

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**Université colonel El Hadj Lakhdar de Batna**  
**Faculté des sciences de l'ingénieur**  
**Département d'Hydraulique**

**Mémoire**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de :**  
**Magister En Hydraulique**

**Option**

**Constructions Hydro -Techniques Et Environnement**

**Thème**

**ESSAI DE MODÉLISATION DE LA GESTION DU  
BARRAGE DE FOUM EL GHERZA  
(W. DE BISKRA)**

Réalisé par : **KRIMIL FARIDA**

**Jury :**

<b>Mr. DJEMILI. L</b>	Maître de conférences à l'université d'Annaba :	<b>Président</b>
<b>Mme. DRIDI. H</b>	Maître de conférences à l'université de Batna :	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr. AMARCHI. H</b>	Maître de conférences à l'université d'Annaba :	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2008-2009**

# Remerciements

*Je remercie en premier lieu dieu de m'avoir donné la force et la patience de terminer ce travail, je souhaiterais adresser aussi mes vifs remerciements à certaines personnes qui m'ont aidé au cours de ces deux dernières années.*

*Je voudrais remercier très chaleureusement madame **DRIDI HADDA**, maître de conférences au département des sciences de la terre de l'université de BATNA, mon promoteur, pour les précieux conseils qu'elle a pu me donner pour élaborer ce travail.*

*J'adresse fortement mes vifs remerciements à madame **TEBBI FATIMA ZOHRA**, maître assistante au département d'hydraulique de l'université de BATNA, pour le temps qu'elle a su me consacrer, l'aide et les conseils précieux qu'elle m'a apporté pendant l'élaboration de ce travail.*

*Je tiens également à remercier monsieur **HOUICHI LARBI** maître de conférences au département d'hydraulique de l'université de BATNA, pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté pendant mes études et la préparation de ce mémoire et d'avoir bien voulu présider le jury.*

*J'adresse aussi mes remerciements à monsieur **DJEMILI LAKHDAR** maître de conférences au département d'hydraulique de l'université d'ANNABA et monsieur **AMARCHI HOCINE** maître de conférences au département d'hydraulique de l'université d'ANNABA pour l'honneur qu'ils m'a fait en acceptant de juger ce travail.*

*Je souhaite également remercier fortement mes parents : mon père et ma mère, mes sœurs et frères sans oublier Yassir et Razine*

*Je souhaiterais associer à ces remerciements les responsables de l'A.N.B (BISKRA), l'A.N.R.H(BISKRA), l'I.T.D.A.S (BISKRA) et l'A.N.B.T (ALGER).*

**TABLE DES MATIÈRES**

<b>ANNOTATIONS.....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE I : PRESENTATION DU BASSIN VERSANT</b>	
<b>I. Présentation du bassin versant l'Oued El Abiod.....</b>	<b>9</b>
I.1. Situation géographique.....	9
I.2. Morphométrie du bassin versant.....	11
I.2.1. La forme.....	11
I.2.2. Rectangle équivalent.....	11
I.2.3. Caractéristiques des altitudes (le relief).....	12
I.2.3.1. Courbe hypsométrique.....	13
I.2.3.2. Indice de pente globale.....	15
I.2.3.3. Dénivelée spécifique $D_s$ .....	16
I.2.4. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant.....	17
I.2.4.1. Densité de drainage $D_d$ .....	17
I.2.4.2. Coefficient de torrentialité.....	19
I.2.4.3. Temps de concentration.....	20
<b>II. Caractéristiques climatiques du bassin versant.....</b>	<b>23</b>
II.1. Les précipitations et leur variabilité.....	23
II.1.1. Equipement du Bassin Versant.....	24
II.1.2. Précipitation moyenne annuelle sur le bassin versant.....	24
II.1.2.1. Moyenne arithmétique.....	25
II.1.2.2. Méthode des isohyètes.....	26
II.1.3. Etude statistique des précipitations moyennes annuelles par la loi de GUMBEL.....	28
II.1.4. Les précipitations moyennes mensuelles.....	35
II.2. Etude des crues.....	36
II.2.1. Etude des pluies journalières maximales.....	36
II.2.2. Pluie de courte durée.....	37
II.2.3. Calcul du débit maximal.....	38
II.2.3.1. Détermination des débits moyens journaliers maximums fréquents.....	38

## TABLE DES MATIÈRES

---

II.2.3.2.Hydrogramme de crue .....	40
II.3.Les températures moyennes mensuelles.....	43
II.4.L'humidité relative de l'air .....	44
II.5.Les Vents .....	45
II.6. L'évapotranspiration.....	46

### **CHAPITRE II:LE CADRE GEOLOGIQUES ET LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT**

<b>I. Caractéristiques physiques du bassin versant.....</b>	<b>50</b>
I.1.Structure géologique du bassin versant.....	50
I.2. Stratigraphie.....	51
I.3.La cuvette.....	52
I.4.Etanchéité de la cuvette.....	52
I.5.Tectonique .....	53
I.6.Fondation du barrage.....	53
<b>II. Couvert végétal.....</b>	<b>54</b>

### **CHAPITRE III : FONCTIONNEMENT ACTUEL DU BARRAGE FOUM EL GHERZA**

<b>I. Présentation du barrage Foug El Gherza.....</b>	<b>58</b>
<b>II. Caractéristiques pluviométriques et hydrométriques du barrage Foug El Gherza</b>	
<b>.....</b>	<b>59</b>
II.1. Relation Hauteur -Volume-Surface (HSV).....	59
II.2.Analyse des précipitations mensuelles du barrage de Foug El Gherza.....	62
II.3.Reconstitution des apports.....	63
II.3.1. Modèles auto- régressifs.....	63
II.3.2.Modèles conceptuels.....	64
II.3.2.1.Définition du modèle conceptuel.....	64
II.3.2.2.Paramètres des modèles conceptuels.....	64
II.3.2.3.Estimation des paramètres du modèle : Phase de calage.....	65
II.3.2.4.Puissance du modèle : Phase de validation.....	65
II.3.2.5.Précision et incertitude.....	65
II.3.2.6.Critère de validation.....	65
II.3.2.7.Application du Modèle GR2M à Foug el Gherza.....	66
II.3.3.Recours à l'analyse en composantes principales (ACP).....	69

## TABLE DES MATIÈRES

---

II.3.3.1. Notion d'individu et Notion de variable.....	69
II.3.3.2. Présentation de l'ACP.....	70
II.3.3.3. Méthodologie de l'application de l'ACP.....	71
II.3.3.4. Application de l'ACP aux apports liquides mensuels de Foum El Gherza .....	72
II.3.3.5. Simulation des apports par ACP.....	75
II.3.3.6. Reconstitution des données .....	76
II.4. Reconstitution des Précipitations.....	78
II.5. Reconstitution des flux évaporatifs.....	82
II.6. Les vidanges.....	83
II.7. Calcul des fuites.....	84
II.7.1. Historique des fuites du barrage de Foum El Gherza.....	85
II.7.2. Système de mesure.....	85
II.7.3. Evolution des fuites.....	86
<b>III. Le système d'utilisation.....</b>	<b>87</b>
 <b>CHAPITRE IV: ELABORATION D'UN MODELE DE GESTION OPTIMISE</b>	
<b>I. Les principes de gestion.....</b>	<b>90</b>
I.1. Caractéristiques de la gestion.....	90
I.2. La complexité des systèmes.....	90
I.3. Les objectifs de gestion.....	91
<b>II. Système dynamique stochastique.....</b>	<b>91</b>
II.1. Discrétisation du réservoir par la théorie de MORAN.....	92
II.2. Définition du modèle d'optimisation.....	92
II.3. Optimisation par programmation dynamique stochastique (PDS).....	92
II.3.1. Le choix de la fonction objectif.....	92
II.3.2. Le processus markovien dans le cas de la gestion des barrages.....	93
II.3.3. La relation fondamentale de l'optimisation par programmation dynamique Stochastique.....	94
<b>III. Elaboration d'un modèle de gestion optimisée.....</b>	<b>96</b>
III.1. Test d'indépendance des apports.....	96
III.2. Discrétisation des stocks et des apports.....	97
III.3. Fréquences d'apports.....	98

## TABLE DES MATIÈRES

---

III.4. Détermination des sorties.....	98
III.5.Bilan hydrique.....	98
III.5.Organigramme du programme d'optimisation.....	86
<b>IV. Simulation.....</b>	<b>100</b>
IV.1. Définition du modèle de simulation.....	100
IV.2.Gestion des risques par simulation.....	100
IV.3.Incidents et indices de performance.....	101
IV.4. Détermination de la défaillance du stock et de la déverse.....	101
IV.5. Détermination de la demande non satisfaite.....	102
IV.6. Détermination de l'eau lâchée en plus de la demande agricole.....	102
IV.7.Organigramme du programme de simulation .....	103
IV.8.Interprétation des résultats.....	106
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>108</b>
<b>TABLES DES ILLUSTRATIONS.....</b>	<b>109</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>113</b>
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>118</b>

**Annotations**

$a_{ji}$	coefficient du système également appelés cosinus directeurs du système
$Ap(t)$	apport à la retenue à l'instant t (Hm <sup>3</sup> )
$b$	exposant climatique(-)
$C_j$	$j^{\text{ème}}$ Composante Principale
$Cor$	coefficient de corrélation
$Cov$	coefficient de covariance
$C^t$	fonction objectif
$C_t$	coefficient de torrentialité
$C_v$	coefficient de variation
$D_d$	densité de drainage
$D_s$	dénivelée spécifique
$e_{ij}$	résidu
$ETP$	évapotranspiration potentielle (mm/mois)
$H$	durée théorique d'insolation du mois i (h/mois)
$I_g$	indice de pente globale
$K_C$	indice de compacité de Gravelius (-)
$K_m$	coefficient correctif mensuel (-)
$K_r$	coefficient correctif régional (-)
$L(t)$	lâcher à l'instant t
$P_j$	probabilité d'apparition de l'apport J
$P_{jmax}$	pluies journalières maximales (mm)
$P_{tc}$	pluie de courte durée (mm)
$[R]$	matrice de corrélation
$S_j$	écart-type de la variable j

## ANNOTATIONS

---

$T_c$	temps de concentration (h)
$U$	variable de GAUSS (-)
$V_{\text{consigne}}$	volume minimal jugé rassurant pour pouvoir démarrer la gestion du stock
$V_d(t)$	déverse à l'instant t (Hm <sup>3</sup> )
$V_{\text{evap}}$	volume évaporé (Hm <sup>3</sup> )
$V_{\text{inf}}$	volume infiltré (Hm <sup>3</sup> )
$V(t)$	volume de la retenue à l'instant t (Hm <sup>3</sup> )
$X_j$	vecteur variable initiale
$\bar{X}_j$	moyenne arithmétique de la variable j
$X_{ij}$	individu historique
$\hat{X}_{ij}$	individu ij reconstitué
$\alpha$	facteur de pondération

# Introduction

*L'Algérie est soumise à un climat semi-aride à aride où les ressources en eau sont profondément liées aux précipitations. Celles-ci sont peu importantes, mal réparties et d'une irrégularité interannuelle très marquée. L'agriculture présente l'un des secteurs les plus consommateurs d'eau et dont la demande est continuellement grandissante.*

*En égard de l'importance du rôle de l'eau dans le développement socio-économique, toute pénurie ou rareté dans la ressource aura un impact important capable d'affecter d'une manière durable l'effort de développement du pays et en particulier l'économie liée à l'agriculture.*

*Les problèmes liés à l'eau sont aptes à devenir plus complexes dans le futur, en raison de la poussée démographique et les besoins qu'ils lui sont associés surtout le caractère instable et variable des régimes pluviométriques liés à la péjoration climatique. Pour cela, la gestion de l'eau a pour rôle de trouver le bon équilibre entre ressource et usage.*

*Le barrage de Foum El Gherza sur l'oued L'Abiod, situé à 15 km Nord-est de la ville de Biskra, est un vieil ouvrage de plus d'un demi siècle et classé comme patrimoine national. Il a connu une opération de dévasement afin de récupérer près de 70% de sa capacité initiale de 47 hm<sup>3</sup>. Il est destiné spécialement à l'irrigation de 1200Ha de palmerais dans la Daira de Sidi Okba. Ce barrage est aujourd'hui dans un état d'envasement très avancé, ce qui a réduit considérablement sa capacité d'emmagasinement.*

*Devant cette situation dont l'impact socio-économique et environnemental est considérable, seule une gestion très rationnelle de la ressource peut atténuer cette crise. Pour cette raison le barrage de Foum El Gherza érigé à l'exutoire de cette grande vallée, a été choisi pour faire l'objet d'une simulation pour une régularisation à caractère prévisionnel dans la gestion du barrage et dont la mise en œuvre est une opération souvent difficile et complexe.*

## Introduction générale

---

*Cette approche prendra la forme d'une modélisation basée sur deux paramètres : pluies/débits intégrant la double dimension spatio - temporelle.*

*Nous avons opté dans ce travail pour l'utilisation de la programmation dynamique stochastique (P.D.S) qui s'adapte le mieux au caractère variable des observations à travers leur probabilité d'occurrence.*

# *CHAPITRE I*

## *PRESENTATION DU BASSIN VERSANT*

## **Introduction**

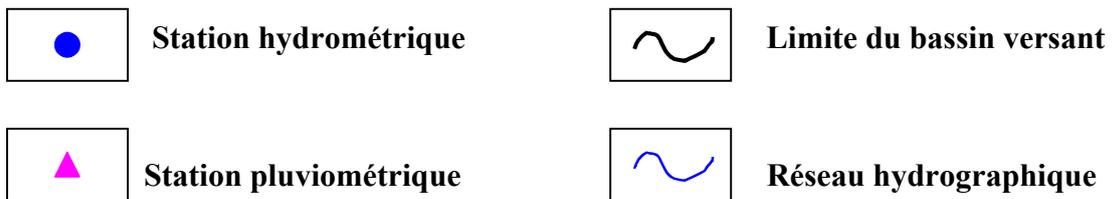
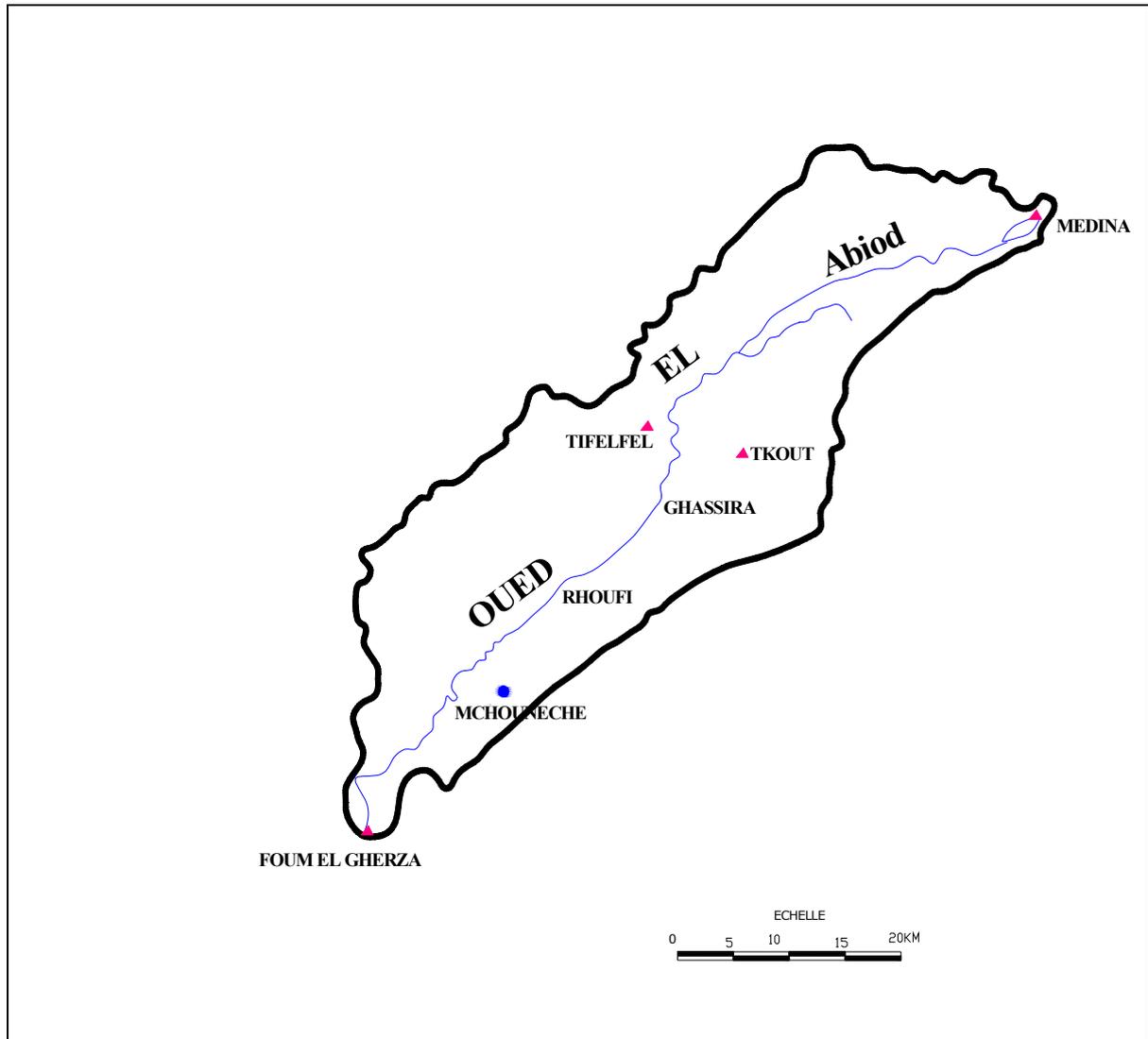
La mise en évidence des caractéristiques du bassin versant l'oued El Abiod a pour but d'appréhender avec assez de précision la réponse hydrologique vis-à-vis d'une séquence pluviométrique.

Les caractéristiques physiques et morphométriques permettent de définir l'aptitude aux écoulements dans le bassin. L'analyse des facteurs climatiques et des régimes qui leurs sont associés sera appréhendé à travers l'analyse des éléments les plus déterminants de l'écoulement.

## **I. Présentation du bassin versant l'Oued El Abiod**

### **I.1. Situation géographique**

Le bassin versant Oued El Abiod est situé dans le massif des Aurès. Il fait partie du grand bassin hydrologique de Chott Melghir qui se compose de trois principaux oueds : oued El Abiod ; oued Chenawra et oued Tkout formant par leur confluence oued Ghassira. Oued El Abiod est formé par la réunion des torrents descendants des raides pentes de Chelia (2326m) et Ichemoul (2100m). Après avoir traversé Tighanimine, il s'encaisse dans les canyons de Rhoufi et les gorges de Mchouneche, puis s'ouvre une voie vers la plaine Saharienne jusqu'aux gorges de Foum el Gherza. Le bassin versant est caractérisé par sa dissymétrie, une partie montagneuse au Nord à plus de 2000 m (Chelia) et une autre basse au Sud (295m El Habel). Il s'étale sur une superficie de 1300 Km<sup>2</sup> circonscrite par un périmètre de 200 Km.



**Fig .1.1.**Présentation du bassin versant Oued El Abiod

## I.2.Morphométrie du bassin versant

Les différents paramètres morphométriques du bassin notamment, la forme, l'altitude caractéristique, la pente et le relief, interviennent et souvent d'une façon combinée dans les modalités de l'écoulement, donc il convient de les préciser dès le début dans toute étude.

### I.2.1.La forme

La forme du bassin versant influence sur l'écoulement et sur l'allure de l'hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant. Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser la forme, et aussi de comparer les bassins versants entre eux, parmi ces indices celui de Gravelius qui caractérise la compacité du bassin versant. Il se définit comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle ayant même surface

$$K_C = \frac{P}{2 \sqrt{\pi S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (1.1)$$

Pour un bassin circulaire le «  $K_C$  » est égal à 1 et augmente autant que la compacité diminue. Dans le bassin de l'Oued El Abiod l'indice de Gravelius est de :

$$K_C = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} = 0,28 \frac{200}{\sqrt{1300}} = 1,55.$$

$$K_C=1.55.$$

Au vu de ce résultat, nous pouvons dire que le bassin versant oued El Abiod se caractérise par une forme allongée.

### I.2.2.Rectangle équivalent

Mis au point par ROCHE, le rectangle équivalent permet de comparer deux bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Le contour du bassin devient rectangle de même périmètre dont la longueur et la largeur seront :

### 1. Longueur du rectangle équivalent

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,128} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right] \quad (1.2)$$

-  $K_c$  : indice de pente de Gravelius.

-  $S$  : superficie du bassin versant ( $\text{Km}^2$ ).

$$L = \frac{1,55 \sqrt{1300}}{1,128} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{1,55} \right)^2} \right]$$

$$L = 83,524 \text{ Km}$$

### 2. Largeur du rectangle équivalent

$$I = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,128} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right] \quad (1.3)$$

$$I = \frac{1,55 \sqrt{1300}}{1,128} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{1,55} \right)^2} \right]$$

$$I = 15,56 \text{ Km}$$

#### I.2.3. Caractéristiques des altitudes (le relief)

L'importance des reliefs et leur articulation dans l'espace jouent un rôle essentiel dans le bilan hydrique et par conséquent dans l'aptitude aux écoulements.

L'orographie définit un gradient pluviométrique et thermique chaque bassin est caractérisé par la répartition altitudinale de son impluvium.

### I.2.3.1. Courbe hypsométrique

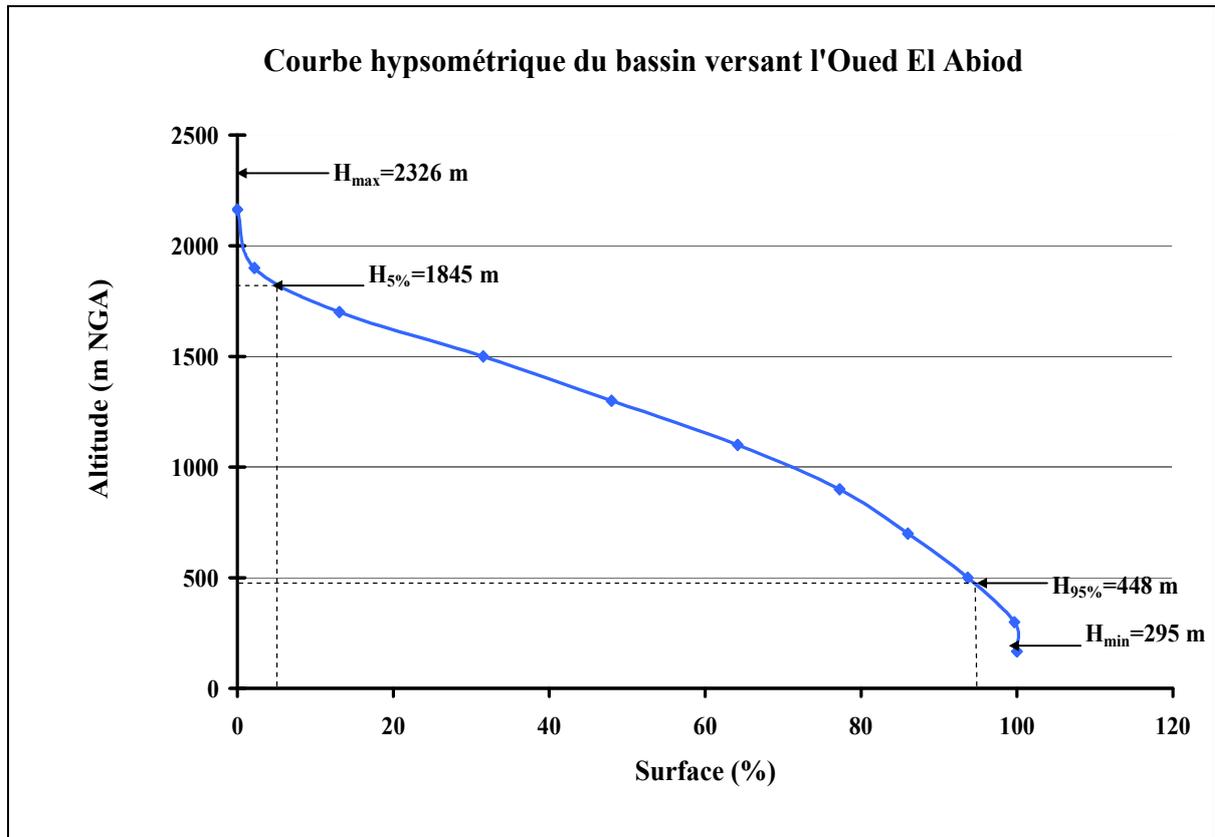
La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude.

Les courbes hypsométrique demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassin entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.

Le but recherché ici, est la détermination de la classe de relief, la hauteur moyenne, la médiane et le pourcentage des aires partielles entre les différentes courbes de niveau.

**Tableau 1.1.** Variation de surface en fonction de l'altitude

Altitude (m)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Surface Cumulée (Km <sup>2</sup> )	Surface Cumulée (%)
>2200	0.16	0.012	0.16	0.012
2200-2000	28	2.154	28.16	2.166
2000-1800	142	10.923	170.16	13.089
1800-1600	240	18.462	410.16	31.551
1600-1400	214	16.462	624.16	48.012
1400-1200	210	16.154	834.16	64.166
1200-1000	170	13.077	1004.16	77.243
1000-800	113.84	8.757	1118	86.000
800-600	100	7.692	1218	93.692
600-400	78	6.000	1296	99.692
<400	4	0.308	1300	100



**Fig.1.2.** Courbe hypsométrique du bassin versant l'Oued El Abiod.

La zone d'altitude comprise entre 1600m et 1200m correspond en majorité au bassin des hautes plaines d'Arris, les secteurs d'altitude entre 1200 à 600m où se fait la jonction de l'oued El Abiod avec ces deux principaux affluents en l'occurrence les oueds Zellatou et Theniet El Beida. La tranche d'altitude inférieure à 600m où oued El Abiod est accueilli par un affluent important oued El Atrouss. Cette répartition altitudinale de relief du bassin a une influence directe sur le régime hydrologique du bassin.

### I.2.3.2. Indice de pente globale

Cet indice permet de déduire la nature du relief en se référant à la classification de l'O.R.S.T.O.M (tableau 1.2).

$$I_g = D/L \quad (1.4)$$

-D: La dénivelée ou bien la distance qui sépare les altitudes ayant 5% de la surface du bassin et celles de 95% ou bien la distance qui sépare les deux courbes de niveau maitresses extrêmes  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$ .

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \quad (1.5)$$

-L : longueur du rectangle équivalent ;  $L=83.524\text{Km}$

A partir de la courbe hypsométrique on trouve :

$$-H_{5\%} = 2096\text{m}$$

$$-H_{95\%} = 556\text{m}.$$

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 2096 - 556 = 1540 \text{ m}.$$

$$D = 1540\text{m}.$$

$$I_g = \frac{1540}{83.524} = 18,44\text{m/Km}.$$

**Tableau 1.2.** Variation de l'indice de pente global

<b>1</b>	relief très faible	$I_g < 0.002$
<b>2</b>	relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
<b>3</b>	relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
<b>4</b>	relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
<b>5</b>	relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
<b>6</b>	relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
<b>7</b>	relief très fort	$0.1 < I_g$

Cet indice de pente global sert aussi à classer le relief d'un bassin, mais pour permettre une comparaison plus efficace et plus poussée du bassin, du point de vue relief. Il convient de calculer la dénivelée spécifique.

### I.2.3.3. Dénivelée spécifique $D_s$

Puisque l'indice de pente globale décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique  $D_s$  ne présente pas cet inconvénient

$$D_s = I_g \sqrt{S} \quad (1.6)$$

$$D_s = 18,44 \sqrt{1300} = 664,86 \text{m.}$$

$$D_s = 664,86 \text{m.}$$

D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M. La dénivelée spécifique du bassin l'oued El Abiod se trouve dans la classe R7 : donc Relief très fort.

**Tableau 1.3.** Classification de l'O.R.S.T.O.M du relief

<b>R1</b>	Relief très faible	$D_s < 10\text{m}$
<b>R2</b>	Relief faible	$10\text{m} < D_s < 25\text{m}$
<b>R3</b>	Relief assez faible	$25\text{m} < D_s < 50\text{m}$
<b>R4</b>	Relief modéré	$50\text{m} < D_s < 100\text{m}$
<b>R5</b>	Relief assez fort	$100\text{m} < D_s < 250\text{m}$
<b>R6</b>	Relief fort	$250\text{m} < D_s < 500\text{m}$
<b>R7</b>	Relief très fort	$D_s > 500\text{m}$

Les résultats précédents de l'indice de pente globale  $I_g = 18,44 \text{m/Km}$  présentes des reliefs forts de  $D_s = 664,86 \text{m}$ , la valeur de  $D_s$  traduit le volume montagneux dans le bassin versant.

## I.2.4. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant

### I.2.4.1. Densité de drainage $D_d$

Elle est déterminée comme étant le rapport entre la longueur totale des cours d'eau de tout ordre  $L_x$  sur la surface du bassin versant  $S$ .

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (1.7)$$

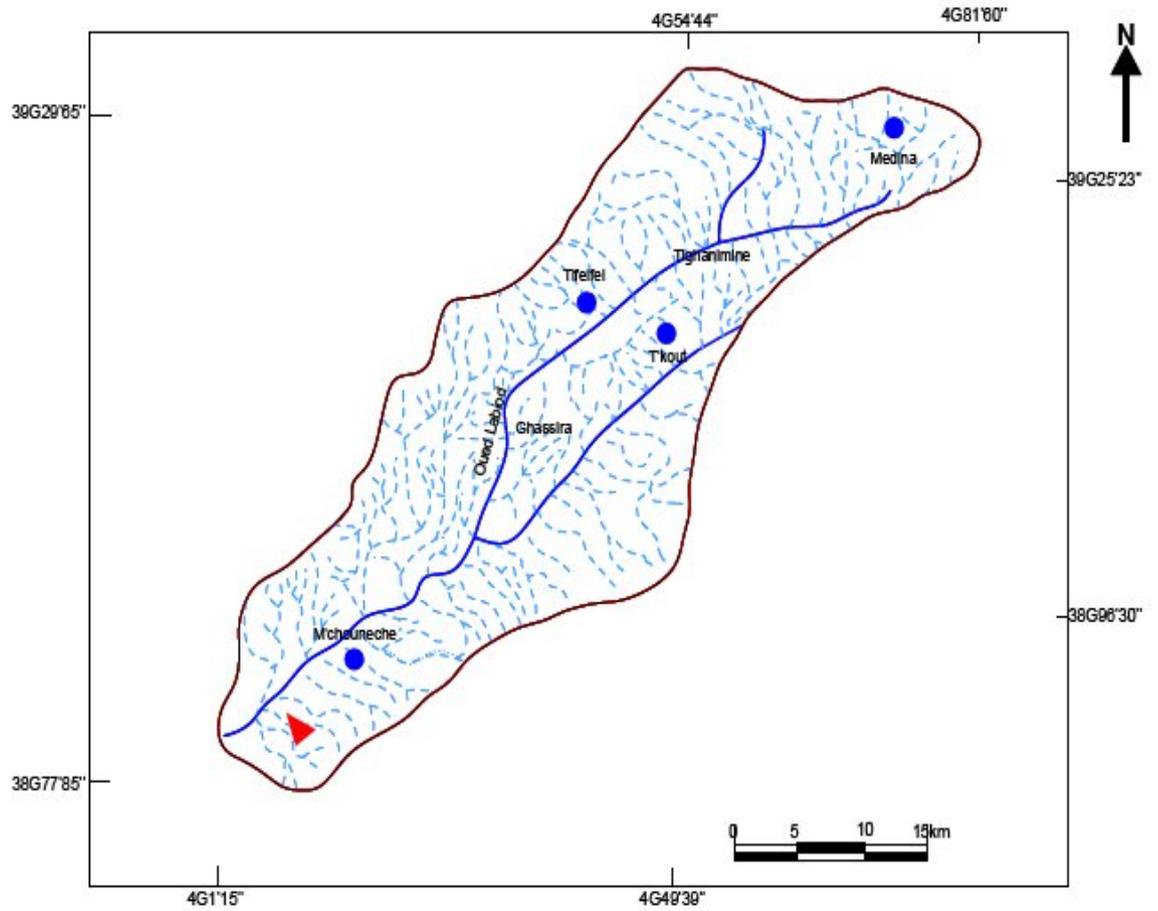
- $D_d$  : densité de drainage en (km/km<sup>2</sup>).

- $L_i$  : Somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal.

- $S$  : superficie du bassin versant.

$$D_d = 4935/1300$$

$$D_d = 3,80 \text{ km/km}^2.$$



Source : Haoues.C.2008

- **Station hydrométrique**
- ▲
**Station pluviométrique**
- ~
**Limite du bassin versant**
- **Réseau hydrographique principal**
- - -
**Réseau hydrographique secondaire**

Fig .1.3. Réseau hydrographique du bassin versant l'Oued El Abiod

#### **I.2.4.2.Coefficient de torrentialité**

C'est le produit de la densité de drainage par la fréquence de thalwegs élémentaires.

$$C_t = D_d \cdot \frac{N_1}{S} \quad (1.8)$$

- $C_t$  : coefficient de torrentialité.

- $D_d$  : densité de drainage  $D_d=3.80 \text{ km/km}^2$ .

- $N_1$  : nombre de thalwegs d'ordre « 1 »  $N_1=8904$ .

- $S$  : surface du bassin versant  $S=1300 \text{ km}^2$ .

$$C_t = 3,80 * \frac{8904}{1300}$$

$$C_t = \mathbf{26,03.}$$

On en déduit que cet écoulement est assez fort et il peut s'expliquer par les fortes pentes caractérisent le bassin versant.

#### **I.2.4.3.Temps de concentration**

C'est le temps que mettra la première goutte d'eau tombée au point hydrologiquement le plus éloigné du bassin versant pour arriver à l'exutoire.

### 1-Calcul du temps de concentration par l'hydrogramme de crue

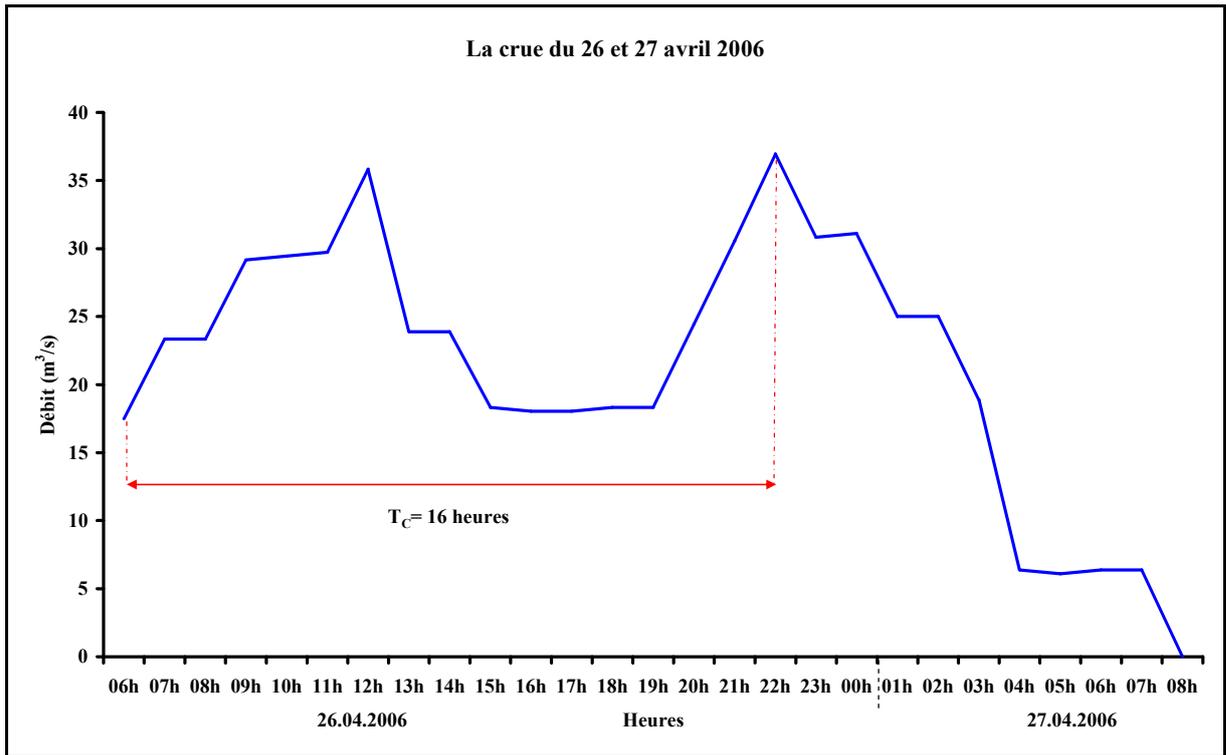
Les relevées disponibles de cotes du plan d'eau permettent de reconstituer au pas horaire le débit entrant dans la retenue. Les données sont représentées dans les tableaux suivants :

**Tableau 1.4.** Observation de la crue du 26 avril 2006

Date	Heure des mesures (h)	Cote du plan d'eau N.G.A	Volume de la retenue (Hm <sup>3</sup> )	Variation de volume de la retenue (Hm <sup>3</sup> )	Débit instantané (m <sup>3</sup> /s)
26/04/2006	05h.00	195,30	5,741	-	-
	06h.00	195,33	5,804	0,063	17,50
	07h.00	195,37	5,888	0,084	23,33
	08h.00	195,41	5,972	0,084	23,33
	09h.00	195,46	6,077	0,105	29,17
	10h.00	195,51	6,183	0,106	29,44
	11h.00	195,56	6,290	0,107	29,72
	12h.00	195,62	6,419	0,129	35,83
	13h.00	195,66	6,505	0,086	23,89
	14h.00	195,70	6,591	0,086	23,89
	15h.00	195,73	6,657	0,066	18,33
	16h.00	195,76	6,722	0,065	18,06
	17h.00	195,79	6,787	0,065	18,06
	18h.00	195,82	6,853	0,066	18,33
	19h.00	195,85	6,919	0,066	18,33
	20h.00	195,89	7,007	0,088	24,44
	21h.00	195,94	7,117	0,110	30,56
	22h.00	196,00	7,250	0,133	36,94
23h.00	196,05	7,361	0,111	30,83	
00h.00	196,10	7,473	0,112	31,11	

**Tableau 1.5.** Observation de la crue du 27 avril 2006

Date	Heure des mesures (h.mn)	Cote du plan d'eau N.G.A	Volume de la retenue (Hm <sup>3</sup> )	Variation de volume de la retenue (Hm <sup>3</sup> )	Débit instantané (m <sup>3</sup> /s)
27/04/2006	01h.00	196,14	7,563	0,090	25,00
	02h.00	196,18	7,653	0,090	25,00
	03h.00	196,21	7,721	0,068	18,89
	04h.00	196,22	7,744	0,023	6,39
	05h.00	196,23	7,766	0,022	6,11
	06h.00	196,24	7,789	0,023	6,39
	07h.00	196,25	7,812	0,023	6,39
	08h.00	196,25	7,812	0,000	0,00



**Fig .1.4.** Hydrogramme de la crue de 26 et 27 avril 2006.

De la Fig.1.5.le temps de concentration est égal à  $T_c=16h$ .

**2-Calcul du temps de concentration par la formule de GIONDOTTI**

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H}} \quad (1.9)$$

-A : Superficie du bassin versant.

-L : Longueur du talweg principal = 106 km.

-H =  $H_{moy} - H_{min} \Rightarrow H = 1170 - 295 = 875$  m.

Donc :  $T_c = 13$  heures.

**Tableau 1.6.**Résultats morphométriques et géométriques

<b>Paramètres</b>	<b>unités</b>	<b>symboles</b>	<b>valeurs</b>
<b>Longueur du thalweg principal</b>	Km	L <sub>p</sub>	106
<b>Superficie du BV</b>	Km <sup>2</sup>	S	1300
<b>Périmètre du BV</b>	Km	P	200
<b>Altitude maximale</b>	m	H <sub>max</sub>	2326
<b>Altitude moyenne</b>	m	H <sub>moy</sub>	1170
<b>Altitude minimale</b>	m	H <sub>min</sub>	295
<b>Altitude 5%</b>	m	H <sub>5%</sub>	2096
<b>Altitude 95%</b>	m	H <sub>95%</sub>	556
<b>Indice de compacité de Gravelius</b>	--	K <sub>c</sub>	1.56
<b>Rectangle équivalent</b>			
<b>Longueur</b>	Km	L	83.524
<b>Largeur</b>	Km	l	15.56
<b>Indice de pente global</b>	m/Km	L <sub>g</sub>	18,44
<b>Dénivelée spécifique</b>	m	D <sub>s</sub>	664,86
<b>Classe de relief suivant la classification de l'OSTROM</b>	--	R7(relief très fort) D <sub>s</sub> >500	
<b>Densité de drainage</b>	Km/Km <sup>2</sup>	D <sub>d</sub>	3.80
<b>Temps de concentration</b>	h	T <sub>c</sub>	16

Les résultats des caractéristiques morphométriques, montrent que la densité de drainage est assez importante, de plus le coefficient de torrencialité semble assez élevé ceci est due certainement au nombre considérable de talwegs de premier ordre. Quant au temps de concentration, il semble important (long) puisque le temps qu'a mis une goutte d'eau pour arriver au point le plus éloigné de l'exutoire est 16heures.

Ceci, explique la complication des chenaux qui traversent les différentes structures et la forme allongée du bassin versant.

## II. Caractéristiques climatiques du bassin versant

### II.1. Les précipitations et leur variabilité

Les conditions climatiques d'un bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau. Ce sont les précipitations qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- Leur hauteur totale annuelle.
- Leur répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques.
- Leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

Ces différents aspects des précipitations sont plus ou moins modifiés selon l'effet combiné des autres paramètres physiques et climatiques. Les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble, variables aléatoires dans le temps et dans l'espace, permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large.

L'oued El Abiod traverse deux régions nettement distinctes du point de vue orographique et hydrographique :

- Les Aurès.
- La plaine saharienne.

Les conditions climatiques et les précipitations suffisent dans la première et les irrigations y sont utiles mais non indispensables, tant que le climat est froid la terre garde son humidité. Par contre, la rareté des pluies et le climat brûlant dans la seconde condamnent le sol desséché à une aridité totale si les irrigations ne le fécondent pas.

### II.1.1. Equipement du Bassin Versant

Le long de l'oued El Abiod jusqu'à l'exutoire (barrage Foum El Gherza) on dénombre 04 stations pluviométriques (Médina, Tifelfel, Tkout et la station du barrage) et une station hydrométrique (Mchouneche). Le tableau ci-dessous conclut les caractéristiques des stations et les séries d'observation.

**Tableau 1.7.** Caractérisation des stations pluviométriques et hydrométrique

Nom de la station	Code	X	Y	Z(m)
Tifelfel	061511	821.9	207.65	740
Médina	061503	846.80	231.10	1450
Tkout	061505	829	211	998
Mchouneche	061506	800.8	186.8	390
Barrage	061601	9864.41	15631.09	200

### II.1.2. Précipitation moyenne annuelle sur le bassin versant

L'étude des précipitations est d'une importance capitale, car elle constitue l'élément de base pour notre étude. Pour le bassin versant oued El Abiod, la répartition des précipitations est assez irrégulière. On note cependant l'échelonnement nettement délimité, des précipitations qui varient avec l'altitude mais aussi avec la latitude saharienne. Les pluviomètres donnent des indications ponctuelles sur la quantité d'eau tombée, et ne peuvent pas forcément représenter les conditions pluviométriques exactes d'une grande surface. C'est pourquoi, la détermination de la précipitation moyenne sur un bassin versant est une opération relativement délicate.

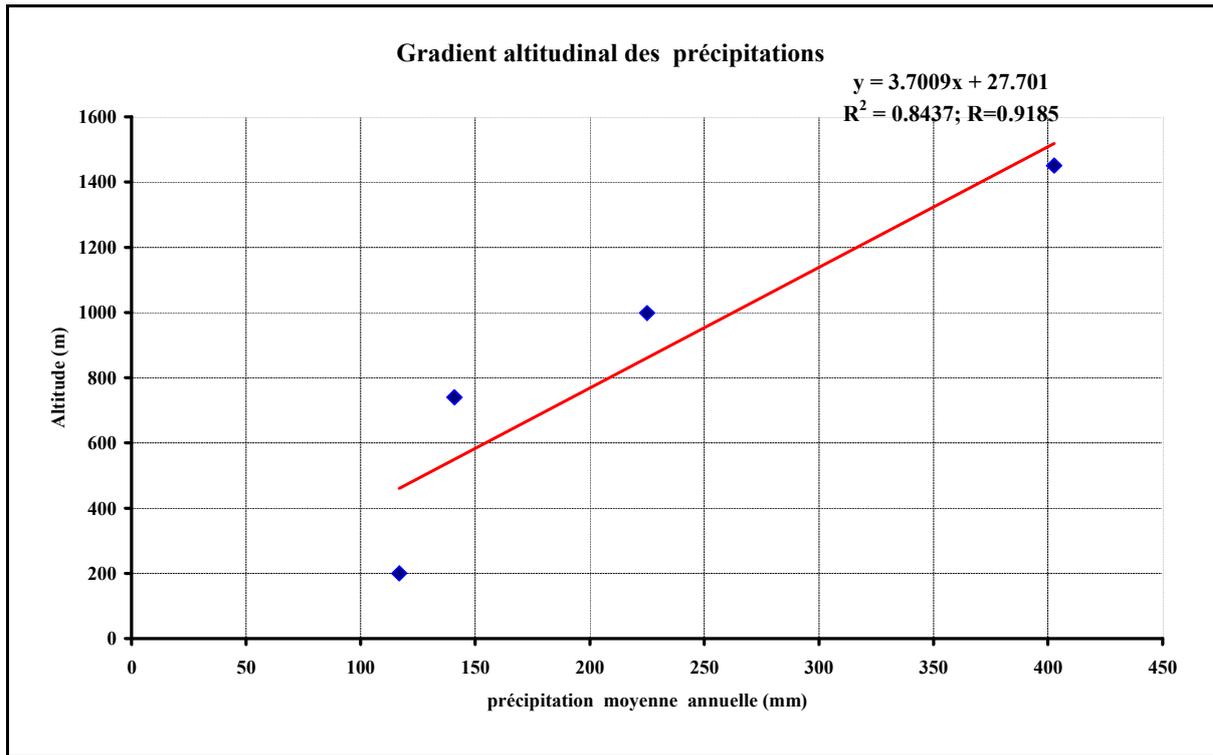


Fig .1.5. Régression linéaire du gradient altitudinal des précipitations.

Plusieurs méthodes permettent de calculer la hauteur des précipitations tombée sur un bassin versant les plus usuelles sont :

#### II.1.2.1.Moyenne arithmétique

Cette méthode simple, mais néanmoins assez grossière consiste à calculer la moyenne arithmétique de hauteurs de précipitation relevées au cours du même intervalle du temps au diverses stations de mesures du bassin, cette méthode reste peu précise car en l'absence de pointe d'observation suffisamment nombreux, risque de donner trop d'importance aux valeurs extrêmes, car la répartition des stations n'est pas homogène sur l'ensemble du bassin, de ce fait la variation des précipitations d'une station à l'autre reste importante.

$$\overline{P} = \frac{\sum P_i}{N} \quad (1.10)$$

- $P_i$  : Précipitation moyenne à la station i en (mm).

-N : Nombre de station d'observation.

**Tableau 1.8.**La pluie moyenne annuelle

Station	Code	P moyenne annuelle (mm)
Tkout	061505	245,304
Tifelfel	061511	142,431
Barrage	061601	116,845
Médina	061503	416.82
<b>Précipitation moyenne des 04 stations</b>		230.35

Cette méthode ne reflète pas souvent la quantité réelle des pluies qui se sont abattues sur la totalité du bassin versant, pour cela on recourt à d'autres méthodes plus faibles.

### II.1.2.2.Méthode des isohyètes

Une courbe isohyète est l'ensemble des points sur lesquels est tombée la même hauteur de pluie pendant une période déterminée. Pour pouvoir tracer les isohyètes avec un maximum d'exactitude, il faut que le réseau des pluviomètres soit très dense, en couvrant toute la superficie du bassin, on peut tenir compte des stations situées dans les bassins voisins.

Les cartes isohyètes sont tracées en joignant les points d'égales précipitations. Ceci nécessite une très bonne connaissance de l'environnement général du bassin versant.

La pluie moyenne sur la surface S est donnée par la moyenne pondérée

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} S_i P_i}{S_T} \quad (1.11)$$

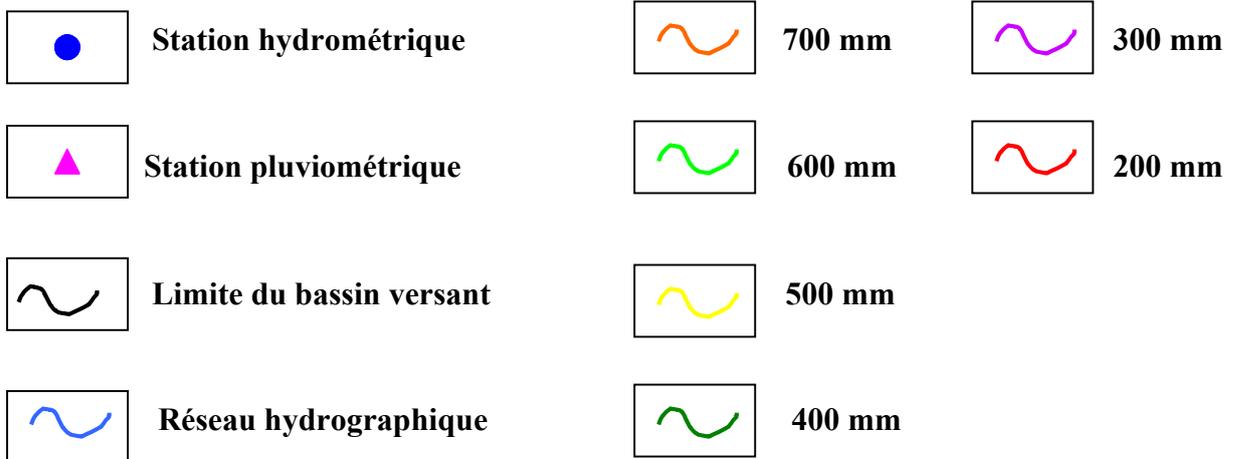
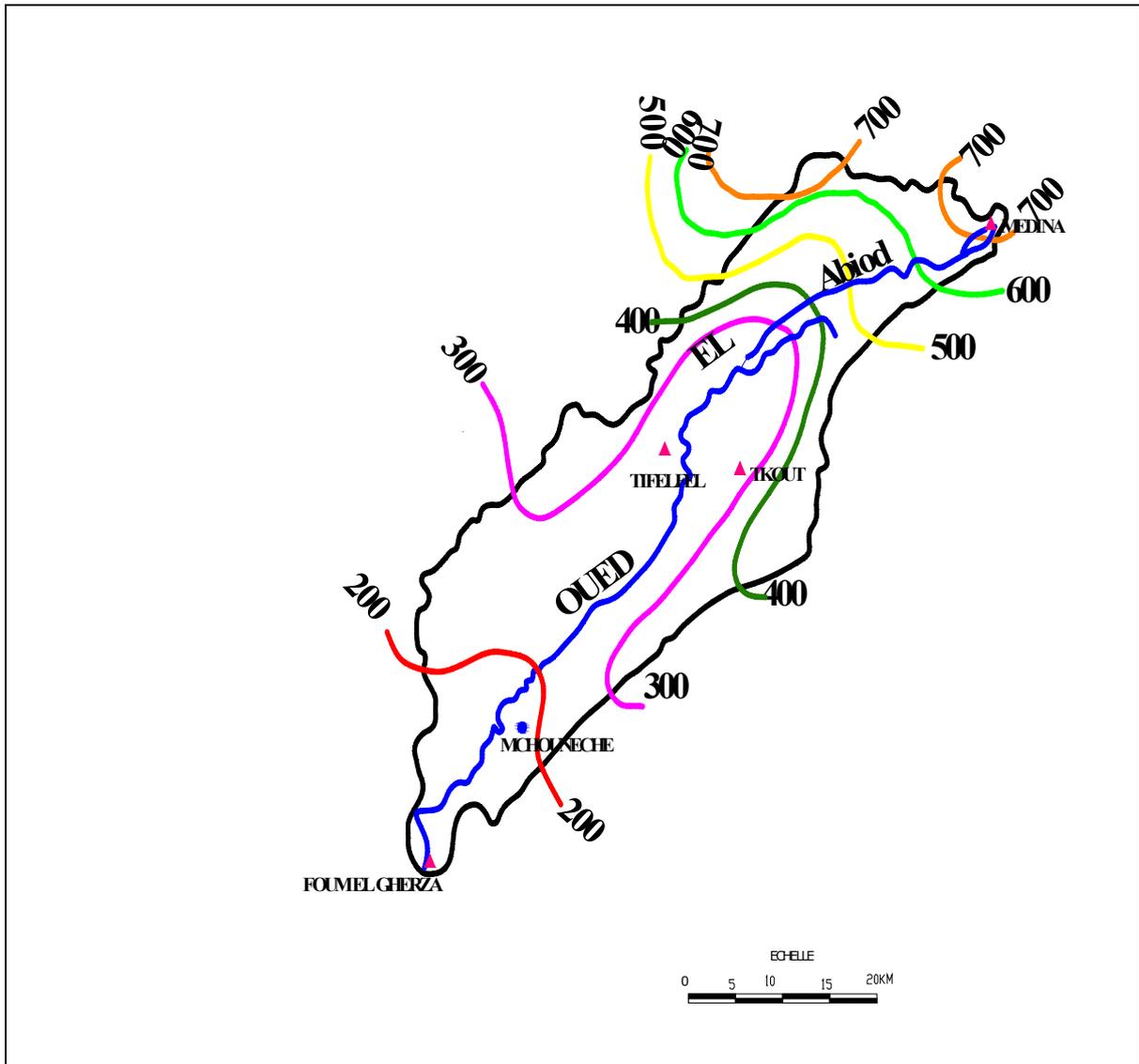


Fig 1.6. La carte des isohyètes

**Tableau 1.9.** Estimation de la lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin par la méthode des isohyètes.

N°	Isohyètes des hauteurs (mm)	Zone d'influence S <sub>i</sub> (Km <sup>2</sup> )	P <sub>i</sub>	S <sub>i</sub> P <sub>i</sub>
1	>600	27.20	660.80	17973,76
2	600-500	70.40	550.60	38762,24
3	500-400	112	483.10	54107,2
4	400-300	150.80	388	58510,4
5	300-200	207.60	298.50	61968,6
6	200-150	566	186.70	105672,2
7	<150	163.30	186.50	30455,45
$\bar{P}$	<b>283 mm</b>			

Parmi les deux méthodes nous retenons la méthode des isohyètes en raison de sa précision, relativement acceptable, pour évaluer la moyenne du bassin versant :

$$\bar{P}=283 \text{ mm}$$

### II.1.3. Etude statistique des précipitations moyennes annuelles par La loi de GUMBEL

#### 1. Statistique de base

##### -La variance

Soit un échantillon de taille N ; de moyenne arithmétique ( $\bar{X}$ ), la variance  $\sigma^2$  soit égale à :

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1} = \frac{1}{N-1} \left[ \sum_1^n x_i^2 - N\bar{x}^2 \right]$$

##### -L'écart type « $\sigma$ »

L'écart type d'un échantillon est la racine carrée de la variance.

**-La médiane :**

Si on classe les valeurs de la variable par ordre de grandeur croissant la médiane est le terme tel qu'il ait autant de valeurs inférieures que de valeurs supérieures.

-Si  $N=2n+1$  ; la médiane est le  $(n+1)$  <sup>ème</sup> terme.

-Si  $N=2n$  ; la médiane est égale à la moyenne du  $n$  <sup>ème</sup> et du  $(n+1)$  <sup>ème</sup> terme.

**-Le coefficient de variation : «  $C_v$  »**

Paramètre adimensionnel fréquemment utilisé en hydrologie pour mesurer la dispersion d'un échantillon.

$$C_v = \frac{\sigma}{x}$$

**2. La loi de GUMBEL**

Sous la formule simple de la loi de GUMBEL et généralement utilisée on a :

$$\text{Avec : } U = \frac{x - x_0}{g}$$

Où :

-U : la variable réduite de GUMBEL.

$$U = -\ln(-\ln F)$$

-  $x_0$  : Le paramètre de position (le mode).

-  $S$  : Le paramètre d'échelle positif différent de zéro.

-N : La taille d'échantillon.

-La fréquence expérimentale sera calculée par la formule la plus utilisée :  $f = \frac{n-0.5}{N}$

-n : ordre de classement ;  $n=1, 2, 3, \dots$ , etc.

-La valeur théorique (x) soit égale à :

$$u = \frac{x - x_0}{g} \Rightarrow x = g * u + x_0$$

-g : le gradex ;  $g=0.78 \sigma_x$

**Tableau 1.10.** Les paramètres de la loi de Gumbel (FOUM EL GHERZA)

Valeur de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique
147,300	36,500	1	0,017	-1,410	36,500	28,970
258,600	40,420	2	0,050	-1,097	40,420	42,789
51,500	40,800	3	0,083	-0,910	40,800	51,059
36,500	50,000	4	0,117	-0,765	50,000	57,495
106,000	51,500	5	0,150	-0,640	51,500	62,998
114,000	60,000	6	0,183	-0,529	60,000	67,943
81,300	79,600	7	0,217	-0,425	79,600	72,528
153,800	81,200	8	0,250	-0,327	81,200	76,874
40,800	81,300	9	0,283	-0,232	81,300	81,059
138,000	91,010	10	0,317	-0,140	91,010	85,143
119,000	100,000	11	0,350	-0,049	100,000	89,171
100,000	106,000	12	0,383	0,042	106,000	93,181
50,000	107,700	13	0,417	0,133	107,700	97,205
114,330	107,800	14	0,450	0,225	107,800	101,275
215,800	109,900	15	0,483	0,319	109,900	105,422
91,010	110,200	16	0,517	0,415	110,200	109,678
131,200	114,000	17	0,550	0,514	114,000	114,077
110,200	114,330	18	0,583	0,618	114,330	118,660
81,200	119,000	19	0,617	0,727	119,000	123,473
107,800	125,400	20	0,650	0,842	125,400	128,573
164,300	131,200	21	0,683	0,966	131,200	134,032
79,600	138,000	22	0,717	1,099	138,000	139,942
159,980	147,300	23	0,750	1,246	147,300	146,432
107,700	152,700	24	0,783	1,410	152,700	153,681
109,900	153,800	25	0,817	1,597	153,800	161,958
40,420	159,980	26	0,850	1,817	159,980	171,693
60,000	164,300	27	0,883	2,087	164,300	183,639
152,700	215,800	28	0,917	2,442	215,800	199,328
257,000	257,000	29	0,950	2,970	257,000	222,704
125,400	258,600	30	0,983	4,086	258,600	272,058

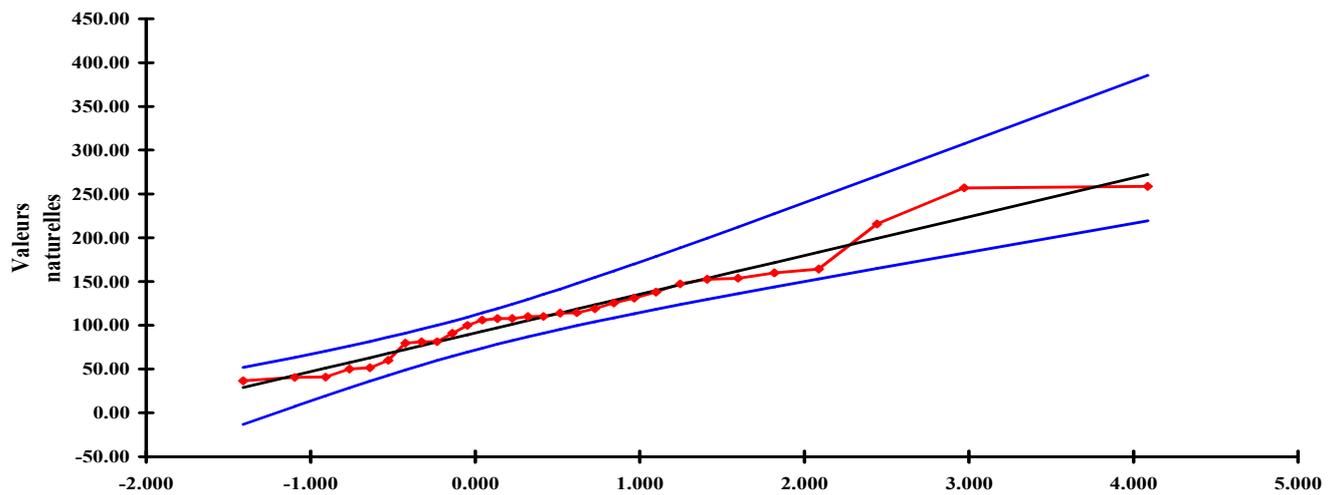
Les tableaux des autres stations sont intégrés dans les annexes.

**Statistique de base :**

**1. Station du barrage FOUM EL GHERZA**

- Nombre d'observations : 30.
- Minimum : 36.50mm.
- Maximum : 258.6mm.
- Moyenne : 116.8mm.
- Ecart-type : 56.71mm.
- Médiane : 110.1mm.
- Coefficient de variation (Cv) : 0.4853.

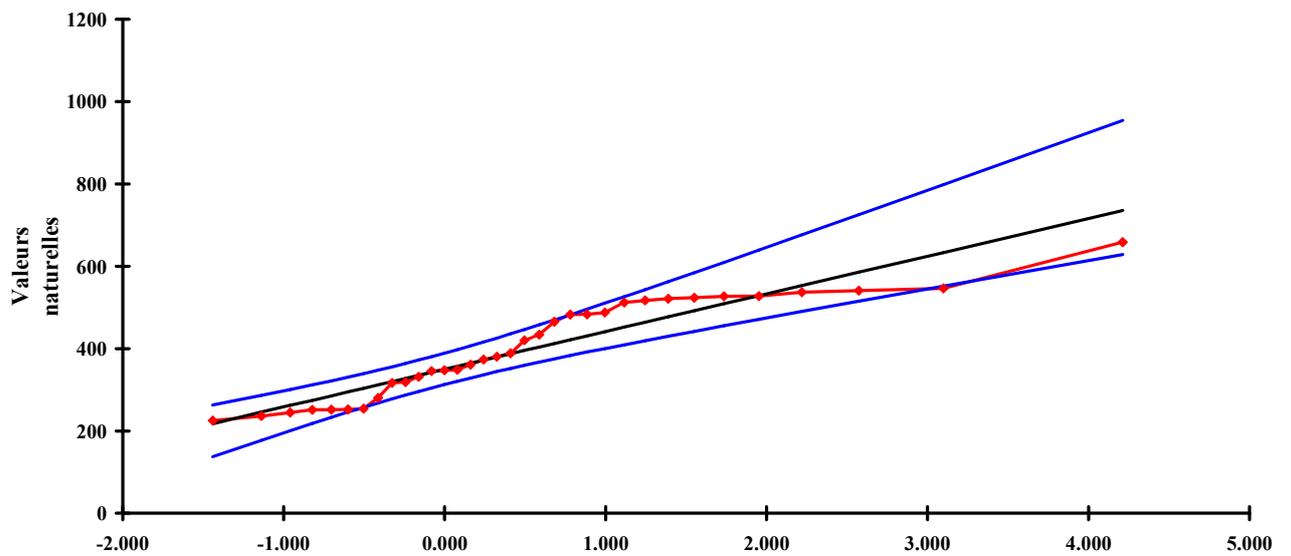
**Ajustement à la loi de Gumbel (FOUM EL GHERZA, IC=95%):  $X=44.23\mu+91.23$**



## 2. Station MEDINA

- Nombre d'observations : 34.
- Minimum : 225.1mm.
- Maximum : 658.7mm.
- Moyenne : 402.7mm.
- Ecart-type : 117.5mm.
- Médiane : 384.4mm.
- Coefficient de variation (Cv) : 0.2917.

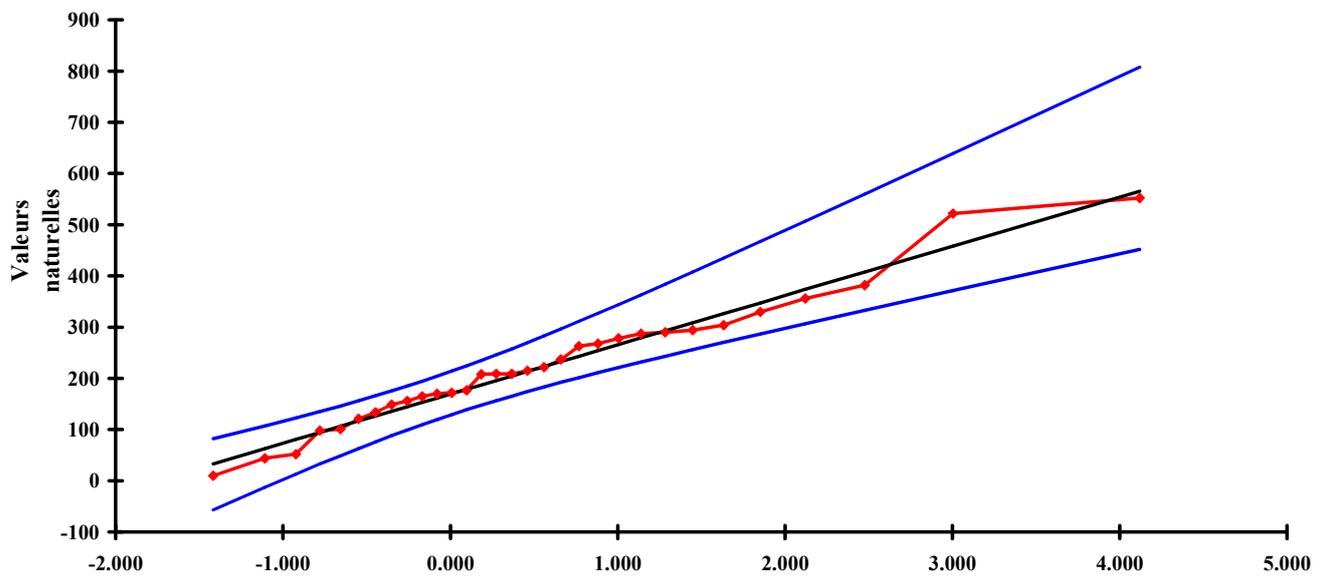
Ajustement à la loi de Gumbel (MEDINA,IC=95%):  $X=91.62\mu+349.86$



### 3. Station TKOUT

- Nombre d'observations : 31.
- Minimum : 10.00mm.
- Maximum : 552.0mm.
- Moyenne : 225.0mm.
- Ecart-type : 123.3mm.
- Médiane : 209.0mm.
- Coefficient de variation (Cv) : 0.5479.

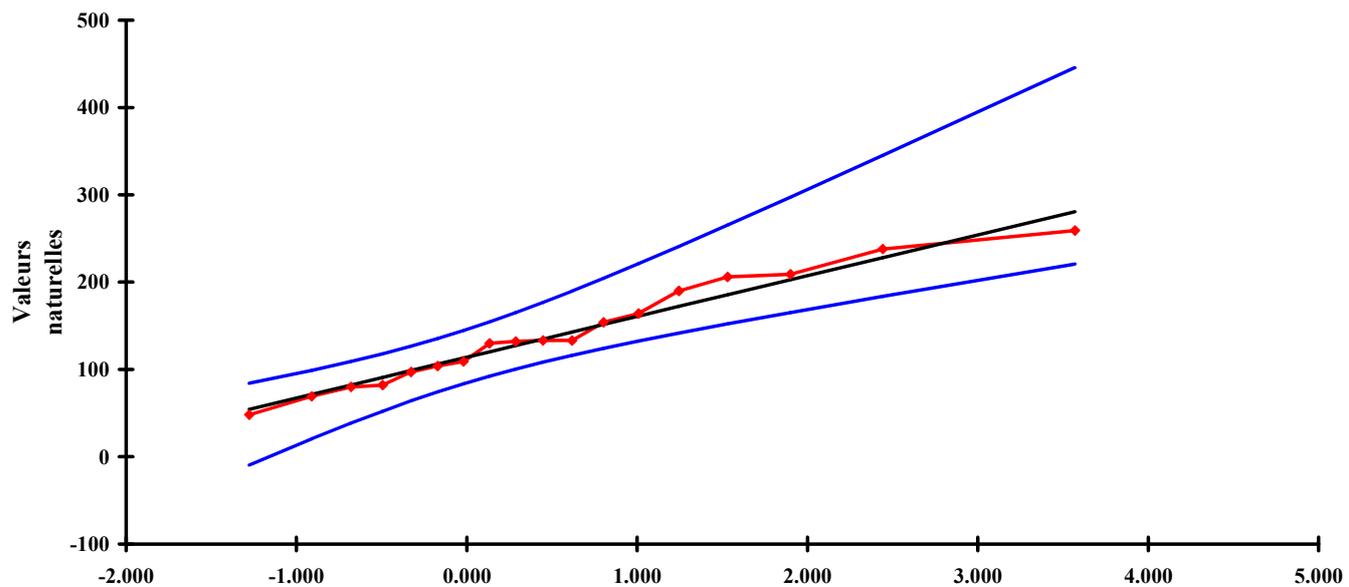
Ajustement à la loi de Gumbel (TKOUT, IC=95%):  $X=96.16\mu+169.51$



#### 4. Station TIFELFEL

- Nombre d'observations : 18
- Minimum : 48.00mm.
- Maximum : 259.0mm.
- Moyenne : 140.9mm.
- Ecart-type : 59.89mm.
- Médiane : 132.5mm.
- Coefficient de variation (Cv) : 0.4249.

Ajustement à la loi de Gumbel (TIFELFEL, IC=95%):  $X=46.71\mu+113.99$



#### 11.1.4. Les précipitations moyennes mensuelles

On dispose des données concernant les trois stations (Tkout, Tifelfel et F.Gherza), avec une période allant de 1960 à 2005.

**Tableau 1.11.** Précipitations moyennes mensuelles

<b>Mois</b>	<b>TKOUT (mm)</b>	<b>TIFELFEL (mm)</b>	<b>FOUM EL GHERZA (mm)</b>
<b>Sep</b>	27,50	16,50	12,04
<b>Oct</b>	25	16,80	9,33
<b>Nov</b>	23,70	14,50	16,51
<b>Dec</b>	17,10	9,40	8,04
<b>Jan</b>	16,60	8,55	16,26
<b>Fev</b>	16,40	14,80	9,24
<b>Mar</b>	27,60	18,25	14,95
<b>Avr</b>	23,60	16,30	11,83
<b>Mai</b>	23,20	11,90	8,36
<b>Jui</b>	15,20	6,40	5,83
<b>Juil</b>	5,80	1,80	0,52
<b>Aou</b>	16,90	9,90	3,93

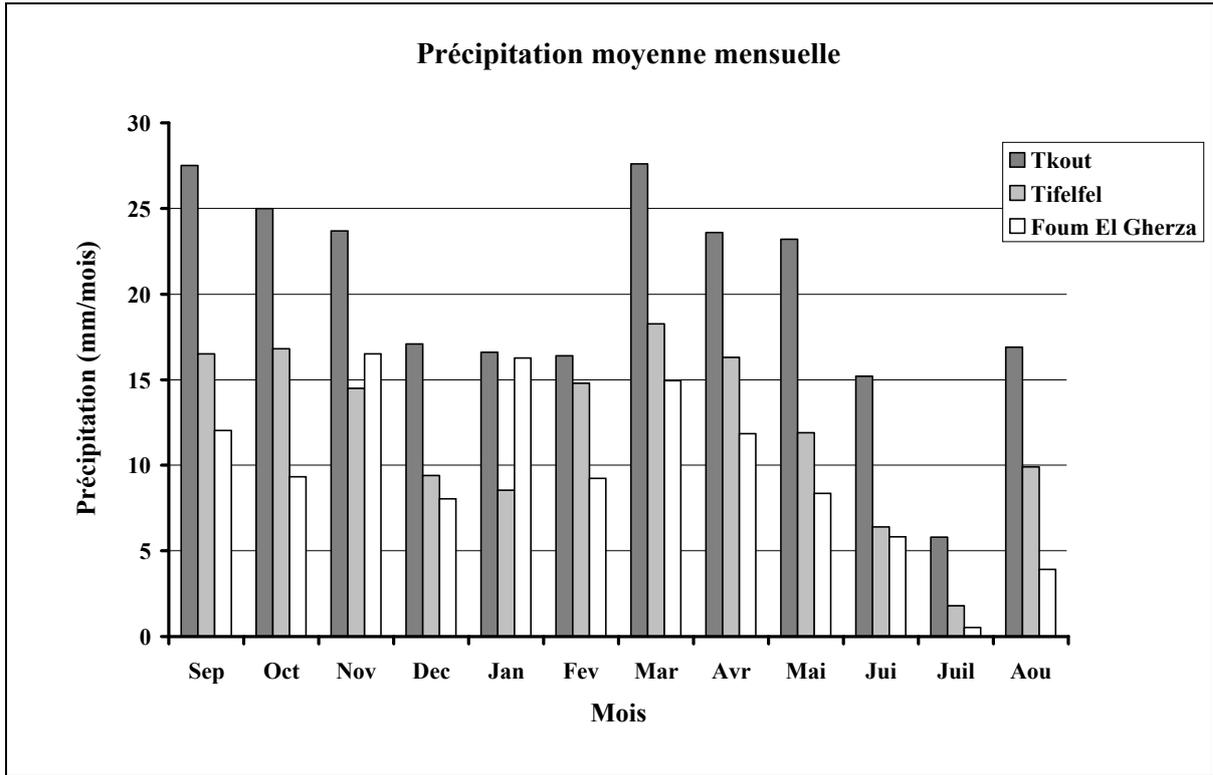


Fig 1.7. Variation de la précipitation moyenne mensuelle.

## II.2. Etude des crues

### II.2.1. Etude des pluies journalières maximales

On appelle précipitation toutes les eaux météoriques qui tombent à la surface de la terre sous forme liquide ou solide (neige, pluie, grêle),  $P_{jmax}$  est déterminée par la formule :

$$P_{jmax} = \frac{\bar{P} e^{u \sqrt{\ln(C_v^2 + 1)}}}{\sqrt{C_v^2 + 1}} \quad (1.12)$$

- $C_v$  : coefficient de variation est égal à « 0.21 » déterminé à partir de la carte des isolignes de coefficient de variation ;

- $P_{jmax}$  : pluie journalière maximale de fréquence donnée ;

- $U$  : variable de GAUSS ;

- $\bar{P}$  : Pluie journalière maximale moyenne ( $\bar{P}=28\text{mm}$ ).

On aura :

$$\bar{P}=0.0525*P+18.6 \quad (1.13)$$

$$\bar{P}=0.0525*28+18.6=20.07\text{mm}$$

$$\bar{P}=20.07 \text{ mm.}$$

Donc la répartition théorique sera comme suit :

**Tableau 1.12.**Représentation fréquentielle des pluies journalières maximales

Fréquence (%)	0.1	0.5	1	2	5	10
Variable de GAUSS	3.099	2.579	2.327	2.057	1.363	1.279
Période de retour (an)	1000	200	100	50	20	10
$P_{j\max}$ (mm)	37.391	33.562	31.851	30.113	26.070	25.619

### II.2.2.Pluie de courte durée

Le passage des pluies journalières maximales aux pluies de courte durée de même fréquence se fait, en utilisant la formule suivante :

$$P_{tc} = P_{j\max} \left[ \frac{T_c}{24} \right]^b \quad (1.14)$$

- $P_{j\max}$  : pluie maximale journalière de même fréquence (mm) ;

- $P_{tc}$  : pluie de courte durée de fréquence donnée (mm) ;

- $T_c$ : temps de concentration ;  $T_c=16$ heures ;

- $b$  : exposant climatique ( $b=0.27$ ) « à partir de la carte des isolignes d'exposant climatique ».

Les pluies de courtes durées génératrices de crues sont représentées dans le tableau suivant :

**Tableau 1.13.**Pluies de courte durée pour différentes fréquences

Fréquences (%)	0.1	0.5	1	2	5	10
Période de retour (an)	1000	200	100	50	20	10
P <sub>tc</sub> (mm)	33.514	30.082	28.548	26.990	23.367	22.962

## II.2.3.Calcul du débit maximal

### II.2.3.1.Détermination des débits moyens journaliers maximums fréquentiels

Pour calculer les débits moyens journaliers maximums fréquentielle nous avons utilisé plusieurs formules: (GIONDOTTI ; TURAZZA ; SOKOLOVSKY).

#### 1. Formule de GIONDOTTI

$$Q_{j_{\max}} = \frac{C.S.P_{tc} \sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}}{4\sqrt{S + 1.5L}} \quad (1.15)$$

-S: Surface du bassin versant; S = 1300Km<sup>2</sup> ;

-H<sub>min</sub>: Altitude minimale =295m;

-H<sub>moy</sub> : Altitude moyenne=1170m ;

-C : Coefficient topographique=166 ;

-L : Longueur du talweg principale =106Km ;

-P<sub>tc</sub>: Pluie de courte durée.

**2. Formule de TURAZZA**

$$Q_{j \max} = \frac{Cr \cdot P_{tc} \cdot S}{3.6 T_C} \quad (1.16)$$

- Cr : Coefficient de ruissellement=0.90 ;
- P<sub>tc</sub>: Pluie de courte durée ;
- S: Surface du bassin Versant= 1300Km<sup>2</sup> ;
- T<sub>c</sub>: Temps de concentration =16 h.

**3. Formule de SOKOLOVSKY**

$$Q_{j \max} = \frac{0.28 P_{tc} Cr \cdot S \cdot F}{T_m} \quad (1.17)$$

- P<sub>tc</sub>: Pluie de courte durée ;
- S: Surface du bassin versant; S = 1300Km<sup>2</sup> ;
- Cr: Coefficient de ruissellement)=0.90 ;
- T<sub>m</sub>=T<sub>c</sub>: Temps de concentration =16 h.

**Tableau 1.14.** Calcul de Q<sub>jmax</sub> par les différentes formules empiriques.

Période de retour (ans)	Q <sub>jmax</sub> TURAZZA (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>jma</sub> SOKOLOVSKY (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>jmax</sub> GIONDOTTI (m <sup>3</sup> /s)	Fréquence
1000	680.753	685.513	705.538	0.999
200	611.041	615.313	633.288	0.995
100	579.881	583.936	600.994	0.99
50	548.234	552.068	568.195	0.98
20	474.642	477.961	491.923	0.95
10	466.416	469.677	483.397	0.9

### II.2.3.2. Hydrogramme de crue

L'hydrogramme de crue représente la variation des débits d'un cours d'eau en fonction du temps, il permet de déterminer les caractéristiques de la crue, forme, volume, temps de montée et temps de descente, la forme de l'hydrogramme de crue est déterminée selon la méthode de SOKOLOVSKY, qui assimile l'hydrogramme à deux équations paraboliques, l'une traduisant la montée de la crue qui s'écrit :

$$Q_M = Q_{\max} \left( \frac{T}{T_m} \right)^m \quad (1.18)$$

Et l'autre traduisant la descente qui s'écrit :

$$Q_D = Q_{\max} \left( \frac{T_b - T}{T_d} \right)^n \quad (1.19)$$

- $T_m$  : temps de montée de la crue ( $T_m = T_c = 16h$ ) ;

- $T_d$  : temps de décrue ( $T_d = \gamma \cdot T_c$ ) ;

- $Q(t)$  : débit maximum d'une fréquence X (%) ;

- $m=2$  et  $n=3$  : puissance des équations ;

- $\gamma$  : est évalué en fonction de la taille du cours d'eau de la perméabilité et du taux de boisement du bassin versant.

Description du cours d'eau	$\gamma$
Petit cours d'eau et vallons dans les bassins versants faiblement perméables	2 à 2.5
Petit cours d'eau et vallons dans les bassins versants boisés ou perméables Moyen cours d'eau avec terrasses de lit majeures normales.	3 à 4
Grand et moyen cours d'eau avec des terrasses de débordements étendues	4 à 7

Pour notre bassin versant la valeur prise est  $\gamma = 3$ .

$$T_d = \gamma \cdot T_m$$

$$T_d = 3 \cdot 16$$

$$\mathbf{T_d = 48h.}$$

$$T_b = T_m + T_d$$

$$T_b = 16 + 48$$

$$\mathbf{T_b = 64h.}$$

**Tableau 1.15.** Hydrogramme de crue pour  $Q_{jmax}$  de différentes fréquences

Temps(h)	$Q_{jmax}$ (10%)= 705.538m <sup>3</sup> /s	$Q_{jmax}$ (1%)=600.994m <sup>3</sup> /s	$Q_{jmax}$ (0.1%)=483.397m <sup>3</sup> /s
0	0.000	0.000	0.000
2	11.024	9.391	7.553
4	44.096	37.562	30.212
6	99.216	84.515	67.978
8	176.385	150.249	120.849
10	275.601	234.763	188.827
12	396.866	338.059	271.911
14	540.178	460.136	370.101
16	705.539	600.994	483.397
18	620.970	528.956	425.455
20	543.445	462.918	372.339
22	472.656	402.619	323.838
24	408.298	347.797	279.744
26	350.065	298.193	239.845
28	297.649	253.544	203.933
30	250.746	213.591	171.798
32	209.049	178.072	143.229
34	172.251	146.727	118.017
36	140.046	119.295	95.952
38	112.129	95.514	76.825
40	88.192	75.124	60.425
42	67.931	57.865	46.542
44	51.037	43.475	34.968
46	37.206	31.693	25.492
48	26.131	22.259	17.904
50	17.506	14.912	11.994
52	11.024	9.391	7.553
54	6.380	5.434	4.371
56	3.266	2.782	2.238
58	1.378	1.174	0.944
60	0.408	0.348	0.280
62	0.051	0.043	0.035
64	0.000	0.000	0.000

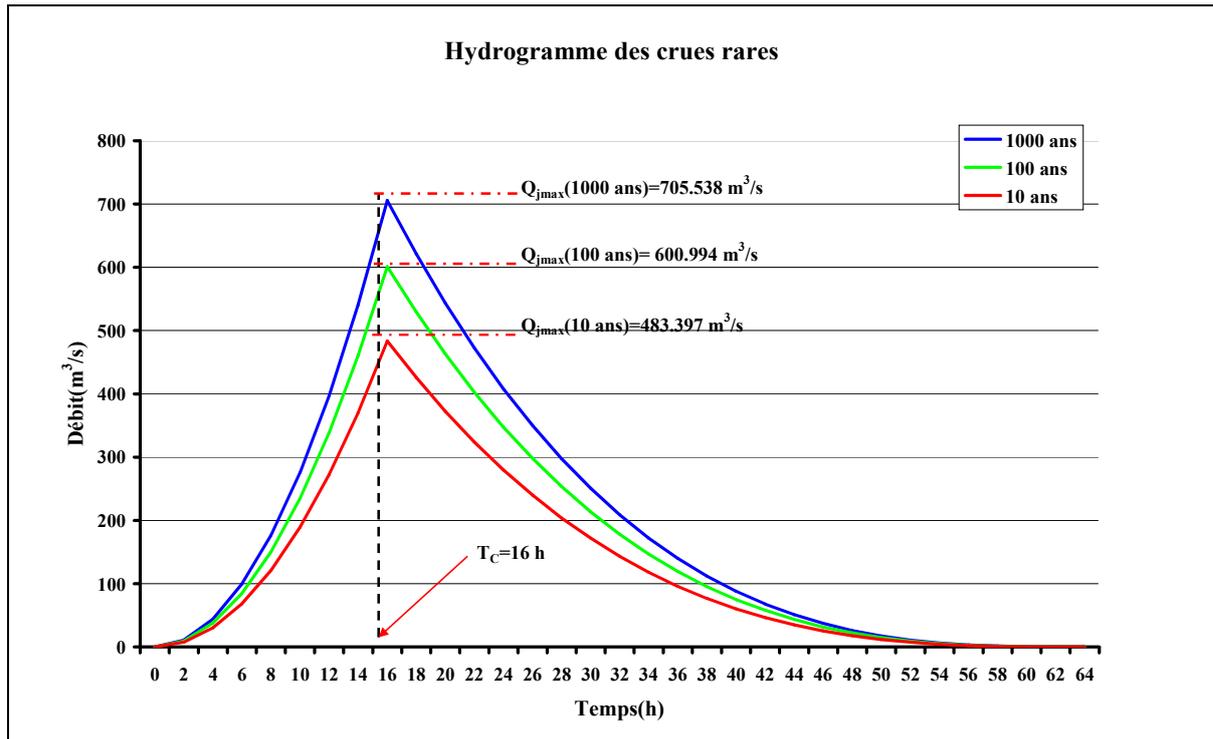


Fig.1.8. Hydrogramme de crues exceptionnelles

### II.3. Les températures moyennes mensuelles

Les données disponibles, montrent les caractéristiques du climat semi-aride et avec des valeurs minimales pendant les mois de Décembre, Janvier, Février, tandis que les valeurs maximales coïncident avec les mois de Juin, Juillet et Août où les précipitations sont rares, tandis que le climat aride (Mchouneche) montre des fluctuations assez nettes avec des valeurs maximales aux mois de Mai, juin, juillet, Août et Septembre et des minimales aux mois de Décembre, Janvier et Février (pendant l'hiver).

Tableau 1.16. Températures moyennes mensuelles interannuelles

Station	Code	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Médina	061503	20.25	15	9.9	5.75	5.35	6.55	8.8	13.15	15.8	22.3	24.6	23.65
Mchouneche	061506	28.5	22.3	16.2	11.9	11.6	13.7	15.7	19.8	24.6	29.2	33.5	32.8

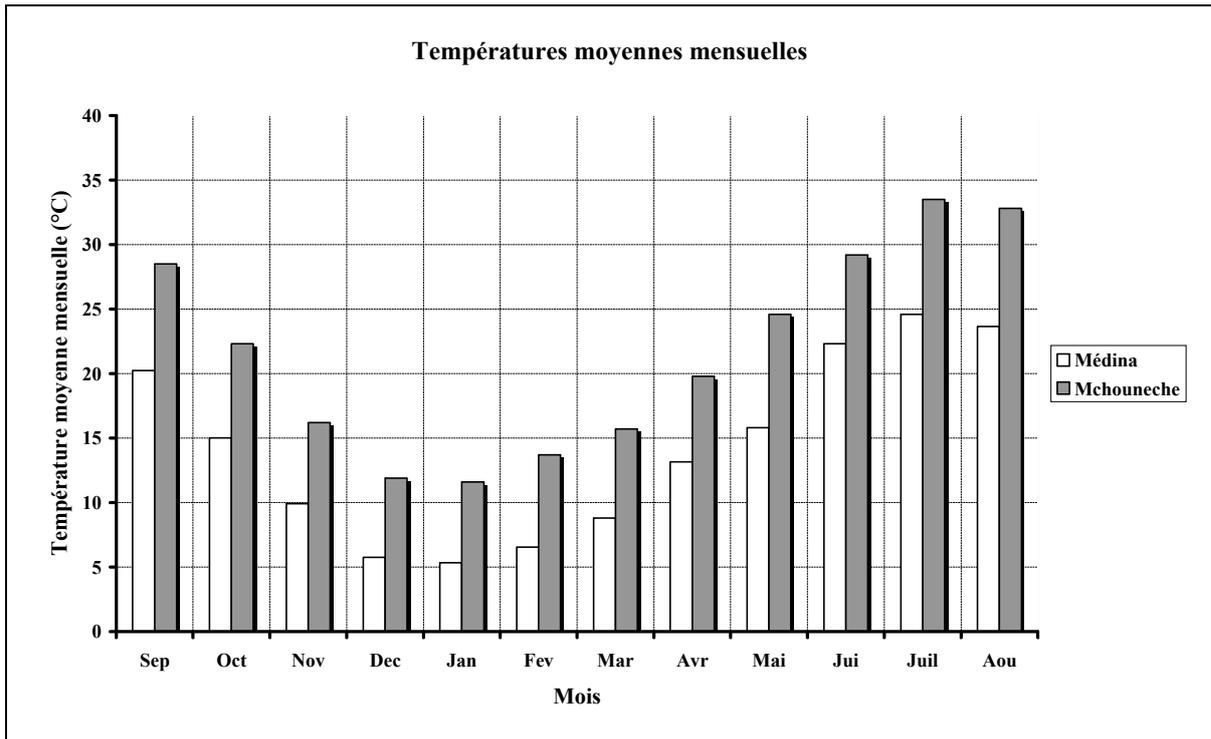


Fig.1.9.Variation mensuelle de la température.

#### II.4.L'humidité relative de l'air

L'humidité relative est l'un des paramètres principaux du cycle hydrologique. Sources de toutes les précipitations, elle conditionne l'évaporation. Vu le manque total de données concernant ce paramètre, nous avons eu recours à deux stations à climat différent (Batna-Biskra), pour mieux montrer l'écart d'humidité relative entre une zone semi aride montagneuse et une autre saharienne aride.

Ce qui traduit un peu la réalité de notre aire d'étude. En effet le bassin versant de l'oued El Abiod s'étale sur des territoires montagneux à climat tantôt semi- aride ou sub-humide à des territoires franchement aride vers l'exutoire.

**Tableau 1.17.** Humidité relative de l'air

Station	Heure	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
<b>Batna(Hr)</b>	7h	57	72	79	88	85	86	72	59	54	50	45	49
	13h	32	44	52	56	56	45	34	34	29	22	22	23
	18h	45	59	68	71	69	56	46	44	41	41	32	31
<b>Biskra(Hr)</b>	7h	50	64	69	62	62	58	47	47	42	36	38	57
	13h	34	35	49	52	44	40	32	32	27	20	25	39
	18h	39	45	60	58	54	48	37	37	32	26	30	47
<b>Bassin versant (Hr)</b>	moy	42	53	60	65	64	57	50	41	40	35	29	32

## II.5.Les Vents

Le bassin versant de l'Oued El Abiod ne dispose pas de stations climatiques permettant la mesure du vent. C'est pour cette raison que nous avons utilisé la station de Batna et la station de Biskra.

La direction Nord-est susceptibles d'être porteuse de pluies par rapport aux autres directions, elle est fréquente durant les mois de Décembre-Janvier -Février et Mars. Ceci explique que la partie Nord reçoit d'avantage les précipitations donc l'effet de l'exposition va contribuer au processus érosif.

**Tableau 1.18.** Mesure des vitesses du vent

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moyenne Annuelle
<b>Vitesse (m/s)</b>	3.9	4.4	4.1	4.5	4.5	5.2	4.6	4.4	4.2	4	4	4.2	4.3
<b>Fréquence (jour)</b>	8.1	11.1	9.7	11.6	13.7	13.7	12.2	11	9.6	8.1	9	10.3	10.7

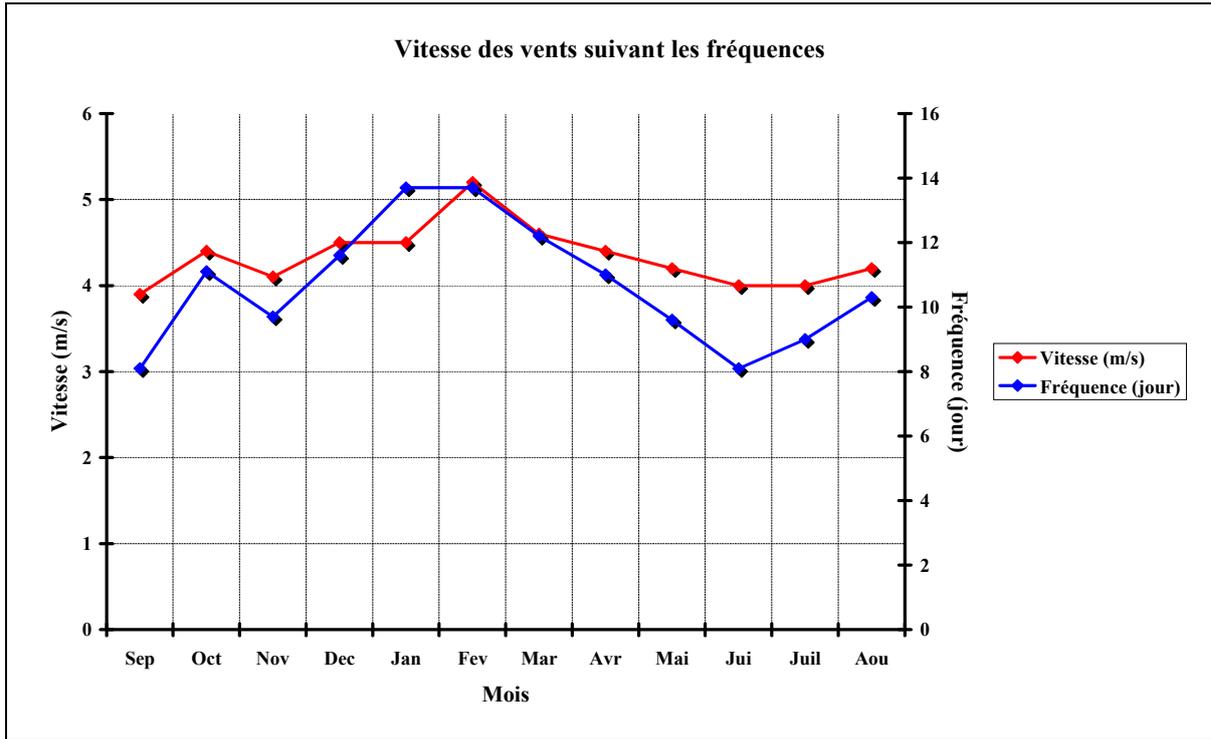


Fig.1.10.Variation mensuelle de la vitesse du vent.

## II.6.L'évapotranspiration

Le bilan hydrique est fonction d'un certain nombre de facteur, dont les précipitations, l'infiltration et surtout l'évapotranspiration. Cette dernière conditionne l'abondance ou le déficit en eau pour la végétation, et par conséquent, sa connaissance est fondamentale pour toute action d'aménagement et de lutte contre les crues et les transports solides.

### -Formule dite ANRH- Penman (1997)

Cette formule permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle de Penman à partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante, de la connaissance du mois et de la position géographique :

$$ETP_{ANRH} = K_r K_m (H - 187) (0.032t + 0.077) \quad (1.20)$$

-ETP<sub>ANRH</sub> est exprimé en mm/mois ;

-K<sub>r</sub> : un coefficient régional (Annexe I) ;

-K<sub>m</sub> : un coefficient mensuel dont les valeurs sont données au (tableau 1.19) ;

-H : la durée théorique mensuelle d'insolation (en heure par mois) et elle s'exprime en fonction des Y (latitude Lambert) ;

-t : la température moyenne mensuelle pour le mois considéré et exprimée en °C.

C'est donc à partir de cette formule que nous nous proposons de généraliser la connaissance des ETP à partir de l'information thermométrique.

**Tableau 1.19.** Evolution du coefficient correctif mensuel  $K_m$

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$K_m$	0.96	1.22	1.11	1.17	1.02	1.00	0.97	0.97	0.98	0.90	0.90	0.86

En fait on se trouve avec deux paramètres saisonniers H et  $K_m$ , si ce dernier est stable spatialement, la durée H varie avec la latitude. Il est possible d'obtenir H d'une façon beaucoup plus simple, avec un écart insignifiant H est lié linéairement aux Y Lambert.

$$H_i = a_i Y + b_i \quad (1.21)$$

-H étant la durée théorique d'insolation du mois i (en h/mois) ;

-Y étant la coordonnée Lambert (en Km), latitude.

Les paramètres mensuels  $a_i$  et  $b_i$  sont donnés dans le (tableau 1.20).

**Tableau 1.20.** Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$a_i$	-0.0218	-0.0110	-0.0012	0.0098	0.0201	0.0248	0.0230	0.0144	0.0031	-0.0081	-0.0185	-0.0246
$b_i$	315	307	371	389	429	429	436	414	370	351	311	308

Les résultats de calcul sont consignés dans les tableaux suivants :

**Tableau 1.21.**ETP mensuelle selon ANRH-Penman à la station Mchouneche ( $K_r=1.26$ ,  
 $y=186,8$ )

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
$a_i$	0.0031	- 0.0081	- 0.0185	- 0.0246	- 0.0218	- 0.0110	- 0.0012	0.0098	0.0201	0.0248	0.0230	0.0144
$b_i$	370	351	311	308	315	307	371	389	429	429	436	414
<b>H (h/mois)</b>	370,58	349,49	307,54	303,40	310,93	304,95	370,78	390,83	432,75	433,63	440,30	416,69
$K_m$	0.98	0.90	0.90	0.86	0.96	1.22	1.11	1.17	1.02	1.00	0.97	0.97
<b>Km (H-187)</b>	179,91	146,24	108,49	100,11	118,97	143,89	203,99	238,48	250,67	246,63	245,70	222,80
$t^{\circ}\text{C}$	28,50	22,30	16,20	11,90	11,60	13,70	15,70	19,80	24,60	29,20	33,50	32,80
<b>ETP (mm/mois)</b>	224,19	145,68	81,39	57,75	67,19	93,44	148,92	213,53	272,95	314,30	355,71	316,27

**Tableau 1.22.**ETP mensuelle selon ANRH-Penman à la station Médina ( $K_r=1.26$ ,  
 $y=231.10$ )

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
$a_i$	0.0031	- 0.0081	- 0.0185	- 0.0246	- 0.0218	- 0.0110	- 0.0012	0.0098	0.0201	0.0248	0.0230	0.0144
$b_i$	370	351	311	308	315	307	371	389	429	429	436	414
<b>H (h/mois)</b>	370,72	349,13	306,72	302,31	309,96	304,46	370,72	391,26	433,65	434,73	441,32	417,33
$K_m$	0.98	0.90	0.90	0.86	0.96	1.22	1.11	1.17	1.02	1.00	0.97	0.97
<b>Km (H-187)</b>	180,04	145,92	107,75	99,17	118,04	143,30	203,93	238,99	251,58	247,73	246,69	223,42
$t^{\circ}\text{C}$	20,25	15	9,9	5,75	5,35	6,55	8,8	13,15	15,8	22,3	24,6	23,65
<b>ETP (mm/mois)</b>	164,47	102,41	53,47	32,61	36,92	51,75	92,14	149,90	184,68	246,78	268,61	234,72

### **Conclusion**

Le bassin versant oued El Abiod est caractérisé par un climat semi-aride à aride vers l'exutoire dont les caractéristiques se manifestent par un hiver froid à frais et un été très chaud et sec. L'irrégularité et la diminution des précipitations s'affirment en allant de plus en plus vers le Sud ce qui influe surtout sur l'évapotranspiration.

## *CHAPITRE II*

# *LE CADRE GEOLOGIQUE ET LITHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT*

## **Introduction**

L'étude géologique du terrain a le plus souvent pour objet de classer les matériaux selon leur résistance et plus ou moins leur perméabilité, de plus elle apporte beaucoup d'indications sur les caractéristiques des matériaux rocheux, indispensables à l'évaluation de l'érosion, le transport solide, et l'envasement du barrage.

La géologie des terrains influe non seulement sur l'écoulement d'eau souterraine mais également sur le ruissellement des surfaces où elle a une influence sur le comportement du réseau hydrographique.

## **I. Caractéristiques physiques du bassin versant**

### **I.1. Structure géologique du bassin versant**

Les gorges de Foum El Gherza font partie de la chaîne qui borde au sud l'atlas saharien. Cette zone tectonique a été affectée par les deux phases de plissement qui se sont superposées dans l'atlas. Deux systèmes de failles ou de fissures sont en relation avec les deux phases de plissement. A cette tectonique se sont ajoutées des actions très récentes dues en majorité à la pesanteur.

De l'ensemble de ces actions combinées à l'érosion intense, résulte la structure actuelle de la gorge. Celle-ci se présente sous la forme d'un synclinal dirigé S.W-N.E avec ennoyage très marqué vers le S.W. Le bord S.E (rive gauche) est bordé par un pli faille.

A l'amont des gorges, dans la cuvette, affleurent les marnes campaniennes absolument imperméables. Les gorges elles-mêmes sont formées par des calcaires maestrichiens rigides, fissurés, donc perméables.

Des galeries de profondeur de 10 m creusées sur les deux rives de la gorge montrent que les calcaires sont fissurés et que presque toutes les fissures sont obturées par des argiles sableuses rouges qui ont autrefois recouvert le massif. Le remplissage des fissures ne va pas très loin ni latéralement dans les berges de la gorge, ni en profondeur sous le lit de l'oued.

**Tableau 1.23.** Les caractéristiques des matériaux du bassin versant

<b>Formations</b>	<b>Résistance à l'érosion</b>	<b>Perméabilité</b>
<b>Calcaire fissuré</b>	Très résistant	Perméable
<b>Dolomie</b>	Très résistant	Imperméable
<b>Grés</b>	Très résistant	Semi-perméable
<b>Calcaire-gréseux</b>	Résistant	Semi-perméable
<b>Calcaire-marneux</b>	Résistant	Semi-perméable
<b>Quaternaire</b>	Résistance moyenne	Perméable
<b>Marne</b>	Non résistant	Perméabilité faible
<b>Galets</b>	Résistance moyenne	Perméable
<b>Graviers</b>	Résistance moyenne	Perméable
<b>éboulis</b>	Résistance moyenne	Perméable

La répartition lithologique du bassin versant montre des zones à érodibilité moyenne à faible au nord et une érodibilité forte au sud, l'absence du couvert végétal favorise un ruissellement violent et donc l'érosion sera plus ou moins importante.

## **I.2. Stratigraphie**

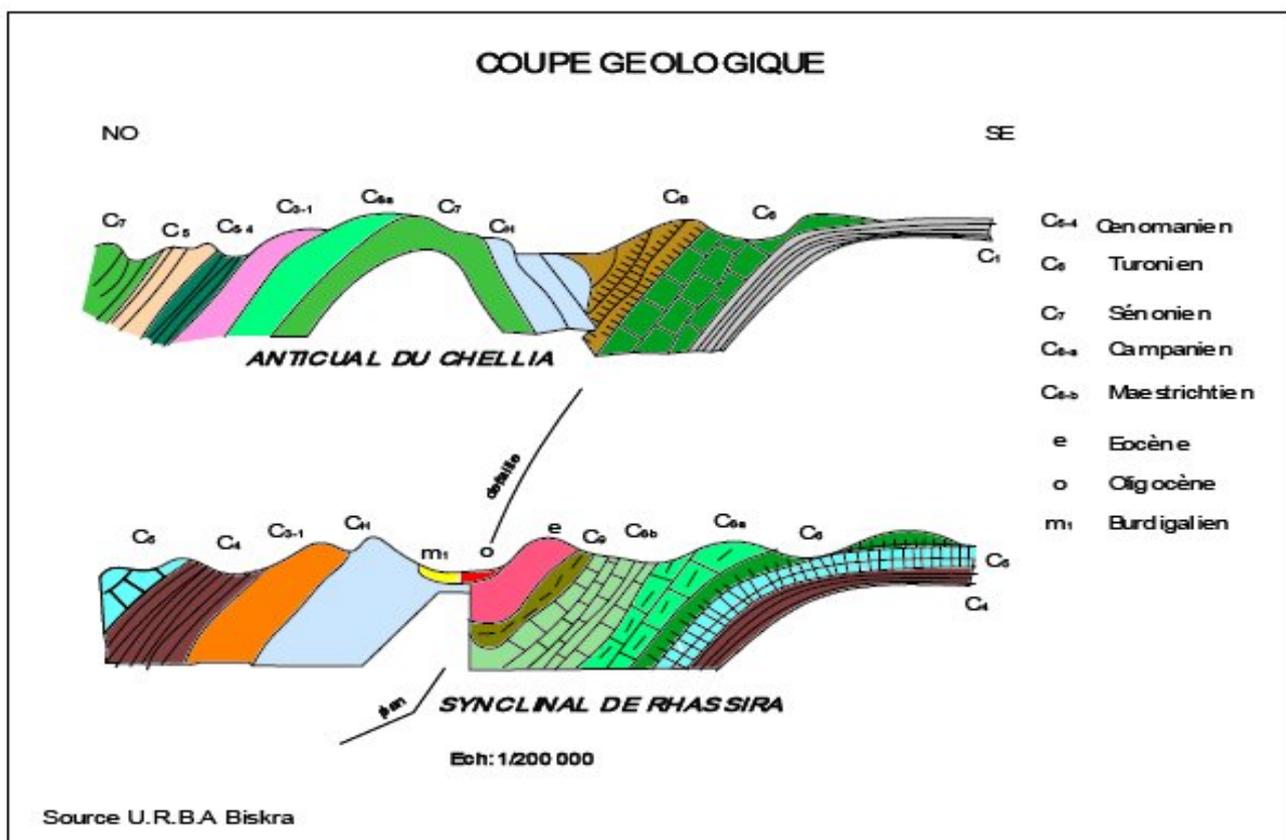
La série stratigraphique est la suivante :

### **I.2.1. Crétacé**

- Campanien inférieur : alternance de calcaires et de marnes, présent au centre de la retenue.
- Campanien supérieur : schistes et marnes schisteuses constituant un niveau imperméable.
- Maastrichtien : calcaires cristallins constituant la fondation du barrage.

### **I.2.2. Miocène**

Ce sont des poudingues et des alternances de marnes, grés, marnes gypseuses, rencontrés en amont du barrage.



Source : Lafitte. R.1939

**Fig.1.11.** Coupe géologique du bassin versant

### I.3.La cuvette

L'étanchéité de la cuvette est assurée par la présence des marnes du campanien qui affleurent en amont du barrage. Il reste toutefois une partie importante de calcaire baignés par la retenue et qu'il a été nécessaire d'étancher par injections. Le voile d'étanchéité réalisé se raccorde aux marnes campaniennes.

### I.4.Etanchéité de la cuvette

Le campanien inférieur, affleure au centre de la cuvette. Il faut aller jusqu'aux environs de BISKRA, à une distance de 15 Km pour trouver un affleurement de ces calcaires au-dessous de la cote des plus hautes eaux. Sur distance aussi grande les pertes de charge seront assez importantes pour ramener les fuites à des chiffres minimes. Le campanien supérieur, niveau complètement imperméable (aucune fuite n'est à craindre).

Maestrichtien, affleure au sud et au nord de la retenue. Des sondages de reconnaissances ont permis de vérifier et de préciser la série stratigraphique et de déterminer l'allure du substratum imperméable. Ces sondages ont uniformément rencontré les calcaires, puis les marno-calcaire, et ont atteint la marne bleue.

### **I.5.Tectonique**

Sur le plan tectonique la région a connu plusieurs phases qui ont fortement influencés sur le dispositif structural de la région.

La phase post-lutétienne a donné sa charpente à la région avec les structures atlasiques. Il s'agit de nombreux anticlinaux orientés NE-SO qui constituent l'essentiel des reliefs de la région.

Une phase cassante pliocène s'est soldée, ensuite, par des formes d'effondrement qui ont donné lieu à de nombreux fossés tectoniques, notamment la fosse sud-atlasique, qui a bouleversé l'ensemble des réseaux hydrographiques. Elle a même complètement inversé la direction des écoulements dans le massif.

Une phase tardive quaternaire a accentué les mouvements verticaux des grands comportements du massif et un abaissement avec une subsidence très marquée de la bordure saharienne.

Ce changement dans le niveau de bases des cours d'eau est responsable de l'encaissement des principaux Oueds de la région.

### **I.6.Fondation du barrage**

La voûte et la culée rive gauche est entièrement fondées sur les calcaires maestrichtiens. Ceux-ci se présentent sous formes de bancs épais, parfois intercalés de bancs marneux. Les couches ont une direction parallèle à la vallée et un pendage général de 30° vers l'aval.

## II. Couvert végétal

La végétation joue un rôle essentiel dans la protection du sol. Elle exerce une protection mécanique directe sur l'écoulement fluviale, en diminuant la force vive des eaux et en favorisant leur infiltration. Cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense. Elle fournit une quantité appréciable d'humus qui joue le rôle de ciment et maintient la structure en grumeaux. Enfin elle donne de l'ombre, ce qui conserve l'humidité et l'activité biologique nécessaire à l'équilibre du sol. L'infiltration en profondeur est facilitée par les fissurations préparées, au sein du sol, par le réseau des racines.

Après saturation des sols les eaux qui ruissellent rencontrent des obstacles qui les obligent à ralentir leur vitesse, l'ensemble se traduit par un large étalement des crues. La régularisation des régimes des sources et des rivières, le maintien des matériaux sur les pentes.

Les formations végétales protègent donc le sol, mais n'empêchent pas totalement l'érosion dite naturelle. Elle est toujours très faible. Le paysage végétal du bassin de l'Oued El Abiod a été largement dégradé et défraîchi en montagne. Le taux de boisement est estimé à 50%. L'effet dévastateur du aux conséquences de la guerre d'indépendance est à signaler. Les belles forêts sont localisées sur le versant Nord entre 1600m et 2000 m composé de cèdre sur 1400ha environ. Le reste de la surface boisée se partage entre chêne vert pin d'Alep, plus particulièrement entre 1400m et 1000m, quant aux basses vallées elles opposent déjà leurs rubans de palmeraies aménagés en terrasses à la nudité du Désert, le jardinage des oasis est associé à d'autres pratiques culturelles notamment, la céréaliculture dont l'irrigation est assurée par des dérivations de l'Oued et d'épandage de crues.

On rencontre ce type d'exploitation dans les environs de Ghassira, Rhoufi et Mchouneche. En général d'après la carte de répartition de la végétation (on peut estimer la surface couverte à 54767ha de la superficie du bassin, soit 42%. Cette concentration est comprise entre Djebel Chelia et les gorges de Tighanimine, d'une part, et sur les montagnes d'Ahmer khadou, d'autre part. La zone semi-aride et aride, d'une superficie de 74969ha, soit 58%, résulte plus d'une intense dégradation de la végétation que des conditions lithologiques et climatiques. La classification des types de végétation par ordre de densité ou d'efficacité décroissante, a permis de distinguer les grandes catégories suivantes :

**1. Superficies bien protégées en permanence**

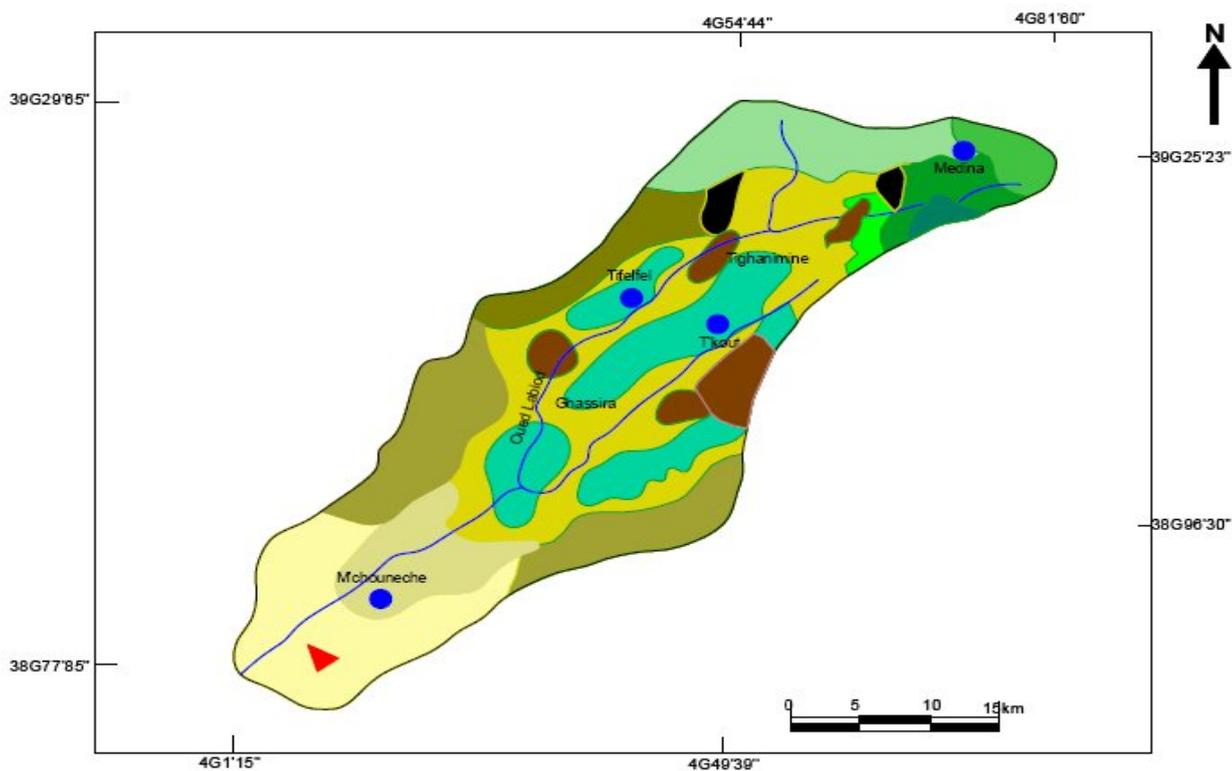
Donc défavorables au ruissellement et à l'érosion hydrique, forêts denses entre Chelia et Tighanimine (cèdre, chêne vert et pin d'Alep).

**2. Superficies moyennement protégées par le couvert végétal**

Où les averses tombent sur les parties du sol non protégées peuvent engendrer un ruissellement plus ou moins violent et exerçant une érosion plus ou moins importante de Tighanimine à Ghassira.

**3. Superficies mal protégées ou totalement nues**

Où le ruissellement et l'érosion hydrique sont largement favorisés de Ghassira jusqu'à El Habel.



Source : Haoues, C.2008

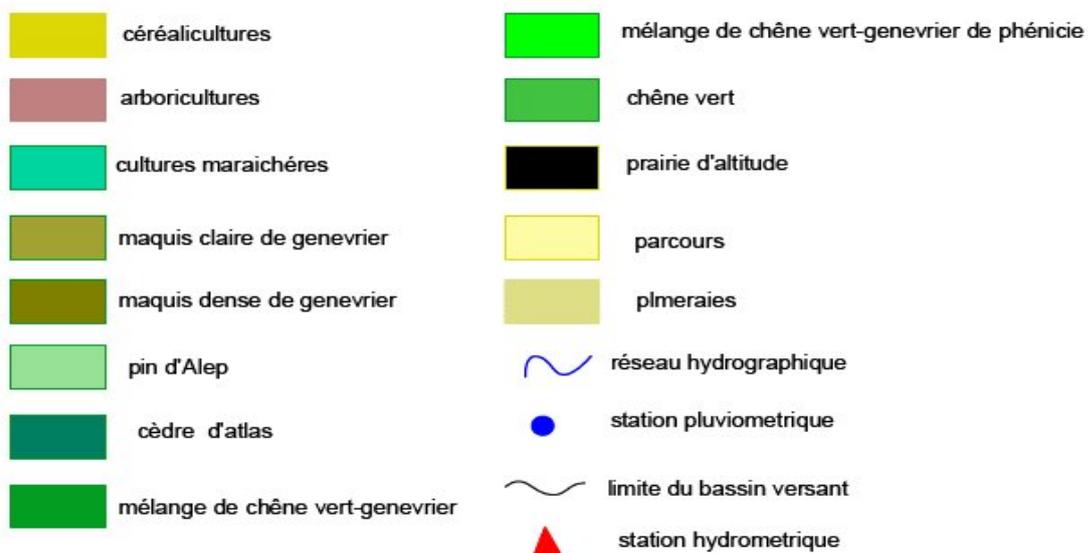


Fig.1.12.Carte d'occupation du sol dans le bassin versant

L'absence du couvert végétal dans certaines zones a favorisé un ruissellement violent et donc l'érosion sera plus ou moins importante. Pour une meilleure évaluation des risques qui menacent notre bassin versant, on a opté pour la division de ce dernier suivant les caractéristiques dominantes et leur influence sur le comportement du bassin versant.

**Tableau 1.24.** Caractéristiques de chaque bassin

<b>Bassin</b>	<b>Bassin supérieur</b>	<b>Bassin moyen</b>	<b>Bassin inférieur</b>
<b>Altitude (m)</b>	2328-1473	1473-880	880-136
<b>Superficies (ha)</b>	47200	41600	41200
<b>Pente %</b>	Très forte	forte	Moyenne à forte
<b>Végétation (ha)</b>	30967	15800	8000
<b>Limite</b>	Dj.chelia aux gorges de Tighanimine	Gorges de Tighanimine à Ghassira	Ghassira au Gorges de Fom El Gherza
<b>lithologie</b>	Grés+marne rouge +calcaire dolomitique	Marne+gypse +calcaire+grés conglomérats+ brèche	Marne blanc et rouge + calcaire+gypse +sable rouge +sable grossier +grés sableux

### **Conclusion**

Ces composantes naturelles représentent des caractéristiques d'une zone semi-aride favorable à une érosion accentuée : pentes raides, couvert végétal dégradé et des pluies plus au moins torrentielles et irrégulières. Ce qui engendre des pertes de sols de l'amont vers l'aval où on est face à un grand problème qui est l'envasement du barrage.

## *CHAPITRE III*

# *FONCTIONNEMENT ACTUEL DU BARRAGE FOUM EL GHERZA*

## **I. Présentation du barrage Foum El Gherza**

Le barrage de Foum El Gherza se situe à l'est de la ville de Biskra a une capacité de 32 Hm<sup>3</sup> à la cote de retenue normale qui est égale à 198.90 NGA. Il a été réalisé durant la période 1948-1950 à l'exutoire de l'Oued El Abiod qui draine un bassin versant d'environ 1300 Km<sup>2</sup>. La cote de crête est égale à 203.85 NGA. La cote des plus hautes eaux est de 203.25 NGA.

Cet ouvrage d'art a permis à la région de Sidi Okba de garder sa vocation économique basée sur l'agriculture durant un demi-siècle, du fait qu'il a aidé à contrer la sécheresse qui sévit dans la région depuis une vingtaine d'années. Il a un très grand intérêt économique dans la région puisqu'il permet d'irriguer plus de 300 000 palmiers dattiers des palmeraies de Sidi Okba, Garta, Seriana et Thouda.

Il se compose de deux parties qui sont une voûte et une culée.

### **-La voûte**

La voûte a les dimensions suivantes :

- Hauteur au dessus du terrain naturel : 65m.
- Hauteur maximale sur fond de fouilles : 73m.
- Longueur développée de la voûte en crête : 126m.
- Longueur développée totale : 196m.
- Épaisseur à la base dans l'axe : 11.48m.
- Épaisseur en crête de la voûte : 3m.

### **-La culée rive gauche**

La culée a les dimensions suivantes :

- Longueur totale de la culée : 60,30m.
- Hauteur maximale au-dessus des fondations : 21,60m.

## II. Caractéristiques pluviométriques et hydrométriques du barrage

### Foum El Gherza

#### II.1. Relation Hauteur -Volume-Surface (HSV)

Le levé bathymétrique qui a été effectué sur le barrage en 1975, a permis de construire les courbes hauteurs- surfaces- capacités (ANB, 2006).

**Tableau 1.25.** Points de référence pour la constitution des relations hauteur/surface et hauteur/volume

H(m)	S <sub>i</sub> (Km <sup>2</sup> )	V <sub>i</sub> (Hm <sup>3</sup> )
179	0,0176	0,359
180	0,3417	0,2154
181	0,5532	0,6628
182	0,7558	1,3173
183	0,8822	2,1363
184	0,9853	3,0701
185	1,0735	4,0995
186	1,1838	5,2281
187	1,2722	6,4561
188	1,3739	7,7792
189	1,5406	9,2364
190	1,6771	10,8453
191	1,8237	12,5957
192	1,9873	14,5012
193	2,1168	16,5532
194	2,2662	18,7447
195	2,4192	21,0874
196	2,5885	23,5913
197	2,7812	26,2761
198	2,9782	29,1558
199	3,1962	32,2430
200	3,4173	35,5498
201	3,6573	39,0871

-Le volume sera déduit de la hauteur par la relation donnée par l'équation suivante :

$$V=0.0715314H^2 - 25.438383H + 2261.8076 \quad (1.22)$$

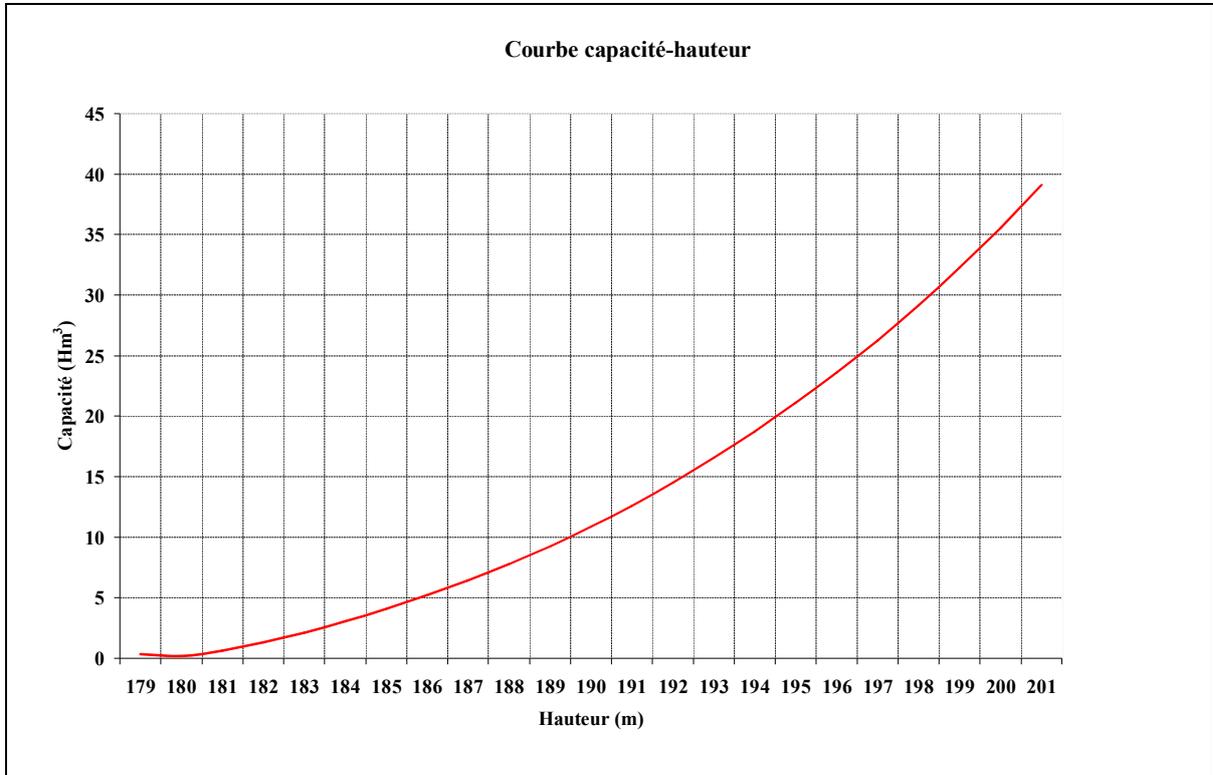
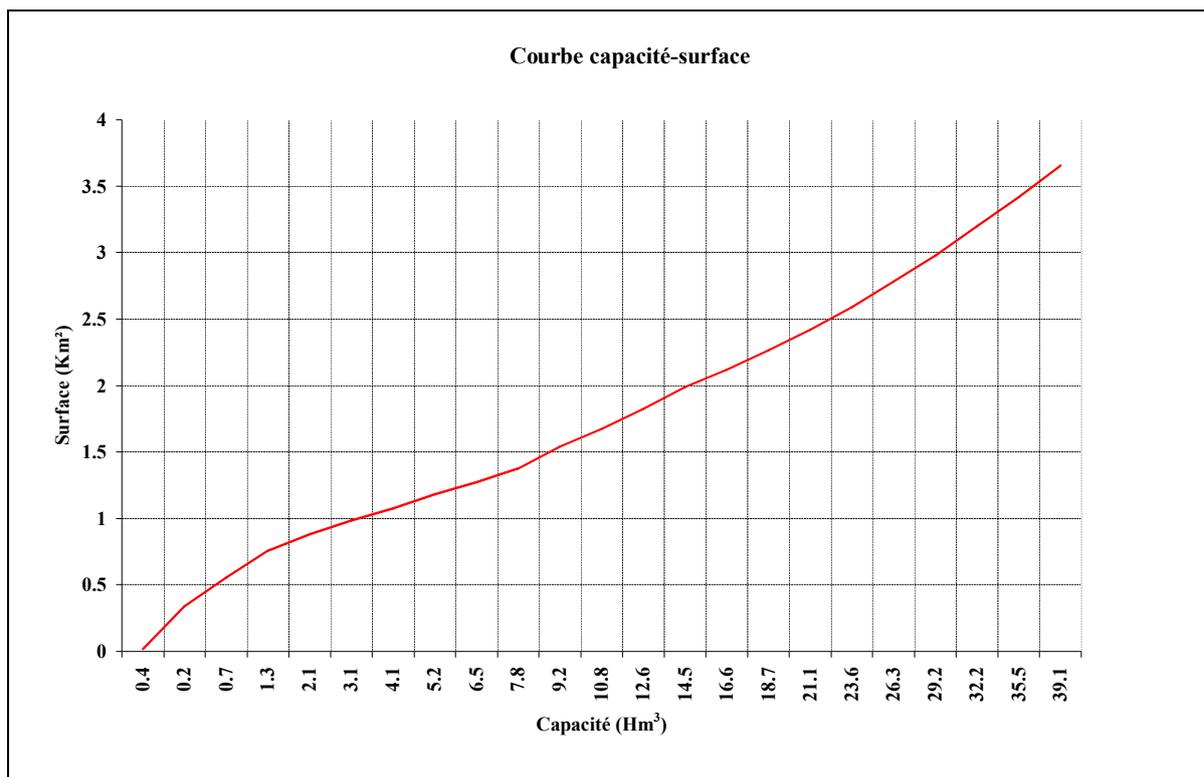


Fig.1.13.La courbe capacité-hauteur

-La surface sera déduite du volume par la relation donnée par l'équation suivante :

$$S= - 0.0000040 V^4+ 0.0003686V^3 - 0.0116424V^2+ 0.2179861 V+ 0.3131330 \quad (1.23)$$



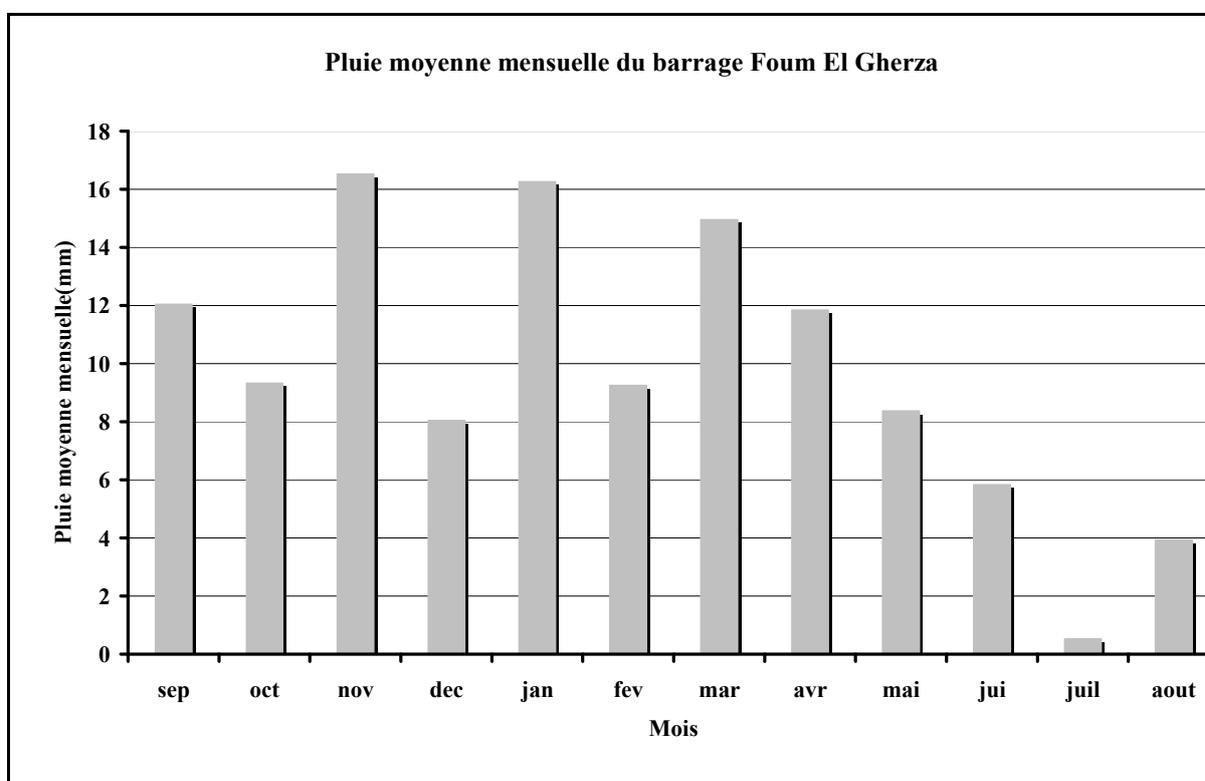
**Fig.1.14.** La courbe capacité-surface

## II.2. Analyse des précipitations mensuelles du barrage de Foum El Gherza

Les caractéristiques hydro-climatiques d'une région ont un lien direct avec son comportement socio-économique. La prise en compte des régimes de précipitations vont conduire à prendre des décisions différentes en matière de gestion des ressources en eau.

**Tableau 1.26.**Analyse statistique des précipitations mensuelles du barrage de Foug El Gherza

	Min	Max	Moyenne	Ecart type ( $\sigma$ )	Coefficient de variation( $C_v$ )	Nombre d'observation
Sep	0.000	54.700	13,251	14,280	1,078	30
Oct	0.000	36.300	9,893	11,748	1,188	30
Nov	0.000	79.500	16,513	18,772	1,137	30
Dec	0.000	45.700	8,496	10,818	1,273	30
Jan	0.000	106.500	16,655	28,665	1,721	30
Fev	0.000	31.000	9,240	10,026	1,085	30
Mar	0.000	88.200	14,980	20,087	1,341	30
Avr	0.000	70.700	12,152	18,326	1,508	30
Mai	0.000	41.000	8,512	12,264	1,441	30
Jui	0.000	33.100	5,750	9,815	1,707	30
Juil	0.000	9.500	0,779	1,899	2,438	30
Aou	0.000	28.700	3,928	8,421	2,144	30



**Fig.1.15.**Variation des pluies moyennes mensuelles

### II.3.Reconstitution des apports

La reconstitution des apports se fait à l'aide d'un modèle hydrologique. Il s'agit d'une représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques(Mouelhi).

Un modèle permet d'approcher de façon figurative des systèmes hydrologiques complexes, en tentant de s'approcher au maximum de ce qui se passe dans la réalité. De nos jours il existe différents types de modèles (entre modèles physiques et empiriques), le choix d'un modèle dépend de plusieurs paramètres tel que : la disponibilité des données pluviométriques et hydrométriques, les facteurs climatiques,...etc.

Pour reconstituer les apports nous avons choisi les trois modèles suivants :

1. le modèle auto- régressif ;
2. le modèle conceptuel GR2M ;
3. l'analyse en composante principale (ACP).

#### II.3.1. Modèles auto- régressifs

Les essais des régressions linéaires entre débits des mois successifs pris deux à deux ont échoués, en effet toutes les relations de régressions possédaient des coefficients de corrélation qui ne sont pas significativement différents de zéros. Cette constatation est exprimée par la non linéarité qui persiste entre les valeurs des débits mensuels pour chaque année de mesure.

**Tableau 1.27.**matrice des coefficients de corrélations

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Sep	1,00	0,24	0,04	0,34	0,03	<b>0,51</b>	0,15	0,26	0,34	0,33	0,23	-0,05
Oct	0,24	1,00	-0,07	-0,15	-0,24	-0,04	0,09	0,32	0,10	0,10	-0,06	0,12
Nov	0,04	-0,07	1,00	0,34	0,19	0,28	0,14	0,22	-0,28	0,14	0,17	0,26
Dec	0,34	-0,15	0,34	1,00	0,20	<b>0,52</b>	0,34	0,28	0,07	0,24	0,36	0,01
Jan	0,03	-0,24	0,19	0,20	1,00	0,44	0,25	0,09	0,10	0,19	0,17	-0,24
Fev	<b>0,51</b>	-0,04	0,28	<b>0,52</b>	0,44	1,00	0,52	0,42	0,34	0,41	<b>0,52</b>	0,03
Mar	0,15	0,09	0,14	0,34	0,25	<b>0,52</b>	1,00	0,49	0,05	0,16	0,39	0,00
Avr	0,26	0,32	0,22	0,28	0,09	0,42	0,49	1,00	0,08	0,41	0,26	0,17
Mai	0,34	0,10	-0,28	0,07	0,10	0,34	0,05	0,08	1,00	0,29	0,38	-0,10
Jui	0,33	0,10	0,14	0,24	0,19	0,41	0,16	0,41	0,29	1,00	0,25	0,00
Juil	0,23	-0,06	0,17	0,36	0,17	<b>0,52</b>	0,39	0,26	0,38	0,25	1,00	0,20
Aou	-0,05	0,12	0,26	0,01	-0,24	0,03	0,00	0,17	-0,10	0,00	0,20	1,00

D'après le tableau ci-dessus, on constate qu'il n'y a pas une bonne régression linéaire entre les mois sauf quelques mois mais ces valeurs restent toujours des résultats faibles (0.51, 0.52). Donc d'après ces résultats, le modèle autorégressif ne peut pas nous donner des résultats de simulation fiables.

Pour ces raisons et des raisons de complexité de la relation qui marquait le transfert pluie- débit à travers toutes les échelles de temps dans la région semi-aride à tendance aride nous omettons cette procédure au profit d'une autre de type conceptuel et toujours dans le souci de s'approcher d'une modélisation plus au moins réaliste.

### **II.3.2.Modèles conceptuels**

#### **II.3.2.1.Définition du modèle conceptuel**

Lorsque la structure du système et les lois qui le régissent sont inconnues ou, quand la mise en œuvre d'un modèle mécaniste devient très compliquée, on procède à une simplification du système. Ainsi, les modèles conceptuels sont réducteurs de la complexité naturelle, bien qu'ils aient l'avantage d'introduire une référence physique.

Le transfert pluie-débit est un phénomène naturel compliqué dépendant des influences dans le temps et dans l'espace.

Les modèles conceptuels tentent à représenter ce phénomène naturel par une conceptualisation (systématisation) des différents mécanismes, en faisant introduire de proche en proche des hypothèses censées de formuler la physique de la dite relation pluie-débit. Ces modèles considèrent donc le bassin versant et ses complexes comme un assemblage de réservoirs d'humidité interconnectés à plusieurs niveaux de remplissage ou stockage.

#### **II.3.2.2.Paramètres des modèles conceptuels**

Le fonctionnement interne des modèles conceptuels est régi par des relations entre les variables (observées) alimentant le modèle considérées comme des entrées, et les variables calculées en ajustant un certain nombre de paramètres. En effet l'estimation de ces paramètres est une étape très essentielle.

### II.3.2.3. Estimation des paramètres du modèle : Phase de calage

Pour le calage, on cherche à déterminer les paramètres par tâtonnement pour avoir une situation optimale, cette situation est acquise quand l'erreur sera minimale entre les données calculées (simulées) et observées.

Selon la littérature, la phase de calage s'étale sur les deux premiers tiers des données observées, le troisième tiers de ces données est conservé pour la phase de la validation.

### II.3.2.4. Puissance du modèle : Phase de validation

La validation du modèle qui s'étale à son tour sur le troisième tiers des données observées est une étape très nécessaire de jugement du modèle en question. Cette phase permet de vérifier la puissance du calage du point de vue indépendance des paramètres déjà choisis dans la phase de calage envers des données nouvelles d'entrées et alors de la disposition du modèle à simuler la réalité ou de prévoir l'avenir.

### II.3.2.5. Précision et incertitude

L'application des résultats d'un modèle en général et d'un modèle conceptuel entre autre est marquée par une certaine incertitude essentiellement due à la structure du modèle lui même, à la fiabilité des données observées et à la justesse d'optimisation des paramètres durant le calage. L'estimation des paramètres fait appel à une fonction objectif qu'on doit optimiser (minimale ou maximale) ce qui définit des critères de validations dont on cite quelques uns.

### II.3.2.6. Critère de validation

-Le critère de Nash (Nash et al., (1970)), il est défini par la relation suivante:

$$\text{Nash} = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \right] * 100 \quad (1.24)$$

- $Q_i$  : Valeurs des données observées ;
- $\hat{Q}_i$  : Valeurs prévues par le modèle ;
- $\bar{Q}$  : Moyenne des données observées.

Le critère de Nash peut prendre des valeurs de  $-\infty$  à 100 %. Dans le cas général une « bonne » ou une « mauvaise » valeur du critère de Nash sont définies comme suit (Kachroo ,1986) :

**Tableau 1.28.** Critère de Nash et qualité

Valeurs de Nash (%)	Qualité
$Nash < 60$	Mauvais
$60 \leq Nash < 80$	Bon
$80 \leq Nash < 90$	Très bon
$Nash \geq 90$	Excellent

### II.3.2.7. Application du Modèle GR2M à Foum el Gherza

Ce modèle est un ensemble de règles de calcul qui se justifient quasi-uniquement par le fait que leur application donne de bons résultats (Laborde, 2003). L'avantage de ce modèle réside essentiellement dans le faible nombre de paramètres à caler (deux) et par l'influence claire de ces paramètres.

C'est un modèle à deux réservoirs, un réservoir superficiel dont l'état est de servir essentiellement à contrôler l'évapotranspiration réelle et l'écoulement. Le second réservoir dans lequel la hauteur sert à différer les écoulements dans le temps.

Les entrées du modèle sont l'évapotranspiration potentielle et la précipitation du mois considéré. L'état initial du système est donné par les hauteurs des deux réservoirs à la fin du mois précédent.

Dans un premier temps on corrige les estimations de l'ETP et de la pluie par une réduction commune. Le premier paramètre  $x_1$  permet de faire cette correction :

On calcule alors un état intermédiaire du réservoir sol. Il dépend de la pluie du mois considéré et de l'état antérieur du niveau dans le réservoir

La pluie en excès est alors donnée et qui sera la part de la pluie du mois qui va s'écouler.

A ce stade on peut alors évaluer le niveau final du réservoir de surface. La pluie en excès se répartie dans le réservoir profond et son niveau change. Le débit de base sortant de ce réservoir profond pour le mois considéré sera évalué en fonction du paramètre  $x_2$ ,  $x_2$  est donc le second paramètre du modèle et il caractérise la vitesse de tarissement de ce

réservoir profond. Le débit total écoulé pour le mois est la somme du débit de base et de la part de la pluie en excès s'écoulant le mois même.

Dans ce modèle le paramètre  $x_1$  est le seul et unique à contrôler la fonction de production (passage de la pluie qui tombe, à la pluie qui s'écoule). De même le paramètre  $x_2$  est le seul et unique à contrôler la fonction de transfert (passage de la pluie qui s'écoule, à l'hydrogramme). Les variables d'entrée sont la pluie et l'ETP et les variables de sortie sont les débits simulés notés Q.

Les deux paramètres à caler de ce modèle sont notés  $x_1$  et  $x_2$ .

Le modèle a deux paramètres optimisables :

- $x_1$  : capacité du réservoir de production (mm) ;

- $x_2$  : coefficient d'échanges souterrains (-).

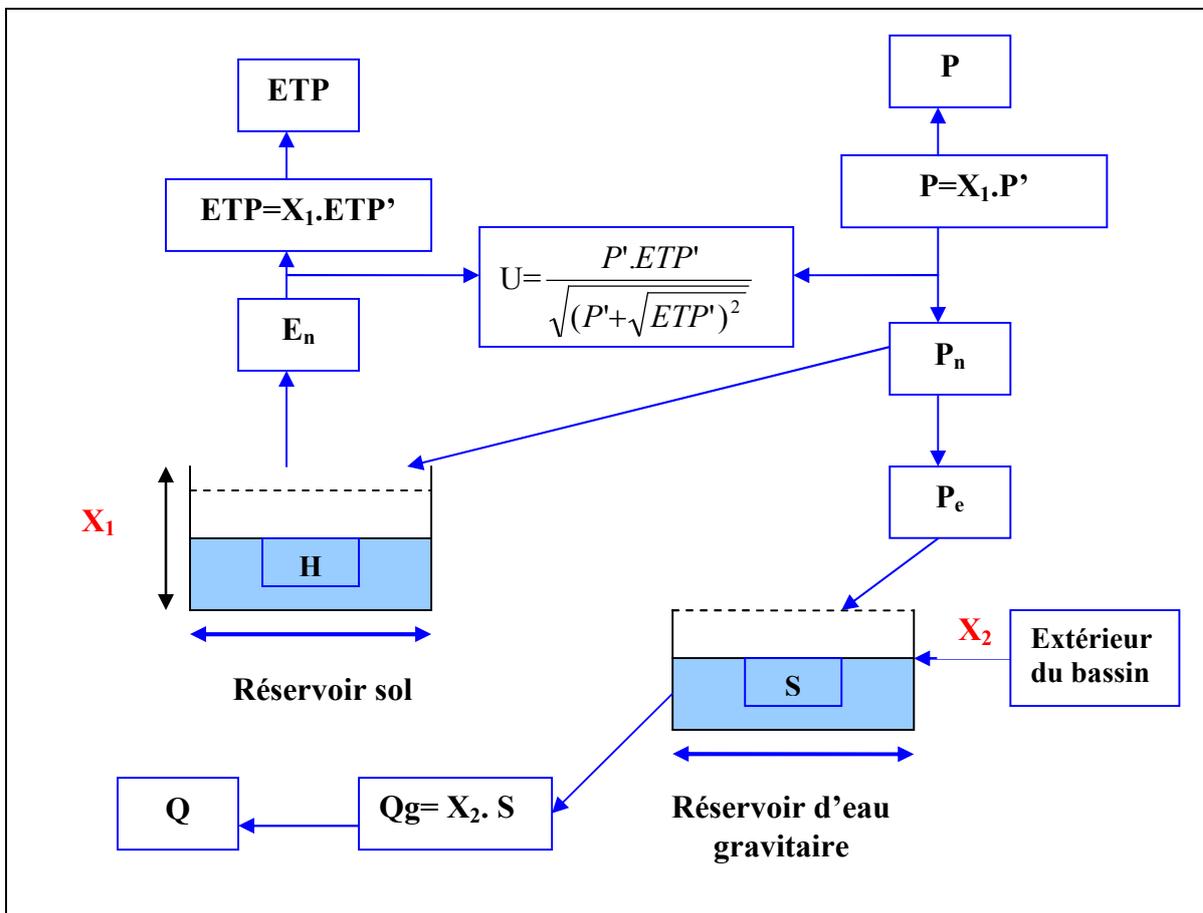


Fig.1.16. Architecture du Modèle GR2M.

## 1. Les données d'entrées du modèle

### -La précipitation moyenne

L'analyse des pluies sur l'ensemble du bassin versant, est basée obligatoirement sur les relevés pluviométriques effectués dans certains nombres de stations existants dans le bassin versant. Elle est basée sur l'hypothèse que la pluie tombée à une station est représentative de celle tombée autour de la station, sur une étendue plus ou moins vaste selon la densité du réseau pluviométrique.

Le modèle permet de tenir compte de plusieurs pluviomètres, Dans notre cas d'étude, nous avons retenus 04 stations pluviométriques : Medina, Tkout, Tifelfel et celle du barrage Foum El Gherza durant la période 1972/1993.

**-L'évapotranspiration :** Nous avons pris celle de Mchouneche qui est la station la plus proche au barrage.

## 2. Les sorties du modèle

Nous avons choisi la série des débits mensuels considérée comme sortie du modèle celle du barrage Foum El Gherza durant la période 1972/1993.

Nous allons procéder aux calculs des 04 variantes suivantes :

1. La 1<sup>ère</sup> variante avec les pluies de la station Tkout ;
2. La 2<sup>ème</sup> variante avec les pluies de la station Tifelfel ;
3. La 3<sup>ème</sup> variante avec les pluies de la station du barrage Foum El Gherza ;
4. La 4<sup>ème</sup> variante avec la moyenne arithmétique des pluies des 04 stations (Barrage, Tkout, Tifelfel et Médina).

## 3. Résultats du modèle

**Tableau 1.29.**Résultat du critère de Nash

Variante	Critère de Nash(%)
Tkout	24.40
Tifelfel	02.80
Foum El Gherza	06.70
moyenne des 04 stations	19.90

Nous avons constaté que les valeurs de critère de Nash sont mauvaises selon la classification de Kachroo.

L'utilisation du modèle conceptuel GR2M a donné des résultats insuffisants eu égard du critère de Nash ce qui nous astreint à chercher un autre modèle. Pour cette raison nous avons fait recours à l'analyse en composante principale ACP.

### **II.3.3. Recours à l'analyse en composantes principales (ACP)**

La littérature annonce que les premières analyses multi-variables ont été élaborées au début du 20<sup>ème</sup> siècle (Pearson (1901), Spearman (1904), Fisher (1915)). Ces analyses sont devenues abordables grâce aux ordinateurs.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est la plus connue des moyens d'analyse de données, elle a pour objectif de remplacer les variables initiales observées et mesurées par de nouvelles variables dites "Composantes Principales".

L'analyse en Composantes Principales ou ACP est une méthode statistique d'analyse des données. Elle permet, à partir d'une matrice à n échantillons (individus) et p variables, la description du nuage dans un espace à p dimensions.

La procédure de l'analyse en composantes principales (ACP), permet de tirer l'essentiel de l'information contenue dans les données, et donne en conséquence une représentation plus facile à interpréter tout en se basant sur les principes suivants :

- Remplacer les variables initiales qui sont généralement plus ou moins liées entre elles, par des variables non corrélées, appelées Composantes Principales, (CP).
- Réduire autant que possible le nombre des nouvelles variables (CP) à prendre en considération, tout en conservant le quasi totalité de la variance de l'ensemble des variables initiales.
- Donner une interprétation particulière aux CP les plus importantes parmi les variables initiales.

#### **II.3.3.1. Notion d'individu et Notion de variable**

On distingue dans une série de données deux ensembles : les individus et les variables relatifs à ces individus. Le terme "individu" peut désigner selon les cas : une année d'observation ou un mois ou une journée ou une autre unité de temps. L'ensemble des individus peut provenir d'un échantillonnage dans une population.

- L'individu "i" est décrit par le vecteur:

$$X_i = \{X_{ij} / j = 1 \text{ à } P\} \quad (1.25)$$

Sur un individu, on relève un certain nombre de variables désignant en général un paramètre intervenant dans un phénomène complexe à étudier.

-La variable "j" est décrit par le vecteur:

$$X_j = \{X_{ij} / i = 1 \text{ à } N\} \quad (1.26)$$

Le terme  $X_{ij}$  est un nombre réel qui représente la mesure de la variable  $X_j$  sur l'individu  $i$ .

### II.3.3.2.Présentation de l'ACP

L'ACP considère  $P$  variables pour lesquelles on dispose de  $N$  individus, donc la matrice  $[X]$  résultant du croisement « $N \times P$ » est la matrice de données  $[X]$  tel que :

$$[X] = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & \dots & X_{1j} & \dots & \dots & X_{1P} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & \dots & X_{2j} & \dots & \dots & X_{2P} \\ \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & \dots & X_{ij} & \dots & \dots & X_{iP} \\ \dots & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & \dots & X_{Nj} & \dots & \dots & X_{NP} \end{pmatrix}$$

Pour chaque variable, nous pouvons évaluer sa moyenne  $\overline{X_j}$  et son écart type  $S_j$  :

$$\overline{X_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ij} \quad (1.27)$$

$$S_j = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \overline{X_j})^2 \right]^{1/2} \quad (1.28)$$

Le coefficient de covariance entre les variables  $X_j$  et  $X_k$  est donné par :

$$Cov(X_j, X_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \overline{X_j}) * (X_{ik} - \overline{X_k}) \quad (1.29)$$

Le coefficient de corrélation entre les variables  $X_j$  et  $X_k$  est donné par :

$$Cor(X_j, X_k) = \frac{Cov(X_j, X_k)}{S_j * S_k} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_k)}{\left[ \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 * \sum_{i=1}^N (X_{ik} - \bar{X}_k)^2 \right]^{1/2}} \quad (1.30)$$

Le tableau [X] est remplacé par un tableau [Y] (individus x nouvelles variables) en réduisant le nombre de variables nécessaires pour décrire les individus, avec une perte minimale d'informations, ces nouvelles variables sont appelées composantes principales (ou CP).

Calculer les composantes principales notées  $C_j$  revient à déterminer N relations linéaires entre les variables  $X_j$  :

$$\begin{cases} C_1 = a_{10} + a_{11}X_1 + \dots + a_{1j}X_j + \dots + a_{1N}X_N \\ C_2 = a_{20} + a_{21}X_1 + \dots + a_{2j}X_j + \dots + a_{2N}X_N \\ \dots \\ C_j = a_{j0} + a_{j1}X_1 + \dots + a_{jj}X_j + \dots + a_{jN}X_N \\ \dots \\ C_N = a_{N0} + a_{N1}X_1 + \dots + a_{Nj}X_j + \dots + a_{NN}X_N \end{cases}$$

- $C_j$  : j<sup>ème</sup> Composante Principale ;
- $X_j$  : Vecteur variable initiale ;
- $a_{jl}$  : Coefficient du système également appelés cosinus directeurs du système.

### II.3.3.3.Méthodologie de l'application de l'ACP

Cette méthodologie consiste à:

- Transformer les données observées;
- Calculer la matrice de covariance ou de corrélation [R] ainsi que les paramètres statistiques;
- Diagonaliser [R] (recherche des vecteurs propres);
- Calculer les composantes principales;
- Visualiser graphiquement les résultats.

### II.3.3.4. Application de l'ACP aux apports liquides mensuels de Foum El Gherza

#### -données disponibles

Nous disposons d'une série d'apports mensuels sur trente années de 1975 à 2005 au niveau du barrage Foum El Gherza. Nous allons appliquer l'ACP à ces données composées de 30 individus (années) et 12 variables (mois). L'ACP s'applique à des données centrées réduites donc :

- La première étape consiste à calculer les moyennes et les écarts types des variables.

**Tableau 1.30.** Moyenne et Ecart type des variables

Mois	n	Moyenne	Ecart-type
sep	30	3.83	5.07
oct	30	1.96	2.29
nov	30	2.14	4.17
dec	30	1.62	5.25
jan	30	1.82	3.85
fev	30	1.45	2.77
mar	30	3.88	7.30
avr	30	2.88	8.13
mai	30	2.58	5.96
juin	30	2.02	4.64
juil	30	0.37	0.72
aou	30	1.39	1.88

-La deuxième étape consiste en le calcul de la matrice de corrélation entre les variables nous constatons que cette matrice symétrique montre des corrélations plus ou moins significantes entre les mois.

**Tableau 1.31.**Matrice de corrélation entre les variables

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Sep	1,00											
Oct	-0,12	1,00										
Nov	0,08	-0,14	1,00									
Dec	0,21	-0,16	0,12	1,00								
Jan	0,20	-0,11	0,05	0,79	1,00							
Fev	0,31	-0,12	0,07	0,91	0,77	1,00						
Mar	0,11	0,12	-0,08	0,57	0,51	0,69	1,00					
Avr	0,06	0,29	-0,10	-0,02	-0,03	-0,02	0,38	1,00				
Mai	0,18	0,17	-0,16	-0,05	-0,03	-0,02	0,28	0,88	1,00			
Jui	0,04	0,19	0,00	0,00	0,00	0,05	0,40	0,95	0,83	1,00		
Juil	0,11	0,14	-0,07	-0,01	-0,05	0,11	0,18	-0,06	-0,04	0,04	1,00	
Aou	0,47	0,02	0,16	-0,14	-0,21	-0,07	-0,18	0,09	0,13	0,07	-0,07	1,00

L'analyse des valeurs propres montre que les 6 premiers axes permettent d'expliquer le maximum d'information, soit 90% de la variance totale. Cela nous renseigne sur le nombre de composantes qu'on peut retenir pour la reconstruction des apports.

**Tableau 1.32.** Valeur propre et variance cumulée.

Valeur propre	3.37	2.94	1.59	1.18	0.92	0.82	0.43	0.32	0.21	0.13	0.07	0.02
Variance(%)	28,07	24,46	13,24	9,83	7,63	6,83	3,59	2,71	1,78	1,10	0,57	0,19
Variance cumulée(%)	28,07	52,53	65,77	75,60	83,23	90,06	93,65	96,36	98,14	99,24	99,81	100,00

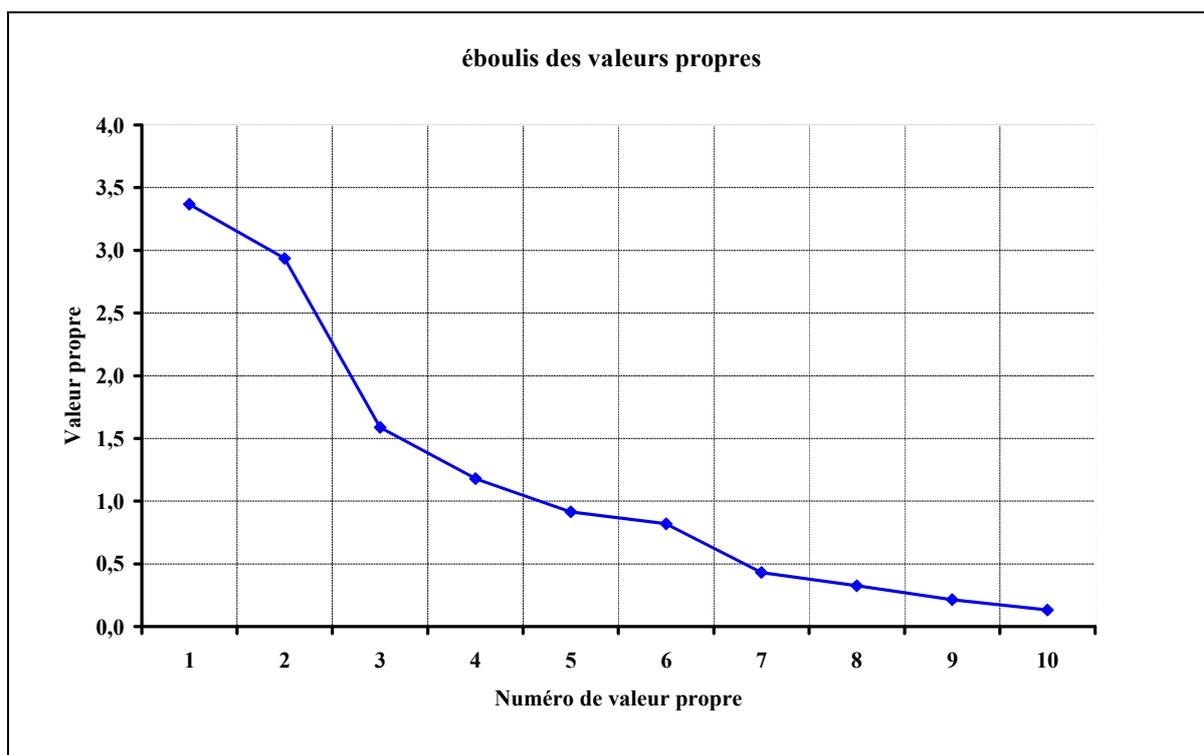
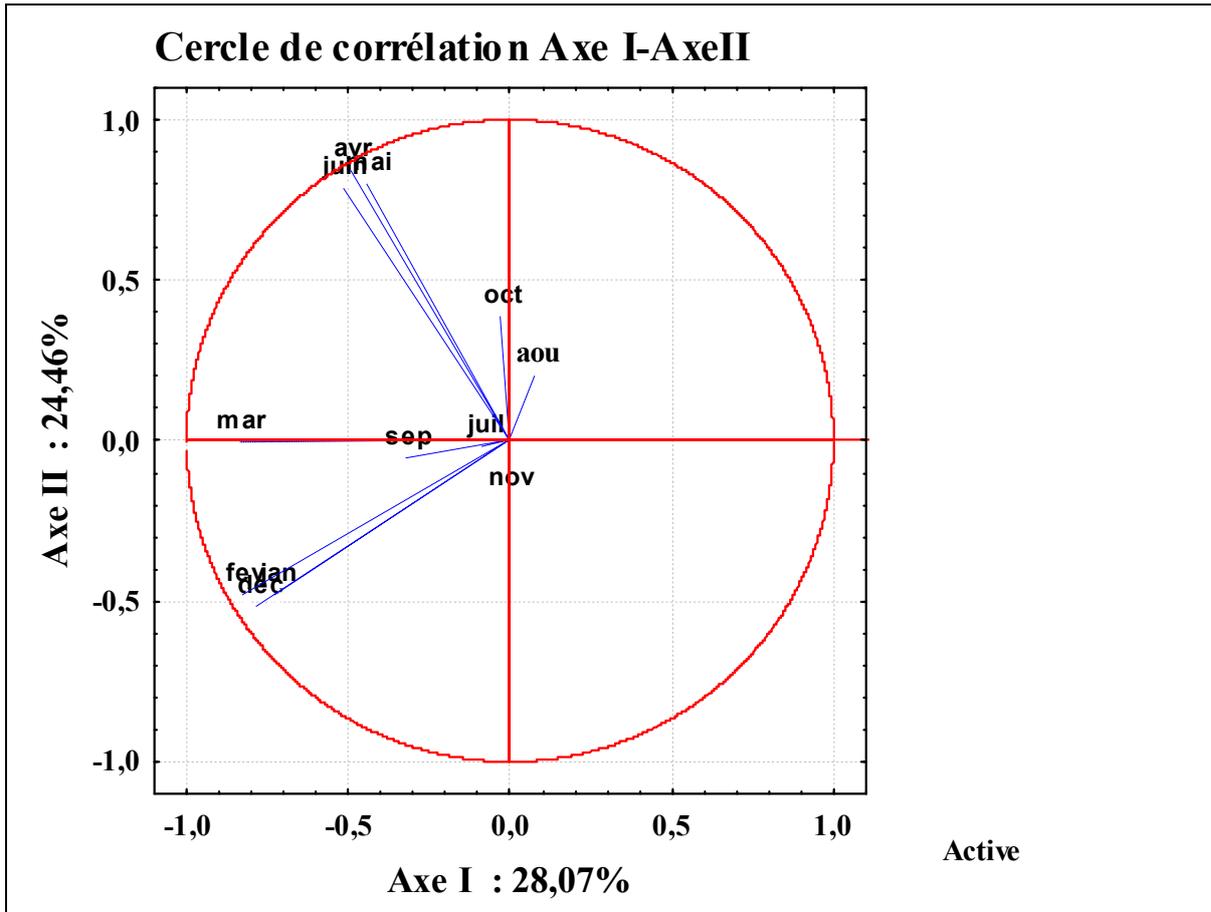


Fig.1.17. Eboulis des valeurs propres.

Tableau 1.33. Corrélations entre variables et axes principaux.

	Axe I	Axe II	Axe III	Axe IV	Axe V	Axe VI
Sep	-0,32	-0,05	0,75	-0,32	0,24	0,05
Oct	-0,03	0,39	-0,29	-0,43	-0,20	-0,72
Nov	0,00	-0,18	0,43	0,29	-0,83	0,00
Dec	-0,78	-0,52	0,01	0,10	-0,01	-0,07
Jan	-0,73	-0,48	-0,06	0,12	0,07	-0,13
Fev	-0,83	-0,48	0,05	-0,07	0,01	-0,04
Mar	-0,84	0,00	-0,23	-0,14	-0,05	0,00
Avr	-0,49	0,84	-0,02	0,13	-0,03	0,01
Mai	-0,45	0,80	0,09	0,11	0,12	0,12
Jui	-0,52	0,79	0,00	0,13	-0,15	0,15
Juil	-0,09	-0,02	-0,14	-0,83	-0,29	0,42
Aou	0,08	0,20	0,82	-0,18	0,07	-0,25

Le tableau des corrélations entre variables et axes principaux montre une bonne corrélation des mois de décembre, janvier, février, mars, juin avec le premier axe principal qui représente 28% de la variance aussi le deuxième axe avec une variance de 24% présente une bonne corrélation avec les mois de décembre, avril, mai et juin.



**Fig.1.18.** Cercle de corrélation Axe I et Axe II.

### II.3.3.5. Simulation des apports par ACP

Pour pouvoir exploiter les résultats de l'ACP dans la reconstruction des apports au barrage Foug El Gherza il faut fixer d'abord le nombre de composantes à retenir, pour cela, plusieurs critères sont connus afin de pouvoir nous aider à bien choisir.

Le critère de Kaiser(1960) indique qu'il faut retenir les composantes dont les valeurs propres sont supérieures à 1 donc pour notre cas retenir 4 composantes.

L'éboulement des valeurs propres (1966) montre un coude au niveau de la 7<sup>ème</sup> composante donc retenir 6 composantes.

Comme indiqué ci-dessus, 90% de la variance totale est expliquée avec 6 composantes.

Tenant compte de ces critères, on peut opter pour garder 6 composantes pour notre modèle.

### II.3.3.6. Reconstitution des données

Le nombre de composantes ainsi fixé nous pouvons alors reconstituer nos données avec 6 composantes principales, la formule de reconstitution est donc:

$$X_{ij}^* = \sum_{h=1}^6 c_{ih} u_{hj} \quad (1.31)$$

- $X_{ij}^*$  : Individu reconstitué (la matrice correspondante étant centrée réduite) ;
- $C_{ih}$  : coordonnée de l'individu i sur l'axe principal h ;
- $U_{hj}$  : coordonnée de la variable j sur l'axe principal h.

En multipliant par l'écart type et en additionnant la moyenne on aura :

$$\hat{X}_{ij} = X_{ij}^* S_j + \bar{X}_j \quad (1.32)$$

- $\hat{X}_{ij}$  : individu ij reconstitué avec 6 composantes ;
- $S_j$  : écart-type de la variable j ;
- $\bar{X}_j$  : moyenne arithmétique de la variable j.

Donc :

$$X_{ij} = \hat{X}_{ij} + e_{ij} \quad (1.33)$$

- $X_{ij}$  : individu historique ;
- $e_{ij}$  : résidu.

Le modèle de simulation est constitué de deux paramètres :

- La matrice  $\hat{X}$  chaque colonne de cette matrice est constituée des éléments reconstitués avec 6 composantes;
- La matrice E des résidus, cette dernière a été simulée par 3 différentes méthodes :
  - Simulation par les lois d'ajustement;
  - Simulation par la fonction de répartition;
  - Simulation par la fonction spline.

Parmi ces simulations on a retenu la simulation par la fonction de répartition pour le mois de janvier et celle par la fonction spline pour les autres mois.

Le modèle obtenu par analyse en composantes principales contrairement aux deux méthodes sus indiquées a donné des résultats meilleurs d'après la classification de Kachroo avec un critère de Nash=85,74% pour la série d'apports mensuels et un critère de Nash=96.25% pour la série d'apports annuels.

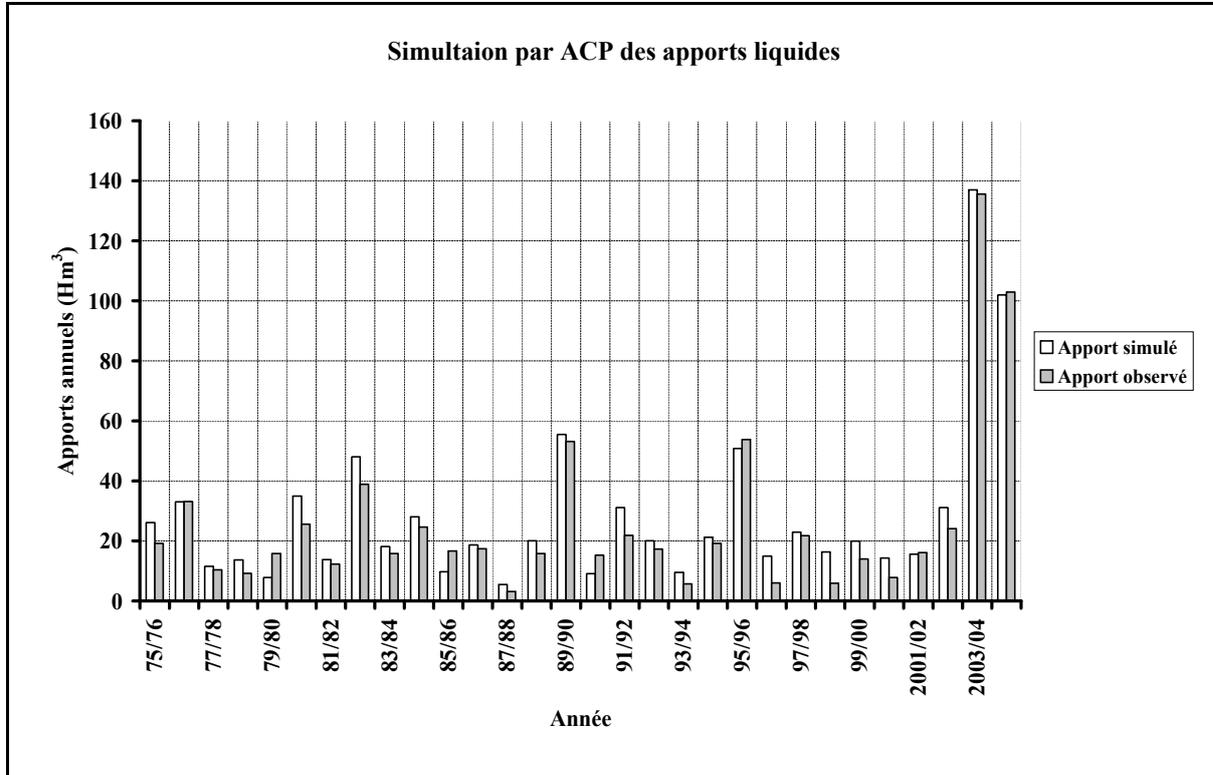


Fig.1.19. Simulation par ACP des apports liquides du barrage Foug El Gherza.

**-Statistique de base des apports annuels reconstitués**

- Nombre d'observations : 30.
- Minimum : 5,50 Hm<sup>3</sup>.
- Maximum : 137,03 Hm<sup>3</sup>.
- Moyenne : 28.65 Hm<sup>3</sup>.
- Ecart-type : 28.07 Hm<sup>3</sup>.
- Médiane : 19.96 Hm<sup>3</sup>.
- Coefficient de variation (Cv) : 0.98.

## II.4. Reconstitution des Précipitations

Pour l'analyse des précipitations nous allons utiliser la même démarche que pour la reconstitution des apports. Nous disposons d'une série de précipitations mensuelles sur trente années de 1975 à 2005 au niveau du barrage Foug El Gherza.

**Tableau 1.34.** Moyenne et Ecart type des variables

<b>Mois</b>	<b>n</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>
<b>sep</b>	30	13,25	14,28
<b>oct</b>	30	9,89	11,75
<b>nov</b>	30	16,51	18,77
<b>dec</b>	30	8,50	10,82
<b>jan</b>	30	16,65	28,67
<b>fev</b>	30	9,24	10,03
<b>mar</b>	30	14,98	20,09
<b>avr</b>	30	12,15	18,33
<b>mai</b>	30	8,51	12,26
<b>juin</b>	30	5,75	9,82
<b>juil</b>	30	0,78	1,90
<b>aou</b>	30	3,93	8,42

**Tableau 1.35.**Matrice de corrélation entre les variables

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Sep	1,00											
Oct	0,26	1,00										
Nov	-0,23	-0,01	1,00									
Dec	-0,10	-0,14	0,19	1,00								
Jan	-0,05	-0,15	-0,05	-0,09	1,00							
Fev	0,15	-0,38	0,12	-0,03	-0,21	1,00						
Mar	0,14	0,25	-0,17	-0,01	-0,11	-0,03	1,00					
Avr	0,27	0,22	-0,23	-0,12	-0,09	-0,21	0,28	1,00				
Mai	0,22	0,26	0,10	-0,24	0,20	-0,17	0,42	0,43	1,00			
Jui	0,10	-0,22	0,04	-0,12	-0,17	0,28	-0,18	-0,01	-0,10	1,00		
Juil	0,29	-0,28	-0,12	-0,03	-0,13	0,51	0,02	-0,07	-0,12	0,49	1,00	
Aou	-0,13	-0,18	0,35	-0,23	-0,12	0,10	-0,16	0,28	0,19	0,30	0,07	1,00

**Tableau 1.36.** Valeur propre et variance cumulée.

<b>Valeur propre</b>	2,50	2,04	1,61	1,23	1,04	0,91	0,82	0,65	0,38	0,32	0,30	0,23
<b>Variance(%)</b>	20,83	17,00	13,40	10,23	8,63	7,56	6,83	5,40	3,13	2,63	2,46	1,91
<b>Variance cumulée(%)</b>	20,83	37,83	51,23	61,46	70,09	77,65	84,48	89,88	93,00	95,63	98,09	100,00

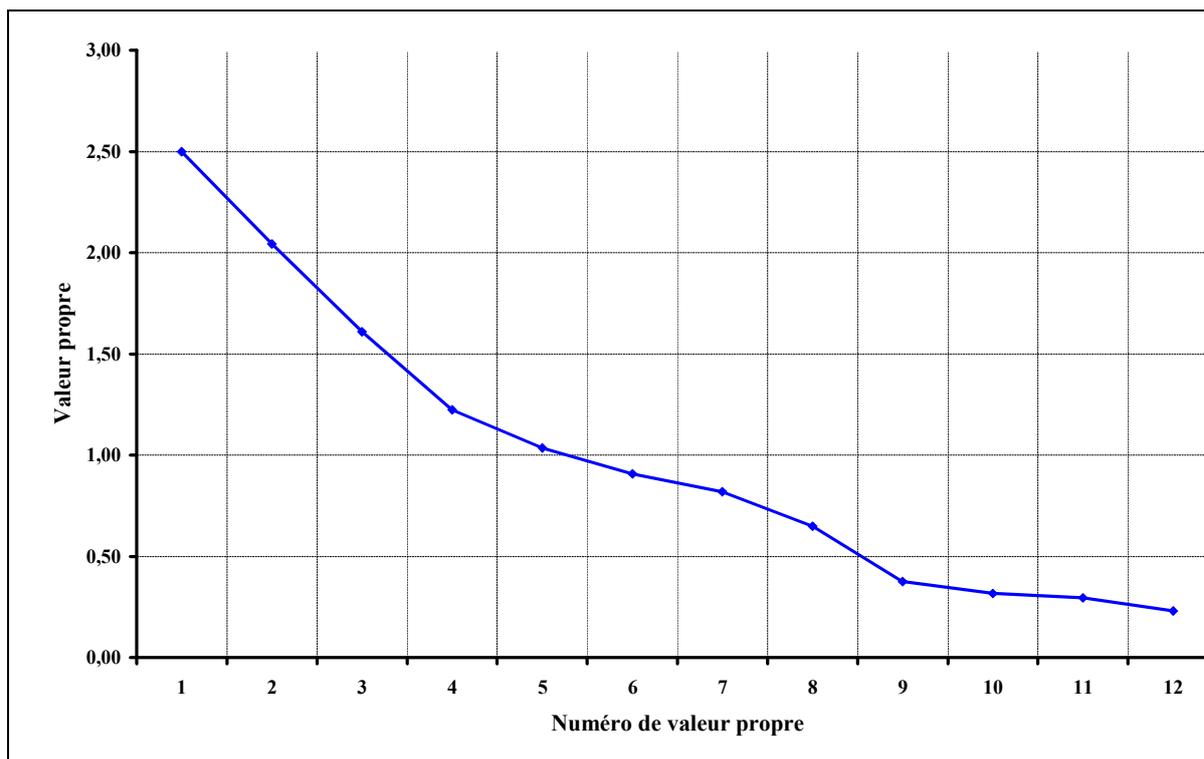


Fig.1.20. Éboulis des valeurs propres.

Tableau 1.37. Corrélations entre variables et axes principaux.

	Axe I	Axe II	Axe III	Axe IV	Axe V	Axe VI	Axe VII	Axe VIII
Sep	0,19	-0,61	-0,39	-0,01	0,03	0,36	0,41	0,25
Oct	0,66	-0,08	-0,08	0,31	-0,29	0,48	-0,01	-0,16
Nov	-0,22	0,22	0,62	0,41	0,33	0,40	0,10	-0,03
Dec	-0,14	0,40	-0,23	0,51	0,30	-0,29	0,54	-0,09
Jan	0,17	0,27	0,07	-0,77	0,40	0,09	0,23	-0,09
Fev	-0,65	-0,37	-0,13	0,11	0,33	0,12	-0,24	0,35
Mar	0,49	-0,34	-0,22	0,27	0,43	-0,25	-0,38	-0,24
Avr	0,51	-0,52	0,21	0,05	-0,15	-0,43	0,27	0,18
Mai	0,58	-0,41	0,36	-0,09	0,43	0,08	0,02	-0,09
Jui	-0,55	-0,49	0,13	-0,06	-0,22	0,03	0,16	-0,52
Juil	-0,56	-0,58	-0,29	-0,06	0,15	0,01	0,06	-0,18
Aou	-0,21	-0,33	0,81	0,03	-0,11	-0,15	0,03	0,12

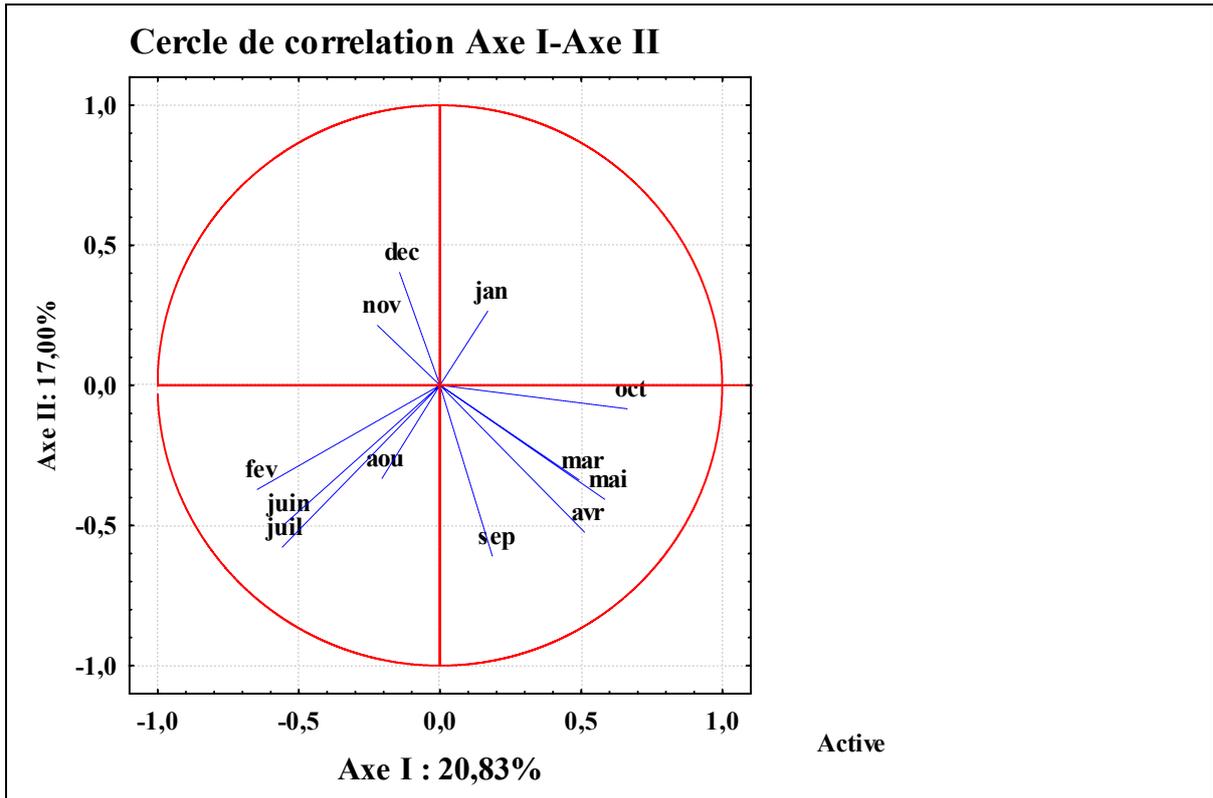


Fig.1.21. Cercle de corrélation Axe I et Axe II.

Le modèle obtenu par analyse en composantes principales a donné des résultats satisfaisants d'après la classification de Kachroo avec un critère de Nash=76.36%.

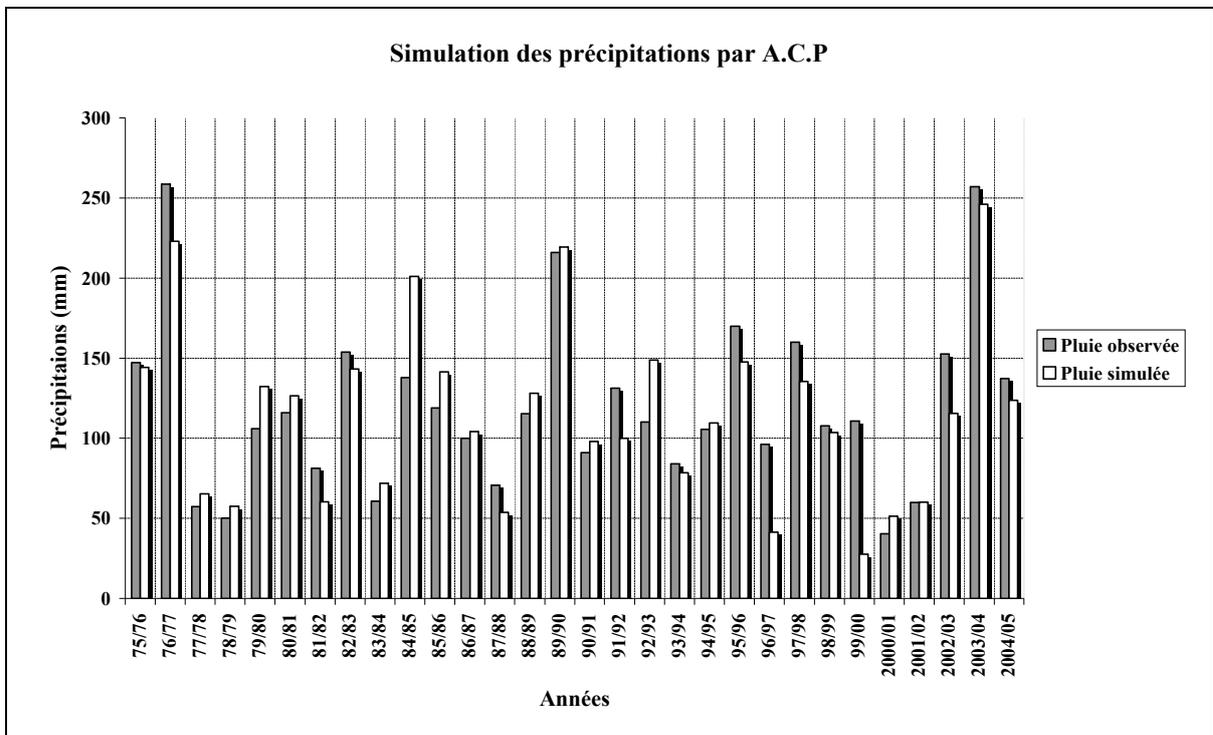


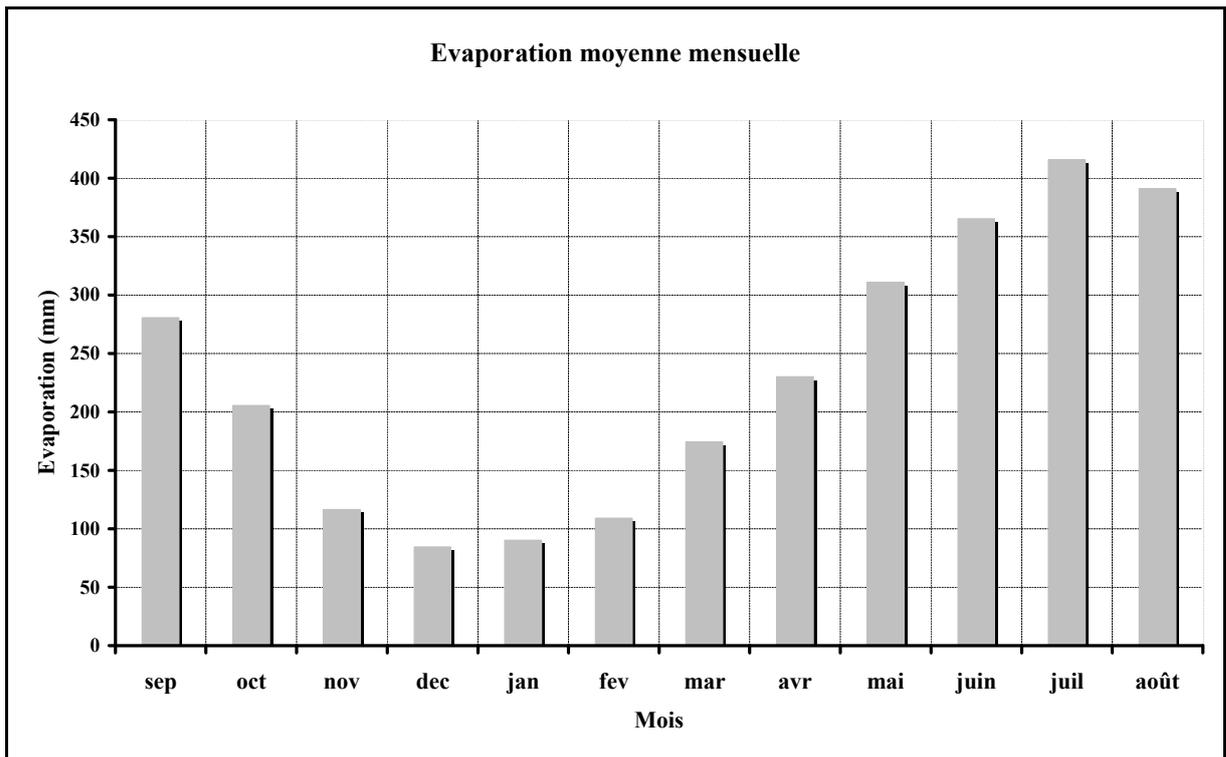
Fig.1.22. Simulation par ACP des précipitations du barrage Foug El Gherza.

**-Statistique de base de précipitations annuelles reconstituées**

- Nombre d'observations : 30.
- Minimum : 27.71 mm.
- Maximum : 246.1 mm.
- Moyenne : 115.3 mm.
- Ecart-type : 55.50 mm.
- Médiane : 112.50 mm.
- Coefficient de variation (Cv) : 0.48.

**II.5.Reconstitution des flux évaporatifs**

L'évaporation de la surface de la retenue est estimée à partir d'un bac Colorado situé dans le barrage. Le coefficient de passage choisi est de **0.78 (Source : ANB)**.



**Fig.1.23.** variation mensuelle de l'évaporation.

Pour modéliser le fonctionnement du barrage, on essaye d'avoir une relation qui lie l'évaporation avec le volume d'eau stocké. Or le volume évaporé dépend de la lame évaporée et de la surface de la retenue:

$$V_{\text{evap}} = (\text{Surface} \cdot 0.78 \cdot \text{Lame évaporée}) / 1000 \tag{1.34}$$

Les relations hauteur – volume – surface permettent de faire le lien entre la surface et le volume, ce qui permet de linéariser le volume évaporé en fonction du volume d'eau stocké.

$$V_{\text{evap}} = a.V + b \quad (1.35)$$

Avec a et b qui dépendent de la lame évaporée.

**Tableau 1.38.** Linéarisation des flux évaporatifs en fonction du volume

Mois	évaporation moyenne mensuelle	a	b	R <sup>2</sup>
Sep	280.36	0.0160049	0.1857869	0.9881
Oct	205.27	0.0117182	0.1360268	0.9881
Nov	116.24	0.0066358	0.0770291	0.9881
Dec	84.23	0.0048084	0.0558169	0.9881
Jan	90.03	0.0051395	0.0596604	0.9881
Fev	108.85	0.0062139	0.0721319	0.9881
Mar	174.00	0.0099331	0.1153050	0.9881
Avr	229.90	0.0131243	0.1523484	0.9881
Mai	310.85	0.0177455	0.2059917	0.9881
Jui	365.02	0.0208379	0.2418887	0.9881
Juil	415.66	0.0237287	0.2754465	0.9881
Aou	390.79	0.0223090	0.2589658	0.9881

## II.6. Les vidanges

En général, on effectue Les lâchers (vidanges) après la crue c'est-à-dire lors des ruissellements importants. Dans le tableau ci-dessous on constate qu'il y a 34 lâchers qui ont été faits durant la période 1989/2004.

**Tableau 1.39.**volumes des vidanges

<b>Date de lâcher</b>	<b>Volume estimé en m<sup>3</sup></b>	<b>Date de lâcher</b>	<b>Volume estimé en m<sup>3</sup></b>
<b>octobre 1989</b>	86 000	<b>septembre 1997</b>	2000
<b>novembre 1989</b>	516 000	<b>octobre 1997</b>	66 000
<b>décembre 1989</b>	5000	<b>juin 1999</b>	9000
<b>février 1990</b>	7000	<b>octobre 1999</b>	4000
<b>avril 1990</b>	3000	<b>mai 2000</b>	36 000
<b>mai 1990</b>	1 228 000	<b>octobre 2000</b>	70 000
<b>août 1990</b>	96 000	<b>mai 2001</b>	36 000
<b>novembre 1990</b>	96 000	<b>septembre 2001</b>	13 000
<b>octobre 1991</b>	78 000	<b>octobre 2001</b>	20 000
<b>décembre 1992</b>	81 000	<b>mai 2002</b>	23 000
<b>octobre 1994</b>	111 000	<b>octobre 2002</b>	34 000
<b>mai 1995</b>	42 000	<b>févier 2003</b>	25 000
<b>septembre 1995</b>	51 000	<b>septembre 2003</b>	3000
<b>octobre 1995</b>	53 000	<b>mars 2004</b>	1 008 000
<b>janvier 1996</b>	5000	<b>avril 2004</b>	2 328 000
<b>mars 1996</b>	3 354 000	<b>mai 2004</b>	864 000
<b>juin 1996</b>	48 000	<b>décembre 2004</b>	42 000

## II.7.Calcul des fuites

Le problème des fuites d'eau dans les retenues de barrages préoccupe les services de l'hydraulique. En effet, en plus des pertes en eau précieuse. Il peut même mettre en péril la sécurité des ouvrages et par conséquent présente des menaces sur les biens et les populations se trouvant en aval. Le barrage de Foum El Gherza est l'un des barrages algériens fortement sujets à ce problème.

### **II.7.1. Historique des fuites du barrage de Foum El Gherza**

Après la mise en eau du barrage, de nombreuses résurgences sont apparues en aval sur les deux rives. D'autres résurgences plus lointaines existent également, dont on ne sait si elles sont en relation avec la retenue. Aujourd'hui la situation est la suivante :

En rive gauche à proximité de la voûte, 09 points de résurgence sont identifiées. Les résurgences les plus importantes étaient auparavant captées, mais les ouvrages de réception sont aujourd'hui hors service. Les fuites de la rive gauche alimentent par conséquent la nappe de l'oued.

En rive droite, on note une résurgence à environ 350m en aval du barrage. Son débit est faible et retourne également à l'oued. L'essentiel des fuites est toutefois capté par des forages restituant les débits dans une galerie située en rive droite, qui constitue le départ du système d'alimentation destiné à l'irrigation.

### **II.7.2. Système de mesure**

Les fuites captées dans la galerie rive droite sont jaugées à la sortie de cette galerie par un déversoir en V permettant une évaluation assez précise du débit. Cette mesure ne peut toutefois fournir le débit des fuites que lorsqu'aucune lâchure pour l'irrigation n'est effectuée, puisque ces lâchures transitent par la galerie.

Comme indiqué plus haut, des systèmes de captage et de mesure avaient été également réalisés en rive gauche, à quelques centaines de mètres du barrage. Les fuites de la retenue sont mesurées en un certain nombre de points situés en rive droite et en rive gauche en aval du barrage.

Les fuites 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, environ 500m en aval du barrage.

II.7.3.Evolution des fuites

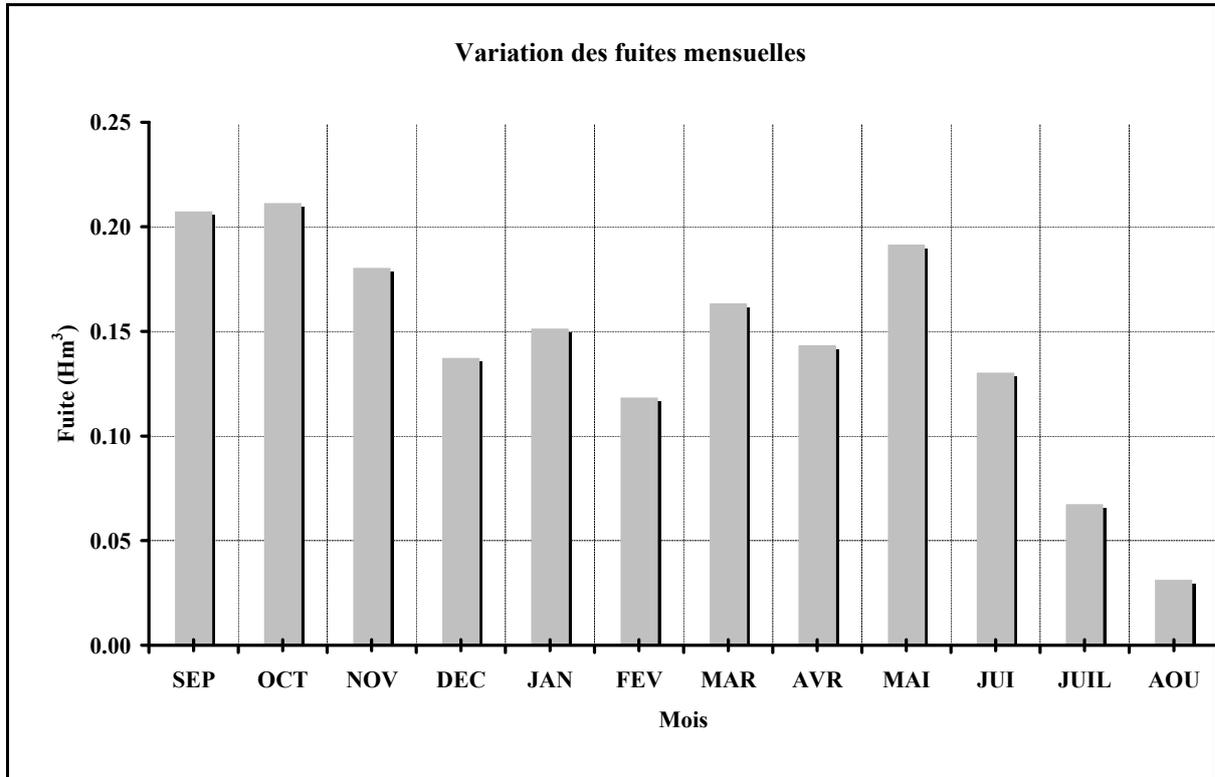


Fig.1.24.variation mensuelle des fuites

Les fuites sont calculées à partir de la courbe reliant les fuites mensuelles au volume du réservoir.

L'équation suivante exprime la relation entre le volume de fuite et le volume du réservoir

$$V_{inf} = 0.0788.V^{0.6775} \quad (1.36)$$

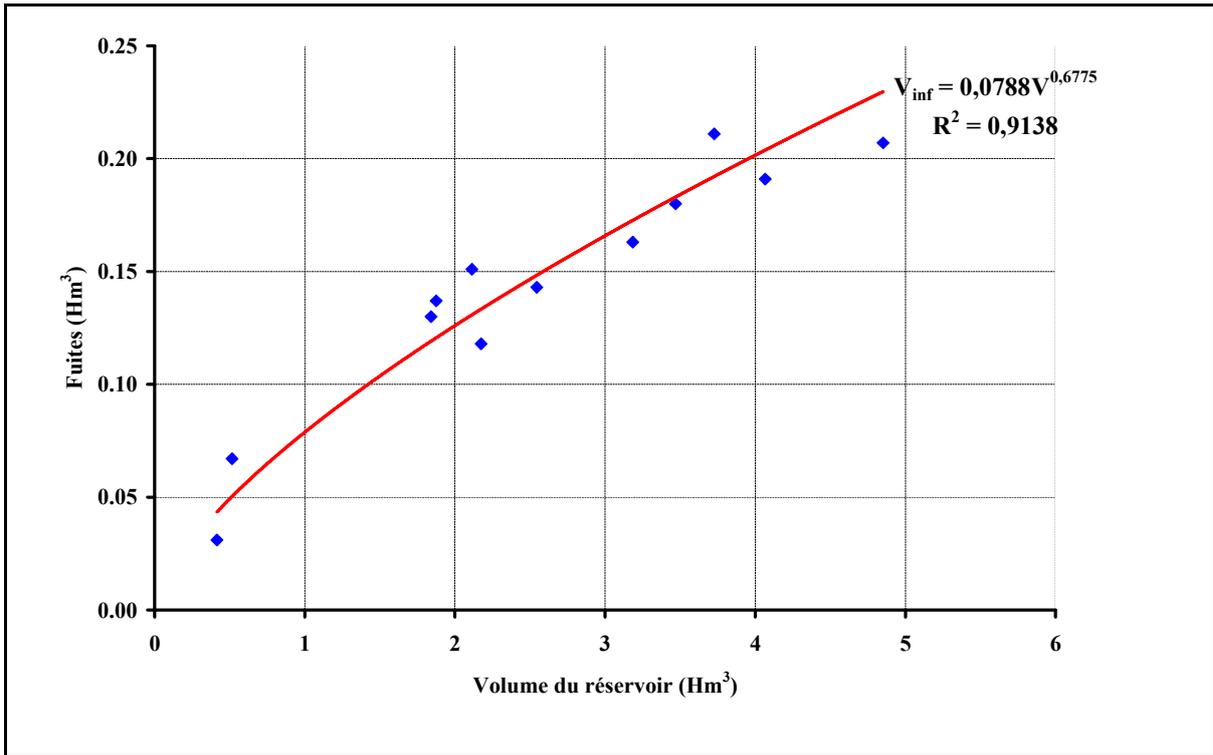


Fig.1.25.variation des fuites en fonction du volume du réservoir.

### III. Le système d'utilisation

La demande des agriculteurs est un construit social, elle fait intervenir des paramètres agronomiques, sociaux et économiques.

#### L'irrigation du palmier dattier

Le palmier dattier est une espèce arboricole très particulière tant par sa morphologie que par ses exigences climatiques et ses exigences en eau. Il habite dans les régions arides la plupart des palmiers ne supportent pas les hivers rigoureux, leur durée de vie peut aller jusqu'à 100ans avec une taille maximale de 30m. Il découle de ces deux observations une série de faits qui ont conditionné jusqu'à ce jour l'état de la culture du palmier dattier.

L'irrigation rationnelle des palmeraies a pour but d'assurer pendant toute l'année et surtout pendant l'été, les quantités d'eau nécessaires à une évolution normale des arbres et à l'élaboration d'une bonne récolte. Donc, les spécialistes sont assez imprécis sur le volume et la fréquence des arrosages. Quoiqu'il en soit, la culture du palmier dattier exige d'importantes quantités d'eau.

L'influence défavorable des facteurs climatiques font qu'au Sahara la prospérité du palmier dattier est principalement fonction des volumes d'eau disponibles pour l'arroser. En fait, l'eau d'irrigation sert à humidifier l'horizon du sol fouillé par les racines nourricières des arbres. Le palmier peut évoluer normalement entre 20 et 24% d'humidité relative du sol (Ben Abdallah, 1990).

Les besoins en eau du palmier dattier dépendent donc :

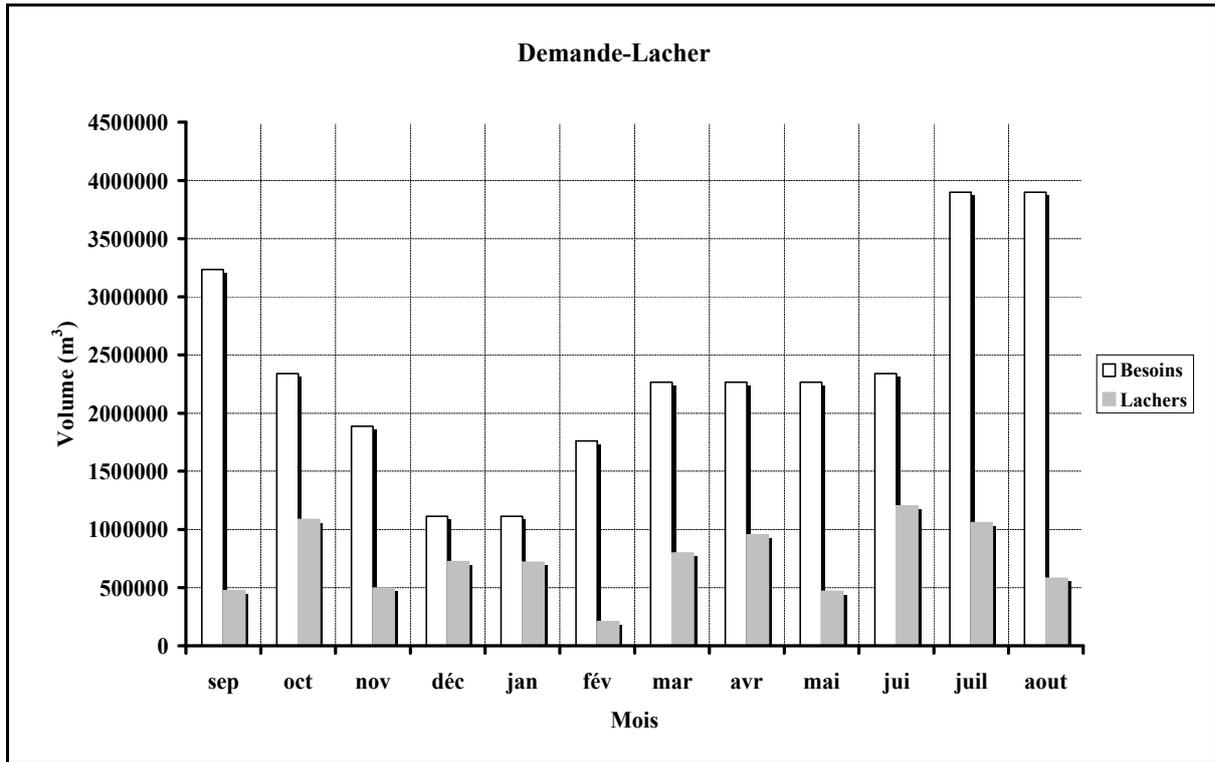
- De facteurs édaphiques (nature physique du sol donc capacité de rétention en eau, nature chimique des terres qui en général sont pauvres mais riches en sels et donc arrosages plus fréquents et copieux pour combattre la salinité).
- De la qualité des eaux : les irrigations doivent être d'autant plus nombreuses et volumineuses que les eaux sont plus chargées afin de limiter les phénomènes de salinisation secondaire généralisée et stabilisée.
- De l'aménagement et de l'entretien de la plantation : plus les planches sont parfaitement nivelées et le sol est entretenu plus l'exécution des arrosages est favorisée et la pénétration de l'eau est meilleure.

Les travaux réalisés par les chercheurs montrent que les besoins en eau du palmier sont faibles en Décembre-janvier et augmentent pour atteindre leur maximum au cours des mois de l'été (juillet-août-septembre). Le taux moyen a été de 23 647 m<sup>3</sup>/ha soit 0,9 l/h/ha pour la variété *Deglet Nour*, le besoin net n'est que de 15 714 m<sup>3</sup>/ha. Le rythme d'irrigation doit être, pour *Deglet Nour* adulte, de 6 à 7 jours en « juillet-août-septembre », de 10 jours en « mars-avril-mai-juin-octobre », de 12 jours en « février et novembre » et de 15 à 21 jours en « décembre-janvier » ( Ben Abdallah, 1990).

Dans la pratique, l'irrigation des palmeraies ne tient pas compte du stade de développement biologique et physiologique des palmiers et par conséquent de la variation des besoins durant l'année. De plus, au point de vue production de dattes, certains chercheurs ont calculé qu'il fallait 1m<sup>3</sup> d'eau pour obtenir 1 kg de dattes.

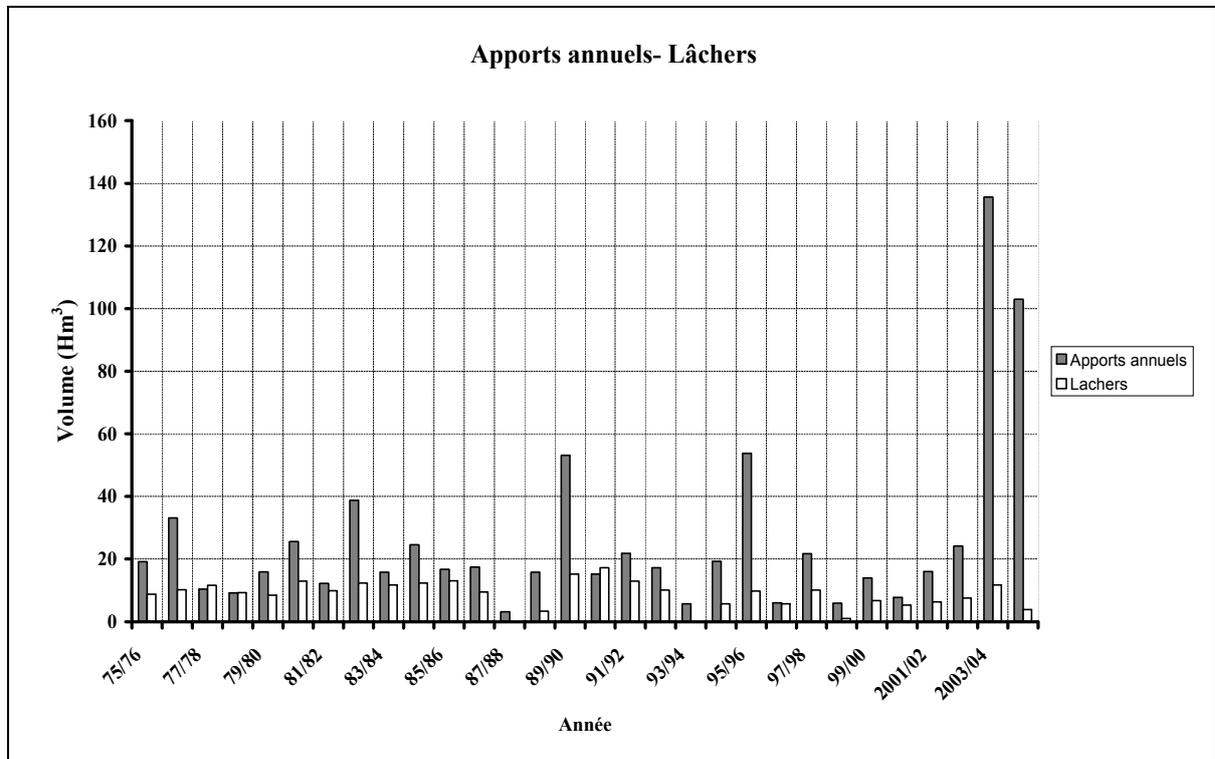
Par ailleurs, en dehors de la technique d'irrigation par submersion, une technique récente a été essayée. Il s'agit de « l'irrigation goutte à goutte ». Elle permet une économie d'eau incontestable.

Dans notre étude le site du barrage de Foug El Gherza se situe à 15 Km au nord-est de Biskra il est destiné pour irriguer 1200 ha correspondant à la plantation de plus de 300 000 palmiers dans les villages de Sériana, Garta et dans la daïra de Sidi Okba.



**Fig.1.26.** Comparaison des besoins et des lâchers d'eau des palmiers

De la figure ci-dessus on constate que les lâchers d'eau sont très inférieurs aux besoins réels des palmiers sur toute la saison.



**Fig.1.27.** Comparaison des apports annuels et des lâchers historiques d'eau des palmiers.

## *CHAPITRE IV*

# *ELABORATION D'UN MODELE DE GESTION OPTIMISE*

## **Introduction**

La connaissance des objectifs de fonctionnement des barrages vont permettre de définir la gestion d'un système. Dans les pays arides et semi-arides, les gestionnaires doivent prendre en considération la rareté et l'irrégularité de la ressource d'une part et les besoins donc la demande en eau d'autre part.

## **I. Les principes de gestion**

### **I.1. Caractéristiques de la gestion**

Pour assurer la gestion d'un système il faut appréhender les réactions du système à son environnement et les objectifs de fonctionnement de la retenue. Dans les zones arides et semi-arides les gestionnaires et les utilisateurs doivent avoir un souci commun, la maîtrise de la contrainte liée, d'une part, à la rareté de la ressource hydrique et d'autre part à son irrégularité.

### **I.2. La complexité des systèmes**

Dans la gestion des réservoirs d'eau, il existe de nombreuses incertitudes selon (Lebdi ,2007), qui les classes en 3 grands types:

#### **-Les incertitudes stratégiques**

Elles interviennent lors de la discussion sur l'opportunité d'un aménagement et par suite d'un investissement. Il arrive qu'on soit incapable de prédire les objectifs futurs de l'ouvrage hydraulique et d'élaborer une planification correcte qui tient compte de cette vision dynamique de définition des objectifs.

#### **-Les incertitudes physiques**

Pour cerner l'incertitude due à la variabilité des phénomènes hydrologiques dans le temps et dans l'espace, on se sert d'outils statistiques dans les modèles mathématiques de gestion de l'eau.

#### **-Les incertitudes technologiques**

A la méconnaissance des processus physiques (relation entre la pluie et le débit qui ruisselle vers le barrage, évaluation correcte des besoins en eau, fonction de production reliant la quantité d'eau à la plante et son rendement,... etc.) et économiques (comportement de l'agriculteur face au marché, choix de culture moins consommatrice en eau et plus rémunératrices,... etc.), s'ajoute la nature de l'information disponible (information incomplète et limitée dans le temps, entachée d'erreurs, ...etc.) (Lebdi ,2007).

### I.3. Les objectifs de gestion

Dans la gestion des systèmes hydrauliques, les objectifs peuvent être nombreux on peut citer :

#### 1. La régulation des débits d'apports

Un barrage peut avoir un rôle de laminage des crues ou de soutenir un étiage (sous un climat à forte irrégularité), l'objectif est donc valorisation de l'eau.

#### 2. L'irrigation

On sait que dans les pays arides et semi-arides, Les apports pluviométriques ne correspondent pas avec les besoins hydriques des plantes, parce que pour la plus part des années, l'essentiel des apports proviennent des pluies dites automne/hiver. Les apports au printemps sont non négligeables. En été, on peut considérer les apports au barrage et la réserve du sol comme quasi nuls malgré certains apports d'orage.

En effet, l'incertitude d'apport d'eau en début d'automne existe toujours, ce qui impose que pour les grands barrages, la gestion est interannuelle. Il ne s'agit pas de vider le barrage en fin de période de gestion car il faut toujours s'assurer d'un stock minimal.

## II. Système dynamique stochastique

Un système peut être représenté d'un pas de temps à un autre selon deux évolutions : une évolution déterministe utilisant des données d'entrées connues donc les niveaux d'eau dépendent des lâchers alors qu'une évolution stochastique utilisant des données d'entrées définies par un aléa, dans ce cas les variables d'entrée (apports) ne sont plus connus pour chaque pas de temps. Les phénomènes hydrologiques sont des phénomènes aléatoires ce qui impose toujours une évolution stochastique du système (Lebdi ,2007).

En outre, la formulation d'un modèle, se définit par:

**-Les états du système** : correspondant au niveau d'eau dans la retenue, au niveau de l'apport, de l'évaporation et des pertes dans la retenue.

**-Les commandes** : sont des variables sur lesquelles le gestionnaire peut agir, comme les lâchers.

**-La fonction d'évolution** : du système qui dépend du temps en plus des deux paramètres précédents:

$$V(t+1) = V(t) + Ap(t) - V_{evap}(t) - L(t) - Vd(t) \quad (1.37)$$

- $V(t)$  : volume de la retenue à l'instant  $t$  ;
- $Ap(t)$  : apport à la retenue à l'instant  $t$  ;
- $V_{\text{evap}}(t)$  : évaporation de la retenue à l'instant  $t$  ;
- $L(t)$  : lâcher à l'instant  $t$  ;
- $Vd(t)$  : déverse à l'instant  $t$ .

**-La fonction objectif** : permettant d'évaluer les performances d'un système en termes de défaillances ou de gains.

### **II.1.Discrétisation du réservoir par la théorie de MORAN**

Dans un réservoir les apports ne sont plus connus pour chaque pas de temps. Pour une décision de lâcher, la fonction d'évolution donnera plusieurs résultats possibles selon l'apport considéré. L'ensemble des stocks de la retenue est rendu discret par la théorie des réservoirs de Moran qui consiste à subdiviser l'état du réservoir en  $n$  classes égales.

### **II.2.Définition du modèle d'optimisation**

C'est un modèle mathématique qui permet de chercher la fonction objectif c'est-à-dire évaluer les performances du système en termes de défaillances ou de gains.

### **II.3.Optimisation par programmation dynamique stochastique (PDS)**

Pour faire une optimisation par programmation dynamique stochastique il faut tenir compte de :

#### **II.3.1. Le choix de la fonction objectif**

L'optimisation d'un système dépend de ses objectifs. Pratiquement, les objectifs de la gestion d'un barrage sont multiples. Dans le cas du barrage de Foum El Gherza l'objectif principal de sa gestion est la satisfaction de la demande en eau d'irrigation, en revanche cet ouvrage doit soutenir les étiages. Pour cela, le critère d'optimisation suivant, avec  $C^{(t)}$  comme fonction objectif est emprunté à (Lebdi, 2002).

-minimiser la non satisfaction des usagers et le déficit du remplissage (du déficit en eau relatif à un niveau de consigne).

$$C^{(t)} = \underbrace{\alpha \left[ \sum_{J=1}^M P_J \times \left( \frac{V^{(t+1)} - V_{\text{consigne}}}{V_{\text{max}}} \right)^2 \right]}_{\text{Critère fonction des apports}} + \underbrace{(1 - \alpha) \left( \frac{L^{(t)} - D^{(t)}}{D_{\text{max}}} \right)^2}_{\text{Critère déterministe}} \quad (1.38)$$

- $V^{t+1}$  : volume du réservoir au temps t+1 ;
- $P_J$  : probabilité d'apparition de l'apport J ;
- L : volume d'eau lâchée à l'aval du barrage ;
- D : demande en eau par le périmètre ;
- $\alpha$  : Facteur de pondération donnant un poids aux deux termes de l'expression "critère" ;
- $V_{\text{consigne}}$ : volume minimal jugé satisfaisant pour la gestion. Au dessus de ce niveau, on considère qu'il y a suffisamment d'eau et que nous pouvons lâcher de l'eau pour l'irrigation. En dessous, il faut faire attention aux lâchers, où nous pouvons satisfaire uniquement qu'une partie de la demande. En gestion interannuelle d'un grand barrage, il est souvent conseillé de prendre ce stock égal à la médiane des apports annuels (Lebdi, 2007),
- J : classes d'apports parmi les M classes possibles.

### II.3.2. Le processus markovien dans le cas de la gestion des barrages

Si nous sommes dans un cas où les apports sont indépendants les uns des autres, le concept de la chaîne de Markov permet d'estimer la probabilité d'obtenir certains apports à (t+1) à partir de la fonction de distribution de probabilité qui dépend uniquement de la valeur d'apport à t (Lebdi, 2007). Le passage d'un niveau à l'autre se fait selon une matrice de probabilités.

$$\text{Prob \{Ap(t) / Ap(t-1),.... Ap(0)\} = Prob \{Ap(t) / Ap(t-1)\}} \quad (1.39)$$

C'est-à-dire la connaissance de l'histoire du système jusqu'à l'instant actuel, son état présent résume toute l'information utile pour connaître son comportement futur (Pabiot, 1999). Le passage d'un pas de temps à un autre se fait selon une matrice de probabilités est exprimé par une matrice de transition contenant toutes les informations concernant l'évolution du système. La probabilité pour que les apports à (t+1) soient  $Ap_j(t+1)$  sachant que les apports à (t) étaient  $Ap_i(t)$ , est:

$$Ap_j(t+1) = Ap_i(t) \times P_{ij} \quad (1.40)$$

- $P_{ij}$  probabilité de transition d'un apport  $Ap_i$  à un apport  $Ap_j$

Avec :  $\sum_{j=1}^N P_{ij} = 1$   
 $0 \leq P_{ij} \leq 1$

### II.3.3. La relation fondamentale de l'optimisation par programmation dynamique stochastique

Le processus d'optimisation par PDS est basé sur l'équation de Bellman-Massé (1957). Cette équation est récursive car l'itération se fait par temps décompté. Elle permet d'optimiser le critère de performance en tenant compte des aléas des apports.

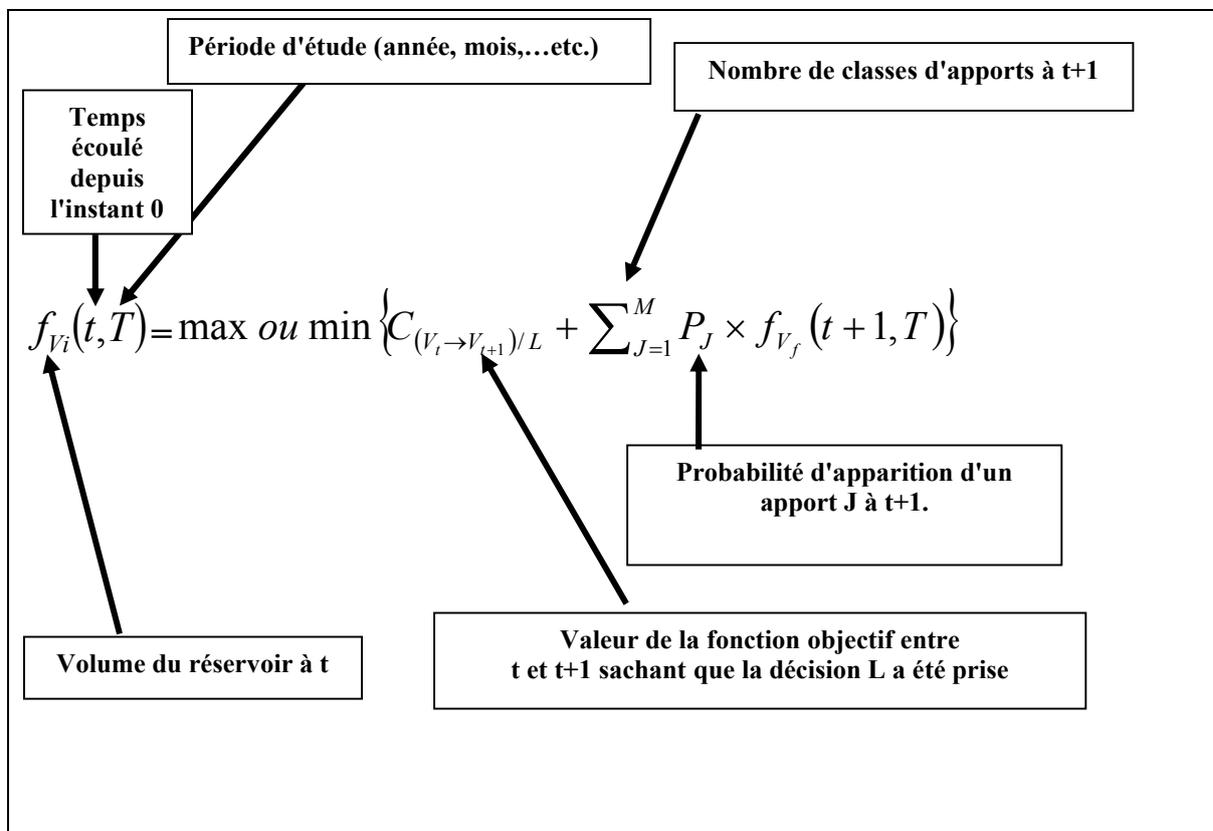


Fig.1.28. Equation de Bellman –Massé

Cette méthode est basée sur des "coûts" déduits du critère d'optimisation :

- $C_{(V_t - V_{t+1})/L}$  correspond au coût de transition entre l'état du stock  $V_t$  initial et  $V_{t+1}$  final.
- $f_{V_f}(t+1, T)$  correspond au coût des transitions pour les pas de temps à venir.

La valeur de Bellman-Massé à un instant donné permet d'en déduire sa valeur au pas de temps précédent ainsi que le meilleur lâcher correspondant. De plus cette méthode raisonne en temps décroissant ce qui permet de faire une gestion fonction du futur. Cette méthode permet aussi de ne pas tenir compte des événements passés (Lebdi, 2007). Pour obtenir une valeur unique du coût de transition, nous calculons l'espérance mathématique de tous les coûts.

$$C_{(V_t \rightarrow V_{t+1})/L} = \underbrace{\alpha \left[ \sum_{J=1}^M P_J \times \left( \frac{V^{(t+1)} - V_{consigne}}{V_{max}} \right)^2 \right]}_{\text{Coût espéré (dépend des apports aléatoires)}} + \underbrace{(1 - \alpha) \left( \frac{L^{(t)} - D^{(t)}}{D_{max}} \right)^2}_{\text{Coût instantané (dépend de variables déterminées)}} \quad (1.41)$$

Nous pouvons alors écrire la relation récursive comme suit:

$$f_{Vi}(t, T) = \min_L \left\{ \underbrace{(1 - \alpha) \left( \frac{L^{(t)} - D^{(t)}}{D_{max}} \right)^2}_{\text{Coût instantané}} + \underbrace{\left[ \sum_{J=1}^M P_J \times \left( \alpha \left( \frac{V^{(t+1)} - V_{consigne}}{V_{max}} \right)^2 + f_{Vi}(t+1, T) \right) \right]}_{\text{Coût total espéré}} \right\} \quad (1.42)$$

**-coût instantané :** est basé sur la satisfaction de la demande en eau. Il est dû à la décision de lâcher.

**-calcul du coût espéré:** Le coût espéré dépend de toutes les évolutions possible du volume du réservoir pour cela la garantie d'un stock consigne, pour cela on associe chaque transition à son espérance mathématique. Le coût espéré sera donc la somme des espérances des évolutions possibles du système.

### III. Elaboration d'un modèle de gestion optimisée

L'optimisation par programmation dynamique stochastique a été retenue car elle répond à la gestion désirée (un phénomène aléatoire), comme elle tient compte aussi des événements à venir.

L'élaboration d'un programme d'optimisation par programmation dynamique stochastique, nécessite de savoir si les apports liquides sont indépendants ou non.

#### III.1. Test d'indépendance des apports

Il existe plusieurs tests d'indépendance parmi ces tests on a choisi le test de Wald Wolfowitz.

Soient  $(x_1, \dots, x_n)$  les éléments de l'échantillon. :

$$\text{On a : } R = \sum_{i=1}^{i=n-1} x_i \cdot x_{i+1} + x_1 \cdot x_n \quad (1.43)$$

$$R = 5555.186$$

Si les éléments sont indépendants, R suit une distribution normale dont :

- la moyenne est égale à :

$$\bar{R} = \frac{S_1^2 - S_2}{n-1} \quad (1.44)$$

$$\text{Avec : } S_r = \sum_{i=1}^{i=n} X_i^r$$

$$- S_1 = \sum_{i=1}^{i=n} X_i^1 = 860.327.$$

$$- S_2 = \sum_{i=1}^{i=n} X_i^2 = 9758.116.$$

$$- S_3 = \sum_{i=1}^{i=n} X_i^3 = 236833.005.$$

$$- S_4 = \sum_{i=1}^{i=n} X_i^4 = 7568965.704.$$

$$\bar{R} = \frac{860.327^2 - 9758.116}{360-1}$$

$$\bar{R} = 2034.555$$

- la variance est égale à :

$$\text{Var R} = \frac{S_2^2 - S_4}{n-1} + \frac{S_1^4 - 4S_1^2 S_2 + 4S_1 S_3 + S_2^2 - 2S_4}{(n-1)(n-2)} - \bar{R}^2 \quad (1.45)$$

$$\text{Var } R = 5.184 \cdot 10^{11}$$

On teste l'indépendance de l'échantillon à partir de la formule suivante :

$$U = \frac{R - \bar{R}}{\sqrt{\text{Var}(R)}} \quad (1.46)$$

Si la valeur absolue de U est inférieure ou égale à 1,96 alors l'indépendance de l'échantillon peut être acceptée au niveau de signification de 5%.

Nous avons appliqué le test de Wald Wolfowitz sur la série d'apports mensuels de 1975/76 à 2004/05, nous obtenons une valeur de  $U = 0,005 < 1,96$  et  $U = 0.0003 < 1.96$  pour les apports annuels, alors nous pouvons dire qu'il y a une indépendance des apports entre chaque mois. De même qu'entre les apports de chaque année.

La procédure d'optimisation par P.D.S nécessite la discrétisation des variables d'états et leur représentation par un nombre fini des valeurs caractéristiques.

### III.2.Discrétisation des stocks et des apports

L'application de la P.D.S nécessite la discrétisation des apports ainsi que les stocks dans la retenue. L'ensemble des stocks du barrage est rendu discret par la théorie des réservoirs de Moran qui consiste à subdiviser l'état du réservoir en n classes égales ce nombre est choisi en fonction de la demande en eau ainsi que de la capacité de l'ordinateur. Et afin de faciliter la procédure d'optimisation, les apports seront discrétisés de la même manière que les stocks (Pabiot, 1999).

Dans notre cas le barrage est discrétisé en 128 niveaux avec des classes de 250 000 m<sup>3</sup>. Le volume consigne est égale à 20 000000 m<sup>3</sup> (soit 80 niveaux de discrétisation).

**Tableau 1.40.**Correspondance entre la demande mensuelle et des classes de discrétisation.

Mois	demande mensuelle	Correspondance de la demande en classes de 250 000 m <sup>3</sup>	Nombre de classe de 250 000 m <sup>3</sup>
Sep	3234392	3250000	13
Oct	2339544	2250000	9
Nov	1886729	1750000	8
Déc	1114068	1000000	4
Jan	1114068	1000000	4
Fev	1760947	1750000	7
Mar	2264074	2250000	9
Avr	2264074	2250000	9
Mai	2264074	2250000	9
Jui	2339544	2250000	9
Juil	3899239	4000000	16
Aou	3899239	4000000	16

Les niveaux sont calculés par la relation suivante :

**Niveau n** : volume de la retenue de l'intervalle **250 000. (n-1)± 250 000/2**

### III.3. Fréquences d'apports

Les apports liquides sont établis d'après des réalisations historiques reconstituées par A.C.P, la probabilité d'un apport est considérée comme étant la fréquence empirique d'apparition des réalisations observées appartenant à une classe déterminée

### III.4. Détermination des sorties

- **Lâchers** : L'unité des lâchers d'eau correspond à l'unité de discrétisation, elle est  $250000 \text{ m}^3$ .
- **Evaporation** : L'évaporation mensuelle est liée au volume d'eau dans la retenue par l'équation (1.35)
- **Infiltrations** : Les infiltrations sont liées au volume d'eau dans la retenue par l'équation (1.36).
- **Demande en eau** : L'irrigation rationnelle des palmeraies a pour but d'assurer pendant toute l'année et surtout pendant l'été, saison durant laquelle les exigences sont les plus grandes, les quantités d'eau nécessaires à une évolution normale des arbres et à l'élaboration d'une bonne récolte (Ben Abdallah, 1990).

Pour assurer cette demande en eau on suppose que l'irrigation se fait sur la base d'un débit fictif continu de  $0.9 \text{ l/s/ha}$  à la borne (Slimani, 1998).

### III.5. Bilan hydrique

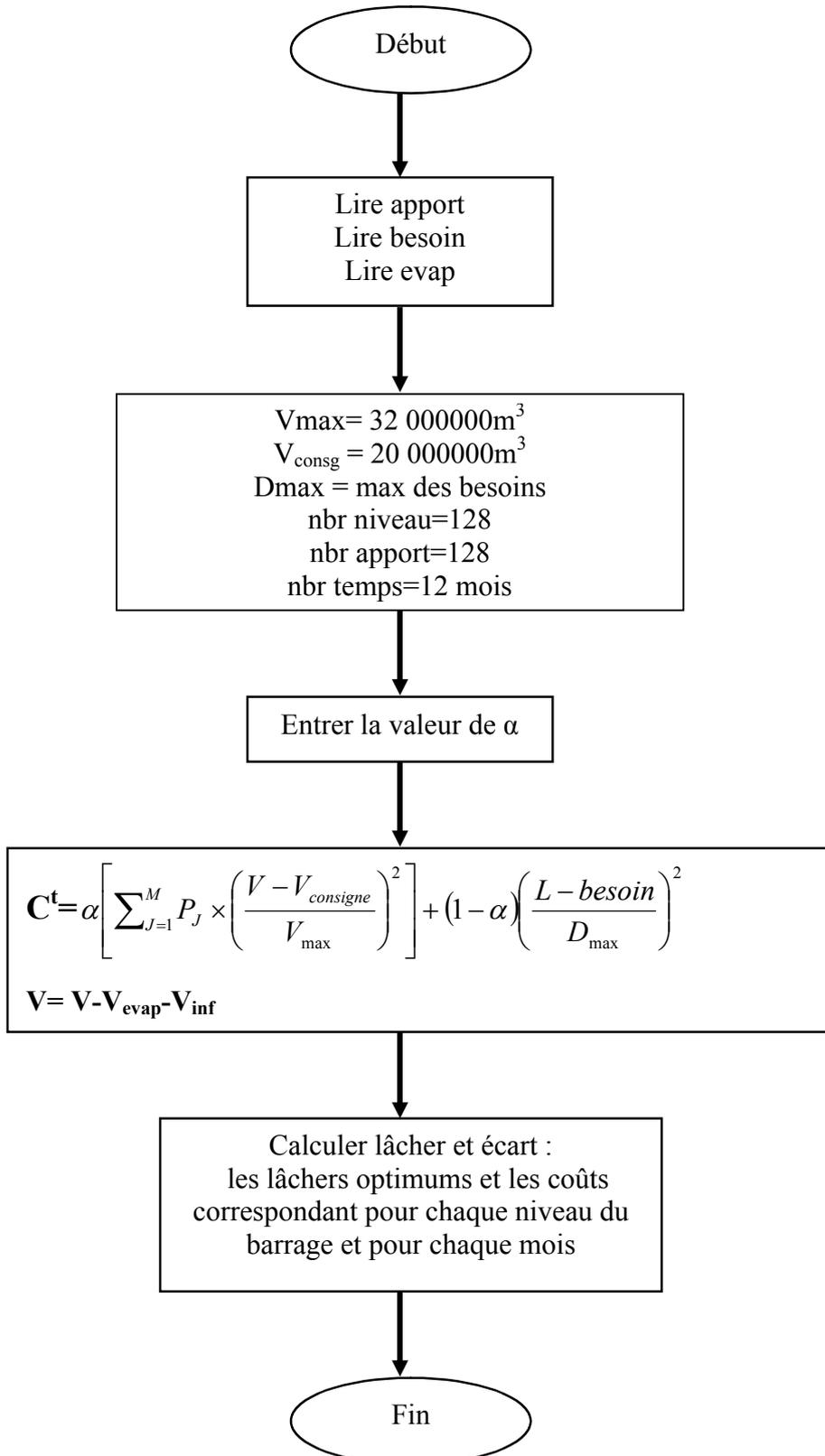
Sur un intervalle de temps donné, l'équation générale du bilan hydrique d'une retenue découle de l'application du principe de la conservation des volumes d'eau (Lebdi, 2002). Elle peut s'écrire :

$$V = (V_r + V_p) - (V_{\text{evap}} + V_{\text{inf}} + V_u) \quad (1.47)$$

- V : variation du stock ;
- V<sub>r</sub> : apports liquides à la retenue ;
- V<sub>p</sub> : apports des pluies directes sur la retenue égales à la lame d'eau précipitée dans le mois par la surface du plan d'eau ;

- $V_{\text{evap}}$  : Volume évaporé ;
- $V_{\text{inf}}$  : Volume infiltré ;
- $V_u$  : Volume lâché pour l'irrigation.

### III.6. Organigramme du programme d'optimisation



### **1. Les entrées du programme**

- apport : matrice Stock-Apport-Probabilité ;
- besoin : matrice de la demande en eau en  $m^3$  ;
- evap : matrice des coefficients de l'évaporation.

### **2. Les variables du programme**

- L : décision de lâcher en  $m^3$  ;
- Vmax : capacité maximale du réservoir en  $m^3$  ;
- Vconsg: volume de consigne en  $m^3$  ;
- Dmax : demande mensuelle maximale en  $m^3$  ;
- $\alpha$  : coefficient de pondération des objectifs de gestion (0 à 1).

### **3. Les sorties du programme**

- coûtO : matrice résultats d'optimisation en coût optimale pour chaque niveau d'eau dans le barrage et chaque mois de gestion.
- lâcherO: matrice résultats d'optimisation en lâcher optimale pour chaque niveau d'eau dans le barrage et chaque mois de gestion.

## **IV. Simulation**

### **IV.1. Définition du modèle de simulation**

C'est un modèle mathématique qui permet de juger du choix d'une combinaison quelconque de paramètres. Il permet d'identifier la meilleure solution du problème original. Par conséquent, La simulation servira alors d'outil de mesure de performances de la règle trouvée par optimisation.

### **IV.2.Gestion des risques par simulation**

L'optimisation précédente permet d'établir les lâchers les moins pénalisants par rapport à un critère choisi qui dépend d'un paramètre de gestion alpha. Même si la règle de gestion est optimale, le stock d'eau peut rentrer dans un état de défaillance. Il est nécessaire donc de calculer la règle de gestion optimisée pour plusieurs valeurs d'alpha. Et afin de juger la qualité de la règle de gestion il faut introduire les indices de performance qui doivent traduire les incidents qui ont eu lieu lors de la simulation.

### IV.3. Incidents et indices de performance

Il existe de nombreux indices de performance, nous allons donner trois types d'incidents selon (Lebdi, 2002):

- **La défaillance du stock** : l'eau atteint un niveau inférieur où il ne reste que la tranche morte du barrage.
- **La déverse** : l'eau se trouve au niveau du réservoir.
- **La non satisfaction de la demande** : les lâchers d'eau n'arrivent pas à satisfaire les demandes.

Les incidents indiqués ci-dessus peuvent être décrits selon trois indices de performance caractérisant l'intensité, la durée et la fréquence du phénomène:

- **Le risque (fréquence)**: probabilité d'avoir l'un des trois incidents précédents.
- **La vulnérabilité (intensité)** : volume perdu pendant la formation de l'incident.
- **La résilience (durée)** : temps de retour à un état normal après un incident.

Les indices de performances sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau 1.41.**Indices de performance.

<b>Risque (probabilité d'un événement)</b>	<b>Vulnérabilité (volume moyen annuel)</b>	<b>Résilience (retour à un état normal)</b>
Risque de défaillance(RDF)	Vulnérabilité de lâchers non agricoles(VSUP)	Résilience de défaillance(RESDF)
Risque de déverse(RDV)	Vulnérabilité de déverse(VDV)	Résilience de déverse(RESDV)
Risque de non satisfaction de la demande(RBN)	Vulnérabilité de non satisfaction de la demande (VBN)	

### IV.4. Détermination de la défaillance du stock et de la déverse

- NC<sub>1</sub> : Niveau de consigne au-delà duquel il y a un incident ;
- NC<sub>2</sub> : Niveau de consigne jugé satisfaisant par rapport à un incident ;
- NC<sub>1</sub> déverse : Volume maximal dans le barrage (32 000000m<sup>3</sup>).
- NC<sub>2</sub> déverse = NC<sub>1</sub> déverse - apport médian maximal sur les 30 années reconstituées.  
=32 000000 – 4 000000 = 28 000000 m<sup>3</sup>
- NC<sub>1</sub>défaillance : 0 m<sup>3</sup>.

-NC<sub>2</sub> défaillance = NC<sub>1</sub> défaillance +  $\frac{1}{3}$  du volume de la retenue (nous considérons que nous sommes dans un état de défaillance lorsque les  $\frac{2}{3}$  du volume de la retenue ne sont pas disponible) = 10 000000 m<sup>3</sup>.

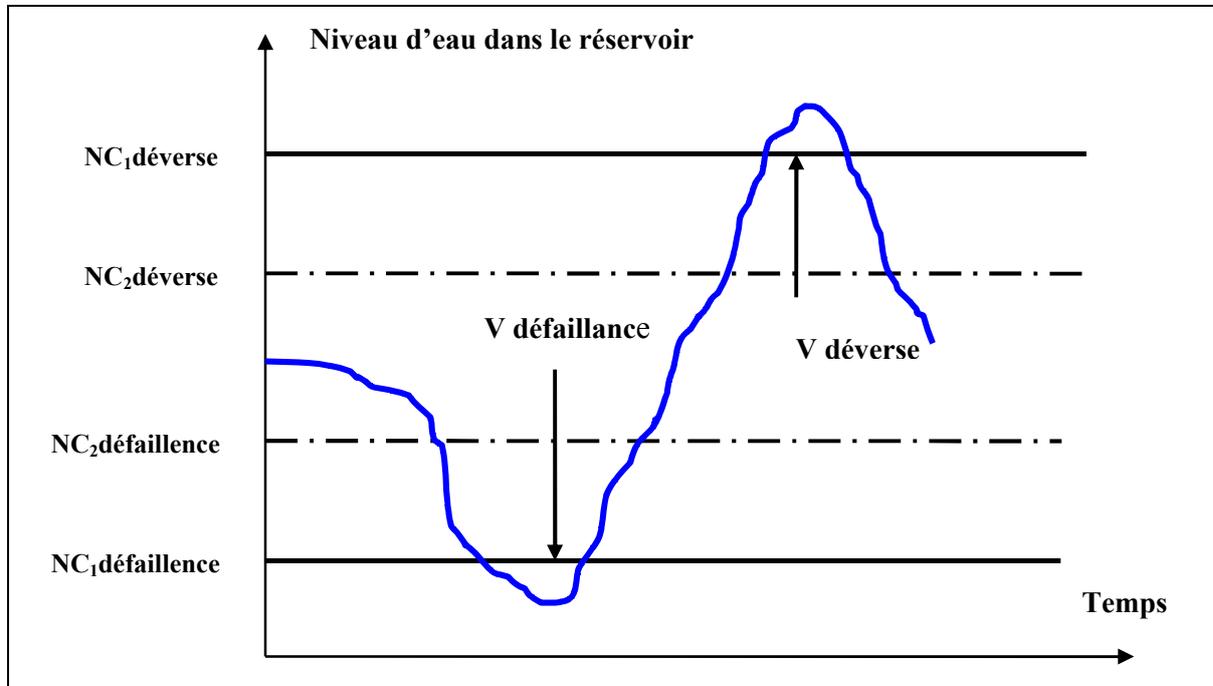


Fig.1.29. schéma de la vulnérabilité et de la résilience pour une déverse et une défaillance.

#### IV.5. Détermination de la demande non satisfaite

Selon les observations faites par les chercheurs sur le terrain la demande non satisfaite est déterminée par un taux de non satisfaction de la demande en dessous duquel nous considérons le système en incidence (fourniture <60% de la demande).

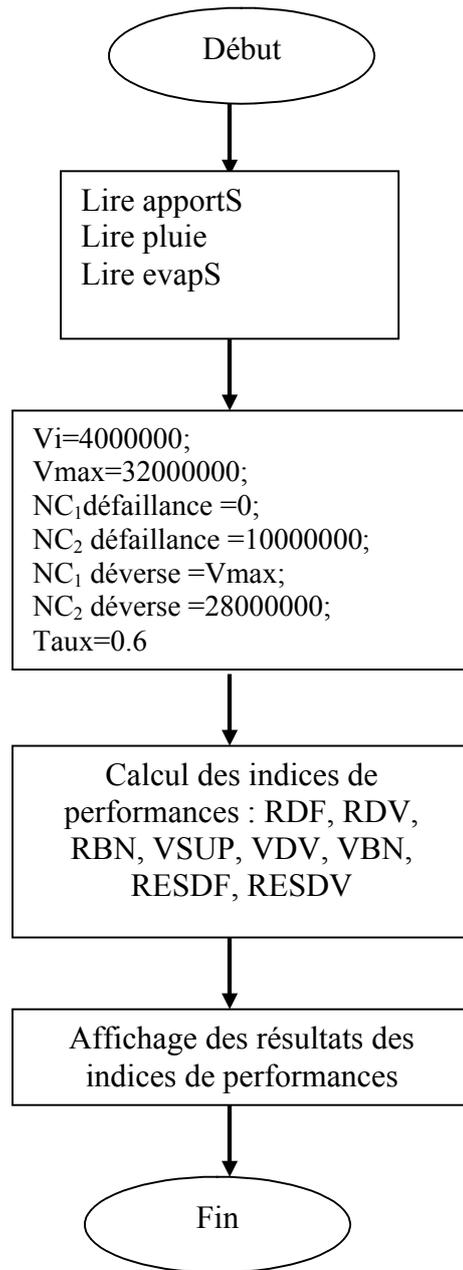
-Risque de non-satisfaction = (temps lorsque demande <0,6)/ temps de simulation.

-Vulnérabilité de non-satisfaction = moyenne des volumes d'eau annuels qui n'ont pas satisfait la demande.

#### IV.6. Détermination de l'eau lâchée en plus de la demande agricole

Vulnérabilité de lâchers non agricoles représente la moyenne des volumes annuels lâchers en surplus de la demande.

### IV.7.Organigramme du programme de simulation



#### 1. Les entrées du programme

- apportS: matrice des apports mensuels reconstitués par A.C.P sur 30 années ;
- pluie : matrice des pluies moyennes mensuelles reconstituées par A.C.P sur 30 années ;
- evapS : matrice des coefficients mensuels a et b.

#### 2. Les variables du programme-

- besoinS : Matrice contenant les demandes en eau mensuelle(12,1).
- lâcherO : Lâchers optimaux pour  $\alpha$  (résultat de l'optimisation)
- Vi : stock d'eau initial en début de simulation.

- NC<sub>1</sub>défaillance : niveau de consigne correspondant au risque de défaillance en m<sup>3</sup> (0 m<sup>3</sup>).
- NC<sub>2</sub> défaillance : niveau de consigne correspondant à un stock jugé satisfaisant par rapport à la défaillance m<sup>3</sup> (10 000000 m<sup>3</sup>).
- NC<sub>1</sub> déverse : niveau de consigne correspondant au risque de déverse du stock en m<sup>3</sup> (32 000000m<sup>3</sup>).
- NC<sub>2</sub> déverse = niveau de consigne correspondant à un stock jugé satisfaisant par rapport à la déverse en m<sup>3</sup> (28 000000m<sup>3</sup>).

### 3. Les sorties du programme

-Stockfin : matrice des stocks finaux obtenus par la simulation.

Les résultats des indices de performances :

**Tableau 1.42.**Indices de performance en fonction de la pénalité  $\alpha$ .

<b>Alpha</b>	<b>RDF (%)</b>	<b>RDV (%)</b>	<b>RBN (%)</b>	<b>VDV (m<sup>3</sup>)</b>	<b>VBN (m<sup>3</sup>)</b>	<b>VSUP (m<sup>3</sup>)</b>	<b>RESDF (mois)</b>	<b>RESDV (mois)</b>
<b>0</b>	0,46	0,46	38,71	375121	8848744	0	18	2
<b>0.1</b>	0,33	1,25	37,46	450290	8446244	0	9	3
<b>0.2</b>	0,71	1,5	41,38	620306	9126244	0	21	3
<b>0.3</b>	0,04	0,79	37,13	539700	8058744	0	7	2
<b>0.4</b>	0,46	2,38	37,5	892740	8101244	0	11	3
<b>0.5</b>	0,21	1,79	45,33	911287	9597494	0	12	4
<b>0.6</b>	0,04	1,67	44,54	747096	9541244	0	4	4
<b>0.7</b>	0	1,54	40,46	1655497	8288744	0	0	3
<b>0.8</b>	0	1,29	46,46	1274374	9138119	0	0	3
<b>0.9</b>	0	1,13	52,88	1204732	10651869	0	0	2
<b>1</b>	0	1,29	55,13	1297970	10694982	1468738	0	2

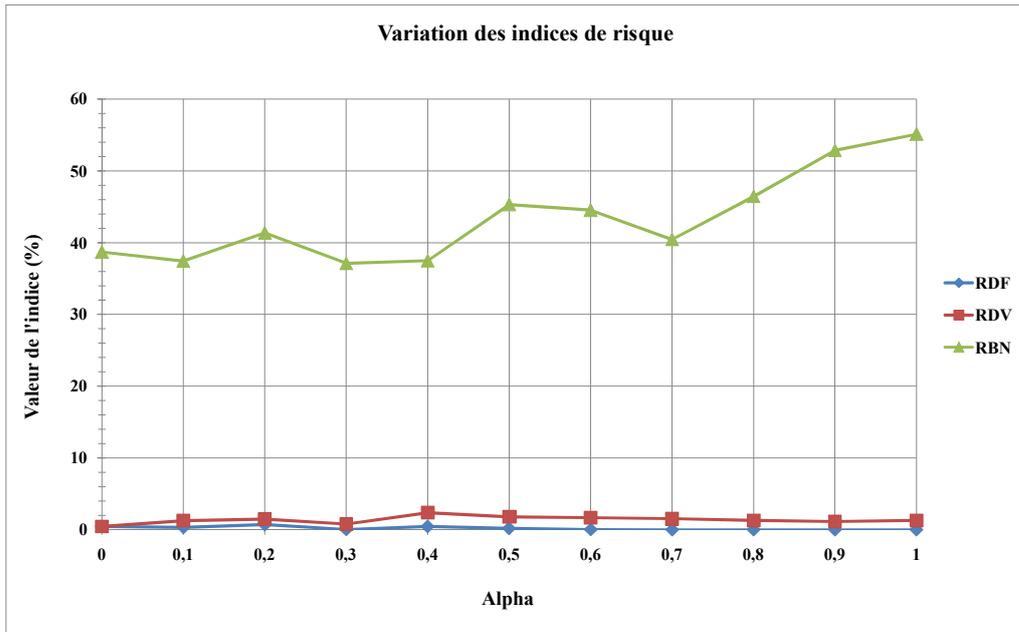


Fig.1.30. Variation des indices de risque en fonction d'alpha.

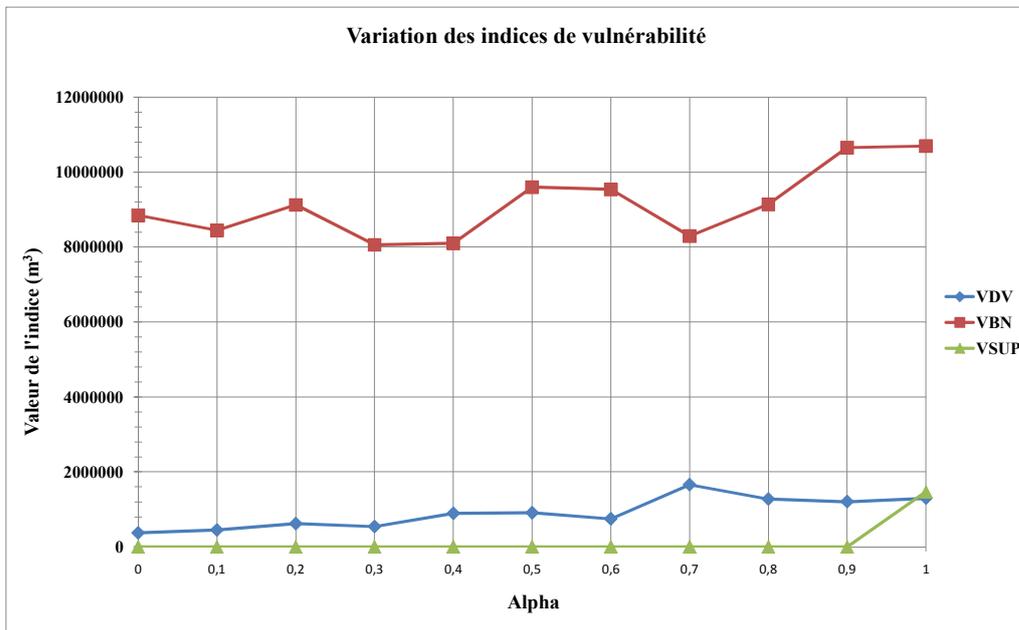


Fig.1.31. Variation des indices de vulnérabilité en fonction d'alpha.

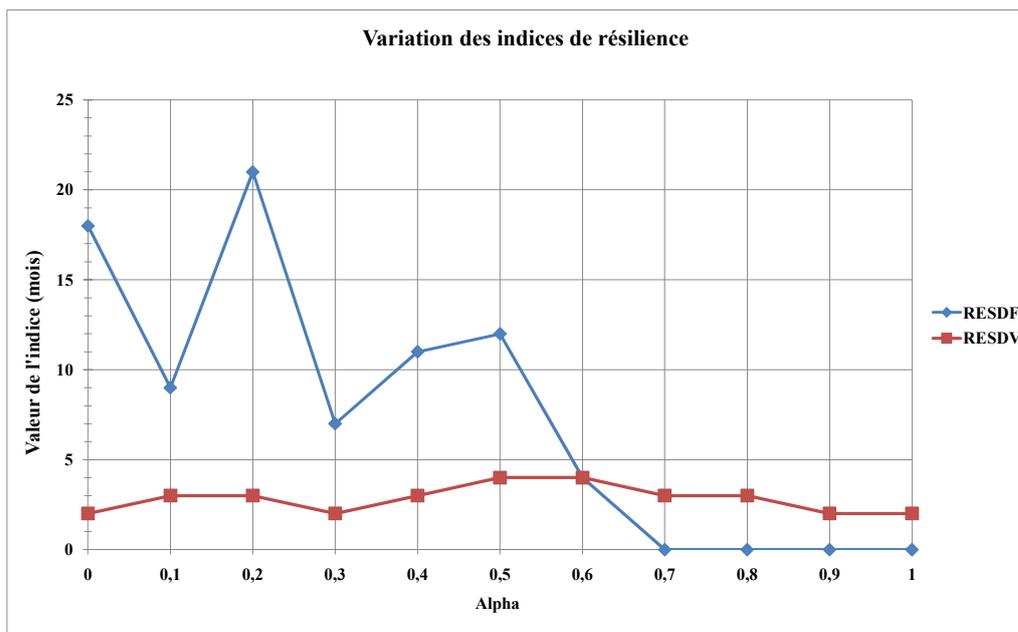


Fig.1.32. Variation des indices de résilience en fonction d'alpha.

#### IV.8. Interprétation des résultats

-L'indice risque de défaillance (RDF) montre des minimums pour les valeurs d'alpha : 0.7 à 0.9.

-L'indice de non satisfaction de la demande (RBN) montre un minimum pour la valeur d'alpha : 0.3.

- L'indice risque de déversement (RDV) montre un minimum pour la valeur d'alpha : 0.3.

-L'indice de la résilience de déverse(RESDV) montre des minimums pour les valeurs d'alpha : 0.3, 0.9.

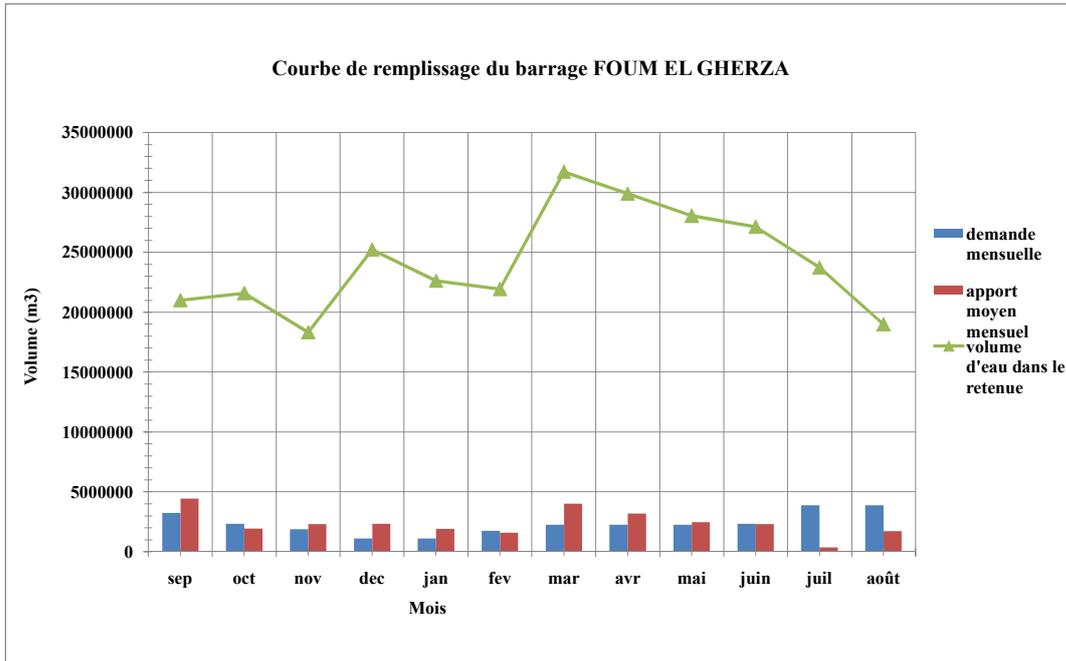
-L'indice de la résilience de défaillance(RESDF) montre des minimums pour les valeurs d'alpha : 0.7 à 0.9.

- L'indice de la vulnérabilité de déverse(VDV) montre un minimum pour la valeur d'alpha : 0.1.

- L'indice de la vulnérabilité de non satisfaction de la demande (VBN) montre un minimum pour la valeur d'alpha : 0.3.

- L'indice de la vulnérabilité de lâchers non agricoles(VSUP) montre des minimums pour les valeurs d'alpha : 0.1 à 0.9.

D'après les résultats précédents nous pouvons constater que la règle acceptable, donc la moins pénalisante est celle pour alpha égale à 0,3.



**Fig.1.33.** Courbe de remplissage du barrage FOUM EL GHERZA obtenue par la programmation dynamique stochastique.

# ***CONCLUSION GENERALE***

*Par ce travail nous avons essayé de définir des règles de gestion optimisées pour le barrage de FOUM EL GHERZA. L'étude de l'hydrosystème du bassin versant et du barrage, a donc été menée pour définir le fonctionnement des différentes composantes du système. Les différents termes du bilan hydrique ont été déterminés tel que l'évaporation, infiltration, pluies, lâché pour irrigation, vidange et apport liquide.*

*Les apports liquides ont été reconstitués par différents type de modèles tel que le modèle auto- régressif, le modèle conceptuel et l'analyse en composantes principales.*

- 1- le modèle auto- régressif :** *a été rejeté car la matrice des coefficients de corrélation n'a pas donné une bonne régression linéaire entre les mois.*
- 2- le modèle conceptuel :** *a été rejeté parce que les résultats obtenues du ne sont pas satisfaisants selon le critère de Nash pour différentes variantes des stations pluviométriques et hydrométriques du bassin versant.*
- 3- l'analyse en composantes principales :** *la procédure de l'analyse en composante principale permet de tirer l'essentiel de l'information contenue dans les données, et donne en conséquence une représentation plus facile à interpréter. Les résultats obtenus sont acceptable selon le critère de Nash (Nash = 85.74 %).*

*Le modèle de gestion optimale du barrage FOUM EL GHERZA consiste à établir les lâchers optimales en vue de satisfaire au mieux les besoins d'irrigation. La programmation dynamique stochastique nous a permis d'élaborer un outil d'aide à la décision et définir les règles de gestion optimales du barrage de FOUM EL GHERZA, dont il faut tenir compte des objectifs essentiels correspondant d'une part à la satisfaction de la demande agricole et à la garantie d'un stock objectif d'autre part. Ces objectifs sont soumis aux facteurs climatiques, à savoir la rareté de la ressource qui dépend des régimes hydropluviométriques. Ce modèle a été conçu en deux parties, une première partie d'optimisation qui nous donne les lâchers optimums et les coûts correspondants pour chaque niveau du barrage et une deuxième partie de simulation qui permet de juger les résultats obtenus par l'optimisation selon des incidents et des indices de performances, dans notre étude nous n'avons retenus que trois types d'incidents qui sont : la défaillance du stock, la déverse et la non satisfaction de la demande. Nous sommes arrivés à la variante de gestion ( $\alpha=0.3$ ) qui semble la moins pénalisante d'une part pour satisfaire la demande en eau des agriculteurs et d'autre part de garder toujours un stock (niveau d'eau) objectif dans le barrage.*

TABLES DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

<b>Fig .1.1.</b> Présentation du bassin versant Oued El Abiod.....	10
<b>Fig.1.2.</b> Courbe hypsométrique du B.V l’Oued El Abiod.....	12
<b>Fig .1.3.</b> Réseau hydrographique du bassin versant l’Oued El Abiod.....	18
<b>Fig .1.4.</b> Hydrogamme de la crue de 26 et 27 avril 2006.....	21
<b>Fig.1.5.</b> Régression linéaire du gradient altitudinal des précipitations .....	25
<b>Fig 1.6.</b> La carte des isoyètes.....	27
<b>Fig 1.7.</b> Variation de la précipitation moyenne mensuelle.....	36
<b>Fig.1.8.</b> Hydrogramme de crues exceptionnelles.....	43
<b>Fig.1.9.</b> Variation mensuelle de la température.....	44
<b>Fig.1.10.</b> Variation mensuelle de la vitesse du vent.....	46
<b>Fig.1.11.</b> Coupe géologique du bassin versant.....	52
<b>Fig.1.12.</b> Carte d'occupation du sol dans le bassin versant.....	56
<b>Fig.1.13.</b> La courbe capacité-hauteur.....	60
<b>Fig.1.14.</b> La courbe capacité-surface.....	61
<b>Fig.1.15.</b> Variation des pluies moyennes mensuelles.....	62
<b>Fig.1.16.</b> Architecture du Modèle GR2M.....	67
<b>Fig.1.17.</b> Eboulis des valeurs propres.....	74
<b>Fig.1.18.</b> Cercle de corrélation Axe I et Axe II.....	75
<b>Fig.1.19.</b> Simulation par ACP des apports liquides du barrage Foum El Gherza.....	77
<b>Fig.1.20.</b> Éboulis des valeurs propres.....	80
<b>Fig.1.21.</b> Cercle de corrélation Axe I et Axe II.....	81
<b>Fig.1.22.</b> Simulation par ACP des précipitations du barrage Foum El Gherza.....	81
<b>Fig.1.23.</b> variation mensuelle de l’évaporation.....	82
<b>Fig.1.24.</b> variation mensuelle des fuites.....	86
<b>Fig.1.25.</b> variation des fuites en fonction du volume du réservoir.....	87
<b>Fig.1.26.</b> Comparaison des besoins et des lâchers d’eau des palmiers.....	89
<b>Fig.1.27.</b> Comparaison des apports annuels et des lâchers historiques d’eau des palmiers .....	89
<b>Fig.1.28.</b> Equation de Bellman –Massé.....	94

**Fig.1.29.** schéma de la vulnérabilité et de la résilience pour une déverse et une défaillance.  
.....102

**Fig.1.30.** Variation des indices de risque en fonction d'alpha.....105

**Fig.1.31.** Variation des indices de vulnérabilité en fonction d'alpha.....105

**Fig.1.32.** Variation des indices de résilience en fonction d'alpha.....106

**Fig.1.33.** Courbe de remplissage du barrage FOUM EL GHERZA obtenue par la  
programmation dynamique stochastique.....107

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau 1.1.</b> Variation de surface en fonction de l'altitude.....	13
<b>Tableau 1.2.</b> Variation de l'indice de pente global.....	15
<b>Tableau 1.3.</b> Classification de l'O.R.S.T.O.M du relief.....	16
<b>Tableau 1.4.</b> Observation de la crue du 26 avril 2006.....	20
<b>Tableau 1.5.</b> Observation de la crue du 27 avril 2006.....	20
<b>Tableau 1.6.</b> Résultats morphométriques et géométriques.....	22
<b>Tableau 1.7.</b> Caractérisation des stations pluviométriques et hydrométrique.....	24
<b>Tableau 1.8.</b> La pluie moyenne annuelle 1972/73-1993/94.....	26
<b>Tableau 1.9.</b> Estimation de la lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin par la méthode des isohyètes.....	28
<b>Tableau 1.10.</b> Les paramètres de la loi de Gumbel (FOUM EL GHERZA).....	30
<b>Tableau 1.11.</b> Précipitations moyennes mensuelles .....	35
<b>Tableau 1.12.</b> Représentation fréquentielle des pluies journalières maximales.....	37
<b>Tableau 1.13.</b> Pluies de courte durée pour différentes fréquences.....	38
<b>Tableau 1.14.</b> Calcul de $Q_{jmax}$ par les différentes formules empiriques.....	39
<b>Tableau 1.15.</b> Hydrogamme de crue pour $Q_{jmax}$ de différentes fréquences.....	42
<b>Tableau 1.16.</b> Températures moyennes mensuelles interannuelles.....	43
<b>Tableau 1.17.</b> Humidité relative de l'air.....	45
<b>Tableau 1.18.</b> Mesure des vitesses du vent.....	45
<b>Tableau 1.19.</b> Evolution du coefficient correctif mensuel $K_m$ .....	47
<b>Tableau 1.20.</b> Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation.....	47
<b>Tableau 1.21.</b> ETP mensuelle selon ANRH-Penman à la station Mchouneche ( $K_r=1.26$ , $y=186,8$ ).....	48
<b>Tableau 1.22.</b> ETP mensuelle selon ANRH-Penman à la station Médina ( $K_r=1.26$ , $y=231.10$ ).....	48
<b>Tableau 1.23.</b> Les caractéristiques des matériaux du bassin versant.....	51
<b>Tableau 1.24.</b> Caractéristiques de chaque bassin.....	57
<b>Tableau 1.25.</b> Points de référence pour la constitution des relations hauteur/surface et hauteur/volume.....	59
<b>Tableau 1.26.</b> Analyse statistique des précipitations mensuelles du barrage de Foug El Gherza.....	62

<b>Tableau 1.27.</b> matrice des coefficients de corrélations.....	63
<b>Tableau 1.28.</b> Critère de Nash et qualité.....	66
<b>Tableau 1.29.</b> Résultat du critère de Nash.....	68
<b>Tableau 1.30.</b> Moyenne et Ecart type des variables.....	72
<b>Tableau 1.31.</b> Matrice de corrélation entre les variables.....	73
<b>Tableau 1.32.</b> Valeur propre et variance cumulée.....	73
<b>Tableau 1.33.</b> Corrélations entre variables et axes principaux.....	74
<b>Tableau 1.34.</b> Moyenne et Ecart type des variables.....	78
<b>Tableau 1.35.</b> Matrice de corrélation entre les variables.....	79
<b>Tableau 1.36.</b> Valeur propre et variance cumulée.....	79
<b>Tableau 1.37.</b> Corrélations entre variables et axes principaux.....	80
<b>Tableau 1.38.</b> Linéarisation des flux évaporatifs en fonction du volume.....	83
<b>Tableau 1.39.</b> volumes des vidanges.....	84
<b>Tableau 1.40.</b> Correspondance entre la demande mensuelle et des classes de Discrétisation.....	97
<b>Tableau 1.41.</b> Indices de performance.....	101
<b>Tableau 1.42.</b> Indices de performance en fonction de la pénalité $\alpha$ .....	104

# ANNEXES

## Annexe 1

### Coefficient correctif régional $K_r$

Nom	$K_r$ -cor	$K_r$	Cor	Nom	$K_r$ -cor	$K_r$	Cor	Nom	$K_r$ -cor	$K_r$	Cor
Aïn Sefra	1.21	1.11	9%	DellysAfir	0.87	0.87	0%	Mostaganem	0.87	0.87	0%
Annaba	0.91	0.91	0%	Djelfa	1.10	1.04	5%	Msila	1.12	1.12	0%
Arzew	0.97	0.97	0%	El Keiter	1.15	1.24	-7%	Naama	1.11	1.11	0%
Barika	1.24	1.24	0%	El Bayadh	1.23	1.23	0%	Oran	0.99	0.99	0%
Batna	1.12	1.12	0%	ElMilia	0.79	0.79	0%	Oum El Bouaghi	0.92	0.92	0%
Bordj BouArreridj	1.07	1.07	0%	Ghazaouet	0.81	0.81	0%	Saida	1.01	1.01	0%
Béchar	1.32	1.32	0%	Guelma	0.83	0.83	0%	Setif	1.04	1.04	0%
Bejaia	0.92	0.92	0%	Jijel Aer	0.79	0.79	0%	Sidi Bel Abbes	0.94	0.94	0%
Benisaf	0.88	0.88	0%	Jijel Port	0.79	0.79	0%	Skikda	0.86	0.86	0%
Biskra	1.26	1.26	0%	Ksar Chellala	1.09	1.09	0%	Souk Ahras	0.99	0.99	0%
Bou saada	1.10	0.93	18%	Maghnia	0.93	0.93	0%	Tebessa	1.00	1.00	0%
Bouira	1.04	1.04	0%	Mascara	0.95	0.95	0%	Tenes	0.95	0.95	0%
Chlef	0.93	0.93	0%	Mechrea	1.14	1.14	0%	Tiaret	1.08	1.14	-6%
Constantine	0.91	0.91	0%	Medea	1.05	1.05	0%	Tizi Ouzou	0.83	0.83	0%
Dar El Beida	0.89	0.89	0%	Miliana	0.97	0.97	0%	Tlemcen	0.93	0.93	0%

## Annexe 2

### Etude statistique des précipitations moyennes annuelles par La loi de Gumbel (MEDINA)

Valeur de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique
527.4	225.1	1	0.015	-1.440	225.1	217.9539
523.6	236.4	2	0.044	-1.138	236.4	245.5852
244.6	244.6	3	0.074	-0.959	244.6	261.9609
482.9	251.3	4	0.103	-0.821	251.3	274.6051
658.7	251.6	5	0.132	-0.704	251.6	285.3367
331.7	252	6	0.162	-0.600	252	294.911
388.6	254.4	7	0.191	-0.504	254.4	303.7234
546.4	280.4	8	0.221	-0.413	280.4	312.011
521.3	316.6	9	0.250	-0.327	316.6	319.9303
345.2	318.7	10	0.279	-0.243	318.7	327.5925
280.4	331.7	11	0.309	-0.161	331.7	335.0816
373.6	345.2	12	0.338	-0.081	345.2	342.4645
517.2	347.1	13	0.368	-0.001	347.1	349.7973
465.3	348.7	14	0.397	0.079	348.7	357.1295
380.1	360.9	15	0.426	0.160	360.9	364.5064
236.4	373.6	16	0.456	0.241	373.6	371.9721
434.2	380.1	17	0.485	0.324	380.1	379.5705
512.4	388.6	18	0.515	0.409	388.6	387.3475
420	420	19	0.544	0.497	420	395.3527
251.3	434.2	20	0.574	0.587	434.2	403.6415
537.1	465.3	21	0.603	0.681	465.3	412.2774
527.2	482.9	22	0.632	0.780	482.9	421.3354
318.7	483.3	23	0.662	0.885	483.3	430.9063
483.3	487.7	24	0.691	0.996	487.7	441.1032
360.9	512.4	25	0.721	1.116	512.4	452.0708
251.6	517.2	26	0.750	1.246	517.2	463.9995
347.1	521.3	27	0.779	1.389	521.3	477.1498
487.7	523.6	28	0.809	1.550	523.6	491.8918
225.1	527.2	29	0.838	1.735	527.2	508.7798
540.7	527.4	30	0.868	1.952	527.4	528.7023
316.6	537.1	31	0.897	2.220	537.1	553.2219
348.7	540.7	32	0.926	2.572	540.7	585.5032
252	546.4	33	0.956	3.098	546.4	633.7201
254.4	658.7	34	0.985	4.212	658.7	735.7519

### *Annexe 3*

#### Etude statistique des précipitations moyennes annuelles par La loi de Gumbel (TKOUT)

Valeur de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique
101	10	1	0.016	-1.418	10	33.19286
121	44	2	0.048	-1.108	44	62.95645
209	52	3	0.081	-0.923	52	80.72086
52	98	4	0.113	-0.780	98	94.51637
44	101	5	0.145	-0.657	101	106.2881
222	121	6	0.177	-0.548	121	116.8461
522	134	7	0.210	-0.446	134	126.616
177	149	8	0.242	-0.350	149	135.8548
172	156	9	0.274	-0.258	156	144.7341
330	165	10	0.306	-0.168	165	153.3774
290	170	11	0.339	-0.079	170	161.8802
170	172	12	0.371	0.008	172	170.3207
156	177	13	0.403	0.096	177	178.7669
10	208	14	0.435	0.185	208	187.2814
278	209	15	0.468	0.275	209	195.9247
287	209	16	0.500	0.367	209	204.7587
209	215	17	0.532	0.461	215	213.8489
215	222	18	0.565	0.559	222	223.2681
356	237	19	0.597	0.661	237	233.0998
382	263	20	0.629	0.769	263	243.4435
208	268	21	0.661	0.883	268	254.4211
294	278	22	0.694	1.005	278	266.1872
268	287	23	0.726	1.138	287	278.9442
165	290	24	0.758	1.284	290	292.9673
263	294	25	0.790	1.447	294	308.6467
552	304	26	0.823	1.633	304	326.5659
98	330	27	0.855	1.853	330	347.6585
304	356	28	0.887	2.122	356	373.5659
149	382	29	0.919	2.476	382	407.6106
237	522	30	0.952	3.004	522	458.3733
134	552	31	0.984	4.119	552	565.6144

#### *Annexe 4*

#### **Etude statistique des précipitations moyennes annuelles par La loi de Gumbel (TIFELFEL)**

<b>Valeur de départ</b>	<b>Valeurs classées</b>	<b>Ordre de classement</b>	<b>Fréquence expérimentale</b>	<b>Variable réduite</b>	<b>Valeur expérimentale</b>	<b>Valeur théorique</b>
133	48	1	0.028	-1.276	48	54.36751
109	69	2	0.083	-0.910	69	71.46994
190	80	3	0.139	-0.680	80	82.2203
238	82	4	0.194	-0.493	82	90.94953
209	97	5	0.250	-0.327	97	98.73219
82	104	6	0.306	-0.170	104	106.0366
206	109	7	0.361	-0.018	109	113.131
164	130	8	0.417	0.133	130	120.2033
97	132	9	0.472	0.287	132	127.4103
130	133	10	0.528	0.448	133	134.9055
69	133	11	0.583	0.618	133	142.8619
154	154	12	0.639	0.803	154	151.4974
80	164	13	0.694	1.009	164	161.1172
48	190	14	0.750	1.246	190	172.1913
132	206	15	0.806	1.531	206	185.5302
133	209	16	0.861	1.900	209	202.7584
259	238	17	0.917	2.442	238	228.0526
104	259	18	0.972	3.569	259	280.7341

## Annexe 5

### Evaporation mensuelle du barrage de Foum El Gherza en (mm)

Années	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	jui	juil	aou
75/76	279.84	170.49	81.43	65.13	114.82	104.93	147.21	222.27	282.46	356.25	393.89	399.03
76/77	285.62	219.42	108.96	91.05	68.87	108.71	173.55	211.30	269.30	331.57	422.08	365.75
77/78	240.78	224.24	106.33	77.98	99.13	148.27	228.95	270.66	357.75	327.98	356.81	349.76
78/79	298.91	288.28	181.36	133.86	97.49	127.17	192.91	230.52	323.54	414.34	213.85	0.000
79/80	197.78	213.86	126.50	104.80	106.83	115.71	181.40	213.83	279.83	396.50	425.33	428.64
80/81	299.03	243.74	116.46	87.15	128.43	98.97	209.10	258.45	365.59	410.77	469.16	400.73
81/82	290.18	195.44	99.60	107.76	109.82	101.78	172.46	221.17	308.01	434.67	513.94	498.23
82/83	319.23	242.77	100.77	73.49	84.48	91.37	163.40	223.92	295.45	354.26	447.54	436.59
83/84	250.47	170.84	126.97	89.78	84.98	123.01	182.84	254.61	358.31	363.08	438.92	382.62
84/85	313.68	184.90	117.45	83.29	89.52	120.42	153.87	255.79	259.81	393.39	432.42	438.92
85/86	289.37	174.18	124.97	88.16	100.93	102.24	152.61	247.52	310.67	343.81	417.06	443.64
86/87	324.23	176.86	105.88	69.30	84.98	114.65	157.87	210.30	288.14	388.11	490.31	364.62
87/88	340.86	239.40	140.73	83.43	113.42	137.64	203.53	240.62	428.28	342.61	489.13	718.34
88/89	246.10	210.89	119.11	75.47	84.18	110.94	204.99	275.36	295.19	288.30	372.76	371.75
89/90	275.37	157.43	122.74	88.30	69.82	115.98	164.97	190.34	192.60	311.66	398.48	277.87
90/91	282.70	212.43	114.18	76.73	57.39	79.43	158.92	166.81	246.15	315.81	372.87	343.47
91/92	242.78	180.43	103.48	62.18	56.13	93.46	141.91	215.78	296.43	360.47	443.29	468.10
92/93	345.23	244.24	135.51	109.53	94.64	129.52	170.95	276.11	360.67	418.12	488.30	437.85
93/94	312.74	253.31	114.48	89.67	113.79	137.63	194.78	263.47	417.06	442.00	461.25	456.40
94/95	312.74	253.31	114.48	89.67	113.79	137.63	194.78	263.47	417.06	442.00	461.25	456.40
95/96	295.63	204.69	156.61	70.52	86.07	79.98	110.04	172.61	267.13	294.28	344.80	336.48
96/97	235.34	169.19	107.63	89.13	98.48	112.36	149.97	184.95	279.99	391.46	403.05	348.71
97/98	214.70	173.02	89.50	86.49	82.55	88.07	154.07	231.59	291.65	364.81	402.72	352.02
98/99	296.67	183.60	101.81	76.43	103.06	94.45	188.59	261.70	348.66	396.07	424.74	421.92
99/00	286.40	233.69	120.17	62.52	62.32	105.39	173.20	256.24	306.23	351.02	409.26	353.56
00/01	265.91	179.58	133.12	89.49	85.35	113.89	242.44	250.00	332.69	402.41	445.77	385.63
2001/02	252.34	200.20	97.21	71.20	58.32	102.55	212.55	218.21	311.20	339.97	335.78	371.12
2002/03	265.33	167.94	120.18	94.54	101.61	83.72	131.77	200.37	290.00	330.79	412.45	392.12
2003/04	282.10	195.05	107.66	76.56	77.38	114.75	176.36	202.44	219.21	305.48	369.09	353.27
2004/05	268.67	194.64	91.89	63.35	72.19	71.01	130.10	206.64	326.32	338.75	413.44	370.01

# BIBLIOGRAPHIE

## RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- Aidaoui, S. (1994).** *Ressource en eau et aménagement hydro-agricole dans la région de Biskra « Ziban » Algérie*, thèse de doctorat, université de Nancy II.
- ANB. (2006).** *Etude de confortement des grands barrages en exploitation*, mission 1 : diagnostic et expertise barrage de Foum El Gherza.
- Ancey, C., Metzger, R. (2006).** *Risques hydrologiques et aménagement du territoire*, version 1.6 laboratoire hydraulique environnementale (LHE), école polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.
- Baazi, H. (2002).** *Etude de faisabilité d'un ouvrage de substitution dans la vallée de l'oued el Abiod*, thèse de magister, faculté des sciences de l'ingénieur, département d'hydraulique, université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie.
- Ben abdallah, A. (1990).** *La phoeniciculture options méditerranéennes*, Les systèmes agricoles oasiens, pp. 106-120.
- Benchaiba, L. (2006).** *Condition d'écoulement et impact sur la mobilisation des ressources en eau bassin versant de l'oued Bouhamdene (w. de Guelma, est Algérien)*, thèse de magister, faculté des sciences de l'ingénieur, département d'hydraulique, université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie.
- Bocquhjon, G., Fang, Z.X., Voron, B. (1990).** *Limitation de l'horizon prévisionnel de la programmation dynamique stochastique en matière de gestion de barrages*, journal des sciences hydrologiques, pp.405-414, France.
- Bocquhjon, G., Fang, Z.X., Voron, B. (1990).** *Programmation dynamique: application à la gestion d'une retenue pour l'irrigation*, journal des sciences hydrologiques, pp.415-424, France.
- Consoli, S., Matarazzo, B., Pappalardo, N. (2007).** *Operating rules of an irrigation purposes reservoir using multi-objective optimization*, université de Catania, Italy.
- Dubreuil, P. (1974).** *Initiation à l'analyse hydrologique*, Paris, France.
- Emma, H. (2003).** *Modélisation mensuelle pluie-débit / apports de la spatialisation - cas des données de sols*, Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences, Université de Montpellier.
- Gautier, M. (1948).** *Hydrologie Algérienne*, Recueil des observations de 1924 à 1946.
- Ghenim, A. (2001).** *Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna : cas de l'oued Isser, oued Mouillah et la haute Tafna*, thèse de

magister faculté des sciences de l'ingénieur, département d'hydraulique, université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.

**Haoues, C. (2008).** *Evaluation par analyse multicritères du risque d'érosion dans la vallée de l'Oued Labiod (Approche systémique)*, thèse de magister, faculté des sciences, département des sciences de la terre, université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie.

**Hubert, P. (1984).** *Eaupusculè 1ère Edition*, Paris, France.

**Klemes, V. (1975).** *Application de l'hydrologie à la gestion des ressources en eau*, Organisation météorologique mondiale (O M M) hydrologie opérationnelle rapport n°4, Genève, Suisse.

**Laborde, J.P. (2000).** *Eléments d'hydrologie de surface*, Université de Nice - Sophia Antipolis, France.

**Laborde, J.P. (2003).** *Etude de synthèse sur les ressources en eaux de surface de l'Algérie du Nord*. "Service Etude" de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Alger (ANRH).

**Laborde, J.P., Touazi, M. (2004),** *Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du nord*, revue des sciences de l'eau, pp.503-516.

**Ladlani, I. (2006).** *Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba»*, thèse de magister, Faculté des sciences de l'ingénieur, laboratoire de recherche en hydraulique appliquée (LA.R.HY.A), université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie.

**Lebdi, F., Lamddalena, N. (2002).** *Projet water saving in irrigated agriculture (WASIA)*, rapport final, pp. 219-245, Tunisie.

**Miossec, M.P. (2004).** *Apport des Multi-Modèles pour la modélisation sur des bassins versants non jaugés*, université Pierre et Marie Curie, université Paris-Sud, école des Mines de Paris et école Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Cemagref.

**Mouelhi, S. (2002).** *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*, thèse de doctorat, Ecole doctorale des sciences de la terre et de l'univers, université de Paris.

**Pabiot, F. (1999).** *Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi aride* mémoire de fin d'études D.A.A. Physiques des Surfaces Naturelles et Génie Hydrologique, (E.N.S.A.R).

- Pangalou, D. (2003).** *Impact du changement climatique sur la variation des paramètres hydrologiques du bassin versant du Rhône*, université Pierre et Marie Curie, université Paris-Sud, école des Mines de Paris et école Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.
- Perrin, C. (2002).** *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. La Houille Blanche, n°6/7, pp.84-91.
- Remini, B., Toumi, A. (2004).** *Barrage de Foum El Gherza face au problème de fuites d'eau* Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 03, pp.25-38.
- Riad, S. (2003).** *Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc*, thèse de doctorat d'état, université de Lille et d'Agadir.
- Schoeller, H. (1959).** *Hydrologie des régions arides progrès récents*, Faculté des sciences de Bordeaux.
- Slimani, M.S., Zayani, K. (1998).** *Apport d'eau, développement et rendement de jeunes palmiers Degle Nour dans la parcelle expérimentale d'Atilet - Nefzaoua*, Tunisie.

## Résumé

L'eau joue un rôle très important dans le développement socio-économique, et si une pénurie venait à perdurer, elle pourrait affecter toute l'économie du pays et particulièrement l'agriculture, grande consommatrice d'eau. Les problèmes liés à l'eau sont aptes à devenir plus complexes dans le futur (accroissement de la population, changement climatique, etc). Pour cela, la gestion de l'eau a pour rôle de trouver le bon équilibre entre ressource et usage.

Le barrage de Foug El Gherza sur l'oued El Abiod est destiné spécialement à l'irrigation de palmeraies dans la Daira de Sidi Okba. L'approche adéquate pour une gestion rationnelle des ouvrages hydrauliques situés en zone aride, passe souvent par une modélisation difficile et complexe. Dans cette étude on propose un outil d'aide à la gestion du barrage de Foug El Gherza en utilisant la programmation dynamique stochastique PDS.

**Mot clés:** Optimisation - Barrage Foug El Gherza - Irrigation de palmeraies

## Abstract

Water plays a very important role in the socio- economic development of the country and if its shortage endures, that may affect the country's economy, particularly the agriculture, a big user of water. Problem concerning water, are to be very complex in the future (population growth, climate changes, etc...). For this purpose, water management aims to find the right equilibrium between resources and usage.

Foug El Gherza dam over l'Oued El Abiod, is intended especially for the irrigation of palm groves of Sidi Okba Daira. The adequate approach for a rational management of hydraulic structures located in arid regions often passes by a difficult and complex modeling. In this study, a decision support system is proposed for Foug El Gherza dam, using stochastic dynamic programming (PDS).

## ملخص

المحافظة على الثروة المائية أمر مهم في تنمية اقتصاد البلدان و خاصة قطاع الفلاحة الذي يعتبر أكبر مستهلك للمياه. إن ارتفاع نسبة النمو الديمغرافي و التغير المناخي من العوامل التي تؤثر سلبا في المحافظة على هذه الثروة. لذا يجب البحث عن السبل الملائمة لتنظيم عملية استهلاك المياه و استغلالها بشكل صحيح مع مراعاة الحفاظ على المخزون المائي في نفس الوقت.