transferts envisage son dévasement prochainement.

**Tableau 2.8** Fiche technique du barrage de Foug El Gueiss

Barrage Foug El Gueiss (W. Khenchela 7 km de Kaiss)	
Coordonnées	Lat 35° 28' Long 6° 56'
Type	Enrochement avec masque en béton
Evacuateur de crue	à seuil libre 600 m <sup>3</sup> /s
Vidange de fond	Galerie de vidange. 25m <sup>3</sup> /s
Prise d'eau	Tour de prise à 3 niveaux
Hauteur (m)	23
NNR( m NGA)	961.90
Capacité initiale (hm <sup>3</sup> )	2.5
Capacité dernier levé 2005(hm <sup>3</sup> )	0.045
Mise en eau	1939
Destination	Irrigation plaine Remila , AEP Kais



**Figure 2.25** Réservoir Foug El Gueiss (Google Earth,2013)

### 2.3 Gestion actuelle des barrages de la région

Comme pour tous les barrages et transferts en Algérie, la gestion des barrages est confiée à l'Agence Nationale des Barrages et Transferts. L'agence utilise les consignes de gestion établies lors de l'étude du projet afin d'exploiter la ressource. Ces consignes sont issues des études hydrologiques en fixant les niveaux minimums qui doivent être maintenus en cas normal, comme en cas d'étiage ou crue.

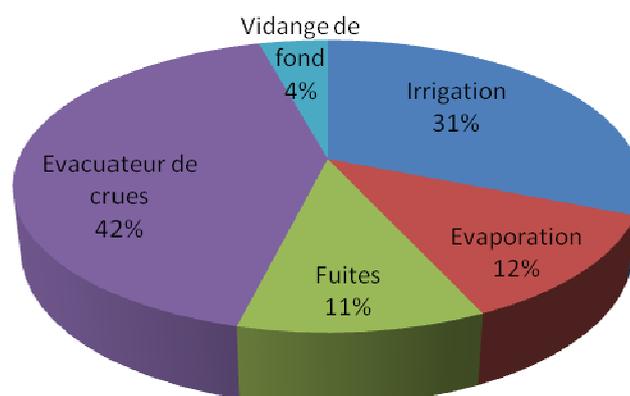
Les bilans hydriques correspondants à chaque réservoir et sur la base des données collectées au niveau des services d'exploitations des barrages concernés durant leurs années de mise en service sont présentés ci-après.

#### 2.3.1 Gestion du barrage de Foug El Kherza

L'analyse des données d'exploitation au niveau du barrage de Foug El Kherza pour la période (1967-2010) (Figure 2.26) avec un apport moyen de  $25.90 \text{ hm}^3$ , montre que le volume déversé par l'évacuateur de crues représente 42% des sorties. Le volume évaporé net n'est pas négligeable aussi (12%). Celui des fuites quant à lui, est d'une ampleur considérable (11%) sans considérer les fuites non quantifiées, la cause principale est la nature karstique du site du barrage.

Le volume fourni pour l'irrigation ne représente que (31%) des sorties. La vidange de fond représente seulement 4%, cette dernière a connu beaucoup de périodes d'arrêt, ce qui laisse à déduire la non efficacité de cet ouvrage pour diminuer le volume de vase dans la retenue.

Donc, plus de 60% des sorties sont des pertes malgré qu'elles sont en majorité collectées à l'aval du barrage.



**Figure 2.26** Bilan hydrique (en %) du barrage Foug El Kherza (1967/2010)

En examinant le bilan des dix dernières années d'exploitation (Figure 2.27), on constate que cette période a été caractérisée par des apports annuels qui ont dépassé  $100 \text{ hm}^3$  pour les

années 2004, 2005 et 2009. Le volume déversé en parallèle, était important vu l'importance des apports d'une part, et le comblement de la retenue par les dépôts solides d'une autre part. La vidange n'a été relativement efficace que durant l'année 2009 avec un volume de 38 hm<sup>3</sup>.

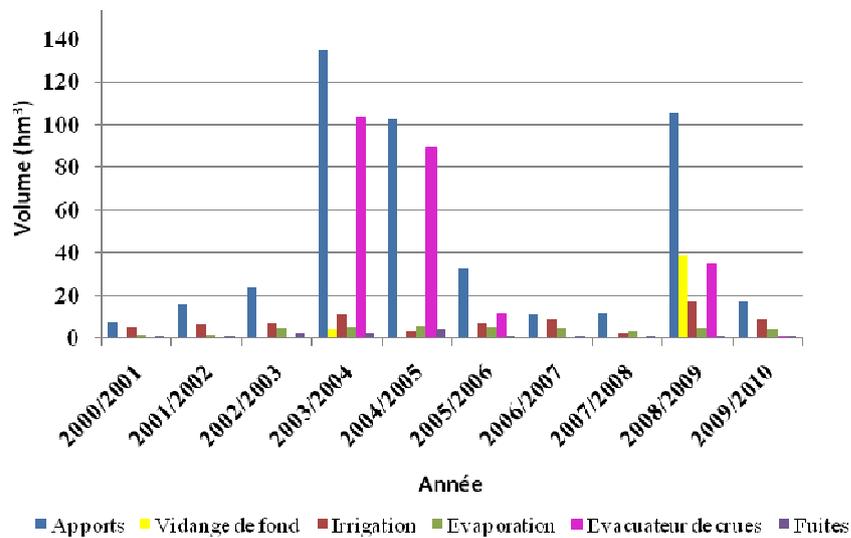


Figure 2.27 Bilan hydrique du réservoir Foug El Kherza (2000/2010)

Le bilan hydrique de la retenue (Figure 2.28) pendant l'année 87/88 faible en apports (3.15 hm<sup>3</sup>), montre que dans cette année, aucun volume n'a été fourni à l'irrigation, la retenue était en fin de l'année à un niveau très bas (0.5 hm<sup>3</sup>), les fuites étaient importantes malgré ce volume (1.3 hm<sup>3</sup>).

Contrairement, l'année 2003/2004 était excédentaire (135hm<sup>3</sup>), malheureusement, 103 hm<sup>3</sup> de ce volume ont été déversés soit 76% de l'apport annuel, la cause principale étant l'envasement de la retenue dont le volume n'était que 15 hm<sup>3</sup>. Notons que seulement 4 hm<sup>3</sup> ont été évacués par la vidange de fond soit 2% ce qui montre qu'elle n'a pas été exploitée efficacement.

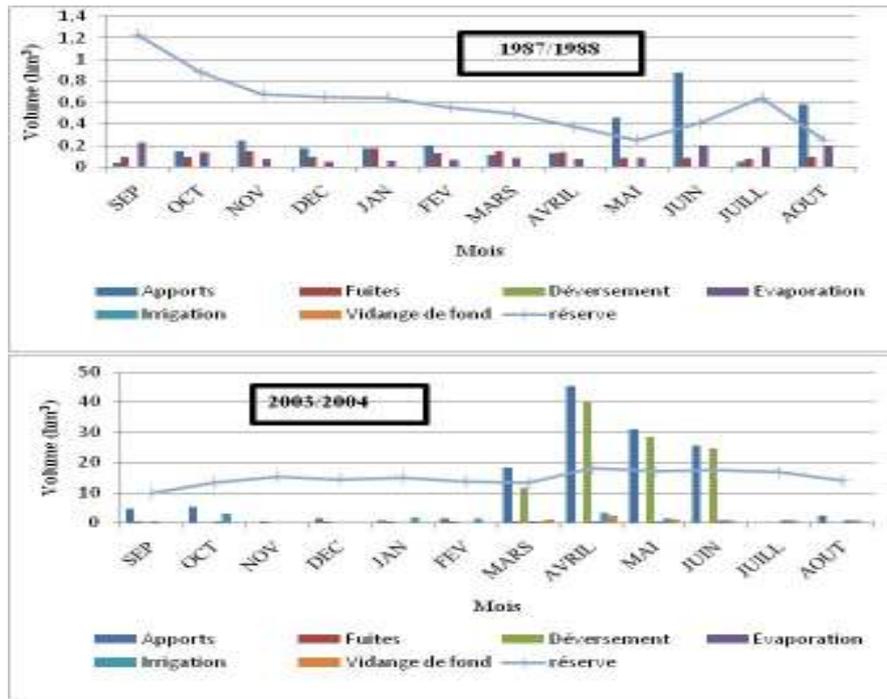


Figure 2.28 Bilans hydriques mensuels (1987/1988 et 2003/2004)

2.3.2 Gestion du réservoir de Babar

Durant les dix années d’exploitation, le réservoir de Babar ayant reçu un volume de 260 hm<sup>3</sup> 29 % ont été déversés (Figure2.29). Les premières années d’exploitation de la retenue ont été marquées par de volumes vidangés très importants, soient plus de 44 hm<sup>3</sup> durant les années 2002, 2003,2004 l’irrigation n’a reçu cependant que 25% de ces apports. Les fuites sont négligeables alors que l’évaporation représente 17% , ce qui est relativement important.

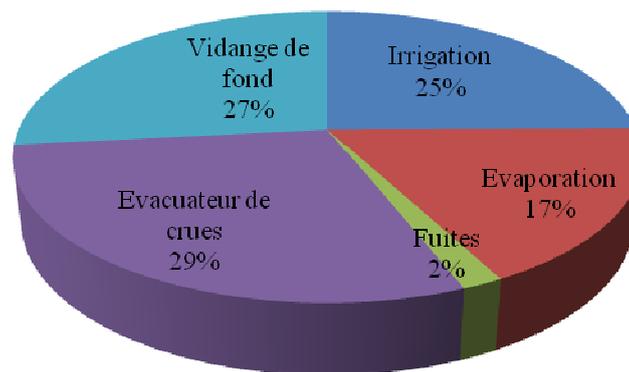


Figure 2.29 Bilan hydrique (en %) du réservoir Babar (2002/2013)

Les apports pendant les années 2002, 2003, 2004, et 2009 représentent plus de 60% du volume total (Figure 2.30). Cependant, la retenue n’était pas encore exploitée, ce qui a favorisé le déversement. L’évaporation a gardé un volume relativement constant de 3.5 hm<sup>3</sup> par an.

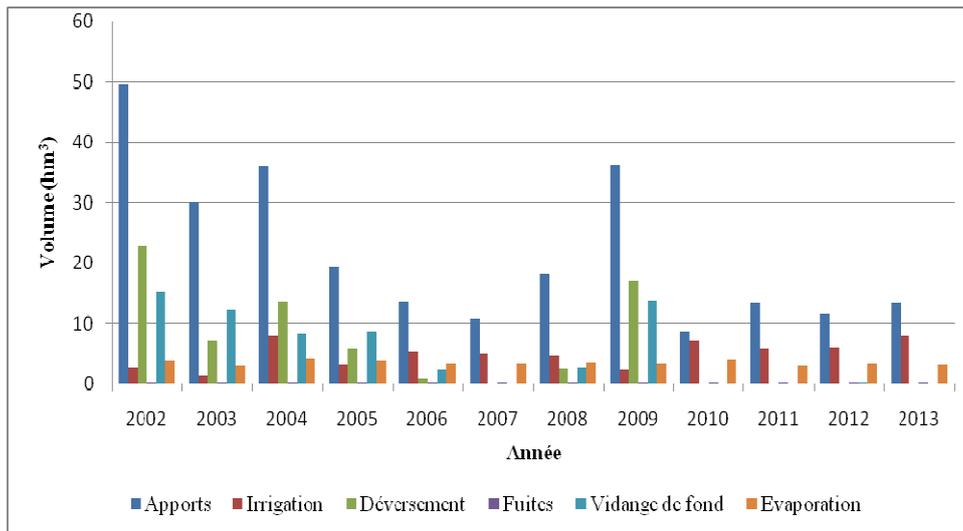


Figure 2. 30 Bilan hydrique interannuel du réservoir Babar (2002/2013)

En examinant les bilans mensuels pour les années 2002 avec un apport de 49.5 hm<sup>3</sup> et 2010 avec un apport de 8.7 hm<sup>3</sup> (Figure 2.31) , on remarque que le volume d'eau dans la retenue n'était pas beaucoup influencé, il est resté pratiquement constant entre (40 et 30 hm<sup>3</sup>) ce qui nous permet de conclure que la retenue de Babar n'est pas encore totalement exploitée.

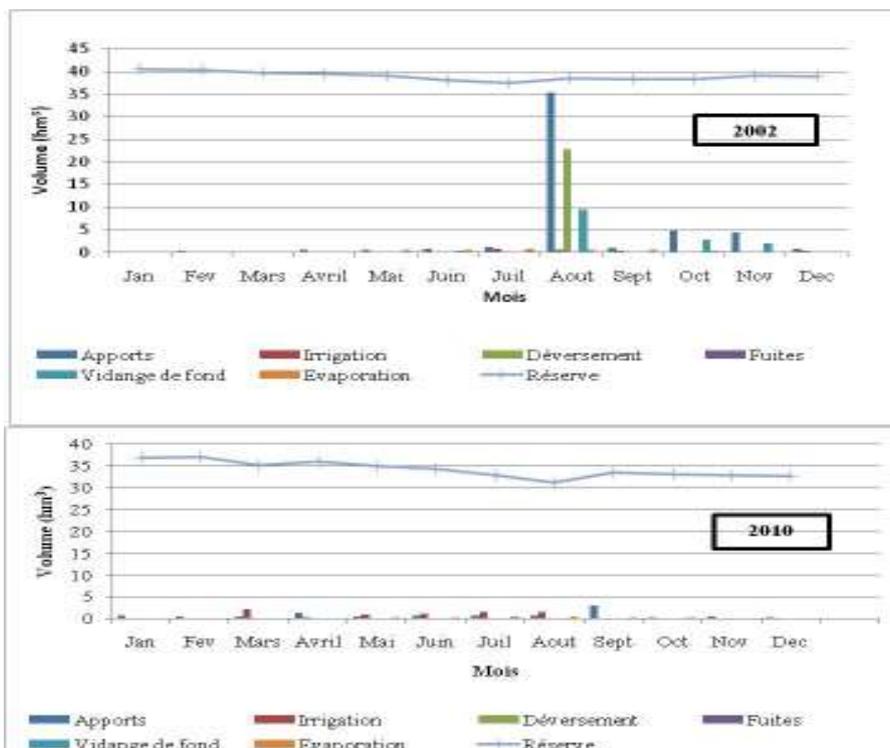


Figure 2.31 Bilans des années 2002 et 2010 du réservoir de Babar.

### 2.3.3 Gestion du réservoir de Foug El Guess

L'analyse de la gestion actuelle de ce barrage n'est présentée qu'à titre indicatif, le barrage étant envasé à plus de 90% .

Le bilan hydrique du réservoir montre que pour les dernières années et avec des apports de 207 hm<sup>3</sup>, déversements et évacuations par vidange de fond représentent plus de 90% du volume total des apports (Figure 2.32).

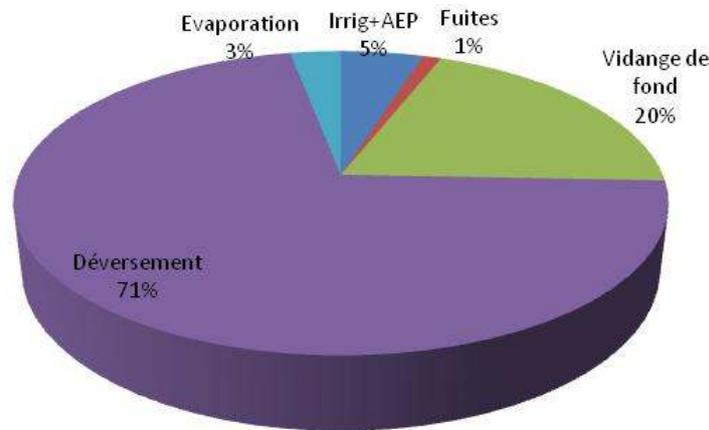


Figure 2.32 Bilan hydrique (en %) du barrage Foug El Gueiss (2001/2013)

L'historique de la gestion du réservoir montre aussi que les apports liquides ont nettement diminués durant la dernière décennie. Durant les années 90 les apports annuels dépassaient 80 hm<sup>3</sup> (1993, 95, 96, 97 et 98) (Figure2.33).

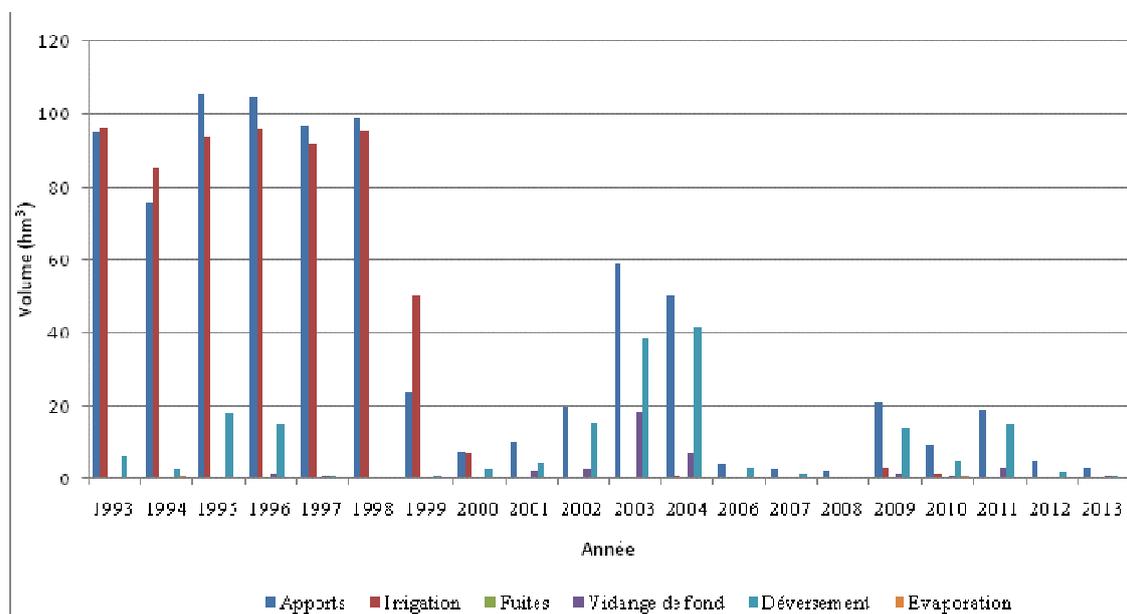


Figure 2.33 Bilan interannuel du barrage de Foug El Gueiss (1993-2013).

Durant l'année 2013 et avec un apport de 3.35 hm<sup>3</sup>, un volume de 2.67 hm<sup>3</sup> a été déversé et vidangé, et seulement 0.19 hm<sup>3</sup> ont été fournis à l'irrigation et à l'Alimentation en Eau Potable. La retenue est restée pleine sauf pendant l'été (Figure 2.34).

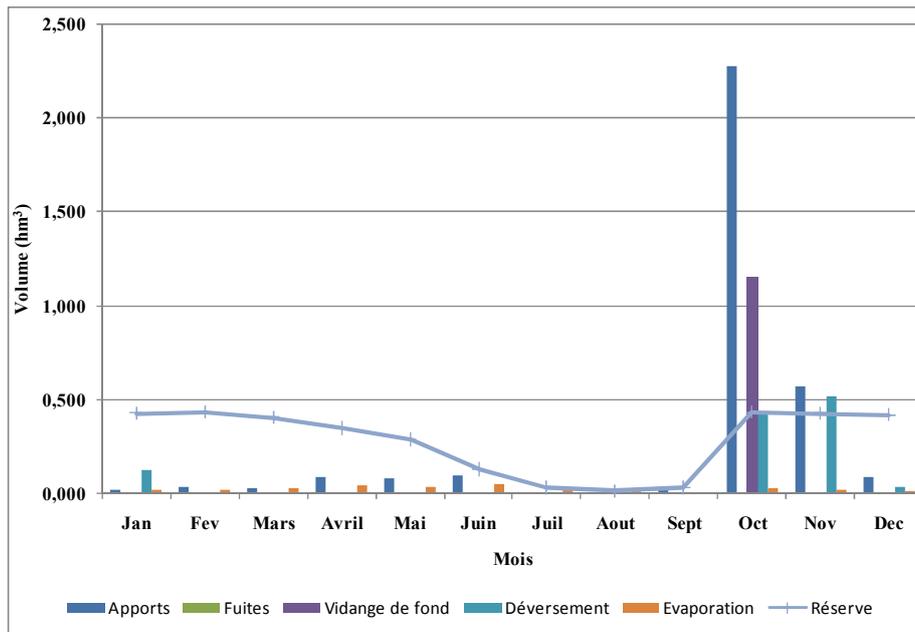


Figure 2.34 Bilan hydrique mensuel du réservoir de Foug El Gueiss (2013).

**2.3.4 Gestion du réservoir de Fontaine des Gazelles**

Le réservoir de Fontaine des Gazelles a reçu durant les années 2002-2011 un volume de 322 hm<sup>3</sup>, 39 % de ce volume ont été déversés, 12% vidangés. La part de l'irrigation a été de 21%, celle de l'évaporation est de 28% (Figure 2.35), ce qui représente le pourcentage le plus élevé dans toute la région des Aurès. L'aridité du site, l'absence du couvert végétal et aussi l'importance de la surface du plan d'eau de la retenue sont les principales causes.

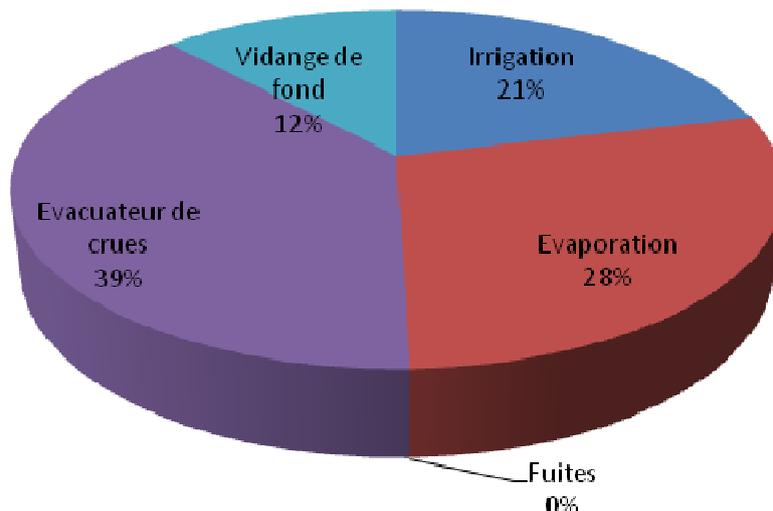


Figure 2.35 Bilan hydrique (en %) du réservoir Fontaine des Gazelles (2002/2011).

Durant la période 2001-2004, le réservoir était en phase de remplissage, l'irrigation n'a commencé qu'au mois de mai 2005, elle a atteint un volume annuel de 19 hm<sup>3</sup> en 2010 (Figure 2.36).

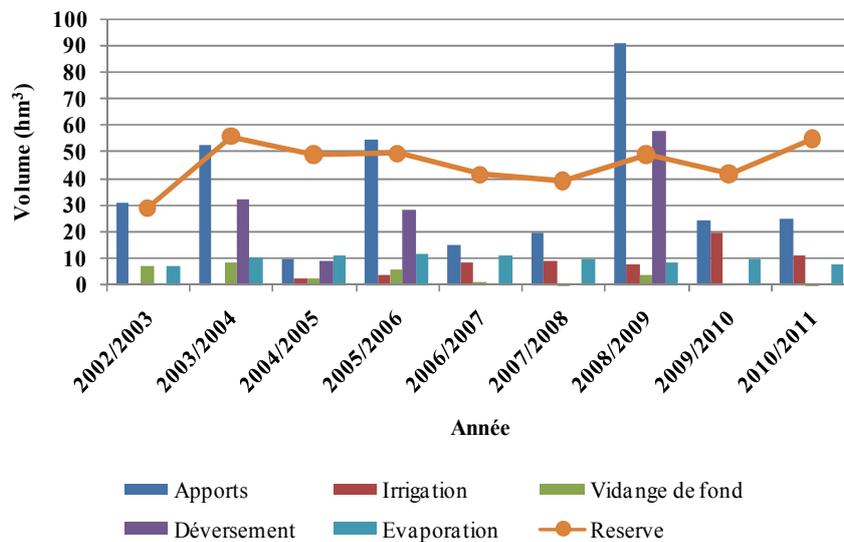


Figure 2.36 Bilan hydrique interannuel du réservoir Fontaine des Gazelles (2002/2011)

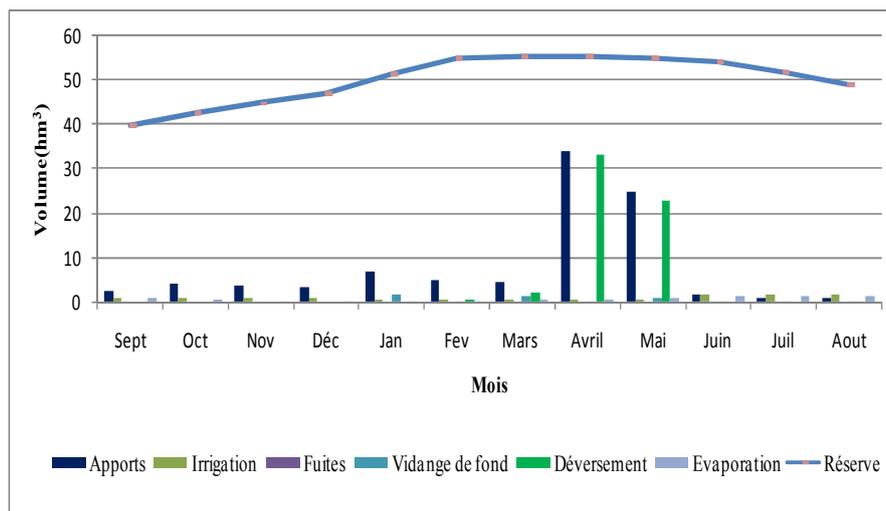


Figure 2.37 Bilan hydrique mensuel du réservoir Fontaine des Gazelles (2008/2009)

Les apports liquides étaient importants pendant l'année 2008/2009, ce qui est le cas pour tous les réservoirs de la région, avec un volume de 90 hm<sup>3</sup> dont 58hm<sup>3</sup> ont été déversés, la vidange de fond n'a évacué que 3 hm<sup>3</sup> (Figure 2.37).

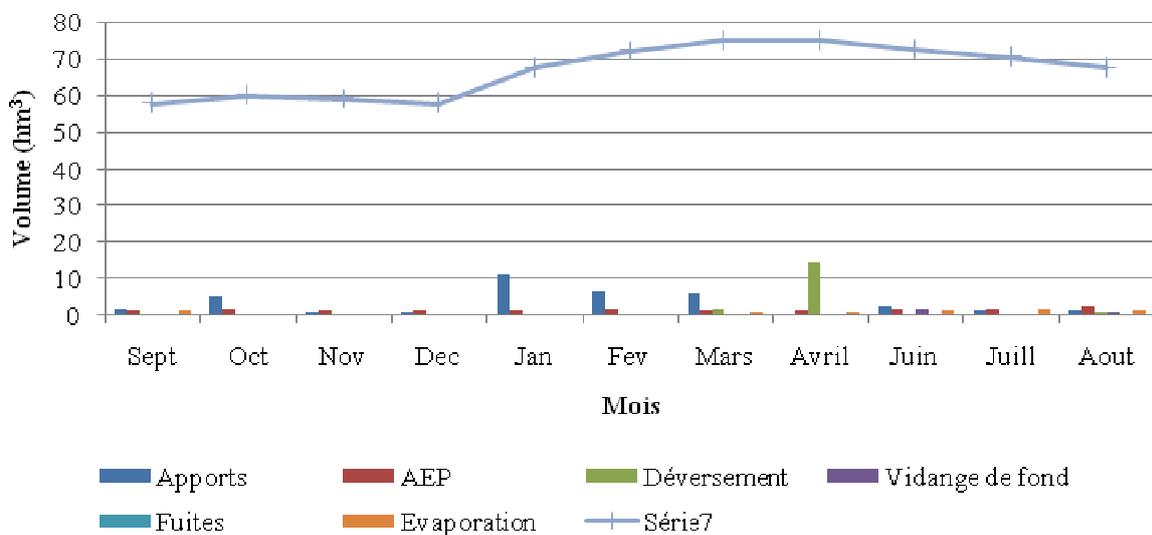
Ce qui nous amène à se demander sur l'efficacité de l'exploitation de cet ouvrage, surtout que son rôle est primordial pour la diminution du volume de vases. Le volume d'eau dans le réservoir est resté cependant proche du volume de retenue normal, montrant ainsi comme pour le cas de Babar que le réservoir n'est pas encore entièrement exploité.

### 2.3.5 Gestion du réservoir de Koudiet M'daouar

Les données concernant ce réservoir ne nous ont pas été disponibles en matière de qualité, en plus, faisant partie du système de Beni Haroun, et vu que le transfert n'est pas encore achevé l'analyse de la gestion de ce réservoir sans celle du réservoir Beni Haroun serait prématurée.

Toutefois, l'année hydrologique 2008/2009 serait intéressante à analyser (Figure 2.38), du fait qu'à l'instar des autres réservoirs de la région, cette année était riche en apports liquides.

En effet, durant cette année le réservoir a reçu 38 hm<sup>3</sup> d'apports liquides dont 17 hm<sup>3</sup> ont été destinés à l'AEP. Le déversoir a évacué 16.80 hm<sup>3</sup> dont la plus part au mois d'avril. La vidange de fond a aussi évacué un volume de 2.5 hm<sup>3</sup>. Le volume d'eau dans la retenue variant entre 58 au mois de septembre et 67 hm<sup>3</sup> au mois d'aout.



**Figure 2.38** Bilan hydrique mensuel du réservoir Koudiet M'daouar (manque de données pour le mois de mai) (2008/2009).

## 2.4 Conclusion

La région des Aurès est caractérisée par un faible volume d'eaux superficielles, associé à une vulnérabilité à l'envasement des barrages. Ces deux paramètres nous incitent à réfléchir la gestion des barrages et l'adapter aux situations réelles.

L'analyse de la gestion actuelle des réservoirs de la région des Aurès nous amène à distinguer deux types de réservoirs:

- Ceux de Foug El Kherza et Foug El Gueiss. Les volumes déversés sont importants et si des opérations de dévasement ne seront pas entreprises, ces deux réservoirs feront partie de l'histoire et ne pourront pas satisfaire la demande.
- Ceux de Fontaine des Gazelles et Babar. Les travaux de réalisation des ouvrages hydrauliques à l'aval des deux barrages tardent, surtout pour le barrage de Babar, âgé

de presque une quinzaine d'années et non encore exploité à 100%. Ce retard explique le pourcentage de déversement important que connaissent les deux réservoirs.

- Le volume d'eau vidangé par le fond est faible. Cette manœuvre lorsqu'elle est bien étudiée et utilisée à temps contribuera fortement dans l'évacuation des dépôts solides de la retenue.

## *Deuxième partie*

*Modèle de gestion par optimisation :*

*Cas du réservoir Foum El Kherza*

## *Chapitre III*

### *Termes du bilan hydrique*

### 3.1 Introduction

La régularisation des barrages nécessite la modélisation de chaque terme de l'équation de continuité à savoir les apports liquides, évaporation, fuites, demande ainsi que la pluie directe sur le réservoir. Ces termes seront intégrés selon leur importance dans l'équation de continuité.

Les données disponibles au niveau du service d'exploitation du barrage de Foum El Kherza seront utilisées afin d'estimer ces différents termes.

### 3.2 Apports liquides

Faisant parti des termes du bilan hydrique au niveau d'un réservoir, les apports liquides représentent sans aucun doute à la fois le terme le plus important et le plus incertain, et mettre en œuvre un bon modèle qui restitue correctement la réalité du terrain, permettra un gain considérable en ressource obtenue grâce à une gestion rationnelle du réservoir. (Dong 2005; Karim and Goulter 1996).

#### 3.2.1 Données disponibles

Une série d'apports liquides issus du bilan hydrique au niveau du barrage, et s'étalant sur la période de 1967 à 2010 a été utilisée afin d'extraire un modèle de prédiction, valable pour une simulation éventuelle de la gestion du réservoir de Foum El Kherza (figure 3.1).

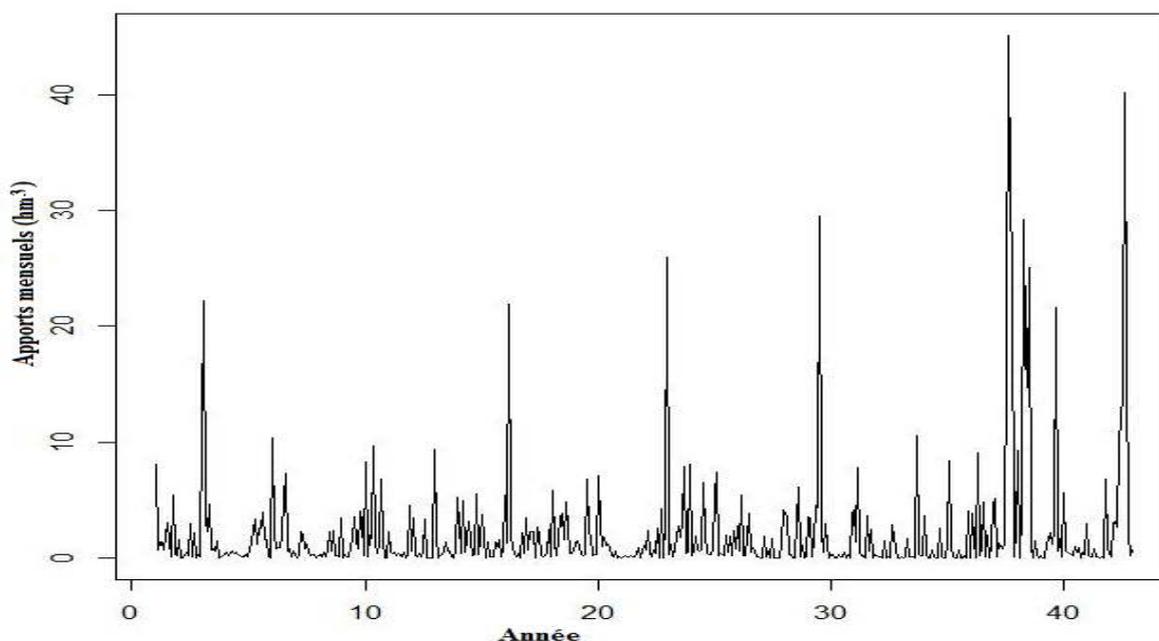


Figure 3.1 Apports liquides mensuels à Foum El Kherza (Sept 1967- Aout 2010)

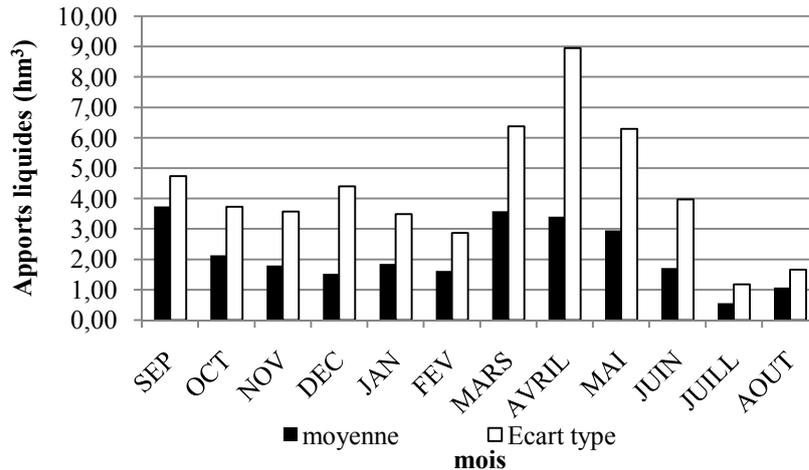


Figure 3.2 Moyennes et Ecart type mensuels des appports liquides (1967-2010)

### 3.2.2 Les modèles de prévision des appports liquides mensuels

Les modèles de prévision des débits liquides peuvent être classés en deux catégories: les modèles conceptuels et les modèles empiriques (Fortin et al. 1997; Shalamu 2009).

**Les Modèles empiriques ou « boîte noire »** ont pour principe d'établir des relations entre la grandeur à modéliser et les facteurs qui la déterminent mais on n'est jamais sûr que les facteurs retenus expliquent à eux seuls la grandeur à modéliser (Yonaba 2009). Les modèles **ARIMA** (Autoregressive Integrated Moving Average), et les RNA (Réseaux de Neurones Artificiels) font partis de ce type de modèles.

**Les Modèles théoriques et conceptuels** encore appelés modèles physiques, sont issus de l'analyse physique, des paramètres dont résulte la grandeur à modéliser (Yonaba 2009).

Dans la littérature, on peut recenser de nombreuses approches pour la prévision des appports liquides mensuels comprenant les modèles conceptuels, les séries temporelles, les réseaux de neurones et récemment les modèles hybrides (Shalamu 2009).

#### 3.2.2.1 Modèle autorégressif

L'analyse des séries temporelles ou chronologiques comme une méthode Data-Driven trouve une large application dans la prévision des appports liquides mensuels (Dong 2005). Un modèle ARIMA saisonnier est noté ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)  $(p,d,q) (P,D,Q)_s$ , la série dépend d'une part des valeurs précédentes (partie non saisonnière) et d'autre part des valeurs à la même période des années précédentes (partie saisonnière) où  $s$  la période saisonnière pour le cas d'une série mensuelle, elle est égale à 12. Les modèles ARIMA ou Box-Jenkins sont relativement faciles à implémenter (Dong 2005; Jordan 2007).

Deux catégories de ce type de modèles sont présentes selon que le processus est stationnaire ou non.

Modèle Autorégressif AR(p) ou ARIMA(p,0,0), Modèle à moyenne mobile MA(q) ou ARIMA(0,0,q), ou la combinaison des deux premiers modèles soit le modèle autorégressif à moyenne mobile ARMA (p,q) ou ARIMA (p,0,q).

Les modèles ARMA supposent que la série est stationnaire donc ils consistent à enlever de la série les tendances et saisonnalités (ou périodicités) évidentes et à modéliser le résidu restant.

On peut décrire le processus ARMA(p,q) pour une série  $X_t$  comme une combinaison du modèle autorégressif AR(p) et celui à moyenne mobile MA(q) et peut s'écrire sous la forme suivante :

$$X_t - a_1X_{t-1} - \dots - a_pX_{t-p} = \varepsilon_t + b_1\varepsilon_{t-1} + \dots + b_q\varepsilon_{t-q} \quad 3.1$$

avec  $\varepsilon_t$  un bruit blanc

$a_i$  et  $b_i$  des paramètres à déterminer.

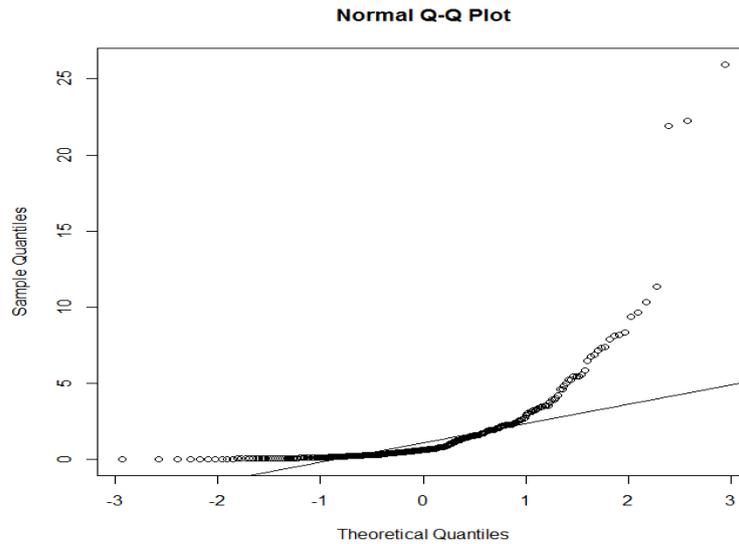
Ce type de modèle a été largement utilisé comme modèle pour les apports liquides au pas de temps mensuel:

Mujumdar (1990) a examiné dix modèles test de la famille ARMA pour représenter les débits mensuels et décennaires de trois rivières Indiennes et recommande le modèle AR(1) qui a conduit à la valeur minimale de moyenne quadratique dans tous les cas étudiés.

Abrahart et See (2000) ont comparé les réseaux de neurones et le modèle ARMA pour deux rivières Wye et Ouse et ont conclu que les deux méthodes aboutissent au même résultat.

Salas (1980) dans son ouvrage, présente la méthodologie nécessaire pour le choix d'un modèle ARMA.

Afin de pouvoir tester un modèle ARMA à la série d'apports liquides mensuels du barrage de Foug El Kherza, la série a été subdivisée en deux séries : l'une (1967-2004) pour construire le modèle ou apprentissage, et l'autre (2004-2009) pour le tester.

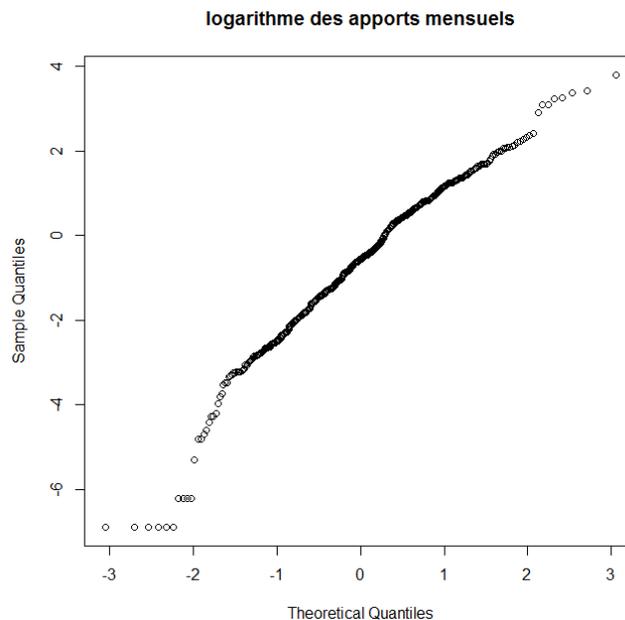


**Figure 3.3** Q-Q plot normale des débits mensuels d'apprentissage (1967-2004)

La série originale a été normalisée (figure 4.4.) en prenant son logarithme :

$$X = \log(x)$$

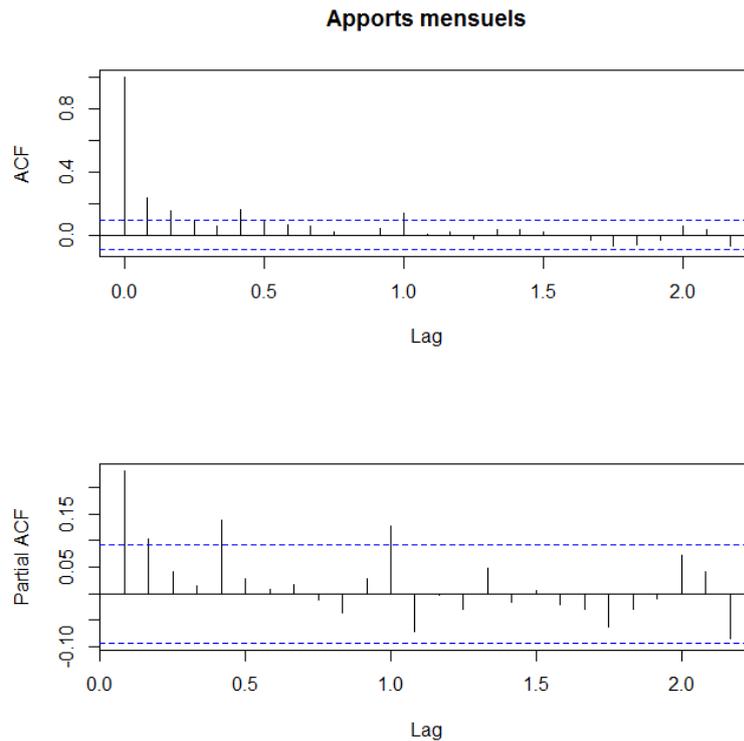
3.2



**Figure 3.4** Q-Q normale de la série normalisée.

L'hypothèse de normalité est rejetée pour les deux séries en utilisant le test de Shapiro-Wilcox. Alors que le test de Dickey Fuller Augmenté indique que la série est stationnaire.

Pour pouvoir choisir un modèle du type ARMA, on adopte la méthodologie de Box Jenkins c.-à-d., qu'il faut examiner les fonctions d'auto corrélation et d'auto corrélation partielles.



**Figure 3.5** Corrélation et Auto corrélation partielle relatives à la série transformée.

La figure 3.5 montre qu'on peut choisir une multitude de modèles ARMA. Toute fois, sous R (2008), et avec le package 'forecast' (Hyndman and Khandakar 2008), la fonction `auto.arima` confronte plusieurs modèles différents et nous retourne celui qui minimise le Critère d'Information d'Akaike AIC (Akaike 1974): Ce critère détermine la complexité du modèle en minimisant la fonction d'information théorique définie par :

$$AIC(p, q) = N \log(\hat{\sigma}_\varepsilon^2) + 2(p + q) \quad 3.3$$

$N$  le nombre de données d'observation.

$\hat{\sigma}_\varepsilon^2$  la variance de processus d'innovation

Le modèle retenu est celui qui minimise le critère AIC (plus de précision avec moins de paramètres).

Les résultats ont aboutis aux modèles  $AR(5)$ ,  $ARMA(1,1)$ . Les modèles utilisés généralement dans ce type de données sont du type  $AR(1)$ , ce qui indique que le modèle donné par la fonction `auto.arima` peut ne pas être fiable. Une des raisons de cette conclusion, est que notre série contient au moins dix valeurs aberrantes (outliers) (Figure 3.4), ces valeurs peuvent induire le modèle vers la complexité. L'analyse des résidus (Figure 3.6) et (Figure 3.7) montre bien ces points qui représentent des périodes de sécheresse ou (crues) et qui ne peuvent pas être ignorés.

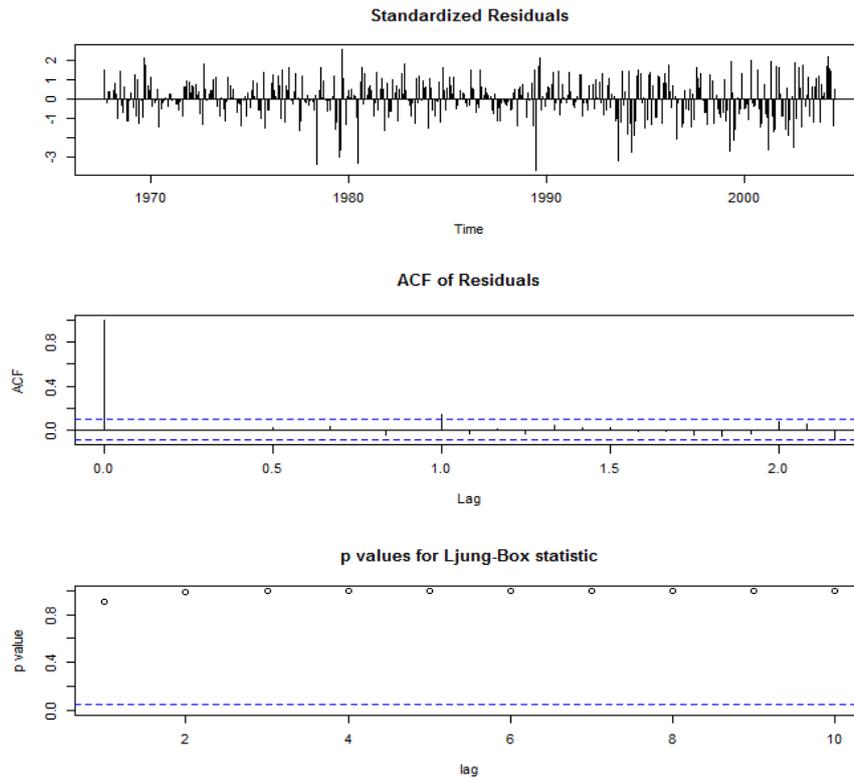


Figure 3.6 Analyse des résidus du modèle AR(5), AIC= 1788.18

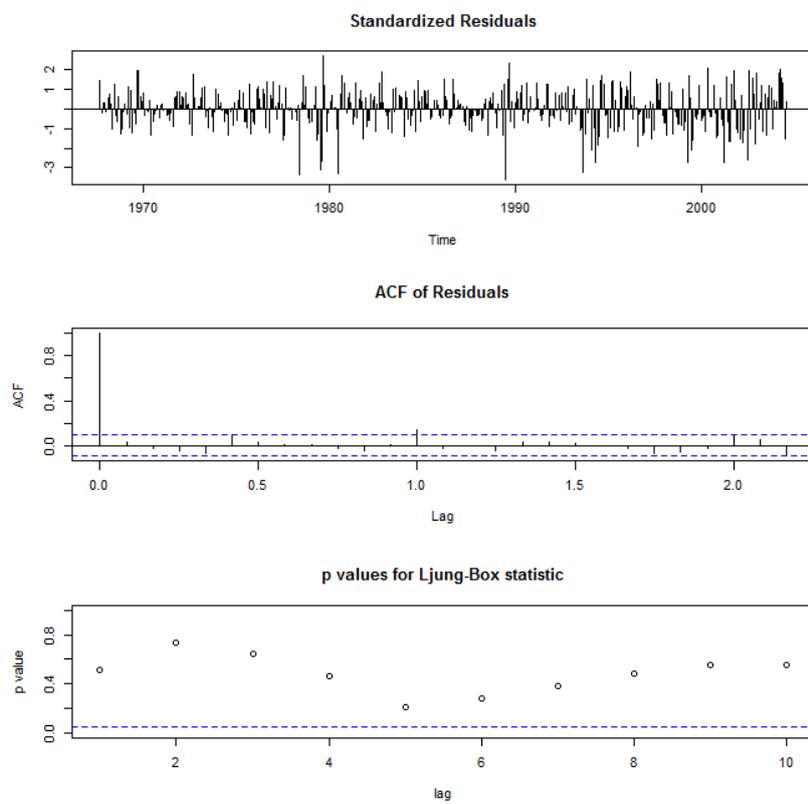


Figure 3.7 Analyse des résidus du modèle ARMA(1,1), AIC= 1788.83

**Détection des valeurs aberrantes**

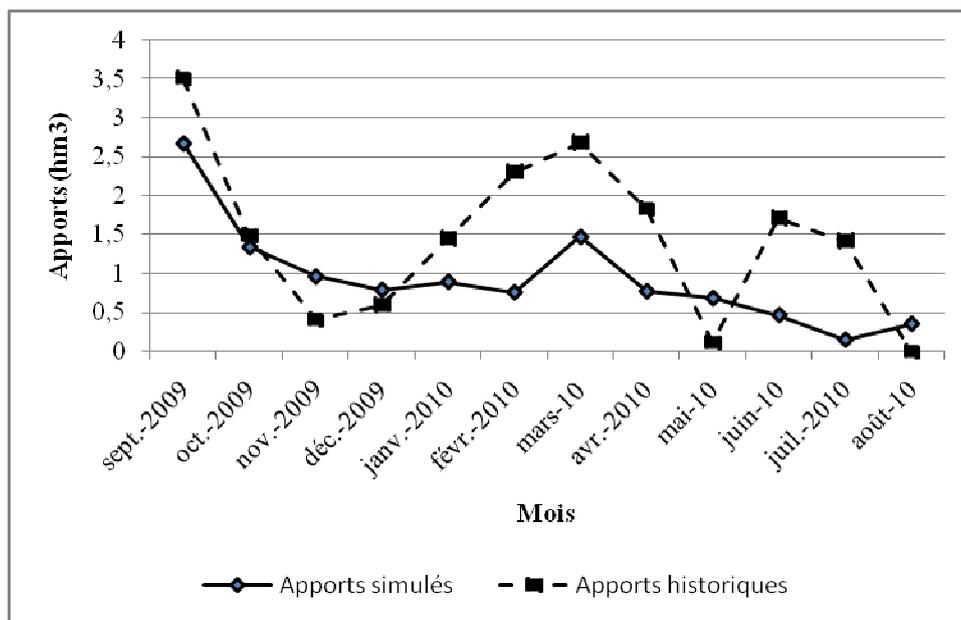
On a choisi d'utiliser le logiciel X-12-ARIMA mis à disposition par le U.S. Census Bureau (Findley et al. 1998), car il offre la possibilité de désaisonnaliser la série, de détecter les valeurs aberrantes et extrêmes, de les ajuster et aussi de faire la prévision pour un horizon prédéfini. X-12-ARIMA est doté d'une fonction d'auto-modélisation qui peut retrouver le modèle selon la minimisation du critère AIC.

le modèle retenu par X-12-ARIMA est ARIMA (1 0 1)(0 1 1)<sub>12</sub>, il s'agit d'un modèle ARIMA saisonnier dont l'équation générale s'écrit :

$$\phi(B)\Phi(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D y_t = \theta(B)\Theta(B^s)e_t \tag{3.4}$$

$$(1 - 0.7910 B)(1 - B^{12})z_t = (1 + 0.5904 B)(1 + B^{12})e_t \tag{3.5}$$

Ou B est l'opérateur retard. Z<sub>t</sub> valeur observée au temps t, e<sub>t</sub> résidus estimé au temps t.



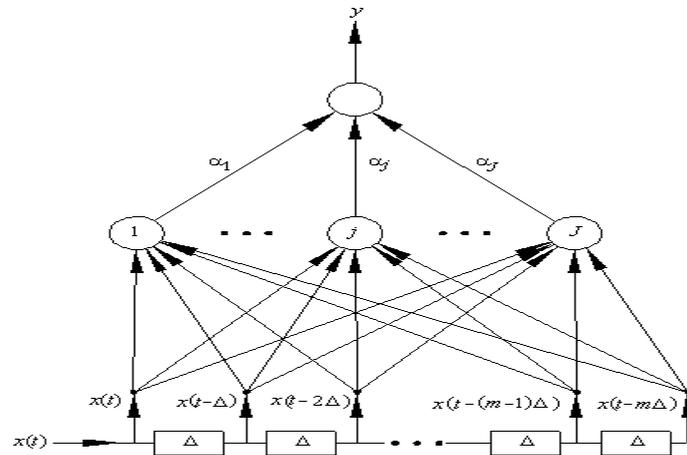
**Figure 3.8** Prévisions pour une année par X-12-ARIMA et celles observées

D'après la figure 3.8, le modèle ARIMA(1,0,1)(0,1,1)<sub>12</sub> s'avère très pauvre en terme de prévision des apports liquides mensuels du réservoir de Foum El Kherza.

**3.2.2.2 Réseau de neurones à temps retard ou Time Delay Neural Network TDNN**

Les processus aléatoires dynamiques nécessitent la prise en compte du facteur temps, un type de représentation du temps fait appel à un mécanisme externe qui est chargé de retarder ou de retenir un certain temps les données, le TDNN (Time Delay Neural Networks) utilise ce principe dans son architecture (Boudjelal 2011).

Le TDNN (Time Delay Neural Networks) est constitué comme le MLP (Perceptron multicouches) d'une couche d'entrée, de couches cachées et d'une couche de sortie mais il se différencie par le fait qu'au lieu de prendre en compte tous les neurones de la couche d'entrée en même temps, il prend une fenêtre du spectre puis effectue un balayage temporel.



**Figure 3.9** Architecture d'un TDNN unidimensionnel Après (Hassoun 1995)

Le TDNN a été utilisé initialement pour la reconnaissance de la parole (Waibel et al. 1989) et a trouvé ensuite son emploi pour les prévisions hydrologiques (Ballini et al. 2001; Coulibaly et al. 2001; Jain and Kumar 2007; Sajikumar and Thandaveswara 1999; Wang et al. 2007).

**Modèle TDNN**

L'application de ce type de modèles requiert la connaissance à priori du retard à considérer dans la couche d'entrée, pour cela, la série ajustée par ARIMA -X-12 ainsi que le retard trouvé par ce modèle sont utilisés comme paramètres d'entrée pour le modèle TDNN.

**Critères de performance du modèle**

Les mesures suivantes sont utilisées afin d'évaluer la performance du modèle de prévision par TDNN pour la série originale ainsi que pour les séries désaisonnalisées par :

1. ARIMA-X-12
2. En multipliant par la moyenne et divisant par l'écart type.

**RMSE Racine de l'erreur quadratique moyenne**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E^2}$$

3.6

**MAE Erreur absolue moyenne**

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |E|}{n} \tag{3.7}$$

Avec :

$$E = X_{th} - X_O$$

$X_O$  Valeur observée

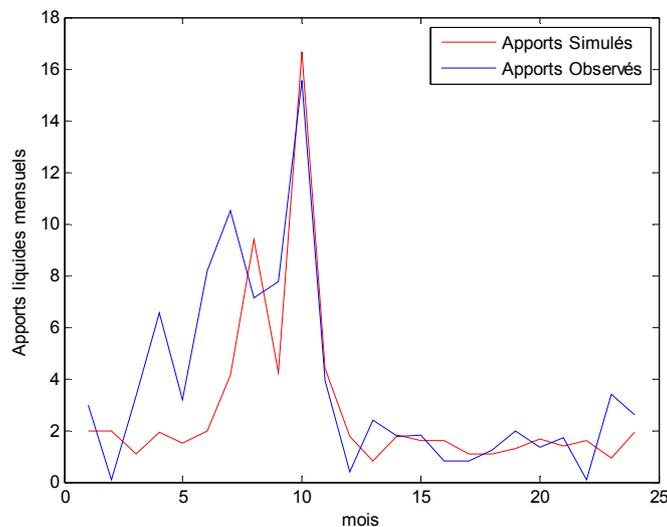
$X_{th}$  Valeur théorique

$n$  Nombre d'observations

**Tableau 3.1** Résultats de simulation pour le modèle TDNN

Type de données	Apprentissage			Test		
	RMSE	MAE	$R^2$	RMSE	MAE	$R^2$
Série originale	2.8962	1.6338	0.57	11.6161	32.8305	0.25
Série ajustée par X12 ARIMA	1.4596	1.0393	0.75	4.5953	2.1193	0.62
Série désaisonnalisée	0.5974	0.3308	0.57	3.2465	1.95	0.29

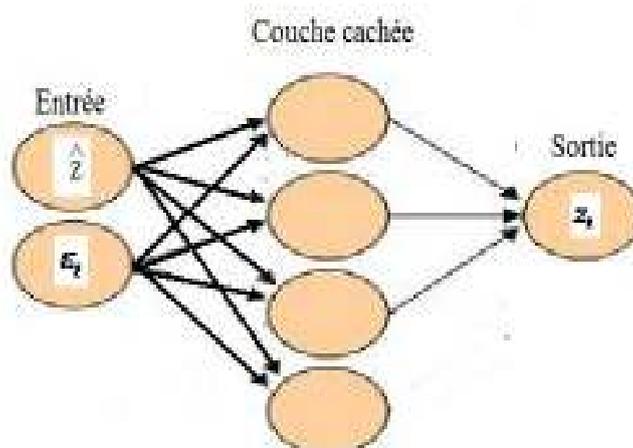
Les résultats de simulation (Tableau 3.1) ont montré que la structure des données d'entrée au modèle TDNN influence les résultats. Ainsi, les données ajustées par X12ARIMA ont donné de meilleures performance, aussi que, l'utilisation du TDNN améliore la performance du modèle par rapport au modèles ARIMA ce qui montre la non linéarité de la série d'apports liquides au réservoir de Fom El Kherza.



**Figure 3.10** Apports simulés et apports Observés (phase de validation)

Aucun de ces modèles n'a donné lieu à des résultats satisfaisants, pour cela, l'idée était d'utiliser un modèle hybride (Díaz-Robles et al. 2008; Khashei and Bijari 2010; Zhang 2003), ce dernier repose sur l'hypothèse que la non linéarité de la série est traduite par les résidus du modèle SARIMA que l'on peut approcher par MLP.

Tsenga et al. (2002) ont proposé le modèle SARIMABP, dans ce modèle, l'estimée  $\hat{Z}$  par SARIMA ainsi que les résidus  $\varepsilon_t$  seront considérées comme entrées du modèle neuronal (Figure 3.11).



**Figure 3.11** Structure du modèle hybride SARIMABP.

Un réseau MLP de la série des apports normalisés associant les résidus issus du modèle ARIMA (1 0 1)(0 1 1)<sub>12</sub> a été testé en utilisant le package caret (Kuhn. et al. 2013).

La prévision avec le modèle SARIMABP nécessite la connaissance à priori des résidus ce qui n'est pas évident. Tsenga et al. (2002) ont admis que les résidus d'un mois d'une année future considérée, sont la moyenne pondérée des résidus du même mois des années antérieures.

**Tableau 3.2 Résultats de simulation par le modèle SARIMABP**

Modèle SARIMABP (Tsenga et al. 2002)	
Entrées du modèle	Estimée SARIMA $\hat{Z}$ , Résidus SARIMA $\varepsilon_t$
Partition	70% apprentissage, 30% test Méthode utilisée Bootstrap
Nombre de neurones	7
RMSE	0.220
$R^2$ (phase de test)	0.9988

De ce qui précède et parmi les modèles élaborés, on constate que le modèle hybride proposé par Tsenga et al. (2002) (tableau 3.2) est un modèle profitant à la fois des avantages des réseaux MLP et ceux des modèles SARIMA. Ce modèle peut être adopté afin de générer une série synthétique, caractéristique des apports liquides au réservoir de Foum El Kherza.

### 3.3 Pertes par évaporation et par infiltrations

#### 3.3.1 Pertes par évaporation

La gestion optimale des réservoirs doit prendre en considération les pertes par évaporation surtout en zone aride où le phénomène d'évaporation est d'une ampleur considérable. Par conséquent, l'estimation précise des volumes évaporés est d'une importance primordiale (Hassani et al. 2008). L'évaporation dépend d'un grand nombre de facteurs. Aussi, il est difficile de la quantifier précisément et son estimation n'est souvent valable que localement (Vachala 2008).

Plusieurs méthodes sont disponibles pour l'estimation de l'évaporation à la surface des réservoirs, on peut les classer en méthodes directes et indirectes.

- La méthode directe est effectuée par mesure directe du volume évaporé à partir d'un bac d'évaporation. Les méthodes indirectes sont des formules empiriques notamment basées sur la température généralement celle de l'air, le vent à 2m au dessus du sol, l'humidité de l'air et le rayonnement solaire.
- Les méthodes indirectes sont souvent difficiles à utiliser à cause de la non disponibilité de toutes les données d'une part, et d'autre part, de la validité de ces formules pour un cas d'étude précis (Hassani et al. 2008).

Récemment, d'autres méthodes ont été explorées par de nombreux chercheurs, telles que les modèles de machines à vecteurs de support (SVM) (Samui 2011), les modèles type **''black box''** tels que les algorithmes génétiques (Kasiviswanathan et al. 2011), ANFIS (Terzi et al. 2006), les réseaux de neurones (Deswal and Pal 2008; Kumar and Tiwari 2012; Ladlani et al. 2012; Moghaddamnia et al. 2009; Tabari et al. 2010).

L'évaporation à partir de la surface du réservoir de Foum El Kherza est très intense. La lame évaporée est mesurée à partir d'un bac Colorado avec un coefficient de (0.7) (ROHWER 1931). Cette lame diminuée de celle précipitée directement est convertie en volume en la

multipliant par la surface du plan d'eau correspondante, cette dernière est déterminée par bathymétrie.

Le volume net moyen annuel perdu par évaporation est estimé à 3.56 hm<sup>3</sup> représentant plus de 17% de l'apport moyen annuel (Figure 3.12) avec un maximum enregistré au mois de juillet avec 0.53 hm<sup>3</sup> (figure 3.13).

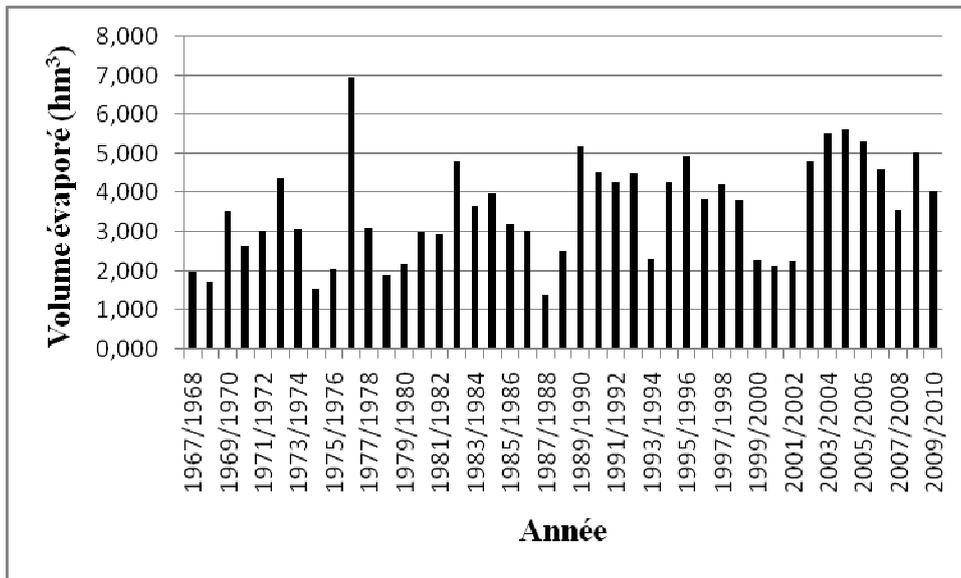


Figure 3.12 Volumes annuels évaporés.

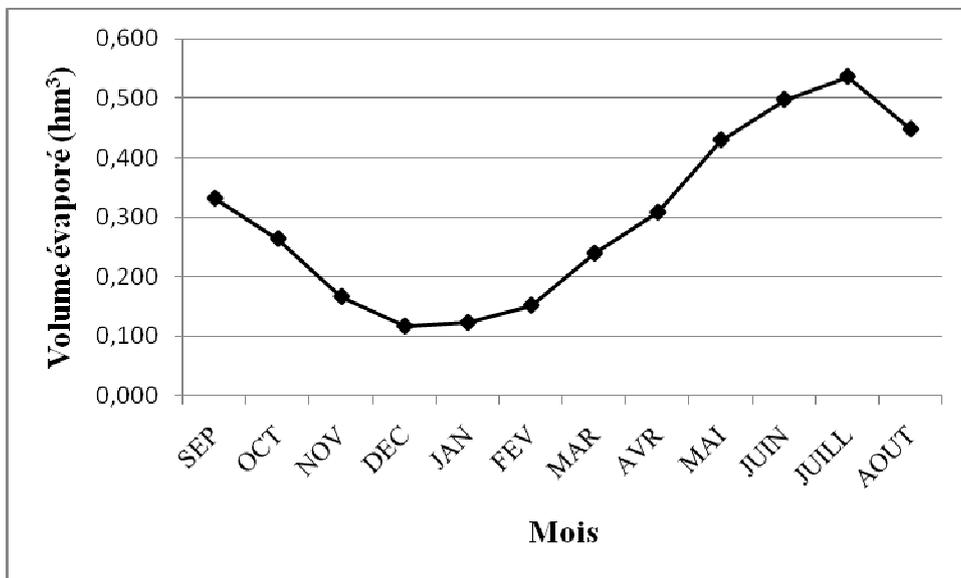


Figure 3.13 Moyennes mensuelles des volumes évaporés

3.3.1.1. Relation Volume évaporé -Volume d'eau dans le réservoir par RNA

Afin d'exploiter au mieux les modèles neuronaux, on a choisi un MLP à une couche cachée et testé différentes structures du réseau soient : le nombre de neurones de la couche cachée,

type de l'apprentissage ainsi que son algorithme et choix des éléments de validation et ceux de test. Le nombre de neurones dans la couche cachée est choisi par tâtonnement et en fonction de la qualité du modèle obtenu. L'algorithme de Levenberg Marquardt est retenu pour l'apprentissage par rétropropagation, ceci, à cause de sa robustesse et à sa convergence rapide. La base de données est partagée en 70 et 30% respectivement pour l'apprentissage et le test du modèle.

L'application du modèle neuronal pour l'estimation du volume évaporé à partir de la surface du réservoir de Foum El Kherza est élaborée avec le logiciel Matlab<sup>®</sup>, utilisant les volumes d'eau mensuels  $V(t)$  dans le réservoir et ceux correspondants évaporés nets  $E(t)$  enregistrés pendant la période 1967/2010. Le modèle neuronal est comparé à une régression linéaire, cette régression a été adoptée pour la modélisation de l'évaporation décadaire au niveau du réservoir El Morra (Pabiot 1999), on adoptant le coefficient de détermination pour juger de la qualité du modèle.

**Tableau 3.3** Estimation de l'évaporation mensuelle par réseaux de neurones Et régression linéaire (phase de validation).

Mois	Variables d'entrée	Structure ANN	R <sup>2</sup>	Régression	R <sup>2</sup>
SEPT	V(t)	1-20-1	0.90	0.013x+0.224	0.41
OCT	V(t)	1-20-1	0.85	0.008x+0.164	0.34
NOV	V(t)	1-20-1	0.84	0.004x+0.162	0.16
DEC	V(t)	1-20-1	0.76	0.003x+0.088	0.121
JAN	V(t)	1-20-1	0.88	0.002x+0.1	0.05
FEV	V(t)	1-20-1	0.91	0.006x+0.093	0.22
MAR	V(t)	1-20-1	0.81	0.007x+0.166	0.30
AVR	V(t)	1-20-1	0.90	0.010x+0.2	0.36
MAI	V(t)	1-20-1	0.86	0.013x+0.298	0.37
JUIN	V(t)	1-20-1	0.91	0.018x+0.306	0.47
JUIL	V(t)	1-20-1	0.87	0.025x+0.293	0.50
AOUT	V(t)	1-20-1	0.98	0.025x+0.245	0.55

La modélisation du volume évaporé à partir du réservoir de Foum El Kherza par réseaux de neurones (Tableau 3.3) a abouti à des coefficients de détermination entre 0.76 pour le mois de décembre et 0.98 pour celui d'aout, on constate aussi que cinq mois sur douze ont un coefficient de détermination supérieur à 90%, ces coefficients sont plus élevés que ceux calculés pour le modèle régressif linéaire et dont le coefficient maximal calculé est celui du mois d'aout avec 55%.

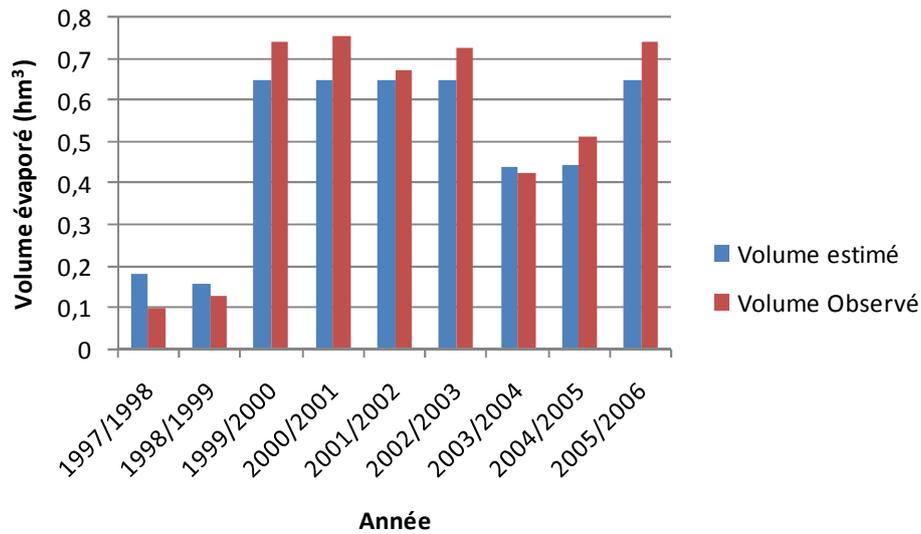


Figure 3.14 Volumes évaporés estimés par réseaux de neurones et ceux observés (pour l'échantillon de test).

### 3.3.2 Pertes par infiltration

Après la mise en eau du barrage, de nombreuses résurgences sont apparues en aval sur les deux rives. Les fuites du réservoir sont mesurées en un certain nombre de points situés en rive droite et en rive gauche en aval du barrage (ISL 2006). Celles de la rive droite sont captées par de nombreux forages débouchant dans le tunnel d'irrigation et sont mesurées par un déversoir triangulaire à la sortie de ce tunnel. Par contre celles de la rive gauche étaient captées en trois points de résurgence et dont le dispositif de mesure est envasé (ISL 2006).

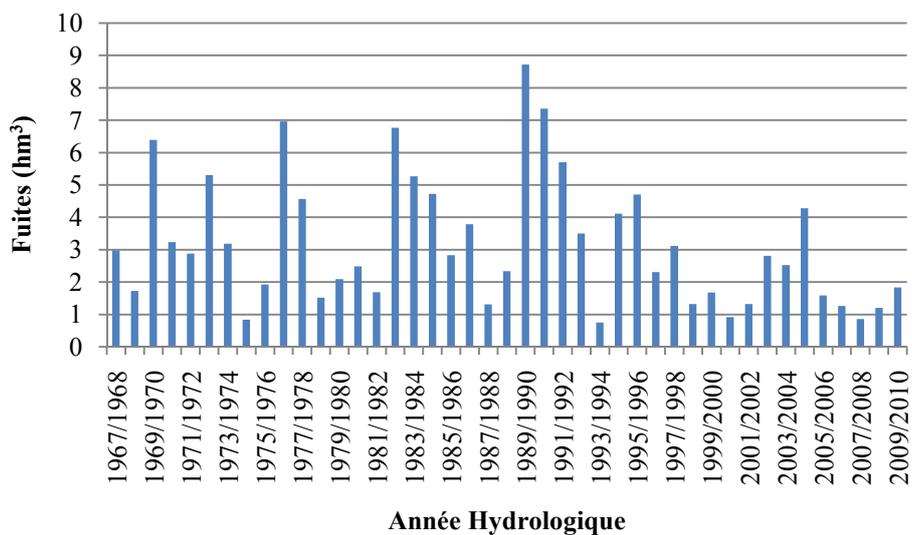
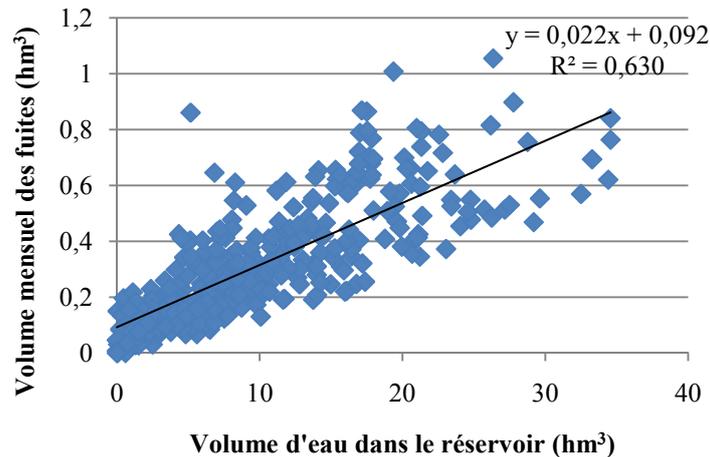


Figure 3. 15 Volumes annuels des fuites

### 3.3.3. Modélisation des pertes par infiltrations

Afin de pouvoir les intégrer dans le bilan et étant liées étroitement au volume d'eau dans le réservoir, les infiltrations mensuelles à partir du réservoir sont considérées comme fonction de ce dernier (Pabiot 1999; Sivapragasam et al. 2009). Étant donné qu'une relation explicite ne peut être extraite des données disponibles. Une régression linéaire a été examinée.



**Figure 3.16** Volumes mensuels des fuites en fonction du volume d'eau dans le réservoir.

Ce modèle issu de la régression linéaire est d'une grande utilité malgré la faible valeur de  $R^2$ , car il considère que les infiltrations sont nettement en relation avec le volume d'eau dans le réservoir.

### 3. 4 Pluviométrie directe au dessus du réservoir

La pluviométrie<sup>2</sup> se caractérise par une irrégularité interannuelle et saisonnière. La moyenne des pluies sur 43 ans d'observation est de 123 mm.

<sup>2</sup> L'étude de la série temporelle de la pluie n'est qu'à titre indicatif.

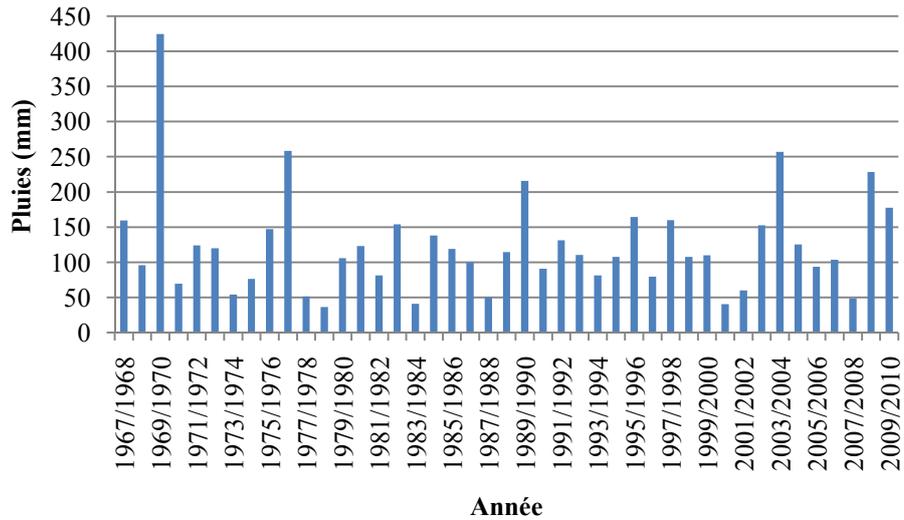


Figure 3.17 Pluies annuelles (mm) (Sept1967- Aout 2010).

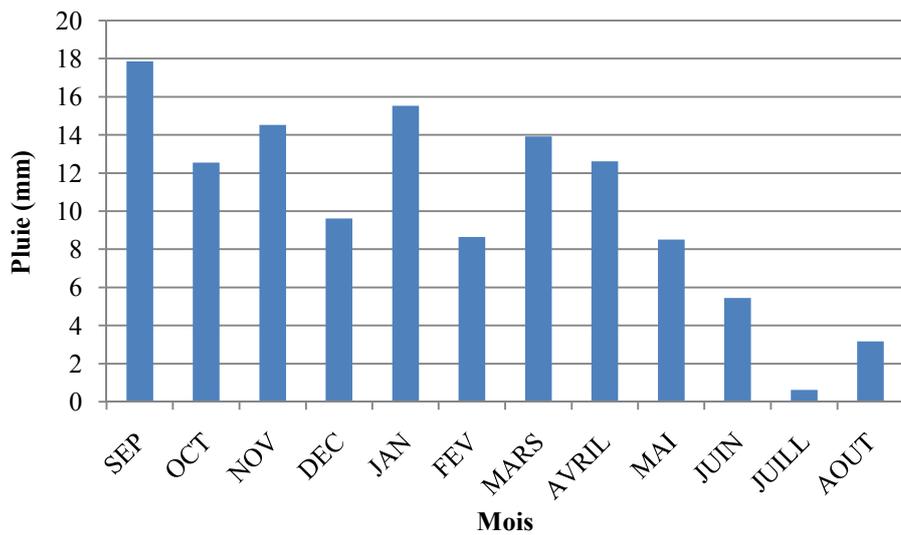
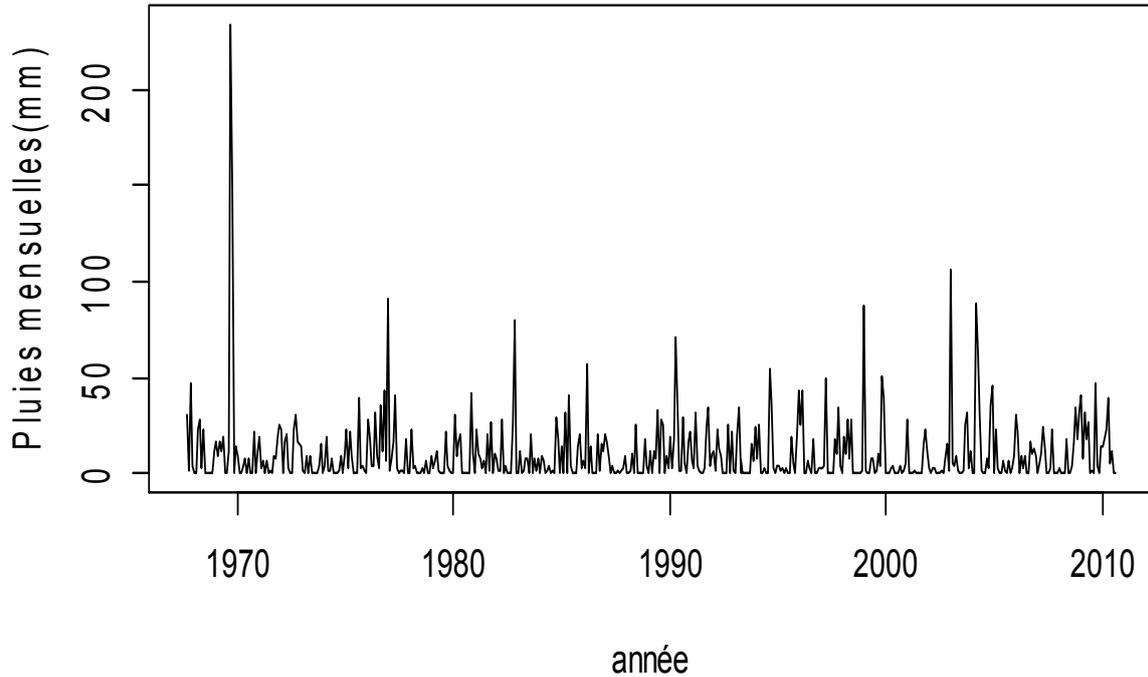


Figure 3.18 Moyennes mensuelles des pluies à Foum El Kherza.

**3.4.1 Modélisation des pluies mensuelles.**

Comme pour le cas des apports liquides, on choisi d’adopter la méthodologie de Box Jenkins sur la série temporelle des pluies mensuelles, s’étalant du mois de septembre 1967 au mois d’aout 2010 (Figure 3.19).

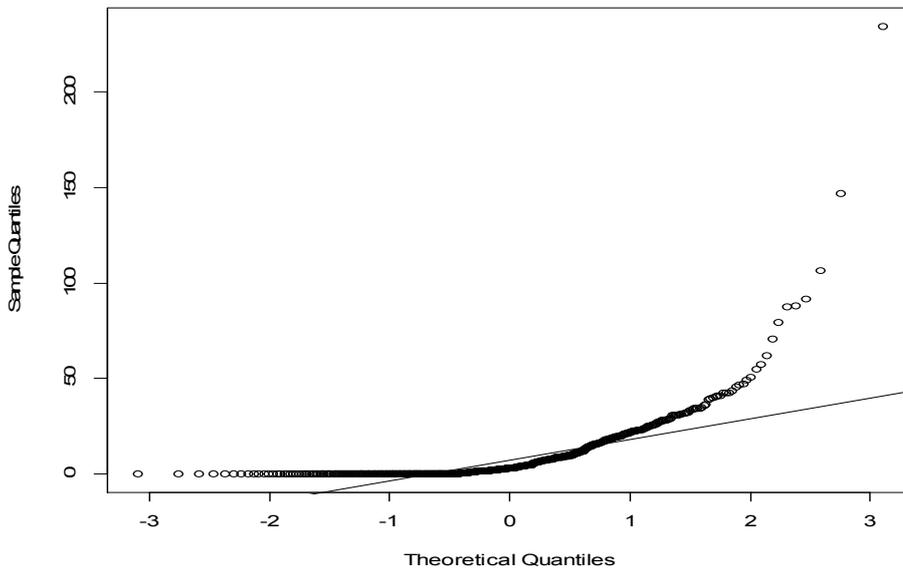


**Figure 3.19** Pluies mensuelle à Foum El Kherza (Sept 1967- Aout 2010)

**Tableau 3.4** Statistiques descriptives de la série

Nombre d'années	moyenne	médiane	Ecart type	Max	Min
43	10.25	3.00	18.53	234.0	0

**Normal Q-Q Plot**



**Figure 3.20** Q-Q plot normale des pluies mensuelles à Foum El Kherza (Sept 1967- Aout 2009)

la série considérée est normalisée en utilisant la fonction  $X = \sqrt{x}$  figure 3.21.

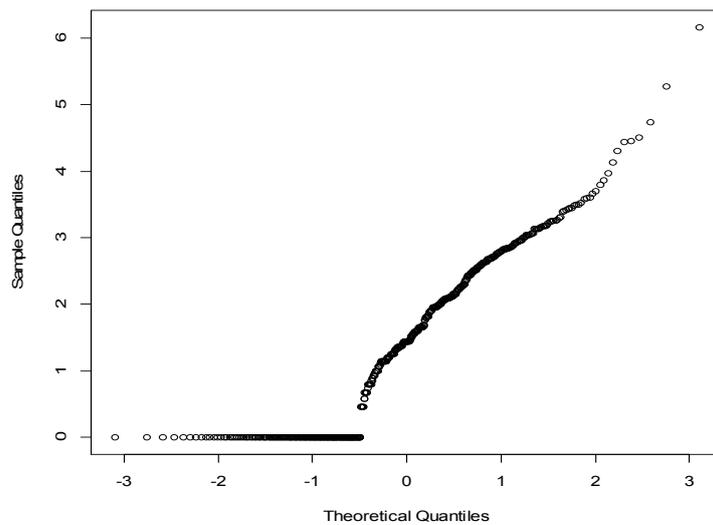


Figure 3.21 Q-Q plot normale de la série prénormalisée

- Un premier modèle en utilisant la fonction auto.arima propose un ARIMA(2,0,1) (2,0,0)<sub>(12)</sub> sur la série normalisée.

Un réseau MLP de la série des pluies mensuelles normalisées associant les résidus issus du modèle SARIMA(2,0,1) (2,0,0)<sub>(12)</sub> a été testé suivant plusieurs structures et a abouti aux résultats suivants

Tableau 3.5 Résultats de simulation du modèle hybride SARIMABP.

Modèle SARIMABP (Tsenga et al. 2002)	
Entrées du modèle	Estimée SARIMA $\hat{Z}$ , Résidus SARIMA $\epsilon_t$
Partition	70% apprentissage, 30% test Méthode utilisée Bootstrap
Nombre de neurones	7
RMSE	0.220
R <sup>2</sup> (phase de test)	0.97

### 3.5 Demande en eau et lâchers historiques

Le palmier dattier en Algérie est considéré outre un moyen d’existence depuis des milliers d’années pour les régions du sud, un patrimoine pour la culture et la diversité écologique du désert (Merabet and Souissi 2008).

L’Algérie occupe la 2<sup>ème</sup> place parmi les pays producteurs de dattes dans la zone arabe avec plus de 600 mille tonnes par an, dont plus de 35 mille tonnes de l’indiscutable leader

« Deglet Nour » qui est destinée spécialement à l'exportation, et afin de renforcer la production spécialement de cette catégorie de dattes localisée principalement aux Zibans, de nouveaux dattiers ont été plantés dans cette région. Aujourd'hui, elle compte plus de 380000 palmiers.

Dans le souci d'assurer la durabilité de ce patrimoine phoenicicole, le réservoir de Foum El Kherza est destiné après l'indépendance et après que la production de l'électricité a été abandonnée, spécialement pour l'irrigation des palmeraies de cette région soient Seriana, Sidi Okba et Garta.

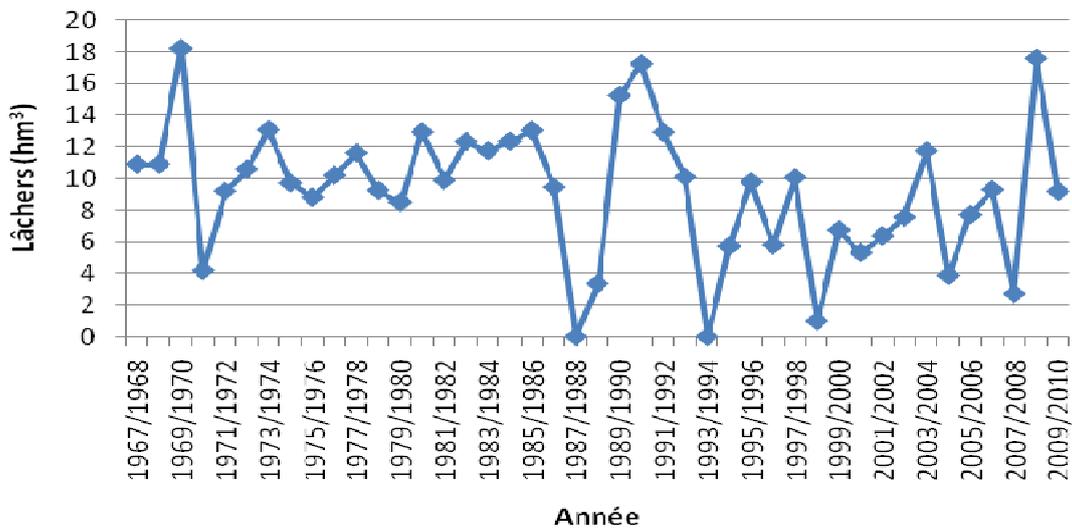


Figure 3.22 Historique des lâchers annuels au niveau du réservoir de Foum El Kherza.

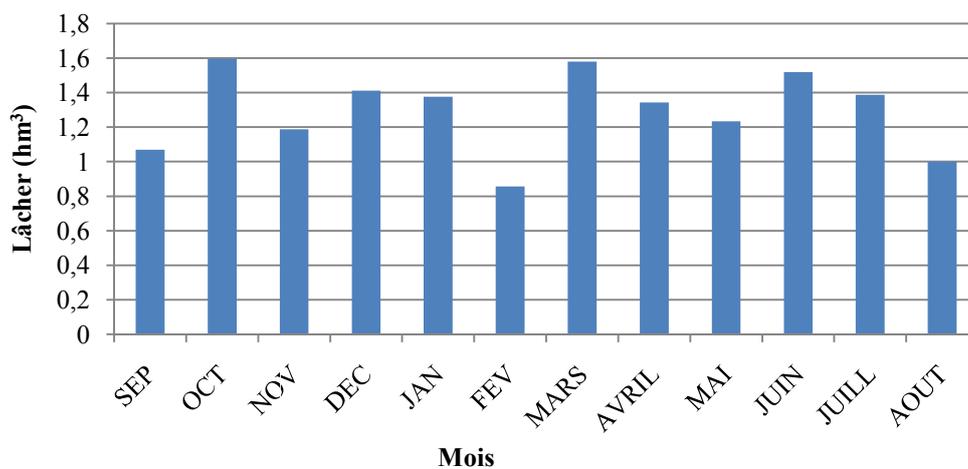


Figure 3.23 Historique des lâchers moyens mensuels au niveau du réservoir Foum El Kherza.

### 3.5.1 Besoins en eau du palmier dattier

« Le palmier vit les pieds dans l'eau et la tête au feu du ciel. » (Peyron 2000), Le palmier dattier peut vivre en atmosphère sèche, pourvu que les besoins en eau au niveau des racines soient satisfaits. Il doit fabriquer des tissus nouveaux, en particulier des palmes 7 à 30 palmes par an selon les cultivars, l'endroit et les conditions culturales, et des inflorescences 10 à 20 par an (Peyron 2000).

L'irrigation est primordiale en phoeniciculture. Les apports d'eau doivent être suffisants pour couvrir tous les besoins du palmier dattier, pour compenser les pertes par infiltration et par évaporation à la surface du sol, pour satisfaire les besoins des cultures intercalaires, s'il y a lieu, et pour lessiver le sol afin d'éliminer les sels accumulés. Pour une production végétale importante, dans un milieu aride, l'eau doit être fournie par une irrigation abondante, dont le volume nécessaire est aussi fonction de facteurs tels que :

- la nature et la texture du sol.
- la qualité de l'eau fournie.
- la protection contre les vents.
- la densité de plantation .
- l'âge de la plantation.
- la présence ou non d'une nappe phréatique.
- la présence ou non de cultures sous-jacentes
- les conditions climatiques, c'est-à-dire l'aridité et les variations saisonnières.

Tous ces facteurs font qu'il est difficile de déterminer rigoureusement le volume d'eau à fournir pour la vie et la production du dattier sinon d'après les calculs basés sur l'évapotranspiration (Peyron 2000).

Différentes approches sont utilisées pour la détermination théorique des besoins en eau du palmier dattier (Khan and Prathapar 2012) parmi elles :

- Par mesures directes de l'évaporation affectée du coefficient cultural  $K_c$ , ce dernier est fonction de la culture égal à 0.9 en hiver et 0.95 en été (Merabet and Souissi 2008)

$$Etc = K_c \times Eto$$

Etc : Evapotranspiration de la culture (mm/jour)

$K_c$  : Coefficient cultural.

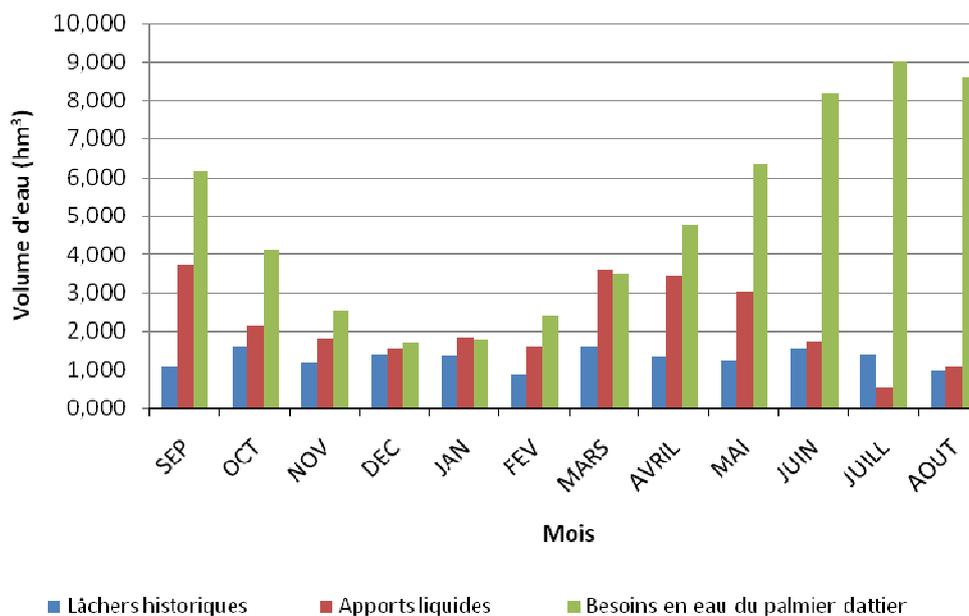
$Eto$  : Evapotranspiration de référence (mm/jour)

- En utilisant l'équation de Penman-Monteith (Penman 1948) qui est la combinaison du bilan énergétique et du flux de masse. Cette approche a été choisie par la FAO comme méthode privilégiée d'estimation de l'évapotranspiration de référence  $ET_o$ , et par suite l'évaporation de la culture  $ET_c$  est celle de référence affectée du coefficient cultural  $K_c$ .
- Approche basée sur les données liées au sol qui considère que les conditions du sol influencent fortement les besoins en eau du palmier. Ainsi, La connaissance de la teneur en eau réelle (humidité du sol) et la capacité de rétention du sol permettent de mesurer la quantité exacte d'eau l'irrigation à appliquer (Khan and Prathapar 2012).

Selon les mesures de l'évaporation effectuées sur le site du barrage sur bac Colorado (coefficient 0.7), et en affectant un coefficient cultural  $K_c$  de 0.95 en été et 0.9 en hiver (Merabet and Souissi 2008), les besoins en eau du palmier dattier ont été évalués par la méthode directe et comparés à ceux moyens évalués par Merabet et Souissi (2008).

**Tableau 3.6** Besoins en eau du palmier dattier (sur la base de 120 palmiers/ha)

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
l/jour/ palmier (Merabet and Souissi 2008)	198	280	388	513	630	783	831	771	570	407	247	180
l/s/ha (Merabet and Souissi 2008)	0.27	0.38	0.54	0.69	0.88	1.05	1.15	1.07	0.77	0.57	0.33	0.25
l/jour/ palmier	196	265	391	527	703	910	1002	956	684	461	278	188
l/s/ha	0.27	0.36	0.54	0.73	0.97	1.26	1.39	1.32	0.95	0.64	0.38	0.26



**Figure 3.24** Lâchers historiques, Apports liquides et Besoins en eau du palmier dattier

La figure 3.24 montre que les besoins évalués du palmier dattier sont nettement supérieurs aux lâchers historiques effectués pendant les années d'opération du réservoir, ainsi qu'aux apports liquides, ceci montre que le barrage n'est pas en mesure de satisfaire cette demande et qu'à priori, la défaillance du réservoir est éventuellement prévue.

### 3.6 Conclusion

- Ce chapitre recommande la combinaison des méthodes issues des modèles régressifs et ceux de l'intelligence artificielle, à la fois, pour les apports liquides et pour les pluies.
- Le manque de données concernant la température, l'humidité, etc. nous a incité à utiliser le volume d'eau dans la retenue comme seule variable d'entrée au modèle neuronal concernant l'évaporation nette, la disponibilité de ces données améliorera certainement la qualité du modèle.
- Concernant l'irrigation, on n'a considéré que celle des palmiers alors que nécessairement, elle n'est pas la seule plantation.
- Les fuites à Foum El Kherza restent encore une variable difficilement quantifiable, ceci à cause des nombreuses sources non mesurées.

## *Chapitre IV*

### *Sédimentation du réservoir*

#### 4.1 Introduction

La sédimentation des réservoirs est l'un des principaux problèmes qui affectent la performance des barrages en Algérie, du point de vue sécurité des structures, capacité des retenues pour le stockage et aussi qualité des eaux. Le réservoir de Foum El Kherza est objet d'une opération de dévasement afin de récupérer 70% de sa capacité initiale de  $47\text{hm}^3$ , la gestion optimisée de ce réservoir doit tenir compte du volume perdu par sédimentation. Cette dernière étant un phénomène très complexe qui est régi par des paramètres hydrauliques et hydrologiques et qui à ce jour, n'a pas de solution analytique qui peut déterminer d'une manière précise la capacité perdu d'un réservoir (Singh and Durgunoglu 1990), on est amené à utiliser les relations empiriques qui divergent souvent des mesures in situ (Remini and Hallouche 2005).

Plusieurs méthodes sont présentes dans la littérature pour prédire les débits solides transportés par une rivière, la plus largement utilisée étant la courbe de tarage des sédiments, qui combine les données des concentrations en sédiments aux débits liquides afin d'en déduire une relation souvent sous forme de puissance et qui peut être utilisée pour une prévision à long terme, d'autres méthodes sont aussi utilisées comme celles basées sur l'équation universelle de perte de sol de Wischmeyer et ses dérivées (Demmak 1984; MacArthur et al. 1995), sans oublier les modèles mathématiques tels que HEC-RAS<sup>®</sup> (HEC 1991; HEC 1995), FLUVIAL<sup>®</sup> (Chang 1998) etc. Ces modèles sont fortement dépendants des données sur site, ce qui n'est pas toujours disponible (Morris and Fan 1998). En Algérie, plusieurs essais de prédiction du taux d'envasement des réservoirs ont été mis en œuvre.

Tixeront (1960) a établi une relation puissance entre le taux d'envasement annuel et l'apport liquide annuel.

Remini et Avenard (1998) ont établi une relation polynomiale donnant le volume piégé dans le réservoir de Foum El Kherza en fonction du temps.

Remini et Hallouche (2005) ont établi deux relations donnant le débit annuel en sédiments fonction du temps d'opération, l'une puissance pour les pays du Maghreb ayant un fort taux de sédimentation, l'autre linéaire avec un taux de sédimentation assez faible.

Meddi et al. (1998) ont utilisé les données de dix huit réservoirs algériens afin d'établir un modèle donnant le débit annuel de sédiments en fonction de deux paramètres le débit annuel et la superficie du bassin versant.

Kassoul et al. (1997) ont développé un abaque à partir de dix neuf barrages algériens afin de permettre l'évaluation du débit solide accumulé.

Bessenasse et al. (2004) ont construit un modèle hydraulique bidimensionnel utilisant les équations de Saint-Venant et une équation de convection-diffusion afin de prédire la sédimentation du réservoir de Zerdezas.

Habituellement, la courbe de tarage en sédiments (SRC) est développée en utilisant les données de plusieurs années de mesures des apports liquides et ceux solides dans les stations hydrométriques. Les lacunes et discontinuités des mesures dans la station de M'chounech nous ont empêché d'utiliser cette méthode dans sa forme classique et incité à rechercher une autre méthode dans laquelle on va utiliser non pas les données de la station de M'chouneche mais plutôt celles des levés bathymétriques, ces dernières étant plus précises et vu le nombre important de campagnes bathymétriques élaboré, elles constituent une base de données très importante. Elles vont être associées par la suite aux apports liquides journaliers au réservoir. Cette méthode nous a été proposée pour la première fois par G.L. Morris, et dans laquelle une estimation retour de la fonction puissance (SRC) donnant la concentration journalières en sédiments en fonction du débit liquide journalier, par optimisation, ceci, à partir des débits liquides journaliers déduits du bilan hydrique dans le réservoir d'une part, et de la courbe cumulative des sédiments piégés dans la retenue mesurés par huit levés bathymétriques effectués le long des années d'opération du réservoir d'une autre part.

## 4.2 Données

A la figure 4.1, la série d'apports liquides journaliers reconstituée par bilan hydrique (Septembre 1967-Mai 2011). Dans cette série, plus de 95% des apports ont une valeur de moins de  $0.2 \text{ hm}^3$  avec des crues de courte durée, dont les plus importantes ont eu lieu le 01/09/1990, 16/04/2004 et 04/05/2006 avec des volumes liquides de 13.74, 25.21 et  $19.20 \text{ hm}^3$  respectivement. Quelques statistiques descriptives de cette série sont présentées au tableau 4.1.

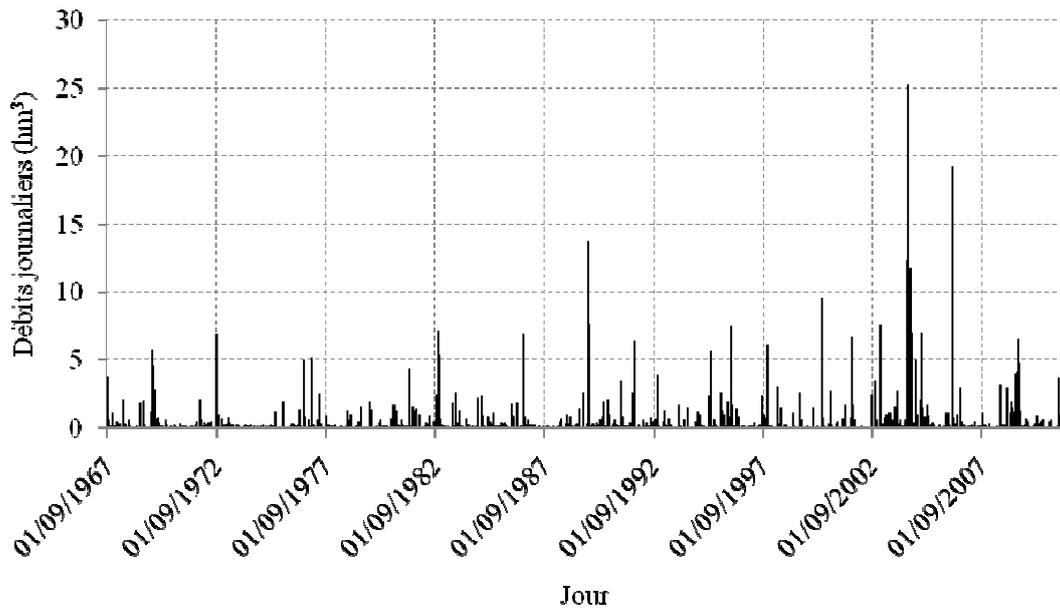


Figure 4.1 Apports liquides journaliers à Foum El Kherza (Septembre 1967-Mai 2011).

Tableau 4.1 Statistiques descriptives de la série d’apports journaliers.

Nombre	$x_{moy}$ (hm <sup>3</sup> )	$S_d$ (hm <sup>3</sup> )	$x_{médiane}$ (hm <sup>3</sup> )	$x_{max}$ (hm <sup>3</sup> )	$x_{min}$ (hm <sup>3</sup> )	$C_v$	$C_s$
15,978	0.0714	0.457	0.005	25.209	0	6.39	24.6

La figure 4.2 montre la perte cumulative de la capacité du réservoir évaluée par des campagnes bathymétriques effectuée en 1967, 1975, 1986, 1993, 2001, 2004 et en 2007 ce dernier a été effectué juste après la première tranche de dragage d’un volume de 4hm<sup>3</sup> de vase.

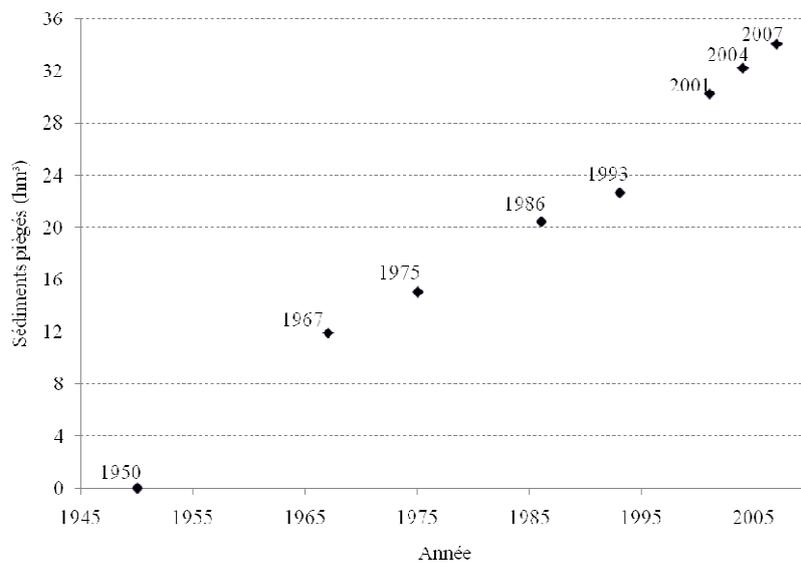


Figure 4.2 Levés bathymétriques effectués à Foum El Kherza.

## 4.3 Méthodes

### 4.3.1 Levés bathymétriques

Un levé bathymétrique constitue un moyen très efficace de mesure du volume des sédiments piégés dans un réservoir, principalement à long terme, car il prend en considération non seulement le débit solide en suspension, mais celui charrié (Morris and Fan 1998). L'incertitude majeure concernant cette méthode est celle de la densité apparente des sédiments qui est généralement estimée et non pas mesurée, et qui peut varier considérablement non seulement suivant la profondeur mais aussi d'un levé à un autre (Morris and Fan 1998).

### 4.3.2 Courbe de tarage en sédiments (SRC)

La courbe de tarage en sédiments (Sediment Rating Curve) est une relation empirique entre la concentration en sédiments  $C$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) ou le débit solide  $Q_s$  ( $\text{kg s}^{-1}$ ) et le débit liquide

$Q$  ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ). C'est une méthode du type "**black box**" ayant pour forme standard :

$$C = aQ^b \quad 4.1$$

Ou

$$Q_s = a'Q^b \quad 4.2$$

Les coefficients  $a$ ,  $a'$  représentent respectivement la concentration et le débit solide pour un débit liquide de  $1\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .

$b$  et  $b'$  reflètent la réponse au changement du débit liquide, ils varient entre 1 et 2 (Julien 2010).

Différentes études ont été élaborées afin de donner une signification physique aux valeurs des coefficients de cette courbe :

Benkhalel et Remini (2003) ont montré que ces coefficients sont fortement influencés par la pluviométrie, l'apport liquide et l'humidité du sol.

Frostick et al. (1983) ont noté qu'aux climats arides sont associés des valeurs de  $b$  inférieurs à 1 et des grandes valeurs de  $a$ .

La courbe de tarage est souvent utilisée pour la prévision de la sédimentation des réservoirs :

Khanchoul et Remini (2009) ont jugé que les courbes de tarage en sédiments sont adéquates pour la prédiction de la sédimentation du réservoir de Bouhamdane.

Jahani (1992) a démontré que la courbe de tarage en sédiments donne des résultats assez proches à ceux réellement mesurés par bathymétrie.

Toutefois il est recommandé d'utiliser cette méthode avec précaution (Asselman 2000; Walling 1977a; Walling 1977b), ceci est principalement dû à l'erreur induite par l'ajustement des valeurs extrêmes, ces dernières ne sont enregistrés que partiellement.

#### ***4.3.3 Efficacité de piégeage 'Trap efficiency'.***

L'efficacité de piégeage d'un réservoir est le pourcentage de l'apport solide total retenu dans le réservoir. La méthode la plus utilisée pour estimer l'efficacité de piégeage à long terme est à partir de la courbe de Brune (Brune 1953) qui estime cette efficacité en se basant sur le rapport de la capacité de stockage à l'apport moyen annuel (Batuca and Jordaan 2000; Heinemann 1984; Morris and Fan 1998). L'efficacité de piégeage varie grandement d'un événement à un autre et peut aussi être influencée par les différentes opérations au niveau du réservoir ou temps de séjour hydraulique 'HRT' (Hydraulic Residence Time). Toute fois, l'efficacité à long terme diminue tout le long de la durée de vie du réservoir étant donné que ce dernier s'envase continument.

#### ***4.3.4 Apport solide piégé historique***

Afin de convertir le volume des sédiments piégés mesuré par bathymétrie en masse, la densité apparente des sédiments est nécessaire, cette dernière varie à la fois avec la taille des particules et le degré de consolidation. Sur la base de l'étude effectuée par Remini et Avenard (1998) la majorité des sédiments est constituée de limons et de sables. La valeur adoptée pour la densité apparente de cette composition est  $\rho = 1.4 \text{ t m}^{-3}$  (Geiger 1963).

#### ***4.3.5 Chasse de fond, évacuation durant les crues et dévasement***

L'historique de l'opération du réservoir nous a servi d'enregistrer les différents volumes chassés par le fond et ceux déversés par l'évacuateur. Etant constitués de mélanges eau-sédiments les valeurs suivantes sont adoptées:

- Le rapport Volume vidangé-Volume des sédiments vidangés 10
- Le rapport Volume déversé- Volume des sédiments déversés 20

- L'opération de dragage du réservoir a été entamée en 2006, avec un soutirage d'un volume de  $4\text{hm}^3$ . Ce volume est converti en masse avec la même valeur de la densité apparente.

#### 4.3.6 Concentration journalière en sédiments

Comme indiqué plus haut, on admet que la concentration en sédiments journalière est liée par la relation (5.1) à l'apport liquide journalier, il est à noter que cette concentration est totale, en d'autres termes, elle inclut les sédiments suspendus et ceux charriés. Les coefficients  $a$  et  $b$  sont tous les deux soumis respectivement à deux contraintes:

- Du fait que le réservoir draine les eaux d'un bassin versant relativement grand, le coefficient  $a$  représentant la concentration d'un débit de  $1\text{m}^3\text{s}^{-1}$  ne peut prendre des valeurs supérieures à 1. Le débit moyen journalier à Foug El Kherza est de  $0.0714\text{hm}^3$ , cette valeur correspond à un débit de  $0.82\text{m}^3/\text{s}$ , ce qui représente un débit relativement faible et par conséquent, transporte un débit solide faible.

**Tableau 4.2** Quelques valeurs du coefficient  $a$  pour des bassins algériens.

Etude	Oued	Superficie ( $\text{km}^2$ )	$a$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )
Touaibia et al. (2001)	Mina	4126	1.05-10.10
Terfous et al. (2001)	Mouillah	2650	0.4082
Achite et Ouillon (2007)	Abd	2480	1.710
Khanchoul et al. (2007)	Kebir ouest	1130	0.8927
Khanchoul et Jansoon (2008)	Mellah	550	0.48
Khanchoul et Remini (2009)	Bouhamdane	1105	0.21-0.55
Cherif et al. (2009)	Mekerra	1890	5.7191
Khanchoul et al. (2010)	Kebir	681	0.86

- Le coefficient  $b$  est compris entre 1 et 2.

#### 4.4 Optimisation de la Courbe Cumulative en Sédiments Piégés

La courbe cumulative est construite par cumul des masses de sédiments piégés et à partir du bilan sédimentaire dans le réservoir au pas de temps journalier:

Masse des sédiments entrants = Masse des sédiments piégés - Masse des sédiments (Evacués+Vidangés+Soutirés).

Cette courbe est sujette à une optimisation afin de l'ajuster à la courbe cumulative des masses de sédiments piégés réellement observée, soit les huit levés bathymétriques. La fonction d'optimisation choisie est relative à la maximalisation du critère de Nash :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_1^6 (MB - MC)^2}{\sum_1^6 (MB - \overline{MB})^2} \quad 4.3$$

Où :

MB : Masse des sédiments aux levés bathymétriques (Tonnes)

MC : Masse des sédiments de la courbe cumulative (Tonnes)

$\overline{MB}$  : Moyenne des levés bathymétriques (Tonnes).

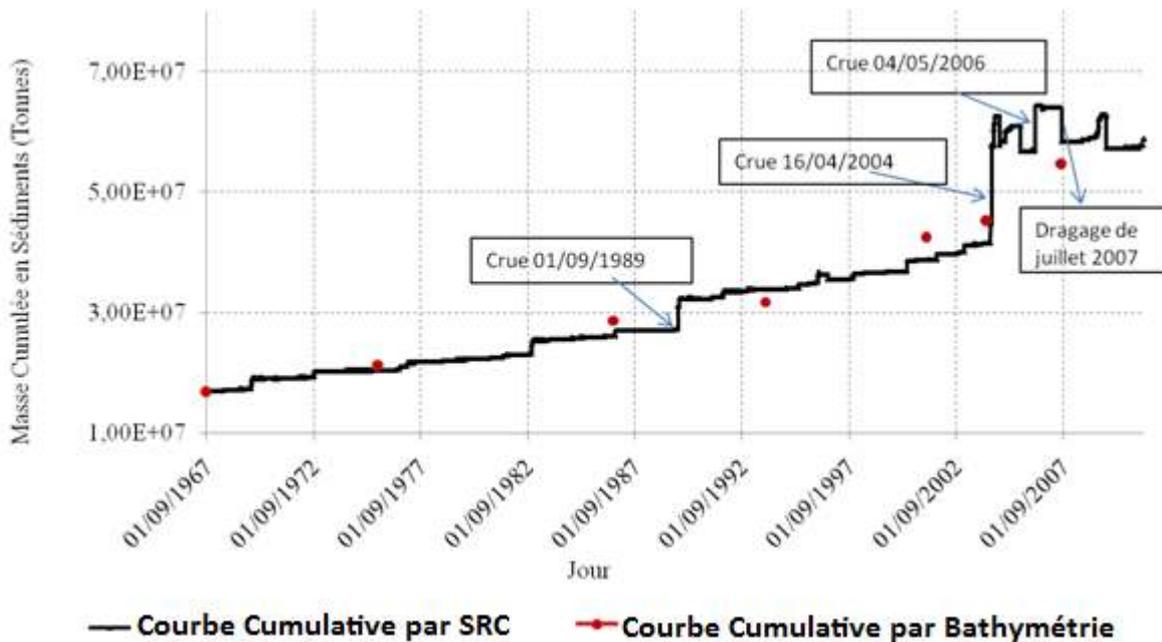


Figure 4.3 Optimisation de la courbe cumulative des sédiments piégés

#### 4.4 Résultats de l'Optimisation de la Courbe Cumulative

L'équation puissance donnant la concentration journalière en sédiments en fonction du débit liquide journalier obtenue par optimisation est :

$$C_t = 1.33Q_t^{1.05} \quad 4.4$$

Avec :

- Le critère de Nash= 0.95.
- Le coefficient de détermination  $R^2= 0.96$ .

Dans leur étude sur le même réservoir, Remini et Avenard (1998) ont conclu que l'évolution de la sédimentation de réservoir est une fonction polynomiale du second degré de temps qui tend vers une stabilisation. Ce qui n'est pas le cas puisque le nombre de crues-éclair a augmenté de 2004 à 2009 avec des apports en sédiments importants. Heureusement, les évacuations à partir du déversoir était plus efficaces pendant les inondations de 2004 et 2006 car le réservoir était déjà plein, en plus des effets bénéfiques de la vidange de fond et l'opération de dragage. L'approche proposée montre l'influence de ces différentes opérations. Le tableau 4.3 indique que l'efficacité annuelle de piégeage des sédiments est très variable et peut différer de la moyenne à long terme estimée par la courbe de Brune en raison de la variabilité d'année en année hydrologique d'une part, et des différentes opérations du réservoir d'une autre part, comme lors des grandes inondations qui se sont produites lorsque le réservoir était presque plein dans les années 2004 et 2006.

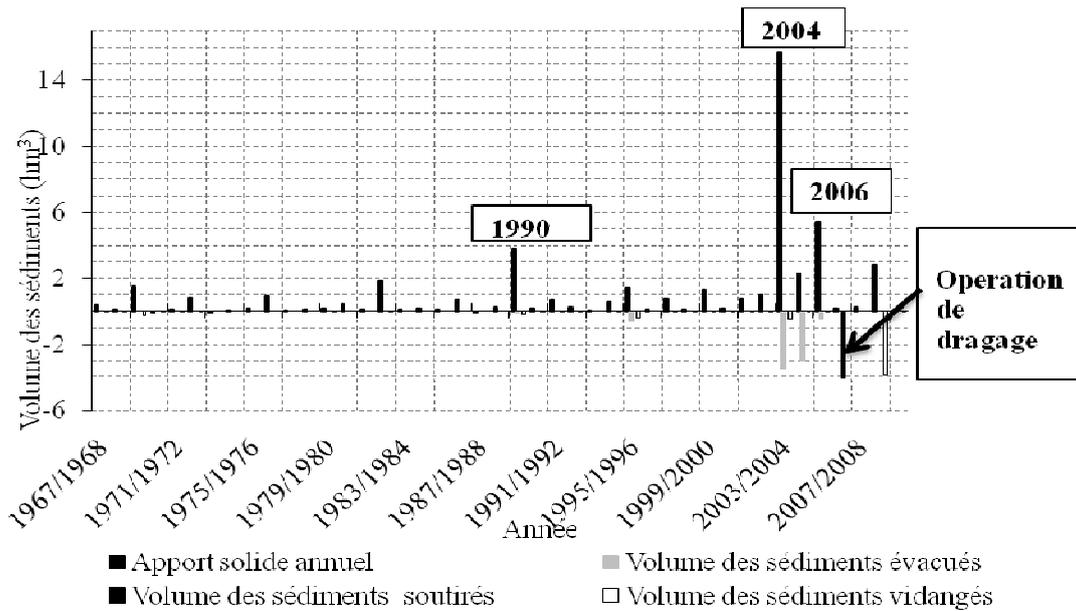
Tableau 4.3 Capacité de piégeage

Année	C (Mm <sup>3</sup> )	I(Mm <sup>3</sup> )	C/I	TE (%)	
				Brune Curve	CTSC
1950	47	-	-	-	-
1967	35.07	21.103	1,66	98	-
1975	31,925	18.98	1,68	98	85
1986	26,519	20.48	1,29	98	99 <sup>1</sup>
1993	24,313	18.202	1,33	98	94
2001	16,744	16.66	1,00	98	75 <sup>2</sup>
2004	14,739	90.52	0,16	91	99 <sup>3</sup>
2007	12,9	36.82	0,35	95	61 <sup>2</sup>

C: Capacité du réservoir; I: Apport annuel ; TE: Piégeage;

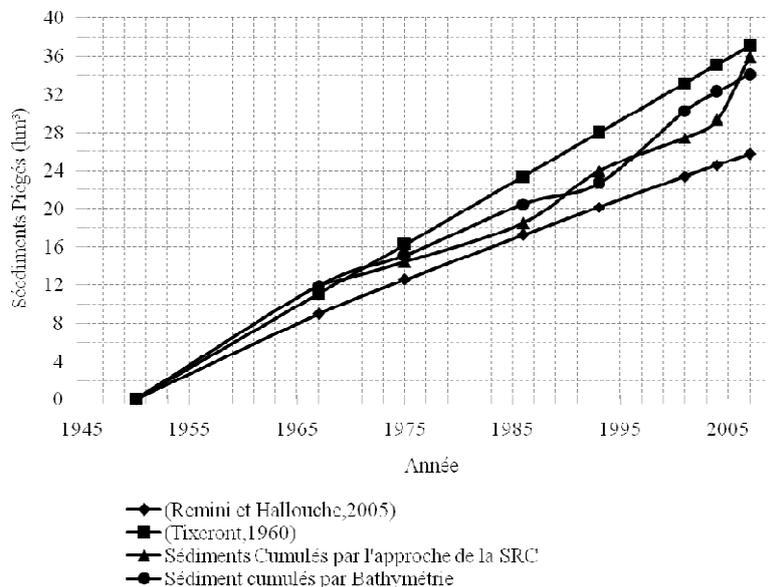
<sup>1</sup>Arrêt de la vidange de fond ; <sup>2</sup>Evacuation efficace;; <sup>3</sup>période humide.

La figure 4.4 montre la variabilité inter-annuelle de la production de sédiments au réservoir Foum El Kherza obtenu à partir de la vidange du fond, évacuation ainsi que la première tranche de l'opération de dragage après la crue 2004.



**Figure 4.4** Bilan sédimentaire annuel

Figure 6 résume les résultats obtenus de la présente approche et les précédents établis par Remini and Hallouche (2005) et Tixeront (1960), aussi bien que les levés bathymétriques menés, montrant l'approche de la Courbe Cumulative en Sédiments Piégés CTSC donnant des résultats satisfaisants.



**Figure 4.5** Perte du volume de stockage du réservoir Foum El Kherza.

Plusieurs incertitudes sont associées à l'application de cette approche, la principale étant la densité apparente des sédiments, cette dernière est estimée à partir de l'étude (Geiger 1963). Les rapports eau-volumes chassés (évacués) ont été estimés à partir d'observations ou

d'études antérieures et peuvent être différents de ceux du réservoir Foum El Kherza et probablement d'une opération à une autre. Des mesures précises de ces paramètres amélioreront sans doute les résultats obtenus.

Afin de réduire le bruit causé par les valeurs journalières de l'apport liquide, le pas de temps a été augmenté à celui annuel ceci, afin de trouver une relation plus simple liant l'apport annuel en sédiments à celui liquide en suivant la même méthodologie, la courbe cumulative au pas de temps annuel montrée à la figure 4.6 est sous la forme :

$$Q_s (\text{hm}^3) = 0.0033Q_l^{1.63} (\text{hm}^3) \quad 4.5$$

- Coefficient of determination  $R^2 = 0.96$

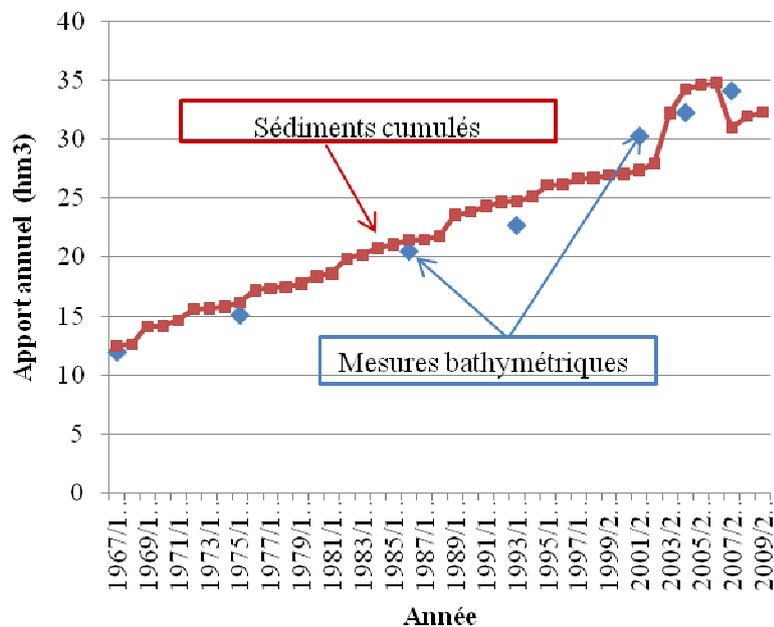
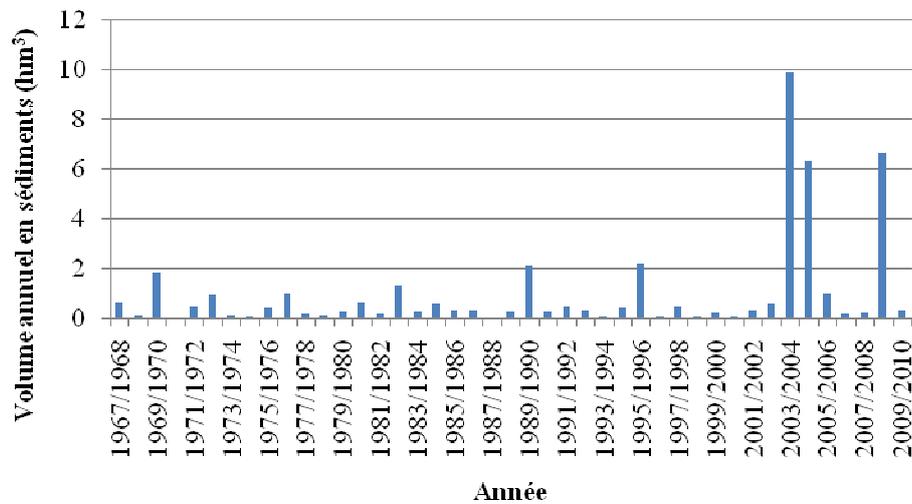


Figure 4.6 Courbe cumulative optimisée au pas de temps annuel

La figure 4.7 issue de l'optimisation de la courbe cumulative des sédiments respectivement au pas de temps annuel, montre un apport en sédiments maximal estimé de  $9.91 \text{ hm}^3$  pendant

année 2003/2004. Cette méthode sera adoptée afin d'estimer l'apport solide piégé dans le



réservoir.

Figure 4.7 **Bilan sédimentaire annuel estimé par la CCS au pas de temps annuel.**

#### 4.5 Conclusion

L'envasement du réservoir a été modélisé en combinant deux méthodes celle des levés bathymétriques et la courbe de tarage en sédiments. Cette méthode représente une alternative aux méthodes utilisées, surtout lorsque les données bathymétriques existent, mais son utilisation impose des données supplémentaires qui ne sont pas toujours disponibles, telles que la densité de la vase le rapport eau/ sédiments chassés (évacués).

Durant ces 45 années d'exploitation, le barrage connaît un régime de crues accentuées cette dernière décennie, ce qui favorise l'apport solide et par conséquent, l'augmentation de la vitesse de sa sédimentation.

## *Chapitre V*

# *L'optimisation de la gestion du réservoir et la contrainte sédimentation*

## 5.1 Introduction

Dans le but, de gérer les réservoirs tout en minimisant les dépôts solides, plusieurs études ont tenté de dériver des règles de gestion ayant pour contrainte la minimisation du volume des sédiments piégés (Nicklow and Mays 2000; Nicklow and Mays 1999; Shokri et al. 2013):

Bringer et Nicklow (2001) ont combiné le modèle HEC 6 (USBR 1998) et les algorithmes génétiques afin de dériver des consignes de gestion qui ont pour objectif la minimisation des dépôts solides dans un système de réservoirs.

Hadihardaja (2009) a introduit un modèle de gestion pour un réservoir dans le but de minimiser le dépôt de sédiments et maximiser la production de l'énergie à la fois. En combinant la programmation non linéaire et les réseaux de neurones.

Ashraf Vaghefi et al. (2009) ont défini comme objectifs la minimisation des déficits de la satisfaction de la demande et de la sédimentation du réservoir.

Khan et Tingsanchali (2009) ont développé le modèle ROSSE (Reservoir Optimization-Simulation with Sediment Evacuation) qui se base sur les algorithmes génétiques et ayant un module introduisant la sédimentation du réservoir dans la phase simulation.

Wan et al.(2010) en se basant sur une similarité entre écoulement de l'eau et celui du transport solide en cas de crues, ont élaboré des consignes de gestion améliorées.

## 5.2 Méthodologie adoptée

Les modèles sus-cités se sont basés sur l'élaboration de consignes de gestion ayant pour objectifs, la minimisation du volume de vase piégée dans le réservoir, c.-à-d. des consignes de chasse de fond ou d'évacuation à travers les évacuateurs de crues en parallèle avec la satisfaction de la demande.

Dans le présent travail, les consignes sont issues principalement des objectifs pour une satisfaction de la demande, ainsi qu'un stockage réserve pour d'éventuelles sécheresses.

La sédimentation par contre est prise en compte implicitement en adaptant ces consignes à long terme à la diminution du volume utile. En effet, ces consignes sont susceptibles d'être plus flexibles, et varier le long des années de gestion du réservoir, selon que, le volume utile diminue ou augmente dans le cas où une opération de dragage est effectuée.

Le modèle d'optimisation par Programmation Dynamique Stochastique Explicite dont la méthodologie a été présentée au deuxième chapitre est appliqué.

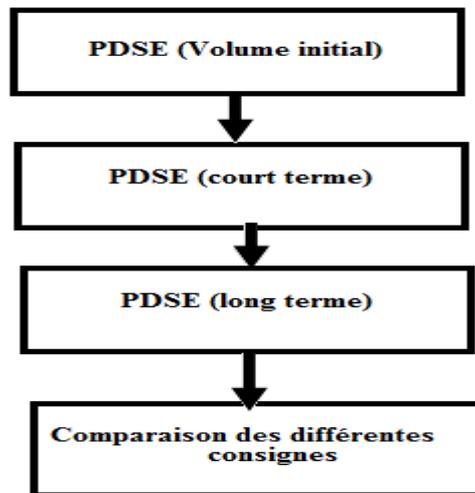


Figure 5.1 Approche proposée <sup>3</sup>

### 5.2.1. Programmation Dynamique Stochastique Explicite

La Programmation Dynamique Stochastique Explicite (PDSE) présentée au deuxième chapitre est appliquée à la gestion du réservoir de Foug El Kherza afin de pouvoir dériver des règles de gestion optimales, tout en considérant la variation du volume utile de ce dernier le long des années de son opération.

L'équation (2.3) s'écrit pour un état de stockage à l'instant  $t$   $k$ , un état d'apport  $i$ , et un état de stockage au temps  $t+1$   $l$  faisable :

$$f_n^t(k, i) = \text{Min} \left[ B_{kil} + \sum_j P_{ij}^t f_{n-1}^{t+1}(l, j) \right] \forall k, i \text{ et } l \text{ faisable} \quad 5.1$$

#### 5.2.1.1 Discretisation des apports

Afin de pouvoir appliquer cette méthode, la discrétisation des apports est nécessaire. La série historique des apports étant longue de 43 années, il est recommandé d'utiliser une série synthétique issue de la modélisation des apports au quatrième chapitre. Ces derniers seront subdivisés en trois classes d'apports pour chaque mois. La subdivision adoptée est fonction de la moyenne et de l'écart type du mois considéré (Harboe and Ratnayake 1993; Matcha 2011).

<sup>3</sup> Approche proposée par Pr. K. Nagesh

**Tableau 5.1** Série synthétique générée.

	Série Historique		Série synthétique	
	Moyenne (hm <sup>3</sup> )	Ecart type	Moyenne	Ecart type
SEP	3,74	4,80	3.54	5.13
OCT	2,15	3,78	2.29	3.85
NOV	1,83	3,60	2.02	4.56
DEC	1,54	4,45	1.56	3.1
JAN	1,86	3,53	2.73	4.61
FEV	1,60	2,90	2.2.0	3.86
MARS	3,60	6,46	3.7	7.03
AVRIL	3,44	9,06	3.76	7.9
MAI	3,02	6,36	1.39	1.97
JUIN	1,71	4,01	1.54	4.02
JUILL	0,54	1,18	0.82	2.59
AOUT	1,08	1,66	1.48	4.47

$$C(i, j) = \bar{x} + 0.25\sigma$$

5.2

Où:

C(i,j) classe de l'observation i du mois j

 $\bar{x}_j$  Moyenne du mois considéré $\sigma_j$  Ecart type de la même série**5.2.2 Matrices de transition**

La probabilité de transition notée  $P_{ij}^t$  est estimée en comptant le nombre de fois qu'un apport liquide d'un état (ou classe) i au mois t passe à un état j au mois t+1 (Tableau 5.2).

**Tableau 5.2** Matrices de transitions.

Sept-Oct			Oct-Nov			Nov-Dec		
0.6190	0.1905	0.1905	0.6087	0.2609	0.1304	0.5455	0.4545	0
0.4444	0.2222	0.3333	0.3000	0.4000	0.3000	0.4615	0.4615	0.0769
0.5000	0.3333	0.1667	0.5556	0.3333	0.1111	0.1429	0.5714	0.2857
Dec-Jan			Jan-Fev			Fev-Mar		
0.8421	0.1053	0.0526	0.7586	0.1724	0.0690	0.8077	0.1154	0.0769
0.6500	0.2000	0.1500	0.2857	0.2857	0.4286	0.3750	0.3750	0.2500
0	0.3333	0.6667	0.3333	0.1667	0.5000	0.3750	0.2500	0.3750
Mar-Avril			Avril-Mai			Mai-Juin		
0.7037	0.2963	0	0.6957	0.2609	0.0435	0.5185	0.2963	0.1852
0.3750	0.5000	0.1250	0.6000	0.1333	0.2667	0.7500	0.2500	0
0.1429	0.4286	0.4286	0.5000	0	0.5000	0.5714	0.2857	0.1429
Juin-Juil			Juil-Aout			Aout-Sept		
0.4167	0.4583	0.1250	0.6364	0.1818	0.1818	0.6364	0.1818	0.1818
0.8333	0.1667	0	0.6000	0.0667	0.3333	0.6000	0.0667	0.3333
0.3333	0.3333	0.3333	0.6000	0.4000	0	0.6000	0.4000	0

**5.2.3 Discrétisation du volume de la retenue**

A chaque optimisation par PDSE, la capacité du réservoir de Foug El Kherza considérée initialement 32 hm<sup>3</sup> et susceptible de varier est discrétisée en un nombre de classes égales de volumes, le nombre de classes choisi est de 10 classes.

**5.2.4 La fonction « objectif »**

La fonction « objectif » ( $B_{kilt}$ ) fixée pour le réservoir de Foug El Kherza est la minimisation de la somme des écarts carrés entre les lâchers ( $R_{kilt}$ ) et les lâchers « objectif » ( $T_r$ ), et entre le stock ( $S_k^t$ ) et celui objectif ( $T_s$ ) (Matcha 2011; Vedula and Mujumdar 2005).

$$\min(B_{kilt}) = \min((R_{kilt} - T_r)^2 + (S_k^t - T_s)^2) \tag{5.3}$$

Le choix du stock objectif est une question subjective (Akter and Simonovic 2004; Matcha 2011), en effet, fixer ce volume dépend du jugement du gestionnaire, s'il préfère satisfaire la demande en dépit de la réserve pour crise ou le contraire.

Le stock objectif pour chaque mois est choisi de manière à prévenir les étiages, caractéristique de la région surtout lorsque la demande est maximale et les apports sont très insuffisants. On choisi d'adopter comme stock objectif de chaque mois la moyenne des stockages mensuels historiques.

Les lâchers objectifs pour chaque mois sont pris égaux aux moyennes historiques des lâchers mensuels (Baliarsingh and Kumar 1997; Matcha 2011).

**Tableau 5.3 Stocks et lâchers objectifs**

Mois	Stock objectif (hm <sup>3</sup> )	Lâcher objectif (hm <sup>3</sup> )
Septembre	6.54	1.069
Octobre	8.78	1.596
Novembre	9.25	1.188
Décembre	9.95	1.411
Janvier	9.33	1.375
Février	9.51	0.856
Mars	9.82	1.580
Avril	10.20	1.342
Mai	10.13	1.233
Juin	10.16	1.519
Juillet	9.14	1.387
Aout	7.45	1.000

### 5.3 Optimisation de l'opération par PDSE et la sédimentation du réservoir

Le modèle élaboré au quatrième chapitre pour l'estimation de la Sédimentation du Réservoir Foum El Kherza est introduit dans celui de la PDSE implicitement afin de dériver des règles de gestion optimales du réservoir à chaque variation de son volume utile.

#### 5.3.1 Résultats de l'optimisation

##### 1. Volume utile ( $V_u=32\text{hm}^3$ )

Etat stable atteint après quatre années avec une fonction de Bellman  $f=675.87$

**Tableau 5.4** Indice ( $I^*$ ) des lâchers optimaux (Aout, Juil, Juin, Mai).

Mois	Aout			JUIL			JUIN			MAI		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	2	2	3	2	2	2	3	3	5	3	3	5
$k=2$	2	2	3	2	2	3	3	3	5	3	3	6
$k=3$	2	2	3	2	2	3	3	3	5	3	3	6
$k=4$	3	3	4	3	3	3	3	3	6	3	4	6
$k=5$	3	3	4	3	3	4	3	4	6	4	4	7
$k=6$	4	3	5	3	3	4	4	4	6	4	5	7
$k=7$	4	4	5	4	4	5	4	5	7	4	5	8
$k=8$	4	4	5	4	4	5	5	5	7	5	5	8
$k=9$	5	5	6	5	5	5	5	5	8	5	6	8
$k=10$	5	5	6	2	2	2	5	6	8	6	6	9

**Tableau 5.5** Indice ( $I^*$ ) des lâchers optimaux (Avril, Mars, Fev, Janv)

Mois	AVR			MAR			FEV			JANV		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	3	2	6	3	2	4	3	2	3	3	2	3
$k=2$	3	3	6	3	2	4	3	2	3	3	2	4
$k=3$	3	3	7	3	3	5	3	2	4	3	2	4
$k=4$	3	3	7	3	3	5	3	3	4	3	3	4
$k=5$	4	4	8	4	4	5	4	3	4	4	3	5
$k=6$	4	4	8	4	4	6	4	4	5	4	4	5
$k=7$	4	4	8	4	4	6	4	4	7	4	4	6
$k=8$	5	5	9	5	5	7	5	4	7	5	4	6
$k=9$	5	5	9	5	5	7	5	5	7	5	5	7
$k=10$	6	6	9	6	6	7	7	7	7	6	5	7

**Tableau 5.6** Indice ( $I^*$ ) des lâchers optimaux (Dec, Nov, Oct, Sept)

Mois	DEC			NOV			OCT			SEPT		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	3	2	4	3	3	4	3	2	4	2	2	4
$k=2$	3	2	5	3	3	4	3	2	5	2	2	5
$k=3$	3	3	5	3	3	5	3	3	5	3	3	5
$k=4$	3	3	5	3	3	5	3	3	5	3	3	6
$k=5$	4	4	6	4	4	5	3	3	6	4	4	6
$k=6$	4	4	6	4	4	6	4	4	6	4	4	7
$k=7$	4	4	7	4	4	6	4	4	6	4	4	7
$k=8$	5	5	7	5	5	6	5	4	7	5	5	7
$k=9$	5	5	7	5	5	7	5	5	7	5	5	8
$k=10$	6	6	8	6	6	7	5	5	8	5	6	8

**2. Volume utile à moyen terme (Sans) ( $V_u=27.11hm^3$ )**

Etat stable atteint après quatre années d'itération avec une fonction de Bellman  $f= 657.96$

**Tableau 5.7** Indice ( $l^*$ ) des lâchers optimaux (Aout, Juil, Juin, Mai).

Mois	Aout			JUIL			JUIN			MAI		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	2	2	3	3	3	3	4	4	6	4	4	7
$k=2$	2	2	3	3	3	3	4	4	6	4	4	7
$k=3$	2	2	4	3	3	4	4	4	6	3	4	7
$k=4$	3	3	4	3	3	4	4	4	7	4	5	8
$k=5$	3	3	5	4	4	4	4	4	7	4	5	8
$k=6$	4	4	5	4	4	5	4	5	7	5	5	8
$k=7$	4	4	5	4	4	5	5	5	8	5	6	9
$k=8$	5	4	6	5	5	6	5	6	8	5	6	9
$k=9$	5	5	6	5	5	6	6	6	9	6	6	10
$k=10$	5	5	7	5	6	6	6	6	9	6	7	10

**Tableau 5.8** Indice ( $l^*$ ) des lâchers optimaux (Avril, Mars, Feb, Janv)

Mois	AVR			MAR			FEV			JANV		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	4	3	7	4	3	5	4	2	4	4	3	4
$k=2$	4	3	8	4	3	5	4	2	4	4	3	5
$k=3$	4	4	8	4	3	6	4	3	4	4	3	5
$k=4$	4	4	8	4	4	6	4	3	5	4	3	5
$k=5$	4	4	9	4	4	6	4	4	5	4	4	6
$k=6$	5	5	9	5	5	7	4	4	5	5	4	6
$k=7$	5	5	10	5	5	7	5	4	6	5	5	7
$k=8$	5	5	10	5	5	7	5	5	8	5	5	7
$k=9$	6	6	10	6	6	8	6	5	8	6	5	7
$k=10$	6	6	10	6	6	8	6	6	8	6	6	8

**Tableau 5.9** Indice ( $l^*$ ) des lâchers optimaux (Dec,Nov, Oct, Sep)

Mois	DEC			NOV			OCT			SEPT		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	4	3	5	4	4	5	4	3	5	3	3	6
$k=2$	4	3	6	4	4	5	4	3	6	3	3	6
$k=3$	4	3	6	4	4	5	3	3	6	3	3	6
$k=4$	4	4	6	4	4	6	4	4	6	4	4	7
$k=5$	4	4	7	4	4	6	4	4	7	4	4	7
$k=6$	5	5	7	5	5	7	4	4	7	5	5	8
$k=7$	5	5	8	5	5	7	5	5	7	5	5	8
$k=8$	5	5	8	5	5	7	5	5	8	5	5	8
$k=9$	6	6	8	6	6	8	6	6	8	6	6	9
$k=10$	6	6	9	6	6	8	6	6	9	6	6	9

**3. Volume utile à long terme (20 ans) ( $V_u=19.31hm^3$ )**

Etat stable atteint après quatre années d'itération avec une fonction de Bellman  $f= 657.57$

**Tableau 5.10** Indice ( $I^*$ ) des lâchers optimaux (Aout, Juil, Juin, Mai)

Mois	Aout			JUIL			JUIN			MAI		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	3	2	4	4	4	4	5	5	7	5	6	9
$k=2$	3	2	4	4	4	4	5	5	8	5	6	9
$k=3$	3	3	5	4	4	4	5	5	8	5	6	9
$k=4$	3	3	5	4	4	5	5	5	9	5	6	10
$k=5$	4	3	5	4	4	5	5	5	9	5	6	10
$k=6$	4	4	6	4	4	6	5	5	9	5	6	10
$k=7$	4	4	6	5	5	6	5	6	10	6	7	10
$k=8$	5	5	7	5	5	6	6	6	10	6	7	10
$k=9$	5	5	7	6	6	7	6	7	10	6	7	10
$k=10$	6	5	7	6	6	7	7	7	10	7	8	10

**Tableau 5.11** Indice ( $I^*$ ) des lâchers optimaux (Avril, Mars, Fev, Janv)

Mois	AVR			MAR			FEV			JANV		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	5	4	10	5	3	6	5	3	4	5	3	5
$k=2$	5	4	10	5	4	6	5	3	5	5	3	6
$k=3$	5	4	10	5	4	7	5	3	5	5	3	6
$k=4$	5	5	10	5	4	7	5	4	6	5	4	7
$k=5$	5	5	10	5	5	7	5	4	6	5	4	7
$k=6$	5	5	10	5	5	8	5	5	6	5	5	7
$k=7$	6	6	10	6	6	8	5	5	7	6	5	8
$k=8$	6	6	10	6	6	8	6	5	7	6	5	8
$k=9$	6	7	10	7	6	9	6	6	8	6	6	8
$k=10$	7	7	10	7	7	9	7	6	8	7	6	9

**Tableau 5.12** Indice ( $I^*$ ) des lâchers optimaux (Déc, Nov, Oct, Sep)

Mois	DEC			NOV			OCT			SEPT		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	5	5	7	5	5	6	5	4	7	4	4	7
$k=2$	5	5	7	5	5	7	5	3	7	4	4	8
$k=3$	5	4	8	5	5	7	5	4	8	4	4	8
$k=4$	5	4	8	5	5	8	4	4	8	4	4	9
$k=5$	5	5	8	5	5	8	5	5	8	5	5	9
$k=6$	5	5	9	5	6	8	5	5	9	5	5	9
$k=7$	6	6	9	6	6	9	5	5	9	6	6	10
$k=8$	6	6	10	6	6	9	6	6	10	6	6	10
$k=9$	6	6	10	7	7	9	6	6	10	6	6	10
$k=10$	7	7	10	7	7	10	7	7	10	7	7	10

**4. Volume utile actuel correspondant au levé juillet 2007 ( $V_u=12.904 \text{ hm}^3$ )**

Réellement, le réservoir n'a connu qu'une seule tranche de dévasement de  $4\text{hm}^3$ . Il est donc intéressant de connaître le comportement du réservoir avec le volume utile réel. Etat stable atteint après quatre années avec une fonction de Bellman  $f= 710.72$

**Tableau 5.13** Indice ( $l^*$ ) des lâchers optimaux (Aout, Juil, Juin, Mai).

Mois	Aout			JUIL			JUN			MAI		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	4	3	5	5	5	5	7	7	10	6	8	10
$k=2$	4	2	6	5	5	5	7	7	10	6	8	10
$k=3$	4	3	6	5	5	6	7	7	10	6	8	10
$k=4$	4	3	6	5	5	6	7	7	10	6	8	10
$k=5$	4	4	7	5	5	6	7	7	10	6	8	10
$k=6$	4	4	7	5	5	7	6	7	10	6	8	10
$k=7$	5	4	8	5	5	7	6	7	10	6	8	10
$k=8$	5	5	8	6	6	8	7	8	10	7	9	10
$k=9$	6	5	8	6	6	8	7	8	10	7	9	10
$k=10$	6	6	9	7	7	8	8	8	10	8	9	10

**Tableau 5.14** Indice ( $l^*$ ) des lâchers optimaux (Avril, Mars, Feb,Jan)

Mois	AVR			MAR			FEV			JANV		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	7	4	10	7	4	8	7	4	6	7	5	8
$k=2$	7	4	10	7	4	8	7	4	7	7	5	8
$k=3$	7	5	10	7	5	8	7	4	7	7	4	8
$k=4$	7	5	10	7	5	9	7	4	7	7	5	9
$k=5$	7	6	10	7	6	9	7	5	8	7	5	9
$k=6$	7	6	10	7	6	9	7	5	8	7	6	9
$k=7$	7	7	10	7	6	10	7	6	8	7	6	10
$k=8$	7	7	10	8	7	10	7	6	9	7	6	10
$k=9$	8	7	10	8	7	10	7	6	9	7	7	10
$k=10$	8	8	10	8	8	10	8	7	9	8	7	10

**Tableau 5.15** Indice ( $l^*$ ) des lâchers optimaux (Déc, Nov, Oct, Sept)

Mois	DEC			NOV			OCT			SEPT		
	$i=1$	$i=2$	$i=3$									
$k=1$	7	6	10	8	7	9	6	5	10	5	4	10
$k=2$	7	6	10	8	7	9	6	5	10	5	4	10
$k=3$	7	6	10	8	7	9	6	5	10	5	5	10
$k=4$	7	6	10	8	7	10	6	5	10	5	5	10
$k=5$	7	6	10	8	6	10	6	5	10	6	6	10
$k=6$	7	6	10	8	7	10	6	6	10	6	6	10
$k=7$	7	7	10	8	7	10	6	6	10	6	7	10
$k=8$	7	7	10	8	8	10	7	7	10	7	7	10
$k=9$	7	8	10	8	8	10	7	7	10	7	7	10
$k=10$	8	8	10	8	8	10	7	7	10	8	8	10

5.3.2 Application des résultats de l'optimisation aux états historiques du réservoir

Les règles de gestion optimales par PDSE pour les états du système historiques et apports liquides correspondants sont représentées sur la figure 5.2, cette dernière montre ces différentes consignes (moyennes) en considérant la variation du volume utile.

Sur les douze mois de l'année, les mois de juin, juillet et aout sont déficitaires pour tous les horizons avec un maximum au mois de juillet de  $6.5 \text{ hm}^3$ , alors que les autres mois de l'année montrent un surplus avec un maximum au mois de décembre de  $2 \text{ hm}^3$ . Les lâchers historiques quant à eux, restent très inférieurs à la demande.

Les différentes consignes dérivées pour différents volumes utiles forment une zone « optimale » ne dépassant pas  $1.65 \text{ hm}^3$  de largeur, ce résultat montre qu'une gestion optimale du réservoir reste possible même si le réservoir s'envase.

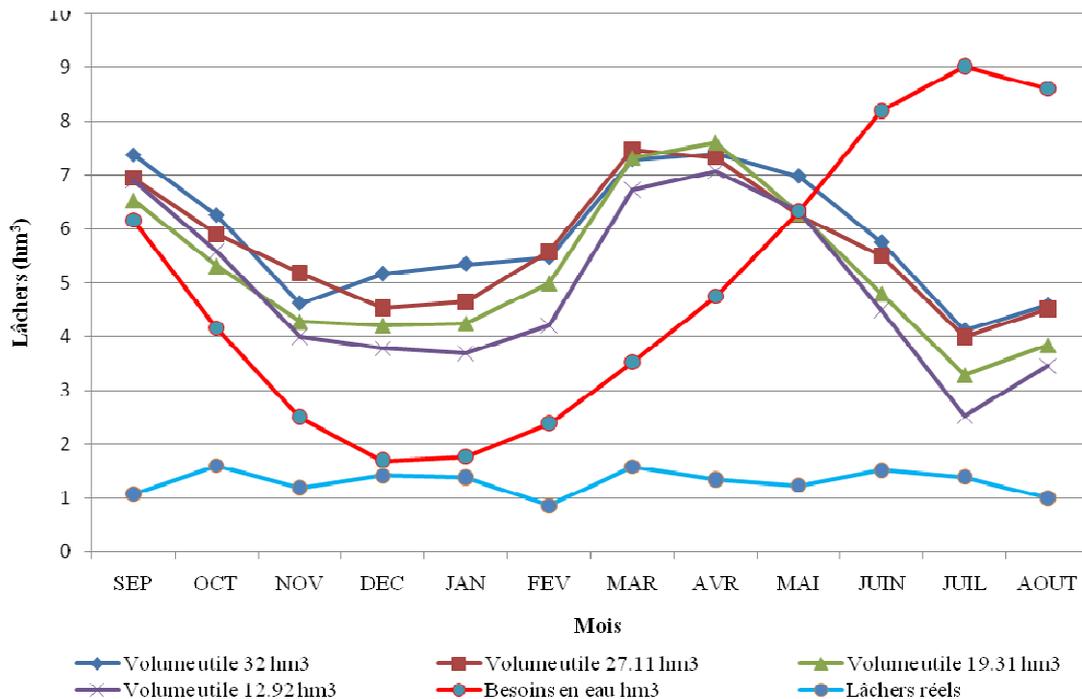


Figure 5.2 PDSE appliquée aux états du système et apports historiques (1967-2009).

5.4 Simulation de l'opération du réservoir par Réseaux de Neurones Artificiels

La simulation par réseaux de neurones de l'opération du réservoir pour différents volumes utiles a été effectuée en considérant un modèle du type MLP (figure 5.3). Comme entrées au modèle, le stockage  $S$  à l'instant  $t$ , l'apport liquide  $Q$  à l'instant  $t$  et comme sortie les lâchers optimaux  $R_t$  calculés par PDSE ont été considérés. La validation a été effectuée avec les six dernières années (figure 5.4).

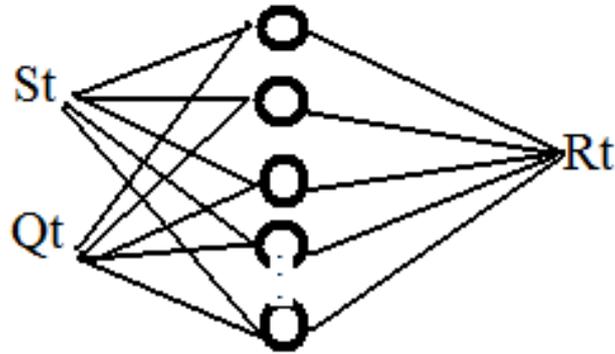


Figure 5.3 Schéma du MLP considéré pour la simulation de l'opération du réservoir

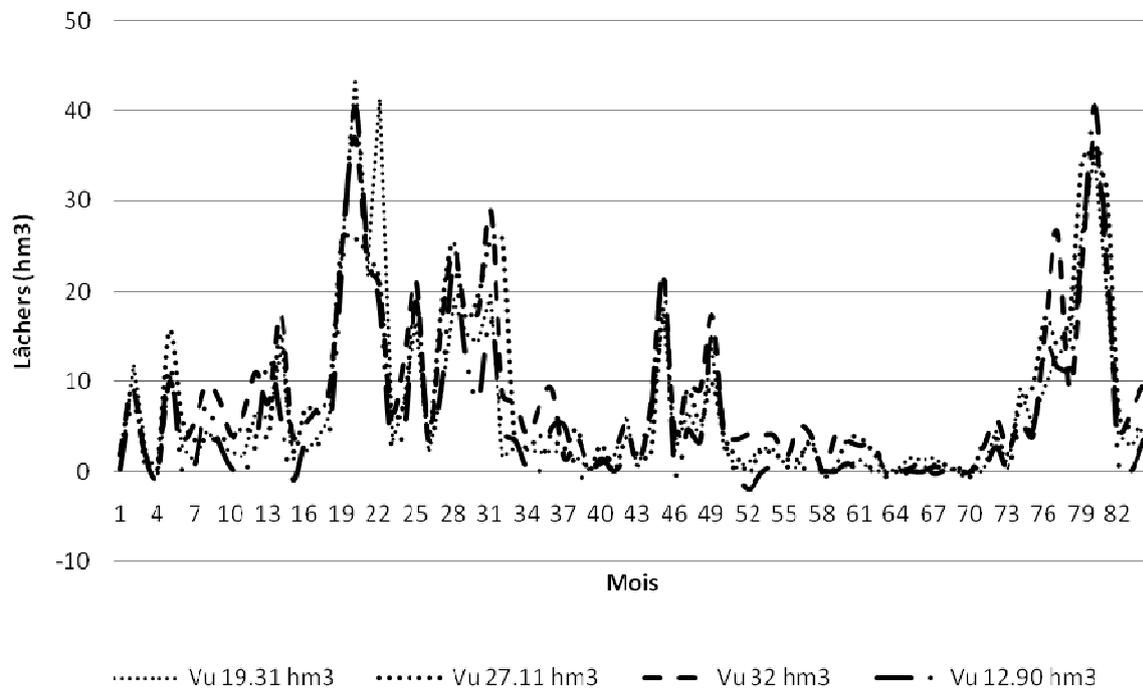
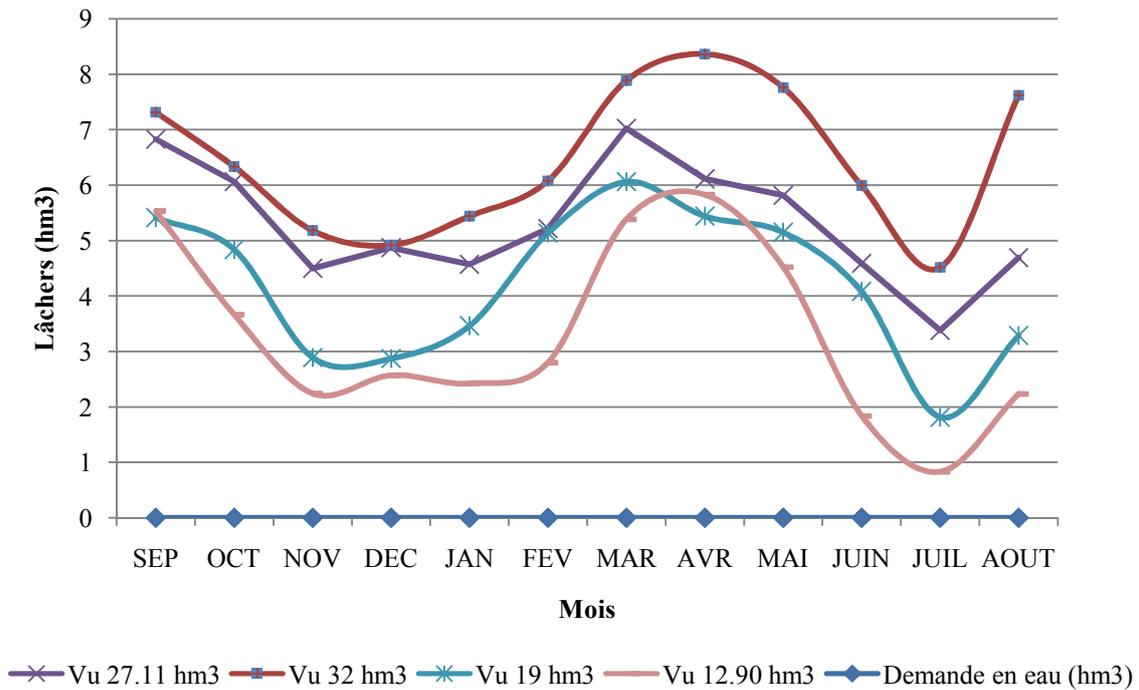


Figure 5.4 Résultats de la simulation de l'opération du réservoir par MLP (phase de validation (2004-2010)).

Les résultats de la simulation pour la phase de validation montrent que l'envasement du réservoir entraîne une diminution des lâchers optimaux, ce qui signifie, qu'on peut garder le volume d'eau dans le réservoir même étant ensasé à un niveau optimal, ce niveau étant variable selon le taux d'envasement du réservoir.



**Figure 5.5** Résultats de la simulation par réseaux de neurones pour les états historiques (lâchers moyens )

Afin d'examiner le comportement réel du réservoir avec les lâchers retrouvés par optimisation, qui, en effet ne représentent que des guides pour l'exploitant (Iftikhar 2009; Matcha 2011), une simulation de l'opération du réservoir est nécessaire afin d'évaluer sa performance face à ces règles.

La simulation est effectuée en utilisant l'équation continuité :

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - \frac{(E_t + E_{t+1})}{2} - INF_t \tag{5.4}$$

$S_{t+1}$  Stockage au temps  $t+1$

$S_t$  Stockage au temps  $t$

$Q_t$  Apport liquide au temps  $t$

$R_t$  Lâcher au temps  $t$

$E_t, E_{t+1}$  Volumes évaporés nets au temps  $t$  et  $t+1$

$INF_t$  Volume infiltré au temps  $t$

Les séries synthétiques des apports liquides obtenues avec le modèle hybride SARIMABP sont utilisées pour la simulation de la régularisation du réservoir.

Afin de définir la performance du système on choisi deux indices très répandus (Bogardi and Kundzewicz 2002; Matcha 2011; Vogel and Bolognese 1995)

Comme indices de performance du système nous allons adopter les plus pondérants (Bogardi and Kundzewicz 2002) On définit :

**Le risque**

On peut distinguer deux types de risques

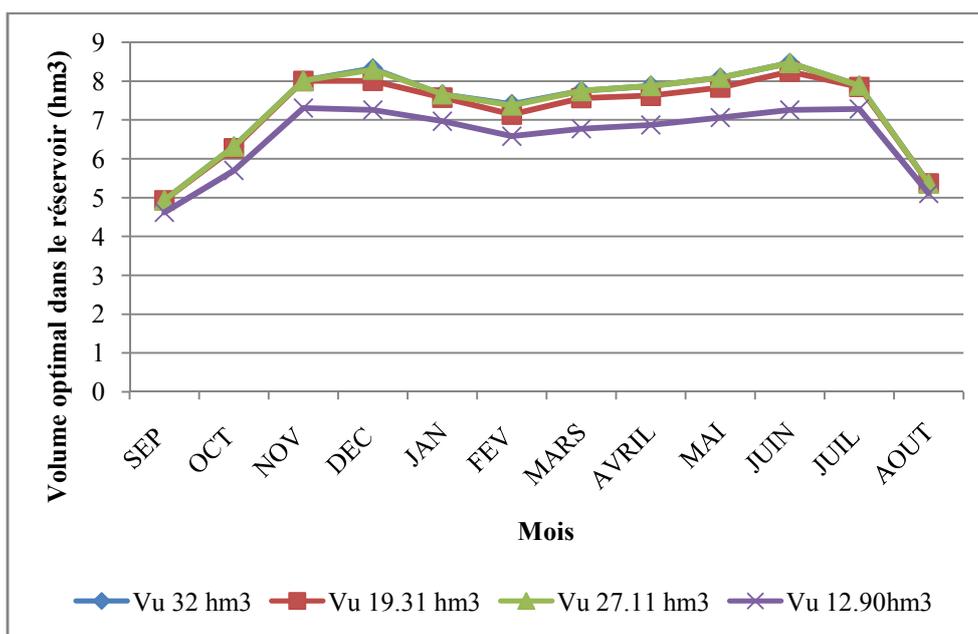
- Le risque de non satisfaction de la demande
- Le risque de déversement

**Résilience** étant le temps au bout duquel le système retourne à un état de fonctionnement normal (Pabiot 1999).

**Tableau. 5.16** Indices de performance pour différents volumes du réservoir

Volume du réservoir	Risque (%)		Résilience (%)	
	satisfaction de la demande	Non déversement	satisfaction de la demande	Non déversement
32	31.74	100	16.66	100
27.11	31.74	99.60	16.66	91
19.31	31.74	95.63	16.66	75
12.90	31.74	81.74	16.66	58.33

Le tableau 5.16 résume les états de défaillance du système en adoptant les lâchers optimaux calculés par optimisation, ces indices montrent que le réservoir est toujours en état de défaillance vis-à-vis la satisfaction de la demande alors que le risque de déversement augmente avec la diminution du volume utile du réservoir.



**Figure 5.6** Courbes consignes en fonction de l'envasement du réservoir

La courbe 5.6 résume le niveau d'eau consigne dans le réservoir pour différents horizons basé sur un calcul par optimisation, ces courbes indiquent la flexibilité de la gestion qu'on doit adopter en fonction de la réduction du volume de dépôts solides dans le réservoir.

### **5.5 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'examiner et d'évaluer la performance du réservoir de Foum El Kherza, face à la contrainte envasement et d'établir les courbes consignes en fonction de cette contrainte pour différents horizons.

Il est à noter que le risque de défaillance à la satisfaction de la demande est très présent, ceci même pour un volume maximal de 32 hm<sup>3</sup>. Aussi, notons que le déversement augmente avec l'envasement du réservoir.

## *Conclusion générale*

Ce travail a consisté dans sa première partie en l'analyse du mode actuel de gestion des réservoirs qui se trouvent dans la région des Aurès, cette analyse a fait apparaître deux états différents:

Concernant les plus anciens : Foum El Kherza et Foum El Gueiss, leur gestion surtout pour le deuxième est une gestion de crise de stockage dans l'attente d'une solution pour son envasement. Foum El Kherza défie encore, surtout avec les apports considérables ces dernières années. Les crues sont plus dangereuses avec la diminution du volume, et des surverses sont à prévoir.

Ceux de Babar et Fontaine des Gazelles attendent encore l'achèvement des travaux en cours. Donc leur gestion actuelle reste plutôt « craintive » de périodes d'étiage du fait que la demande n'est pas encore bien définie.

La deuxième partie a consisté en l'application de la Programmation Dynamique Stochastique pour l'optimisation de la gestion d'un barrage de la région des Aurès, choisi sous l'hypothèse qu'il fait objet actuellement d'une opération de récupération de son volume utile par désenvasement.

L'exploitation des données obtenues auprès du service de gestion du barrage, nous a permis dans un premier lieu d'essayer de modéliser quelques termes du bilan hydrique au niveau du réservoir.

Les apports liquides, paramètre essentiel pour la gestion du réservoir, ont été modélisés en adoptant un modèle hybride basé sur un modèle autorégressif saisonnier du type SARIMA.

L'évaporation, qu'on ne peut négliger pour une zone aride, a été estimée par réseaux de neurones avec une seule variable qui est le volume dans la retenue.

Les infiltrations quant à elles, ont été estimées d'une manière approximative en utilisant un modèle régressif linéaire à cause de la non disponibilité de mesures précises au niveau du réservoir.

La demande en eau, a été évaluée seulement en considérant celle des palmiers.

L'envasement du barrage est estimé en utilisant une méthode basée sur une courbe cumulative combinant à la fois les levés bathymétriques effectués au niveau du barrage et la relation débit solide-débit liquide qui a été longuement utilisée en exploitant les données des stations hydrométriques.

L'optimisation par PDSE et afin de décider des lâchers optimaux compte tenue de la diminution de volume utile, a fait apparaître une zone optimale pour ces derniers selon les

objectifs définis lors de l'optimisation soient : la satisfaction de la demande et un stockage réserve pour d'éventuelles années sèches.

En utilisant un modèle neuronal, l'optimisation de la gestion du réservoir devient plus souple, des points de vue temps de calcul et complexité du modèle. Ce modèle est confronté par la suite à la simulation afin de définir le comportement du système adoptant les lâchers optimaux calculés par optimisation. Les courbes consignes ainsi obtenues varient selon le volume dans le réservoir ce qui indique qu'il est plus convenable d'adopter une gestion qui s'accommode avec l'envasement du réservoir surtout dans le cas où un modèle d'estimation de ce paramètre est disponible.

La PDSE reste parmi les méthodes les plus utilisées pour la gestion des réservoirs, cependant, il est très intéressant de pouvoir appliquer les méthodes de simulation (seules) et optimisation non combinée et d'examiner les résultats.

L'introduction de la variation de la demande n'a pas été effectuée ceci, pour la raison que ce réservoir reste destiné seulement à l'irrigation des palmeraies.

Du point de vue gestion des réservoirs, l'objectif peut être élargi à une gestion minimisant le dépôt solide, en d'autres termes, la vitesse de la diminution du volume utile peut être elle-même diminuée en l'intégrant dans la fonction objectif, ou à une la gestion améliorant la qualité de l'eau.

Il est intéressant d'examiner la gestion d'un système de réservoirs, et d'introduire l'envasement des différents réservoirs et l'influence de l'envasement d'un réservoir sur la gestion de l'autre.

Enfin, La gestion des réservoirs en Algérie est restée dépendante des consignes élaborées pendant la phase d'étude. Dans le but d'augmenter la performance de ces ouvrages, une adaptation de cette gestion à des conditions futures de modification de la ressource et de son usage (incertains) est demandée, avec les outils disponibles de modélisation.

## *Références bibliographiques*

- Abrahart RJ, Kneale PE, See LM (2004a) Neural Networks for Hydrological Modeling. A.A. Balkema,
- Abrahart RJ, Kneale PE, See LM (2004b) Neural networks for hydrological modelling. A.A. Balkema Publishers,
- Abrahart RJ, See L (2000) Comparing neural network and autoregressive moving average techniques for the provision of continuous river flow forecasts in two contrasting catchments Hydrological Processes 14:2157-2172 doi:10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<2157::aid-hyp57>3.0.co;2-s
- Achite M, Ouillon S (2007) Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995) Journal of Hydrology 343:187-202 doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.026
- Akaike H (1974) A new look at the statistical model identification Automatic Control, IEEE Transactions on 19:716-723 doi:10.1109/tac.1974.1100705
- Akter T, Simonovic SP (2004) Modelling uncertainties in short-term reservoir operation using fuzzy sets and a genetic algorithm / Modélisation d'incertitudes dans la gestion de barrage à court terme grâce à des ensembles flous et à un algorithme génétique Hydrological Sciences Journal 49:1097-1107 doi:10.1623/hysj.49.6.1081.55722
- ASCE TC (2000a) Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts Journal of Hydrologic Engineering 5:115-123
- ASCE TC (2000b) Artificial Neural Networks in Hydrology. II: Hydrologic Applications Journal of Hydrologic Engineering 5:124-137
- Asselman NEM (2000) Fitting and interpretation of sediment rating curves Journal of Hydrology 234:228-248 doi:10.1016/S0022-1694(00)00253-5
- Baazi H (2002) Etude de faisabilité d'un ouvrage de substitution dans la vallée de l'Oued El Abiod Université colonel El Hadj Lakhdar de Batna Faculté des sciences de l'ingénieur
- Baliarsingh F, Kumar N Stochastic Linear Programming for optimal reservoir operation - A case study. In: Proceedings of International conference on Large scale water resources development in developing countries: New dimensions of prospects and problems, Kathmandu, Nepal, 1997. pp 124 -130.
- Ballais J-L (1989) Aurès vol 7.
- Ballini R, Soares S, Andrade MG Multi-step-ahead monthly streamflow forecasting by a neurofuzzy network model. In: IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th, 25-28 July 2001 2001. pp 992-997 vol.992. doi:10.1109/nafigs.2001.944740
- Batuca DG, Jordaan JM (2000) Silting and desilting of reservoirs. Taylor & Francis,
- Belagoun F (2012) Etude et modélisation des crues des cours d'eaux en milieu semi aride. "Cas des grands bassins versants 05,06,07". UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
- Belagoune F, Boutoutaou D (2013) Hydrological Study of Watersheds Arid and Semi-Arid South-Eastern Algeria (Chott Melghir, Chott El Hodna and Highlands Constantine) International Journal of Geosciences 4:1483-1490
- Bellman RE, Dreyfus, S.E. (1962) Applied dynamic programming. Princeton University Press  
Princeton N.J. USA.
- Benkhalel A, Remini B (2003) Analyse de la relation de puissance : débit solide - débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie) Journal of Water Science 16:333-356
- Benkhalel A, Rezgui Z, Sakhraoui F (2013) Floods in Abiod Wadi Analysis of database Larhyss Journal 14:179-191
- Benmessaoud H (2009) Etude de la vulnérabilité à la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès (Algérie). Hadj Lakhdar
- Berkane A, Yahiaou A (2007) L'érosion dans les Aurès Sécheresse 18 213-216
- Bertsekas D (2007) Neuro-Dynamic Programming: An Overview and Recent Results. In: Waldmann K-H, Stocker U (eds) Operations Research Proceedings 2006, vol 2006. Operations Research Proceedings. Springer Berlin Heidelberg, pp 71-72. doi:10.1007/978-3-540-69995-8\_11
- Bessenasse M, Kettab A, Paquier A (2004) Simulation numérique de la sédimentation dans les retenues de barrages : cas de la retenue de Zardezas Revue des sciences de l'eau 16:20

- Bogardi JJ, Kundzewicz ZW (2002) Risk, Reliability, Uncertainty, and Robustness of Water Resources Systems. INTERNATIONAL HYDROLOGY SERIES. Cambridge University Press,
- Boudjelal M (2011) Contribution des Réseaux de Neurones Temporels dans le Traitement des Images Animées. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf
- Boulhais N Recherches sur l'Aurès, bibliographie ordonnée
- Boumsseneh A (2007) Les inondations dans la ville de BISKRA Causes et Impacts. Hadj Lakhdar Batna
- Bourouba M (1996) Essai de quantification de l'érosion actuelle à partir des mesures de turbidité en Algérie orientale ORSTOM 16:230-250
- Bringer JA, Nicklow JW (2001) Optimal Control of Sedimentation in Multi-Reservoir River Systems Using Genetic Algorithms. In: Bridging the Gap. pp 1-10. doi:doi:10.1061/40569(2001)93
- Brune GM (1953) Trap Efficiency of Reservoirs Trans Am Geophysical Union 34:407-418
- Busson H (1900) Les vallées de l'Aurès Annales de Géographie:43-55
- Cancelliere A, Giuliano G, Ancarani A, Rossi G (2002) A Neural Networks Approach for Deriving Irrigation Reservoir Operating Rules Water Resources Management 16:71-88 doi:10.1023/a:1015563820136
- Celeste AB, Billib M (2009) Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models Advances in Water Resources 32:1429-1443 doi:10.1016/j.advwatres.2009.06.008
- Celeste AB, Curi WF, Curi RC (2009) Implicit Stochastic Optimization for deriving reservoir operating rules in semiarid Brazil Pesquisa Operacional 29:223-234
- Chandramouli V, Raman H (2001) Multireservoir Modeling with Dynamic Programming and Neural Networks Journal of Water Resources Planning and Management 127:89-98 doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:2(89)
- Chang H (1998) Fluvial-12 Mathematical model for erodible channels. San Diego, CA
- Chauvin Y, Rumelhart DE (2013) Backpropagation: Theory, Architectures, and Applications. Taylor & Francis,
- Cherif EA, Errih M, Cherif HM (2009) Statistical modelling of the solid transport in the Wadi Mekerra basin (Algeria) in the Mediterranean semi-arid zone Hydrological Sciences Journal 54:338-348 doi:10.1623/hysj.54.2.338
- Chu WS, Yeh WWG (1978) A nonlinear programming algorithm for real-time hourlyreservoir operations Journal of the American Water Resources Association 14:1048-1063 doi:10.1111/j.1752-1688.1978.tb02245.x
- Côte M (1998) Les régions bioclimatiques de l'Est algérien Rhumel 6:57-71.
- Coulibaly P, Anctil F, Bobée B (2001) Multivariate Reservoir Inflow Forecasting Using Temporal Neural Networks Journal of Hydrologic Engineering 6:367-376 doi:doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:5(367)
- Dams WCo (2000) Dams and Development: A New Framework for Decision-Making. Earthscan Publications Ltd.,
- Demmak A Recherche d'une relation empirique entre apports solides spécifiques et paramètres physico-climatiques des bassins: application au cas Algérien. In: Walling DE, Foster SSD, Wurzel P (eds) Challenges in African Hydrology and Water Resources Harare, 1984. IAHS, pp 403-414
- Deswal S, Pal M (2008) Artificial Neural Network based Modeling of Evaporation Losses in Reservoirs World Academy of Science, Engineering and Technology 8
- Díaz-Robles LA, Ortega JC, Fu JS, Reed GD, Chow JC, Watson JG, Moncada-Herrera JA (2008) A hybrid ARIMA and artificial neural networks model to forecast particulate matter in urban areas: The case of Temuco, Chile Atmospheric Environment 42:8331-8340 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.020>
- Dong X (2005) Appropriate flow forecasting for reservoir operation. University of Twente
- Draper AJ (2001) Implicit Stochastic Optimization with Limited Foresight for Reservoir Systems. Ph. D., UNIVERSITY OF CALIFORNIA
- Duren FK, Beard LR (1972) Optimizing flood control allocation for a multipurpose reservoir Journal of the American Water Resources Association 8:735-744 doi:10.1111/j.1752-1688.1972.tb05215.x

- Findley DF, Monsell BC, Bell WR, Otto MC, Chen B-C (1998) New Capabilities and Methods of the X-12-ARIMA Seasonal Adjustment Program
- Fortin V, Ourda TBMJ, Rasmussen PF, Bobee B (1997) Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits Revue des sciences de l'eau 4
- Foued BA, Sameh M (2001) Application of goal programming in a multi-objective reservoir operation model in Tunisia European Journal of Operational Research 133:352-361 doi:10.1016/s0377-2217(00)00303-9
- Frostick LE, Reid I, Layman JT (1983) Changing Size Distribution of Suspended Sediment in Arid-Zone Flash Floods. In: Modern and Ancient Fluvial Systems. Blackwell Publishing Ltd., pp 97-106. doi:10.1002/9781444303773.ch7
- Gausson H, Vernet A (1958) Carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques NI-32, NJ-32 Tunis - Sfax.
- Geiger AF (1963) Developing Sediment Storage Requirements for Upstream Retarding Reservoirs. Paper presented at the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference,
- Geng G (2009) Development of Approaches to Integrated Water Resources Management. The University of Edinburgh
- Goodier CC (1997) Analysis of neural networks as a means of developing optimal reservoir operating policies. Central Queensland University
- Govindaraju RS, Rao AR (2000) Artificial neural networks in hydrology. Kluwer Academic Publishers,
- Hadihardaja IK (2009) Decision support system for optimal reservoir operation modeling within sediment deposition control Water Science & Technology 59: 479-489
- Harboe R, Ratnayake U (1993) Simulation of a reservoir with standard operating rule. Paper presented at the Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts, Yokohama,
- Harley MJ, Chidley TRE (1978) DETERMINISTIC DYNAMIC PROGRAMMING FOR LONG TERM RESERVOIR OPERATING POLICIES Engineering Optimization 3:63 - 70
- Hassani A, Tajrishi M, Abrishamchi A (2008) Comparison of Several Evaporation Models Applied to Reservoir of the Saveh Dam, Iran. Paper presented at the The 3rd International Conference on Water Resources and Arid Environments and the 1st Arab Water Forum, Riyadh,
- Hassoun MH (1995) Fundamentals of Artificial Neural Networks. Mit Press,
- HEC (1991) HEC-6, Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs, User's Manual. Davis, CA.
- HEC (1995) HEC-RAS River Analysis System, User's Manual. Sandiego State University, Davis, CA
- Heinemann HG (1984) Reservoir trap efficiency. In: Hadley RF, Walling DE (eds) Erosion and sediment yield: some methods of measurement and modelling. GeoBooks, Norwich, p 201
- Hyndman RJ, Khandakar Y (2008) Automatic Time Series Forecasting: The forecast Package for R Journal of Statistical Software 27:1-22
- Iftikhar A (2009) Optimal control of multiple reservoirs system under water scarcity. University of the Punjab
- ISL (2006) Diagnostic et expertise Barrage de Fom El Gherza.
- Jacoby HD, Loucks DP (1972) Combined use of optimization and simulation models in river basin planning Water Resources Research 8:1401-1414 doi:10.1029/WR008i006p01401
- Jahani A (1992) Calculating the suspended sediment load of the Dez River. Paper presented at the Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins, Oslo,
- Jain A, Kumar AM (2007) Hybrid neural network models for hydrologic time series forecasting Appl Soft Comput 7:585-592 doi:10.1016/j.asoc.2006.03.002
- Jain S, Singh VP (eds) (2003) Water Resources Systems Planning and Management. Developments in Water Science,
- Jha DK, Yorino N, Zoka Y, Hayashi Y (2008) SDP based Reservoir Operation Policy for Hydropower Plants. Chugoku Electric Power Co. Inc., Japan
- Jordan F (2007) Modèle de prévision et de gestion des crues optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue. École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL
- Julien PY (2010) Erosion and Sedimentation (2nd Edition). Cambridge University Press,

- Karamouz M, Houck MH (1987) Comparison of stochastic and deterministic dynamic programming for reservoir operating rule generation *Journal of the American Water Resources Association* 23:1-9 doi:10.1111/j.1752-1688.1987.tb00778.x
- Karamouz M, Szidarovszky F, Zahraie B (2003a) *Water Resources Systems Analysis*. Lewis Publishers,
- Karamouz M, Vasiliadis HV (1992) Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts *Water Resources Research* 28:1221-1232 doi:10.1029/92wr00103
- Karamouz M, Zahraie B, Khodatalab N (2003b) Reservoir Operation Optimization: A Nonstructural Solution for Control of Seepage from Lar Reservoir in Iran *Water International* 28:19 - 26
- Karim K, Goulter IC A more efficient approach to consideration of uncertainty in multiple reservoir operation In: Tickle KS (ed) *Stochastic Hydraulics '96*, Mackay, Queensland, Australia, 1996. A.A. Balkema,
- Kasiviswanathan KS, Pandian RSR, S.Saravanan, Agarwal A (2011) Genetic programming approach on evaporation losses and its effect on climate change for Vaipar Basin *International Journal of Computer Science Issues* 8:269-274
- Kassoul M, Abdelgader A, Belorgey M (1997) Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. *Revue scientifique de l'eau* 10(3):339-358
- Khalil M (2012) *Pattern recognition Course chapitre 5*. 2012
- Khan AR (1996) A two-state deterministic dynamic programming model for optimising the joint operation of Mangla and Tarbela reservoirs in Pakistan. University of British Columbia
- Khan M, Prathapar S (2012) Water Management in Date Palm Groves. In: *Dates. Medicinal and Aromatic Plants - Industrial Profiles*. CRC Press, pp 45-66. doi:doi:10.1201/b11874-6
- Khan NM, Tingsanchali T (2009) Optimization and simulation of reservoir operation with sediment evacuation: a case study of the Tarbela Dam, Pakistan *Hydrological Processes* 23:730-747 doi:10.1002/hyp.7173
- Khanchoul K, El Abidine Boukhrissa Z, Acidi A, Altschul R (2010) Estimation of suspended sediment transport in the Kebir drainage basin, Algeria *Quaternary International* In Press, Corrected Proof doi:DOI: 10.1016/j.quaint.2010.08.016
- Khanchoul K, Jansson MB (2008) Sediment Rating Curves Developed On Stage And Seasonal Means In Discharge Classes For The Mellah Wadi, Algeria *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 90:227-236 doi:10.1111/j.1468-0459.2008.341.x
- Khanchoul K, Jansson MB, Lange J (2007) Comparison of suspended sediment yield in two catchments, northeast Algeria *Zeitschrift für Geomorphologie* 51:63-94 doi:10.1127/0372-8854/2007/0051-0063
- Khanchoul K, Remini B (2009) Regressions on Monthly Stream Discharge to Predict Sediment Inflow to a Reservoir in Algeria *Journal of Geography and Geology* 2:37-47
- Khashei M, Bijari M (2010) An artificial neural network (p,&#xa0;d,&#xa0;q) model for timeseries forecasting *Expert Systems with Applications* 37:479-489 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.05.044>
- Kim T, J. Heo, Bae D, Kim J (2008) Single-reservoir operating rules for a year using multiobjective genetic algorithm *Journal of Hydroinformatics* 10:163-179
- Kuhn. M, Wing J, Weston S, AndreWilliams, Keefer C, Engelhardt A, Cooper T (2013) *Classification and Regression Training*.
- Kumar DN, Baliarsingh F (2003) Folded Dynamic Programming for Optimal Operation of Multireservoir System *Water Resources Management* 17:337-353 doi:10.1023/a:1025894500491
- Kumar P, Tiwari AK (2012) Evaporation Estimation Using Artificial Neural Network *International Journal of Computer Theory and Engineering* 4:51-53
- Ladlani I, Houichi L, Djemili L, Heddami S, Belouz K (2012) Modeling daily reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) in the north of Algeria using generalized regression neural networks (GRNN) and radial basis function neural networks (RBFNN): a comparative study *Meteorol Atmos Phys* 118:163-178 doi:10.1007/s00703-012-0205-9
- Laffitte R (1939) *Étude géologique de l'Aurès (Algérie)*. Gouvernement général de l'Algérie,

- Lamond B, Boukhtouta A, recherche ULFdsdlaDdl (2002) A Neuro-dynamic Programming Approach for Stochastic Reservoir Management. Faculté des sciences de l'administration, Université Laval,
- Larson RE (1968) State increment dynamic programming. American Elsevier Pub. Co.,
- Lecornu J (1998) Les barrages et la gestion des eaux. Paper presented at the International Conference Water and Sustainable Development, Paris
- Lee ES, Waziruddin S (1970) Applying gradient projection and conjugate gradient to the optimum operation of reservoirs Journal of the American Water Resources Association 6:713-724 doi:10.1111/j.1752-1688.1970.tb01616.x
- Lloyd EH (1963) A probability theory of reservoirs with serially correlated inputs Journal of Hydrology 1:99-128 doi:10.1016/0022-1694(63)90035-0
- Loucks DP, Beek Ev (2005) Water Resources Systems Planning and Management An Introduction to Methods, Models and Applications. Studies and Reports in Hydrology. UNESCO PUBLISHING,
- Loucks DP, Stedinger JR, Haith DA (1981) Water resource systems planning and analysis. Prentice-Hall,
- Maass A (1962) Design of water-resource systems: new techniques for relating economic objectives, engineering analysis, and governmental planning. Harvard University Press,
- Maass A, Hufschmidt Mn, M . D, Robe rt T, Jr., HA, Marglin , Steven A ., (1962) Design of Water Resource Systems. Cambridge
- MacArthur RC, Hamilton D, Gee DM (1995) Application of Methods and Models of Prediction of Land Surface Erosion and Yield. Davis, California
- Matcha LPJ (2011) Simulation studies, command area development and design of hydraulic structures of proposed Srisailam left bank canal, AP. PhD, Jawaharal Nehru Technological University Kukatpally
- Mathlouthi M, Lebdi F (2008) Evaluation de la fiabilité de gestion d'un barrage réservoir pour des événements secs / Assessment of the reliability of reservoir dam operation for dry events Hydrological Sciences Journal 53:1194-1207 doi:10.1623/hysj.53.6.1194
- Mebarki A (2004) Hydrologie des bassins de l'est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement. UMConstantine
- Meddi M, Khaldi A, Meddi H (1998) Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord. Paper presented at the Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes, Vienna,
- Meharzi MKE (2010) Forêts, géosystèmes et dynamique du milieu : Le cas de l'Aurès. Université des frères Mentouri faculté des sciences de la terre, de la géographie
- Mehemai F (2009) Essai de modélisation de l'écoulement et risque d'inondation dans le piémont Nord-Est des Aurès (Approche géosystémique). Hadj Lakhdar Batna
- Merabet B, Souissi D Algeria country paper. In: FAO (ed) Workshop on "Irrigation of Date Palm and Associated Crops", Damascus, Syrian Arab Republic, 2008.
- Mitard AE (1941) Aperçu des grands traits géographiques de l'Aurès, Algérie Revue de géographie alpine:557-578
- Moghaddamnia A, Ghafari Gousheh M, Piri J, Amin S, Han D (2009) Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques Advances in Water Resources 32:88-97 doi:10.1016/j.advwatres.2008.10.005
- Morris GL, Fan J ( 1998) Reservoir Sedimentation Handbook. McGraw-Hill Professional,
- Mujumdar PP, Kumar DN (1990) Stochastic models of streamflow: some case studies Hydrological Sciences Journal 35:395-410 doi:10.1080/02626669009492442
- Mujumdar PP, Nirmala B (2007) A Bayesian Stochastic Optimization Model for a Multi-Reservoir Hydropower System Water Resources Management 21:1465-1485 doi:10.1007/s11269-006-9094-3

- Murray DM, Yakowitz SJ (1979) Constrained differential dynamic programming and its application to multireservoir control *Water Resources Research* 15:1017-1027  
doi:10.1029/WR015i005p01017
- Nandalal KDW, Bogardi JJ (2007) *Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs: Applicability and Limits*. International Hydrology Series. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS,
- Nicklow J, Mays L (2000) Optimization of Multiple Reservoir Networks for Sedimentation Control *Journal of Hydraulic Engineering* 126:232-242 doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:4(232)
- Nicklow JW, Mays LW (1999) Operation of Multiple Reservoir Systems to Control Sedimentation in Rivers and Reservoirs. In: WRPMD'99. pp 1-11. doi:doi:10.1061/40430(1999)105
- Opricovic S, Djordjevic B (1976) Optimal long-term control of a multipurpose reservoir with indirect users *Water Resour Res* 12:1286-1290 doi:10.1029/WR012i006p01286
- Oven-Thompson K, Alercon L, Marks DH (1982) Agricultural vs. hydropower tradeoffs in the operation of the High Aswan Dam *Water Resour Res* 18:1605-1613  
doi:10.1029/WR018i006p01605
- Pabiot F (1999) *Optimisation De La Gestion D'un Barrage Collinaire En Zone Semi-Aride*.
- Parent E (1991) *Elaboration des consignes de gestion des barrages-réservoirs*. ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES
- Penman HL Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1948. pp 120-145
- Peyron G (2000) *Cultiver le palmier-dattier: guide illustré de formation*. Cirad,
- Phatarfod RM (1976) Some aspects of stochastic reservoir theory *Journal of Hydrology* 30:199-217  
doi:10.1016/0022-1694(76)90101-3
- Philbrick CR, Kitanidis PK (1999) Limitations of deterministic optimization applied to reservoir operations *Journal of Water Resources Planning and Management* 125
- R D (2008) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria
- Raman H, Chandramouli V (1996) Deriving a General Operating Policy for Reservoirs Using Neural Network *Journal of Water Resources Planning and Management* 122:342-347  
doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:5(342)
- Rani D, Moreira M (2010) Simulation–Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation *Water Resources Management* 24:1107-1138  
doi:10.1007/s11269-009-9488-0
- Reddy MJ (2006) *Swarm Intelligence and evolutionary computation for single and multiobjective optimization in water resource systems*. Indian Institute of Science
- Regulwar DG, Kamodkar RU (2010) Derivation of Multipurpose Single Reservoir Release Policies with Fuzzy Constraints *J Water Resource and Protection* 2
- Reis LFR, Bessler FT, Walters GA, Savic D (2006) *Water supply reservoir operation by combined genetic algorithm - linear programming (GA-LP) Approach vol 20. vol 2*. Springer, Dordrecht, PAYS-BAS
- Remini B, Avenard JM (1998) Evolution de l'envasement dans la retenue du barrage de Foug El Gherza *Bulletin du Réseau Erosion* 18:98-105
- Remini B, Hallouche W (2004) La sédimentation dans les barrages algériens *Houille blanche* 1:60-64
- Remini B, Hallouche W (2005) Prédiction de l'envasement dans les barrages du Maghreb *Larhyss Journal* 04:69-80
- Rezgui Z (2014) *Caractérisation des crues de oued Labiod au droit de la retenue du barrage de Foug el Gherza Biskra*. Mohamed Khider
- Ribeiro B (2005) *Adaptive and Natural Computing Algorithms: Proceedings of the International Conference in Coimbra, Portugal, 2005*. Springer,
- ROHWER CH (1931) *Evaporation from Free Water Surfaces*. U.S. Government Printing Office,
- Saad M, Bigras P, Turgeon A, Duquette R (1996) Fuzzy Learning Decomposition for the Scheduling of Hydroelectric Power Systems *Water Resources Research* 32:179-186  
doi:10.1029/95wr02971

- Saad M, Turgeon A, Bigras P, Duquette R (1994) Learning disaggregation technique for the operation of long-term hydroelectric power systems *Water Resources Research* 30:3195-3202 doi:10.1029/94wr01731
- Sajikumar N, Thandaveswara BS (1999) A non-linear rainfall-runoff model using an artificial neural network vol 216. vol 1-2. Elsevier, Kidlington, ROYAUME-UNI
- Salas JD (1980) *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications,
- Samui P (2011) Application of Least Square Support Vector Machine(LSSVM) for Determination of Evaporation Losses in Reservoirs *Engineering* 3:431-434
- Satishkumar U, Balakrishnan P, Ramaswamy K (2010) Application of chance-constrained linear programming model for reservoir sizing of a cascade system of tanks in northern Karnataka *Karnataka J Agric* 23
- Sechi GM, Sulis A (2007) Mixed Simulation-Optimization Technique for Complex Water Resource System Analysis Under Drought Conditions. In: Rossi G, Vega T, Bonaccorso B (eds) *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*, vol 62. Water Science and Technology Library. Springer Netherlands, pp 217-237. doi:10.1007/978-1-4020-5924-7\_11
- Senthil K, Jain SK, Agarwal SPK (2000) Application on ANN in reservoir operation National Institute of Hydrology, Uttaranchal, India
- Senthil KAR, Goyal M, Ojha CSP, Singh RD, Swamee PK, Nema RK (2013) Application of ANN, Fuzzy Logic and Decision Tree Algorithms for the Development of Reservoir Operating Rules *Water Resources Management* 27:911-925 doi:10.1007/s11269-012-0225-8
- Serrat-Capdevila A, Valdés J (2007) An alternative approach to the operation of multinational reservoir systems: Application to the Amistad & Falcon system (Lower Rio Grande/Río Bravo) *Water Resources Management* 21:677-698 doi:10.1007/s11269-006-9035-1
- Shahidi AAM (2009) Evaluation of Combined Models of DP and Neural Networks in Single Reservoir Operation *Journal of Applied Sciences Research* 5
- Shalamu A (2009) Monthly and seasonal streamflow forecasting in the Rio Grande Basin. New Mexico State University
- Shokri A, Haddad O, Mariño M (2013) Reservoir Operation for Simultaneously Meeting Water Demand and Sediment Flushing: A Stochastic Dynamic Programming Approach with Two Uncertainties *Journal of Water Resources Planning and Management* 139:277-289 doi:doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000244
- Simonovic SP (2009) *Managing Water Resources: Methods and Tools for a Systems Approach*. Studies & Reports in Hydrology.
- Singh KP, Durgunoglu A (1990) An improved methodology for estimating future reservoir storage capacities: Application to surface water supply reservoirs in Illinois. Division of Water Resources Illinois Department of Transportation Campaign,
- , Illinois
- Siqueira TG, Zambelli M, Cicogna M, Andrade M, Soares S Stochastic Dynamic Programming for Long Term Hydrothermal Scheduling Considering Different Streamflow Models. In: 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, KTH, Stockholm, Sweden, 2006.
- Sivapragasam C, Vasudevan G, Maran J, Bose C, Kaza S, Ganesh N (2009) Modeling Evaporation-Seepage Losses for Reservoir Water Balance in Semi-arid Regions *Water Resources Management* 23:853-867 doi:10.1007/s11269-008-9303-3
- Sudha V, Ambujam NK, Venugopal K (2006) A Data Mining Approach for Deriving Irrigation Reservoir Operating Rules.
- Sule BF (1988) Reservoir operation policies for optimizing energy generation at the Shiroro Dam *Water Resources Management* 2:209-219 doi:10.1007/bf00429902
- Tabari H, Marofi S, Sabziparvar A-A (2010) Estimation of daily pan evaporation using artificial neural network and multivariate non-linear regression *Irrigation Science* 28:399-406 doi:10.1007/s00271-009-0201-0
- Tatar H, Touil S, Amireche H (2012) Protection des milieux naturels contre l'érosion hydrique et développement durable en milieu Atlasique algerien Cas de quelques bassins de l'Aurès central (Algérie) *REVISTA DE GEOMORFOLOGIE* 14

- Terfous A, Megnounif A, Bouanani A (2001) Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien) *Rev Sci Eau* 14:173-185.
- Terzi O, Keskin ME, Taylan ED (2006) Estimating Evaporation Using ANFIS *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 132:503-507
- Tihay JP (1973) Note sur quelques paléofformes «périglaciaires» observées en Algérie orientale Méditerranée:37-47
- Tixeront J (1960) Débit Solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie Paper presented at the Helsinki General Assembly, Helsinki,
- Touaibia B, Aidaoui A, Gomer D, Achite M (2001) Temporal quantification and variability of sediment discharge in a semiarid area in northern Algeria *Hydrological Sciences Journal* 46:41-53 doi:10.1080/02626660109492799
- Toumi A, Remini B (2004) Barrage de Foug El Gherza face au Problème de fuites d'eau Larhyss *Journal*:25-38
- Tsenga F-M, Yub H-C, Tzeng G-H (2002) Combining neural network model with seasonal time series ARIMA model *Technological Forecasting & Social Change* 69:71-87
- Turgeon A, Charbonneau R (1998) An aggregation-disaggregation approach to long-term reservoir management *Water Resour Res* 34:3585-3594 doi:10.1029/98wr02608
- USACE (1985) HEC3 River system analysis for conservation. US Army Corps of Engineers
- Davis CA
- USACE (1986) HEC 5 Simulation of flood control and conservation systems USACE, Davis CA
- USACE (2003) HEC-ResSim. Reservoir System Simulation. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis CA
- USBR (1998) HEC-6 Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs User's Manual, Version 4.1. edn., Davis, California
- Vachala S (2008) Évaporation sur les retenues EDF du Sud de la France. Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris, École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts
- Vaghefi A, Zahrai S, Mohammadi M, Hashemi B (2009) Flushing Sediment Removal Optimization Using Reservoir Operation Model: Sefid-Rud Case Study *Iranian Journal of Watershed Management Science&Engineering* 3:39-48
- Vedula S, Mujumdar PP (2005) Water resources systems: modelling techniques and analysis. McGraw Hill Higher Education
- Vogel M, Bolognese RA (1995) Storage-reliability-resiliense yield relations *Water resources research* 31
- Waibel A, Hanazawa T, Hinton G, Shikano K, Lang KJ (1989) Phoneme recognition using time-delay neural networks *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on* 37:328-339 doi:10.1109/29.21701
- Walling DE (1977a) Derivation of erosion and sediment yield parameters in areas with deficient data-reconnaissance measurements *Hydrological Sciences Journal* 22:517-520
- Walling DE (1977b) Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with particular reference to British rivers. Paper presented at the Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters, Paris
- Wan X, Wang G, Yi P, Bao W (2010) Similarity-Based Optimal Operation of Water and Sediment in a Sediment-Laden Reservoir *Water Resources Management* 24:4381-4402 doi:10.1007/s11269-010-9664-2
- Wang X, Lu W, Cao S, Fang D (2007) Using Time-Delay Neural Network Combined with Genetic Algorithms to Predict Runoff Level of Linshan Watershed, Sichuan, China *Journal of Hydrologic Engineering* 12:231-236 doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(231)
- Wang YC, Yoshitani J, Fukami K (2005) Stochastic multiobjective optimization of reservoirs in parallel *Hydrological Processes* 19:3551-3567 doi:10.1002/hyp.5845
- Wurbs R (1991) Optimization of Multiple-Purpose Reservoir System Operations: A Review of Modeling and Analysis Approaches. Davis CA
- Wurbs RA (1997) Computer Models for Water-Resources Planning and Management: National Study of Water Management During Drought. DIANE Publishing,

- Yakowitz S (1982) Dynamic programming applications in water resources Water Resour Res 18:673-696 doi:10.1029/WR018i004p00673
- Yeh WWG (1985) Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review Water Resour Res 21:1797-1818 doi:10.1029/WR021i012p01797
- Yonaba H (2009) Modélisation hydrologique hybride réseau de neurones-modèle conceptuel. Université LAVAL
- Young GK (1967) Techniques for finding reservoir operating rules. Harvard University,
- Zahraie B, Hosseini SM (2009) Development of reservoir operation policies considering variable agricultural water demands Expert Syst Appl 36:4980-4987 doi:10.1016/j.eswa.2008.06.135
- Zhang GP (2003) Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model Neurocomputing 50:159-175 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0925-2312\(01\)00702-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00702-0)
- Ziaei M, Shui LT, Goodarzi E (2012) Optimization and simulation modelling for operation of the Zayandeh Rud Reservoir Water International 37:305-318 doi:10.1080/02508060.2012.688189