



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Université Badji Mokhtar Annaba



**Faculté de science et technique**

**Département D'Hydraulique**

**Mémoire de Master II**

**Intitulé :**

**Evaluation de la performance de gestion d'un réservoir d'eau à  
l'aide des critères RRV cas du barrage Cheffia**

(Fiabilité, Résilience et Vulnérabilité)

**Dirigé par : Mr AMARCHI HOCINE**

**Réalisé par :**

- DJELLAB AICHA**
- KACHABIA DHOHA**

**Promotion-Juin 2019**



## **Remerciement**

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr Amarchi Hocine, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous remercies également d'une façon trop spéciale notre famille qui nous encourage tout au long de notre étude, de même nous proche et les amis qui n'ont aidé à leur manière à l'achèvement de ce mémoire.

Enfin, nous tenons également à remercier notre collègue et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## **Résumé :**

La capacité des systèmes de ressources en eau existants et proposés à fonctionner de manière satisfaisante dans le large éventail de demandes futures possibles et de conditions hydrologiques est une caractéristique importante du système. La performance probable des systèmes de ressources en eau est souvent décrite par la moyenne et la variance des avantages, les concentrations de polluants ou certaines variables. Ce travail développe des critères de performance supplémentaires qui capturent des aspects particuliers de l'identification de système possible sont particulièrement importants pendant les périodes de sécheresse, de demandes de pointe ou de conditions météorologiques extrêmes. Les critères proposés sont appelés fiabilité, résilience et vulnérabilité. Ces mesures de performance devraient être utiles pour la sélection des capacités des systèmes de gestion des ressources en eau et des politiques d'exploitation de la configuration.

## **Summary:**

The ability of existing and proposed water resource systems to function satisfactorily in the wide range of possible future demands and hydrological conditions is an important feature of the system. The likely performance of water resource systems is often described by the mean and variance of benefits, pollutant concentrations or some variables. This article develops additional performance criteria that capture particular aspects of possible system identification that are particularly important during periods of drought, peak demands, or extreme weather conditions. The proposed criteria are called reliability, resilience and vulnerability. These performance measures should be useful for the selection of the capabilities of water resources management systems and configuration operating policies.

## ملخص

تعد قدرة أنظمة الموارد المائية الحالية والمقترحة على العمل بصورة مرضية في مجموعة واسعة من المتطلبات المستقبلية المحتملة والظروف الهيدرولوجية سمة مهمة للنظام. غالبًا ما يوصف الأداء المحتمل لأنظمة الموارد المائية بمتوسط وتفاوت الفوائد ، وتركيزات الملوثات أو بعض المتغيرات. تطور هذه المقالة معايير أداء إضافية تلتقط جوانب معينة من تحديد النظام المحتمل والتي تعتبر مهمة بشكل خاص أثناء فترات الجفاف أو ذروة الطلب أو الظروف الجوية القاسية. تسمى المعايير المقترحة الموثوقة والمرونة والضعف. حيث يجب أن تكون مقاييس الأداء هذه مفيدة لاختيار قدرات أنظمة إدارة الموارد المائية وسياسات تشغيل التكوين

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERAL</b>	<b>12</b>
<b>CHAPITRE I : ETUDE HYDROLOGIQUE</b>	<b>13</b>
<b>1-Introduction</b>	<b>14</b>
<b>2-cycle de l'eau</b>	<b>14</b>
<b>3. Présentation du bassin versant de la MAFRAGH</b>	<b>16</b>
3.1. Définition	16
3.2. Morphométrie du bassin versant	16
3.2.1.Périmètre	16
3.2.2. Surface	16
3.2.3. Forme	17
3.2.4. Rectangle équivalent	18
<b>4. Caractéristique géologique</b>	<b>19</b>
4.1Le Sol	19
4.2 La géologie de substratum	20
4.3. Le couvert végétal	22
4.4. La Surface urbanisée	23
<b>5. Caractéristiques des altitudes (le relief)</b>	<b>23</b>
5.1. Les altitudes max, min, moyenne et médiane	23
5.2. Indice de pente globale $I_g$	24
5.3. Indice de pente de roche $I_p$	25
5.4. Dénivelée spécifique $D_s$	26
5.5. Courbe hypsométrie	26
<b>6. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant</b>	<b>30</b>
6.1. Densité de drainage $D_d$	30
6.2. Coefficient de torrentialité	30
6.3. Coefficient de ruissellement $C_r$	30
6.4. Temps de concentration $T_c$	33
6.5. Bilan hydrologique	34
<b>7. Caractéristiques climatiques du bassin versant</b>	<b>34</b>
7.1 la variabilité des précipitations	34
7.2. Apport moyennes mensuelles	35
7.3. La température moyenne mensuelle	36
7.4. L'évaporation	37

<b>CHAPITRE II : FONCTIONNEMENT ACTUEL DU BARRAGE</b>	<b>39</b>
<b>1. Caractéristique du Bassin versant</b>	<b>40</b>
1.1. Situation géographique de la région d'étude	40
1.2. Situation géographique du bassin	41
1.3. Aperçu sur le bassin de la MAFRAGH	42
1.4. Relief	43
1.5. Cadre géologique	44
1.6. Hydrogéologie	44
<b>2-Les Fuites</b>	<b>45</b>
<b>3-Le Système d'Utilisation</b>	<b>45</b>
3-1-Pour la consommation domestique	45
3-2-Pour l'Irrigation	45
<b>4-Les Apports</b>	<b>46</b>
a-Annuelle	46
b-Apport Mensuelle de (2006-2015)	47
<b>5-Pluies</b>	<b>48</b>
a-Pluies Annuelle durant la période (2006/20015)	48
b-Pluies Mensuelle de (2006-2015)	49
<b>6-Apports Annuels -Lâcher</b>	<b>51</b>
<b>7-Evaporation Annuels et Mensuel</b>	<b>53</b>
a-annuel	53
b-Mensuel	54
<b>8-Conclusion</b>	<b>56</b>
<b>CHAPITRE III : RESULTATS ET SYNTHESE</b>	<b>57</b>
<b>1-Introduction</b>	<b>58</b>
<b>2-Gestion du Barrage</b>	<b>58</b>
<b>3-Les Principes de Gestion</b>	<b>58</b>
3-1-Caractéristiques de la gestion	58
3-1-1-Les Incertitudes Stratégiques	59
3-1-2-Les Incertitudes Physiques	59
3-1-3-Les Incertitudes Technologiques	59
<b>4-Les Objectifs de Gestion</b>	<b>59</b>
4-1-La Régulation des Débits d'Apports :	60
4-2-L'Alimentation en Eau Potable	60
4-3-L'Irrigation	60
<b>5-Les Critères de Performance</b>	<b>62</b>
5-1-Définition	62
5-2-Définition du modèle de simulation	62

5-3-Gestion des risques par simulation :	62
5-4-Indices de performance	62
a)-La défaillance du stock	63
b)-Le non satisfaction de la demande	63
<b>6-Paramètres de simulation</b>	<b>64</b>
<b>7- Détails pour l'alimentation en eau potable</b>	<b>65</b>
<b>8- Détails pour les débordements</b>	<b>65</b>
<b>9-Méthode à appliquer</b>	<b>69</b>
<b>10-Simulation de l'évolution temporelle du remplissage du réservoir</b>	<b>69</b>
<b>11- Calcul des hauteurs de remplissage et de la surface au miroir</b>	<b>69</b>
<b>12-Définition des défaillances</b>	<b>70</b>
<b>13-Critères RRV</b>	<b>70</b>
13-1-Normalisation des critères RRV	70
13-1-1-Production eau potable	71
13-1-2-Récréation	71
13-1-3-Pêche	71
<b>14-Autres critères possibles pour évaluer la performance du système</b>	<b>71</b>
a-Variable de décision modifiée : objectif de prélèvement journalier ...	72
b-Variable de décision modifiée : seuil critique de remplissage à partir duquel on réduit l'objectif de production journalier	72
c-Variable de décision modifiée : capacité totale de stockage du réservoir	74
<b>15-Analyse complémentaire vis à vis des débordements</b>	<b>75</b>

## **LISTE DES FIGURES**

### **Chapitre1 :**

Figure 1: Cycle De L'eau dans la nature.

Figure 2: Types de bassins versants

### **Chapitre2 :**

Figure 3: Localisation géographique du Bassin versant de la Mafragh

Figure 4: Bassin Versant de la Mafragh

Figure 5: Réseau hydrographique du Bassin Versant de la Mafragh

## **LISTE DES COURBES**

### **Chapitre1 :**

Courbe 1 : Courbe Hypsométrique Oued Bounamoussa

Courbe2: pluie moyennes mensuelles

Courbe3: Les températures moyennes mensuelles.

Courbe 4:Evaporation moyenne mensuelle (mm)

### **Chapitre 2 :**

Courbe5:apport annuels du barrage période 2006-2015

Courbe6:apport mensuel du barrage période 2006-2015

Courbe7:pluies annuels du barrage période 2006-2015

Courbe 8:pluies mensuel du barrage période 2006-2015

Courbe 9:l'apport annuel et les lâchers du barrage période 2006-2015

Courbe 10:Evaporation annuel du barrage période 2006-2015

Courbe 11:Evaporation mensuel du barrage période 2006-2015

### **Chapitre 3 :**

Courbe 12 : Pluies mensuelles (2006/2015)

Courbe13 : alimentation vs demande

Courbe14 : alimentation vs seuil critique de remplissage

Courbe15 : récréation vs seuil critique de remplissage

Courbe16 : alimentation vs capacité

**Courbe17 : récréations vs capacité**

**Courbe18 : pêche vs capacité**

**Courbe 19 : débordement vs capacité**

**Courbe 20 : débordement vs demande en eau potable**

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre 1 :**

**Tableau 1: Variation de l'indice de pente global**

**Tableau2: Classification de l'O.R.S.T.O.M du relief**

**Tab.3.Répartition Hypsométrique du Bassin de l'Oued-Bounamoussa**

**Tableau 1: Variation de Cr en fonction de la nature de sols**

**Tableau 2: Variation de Cr en fonction de type d'occupation**

**Tableau 3:Variation de Cr en fonction de couverture végétale et la morphologie du terrain**

**Tableau 4: pluie moyennes mensuelles**

**Tableau 5: Les températures moyennes mensuelles**

**Tableau 6:Evaporation moyenne mensuelle (mm)**

**Tableau 7: Paramètres de BV oued bounamoussa**

### **Chapitre 2 :**

**Tableau 11: les apports annuels durent la période 2006-2015.**

**Tableau 12: les apports mensuel durent la période 2006-2015**

**Tableau 13: les pluies annuels durent la période 2006-2015.**

**Tableau 14: pluies mensuel durent la période 2006-2015.**

**Tableau 15:l'apport annuel et les lâchers du barrage période 2006-2015**

**Tableau 16: Evaporation annuels durent la période 2006-2015.**

**Tableau 17: Evaporation mensuels durent la période 2006-2015.**

### **Chapitre 3 :**

**Tableau 18 : paramètres de simulation**

**Tableau 19 : détails pour l'alimentation en eau potable**

**Tableau 20 : détails pour les débordements**

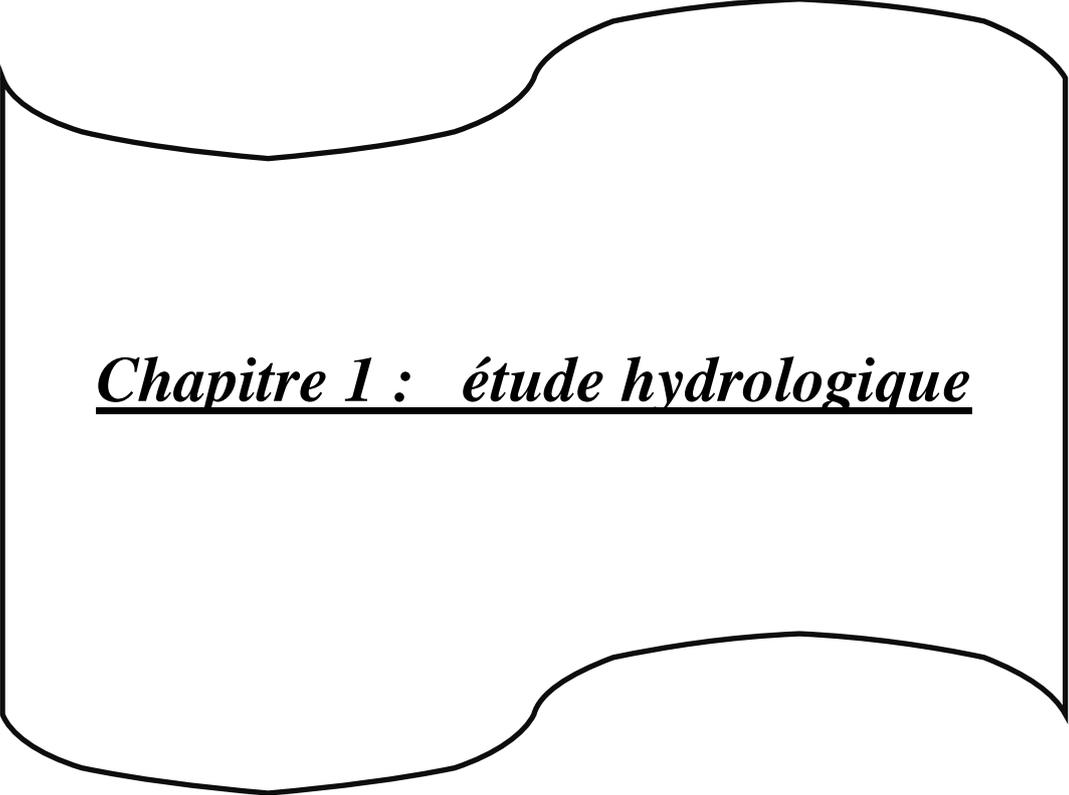
**Tableau 21 : pluies et évaporation de 10 ans**

## **Introduction générale :**

Le monde dépend énormément des réservoirs pour fournir de l'eau. Certains réservoirs sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques et développementaux (par exemple, l'évolution de la population, la croissance du tourisme, les besoins en énergie hydroélectrique). Les irrégularités et les incertitudes du régime de variabilité des changements climatiques et l'augmentation continue de la demande en eau de différents secteurs ajouteront de nouveaux défis de gestion et la capacité de ces réservoirs à résister. L'élasticité des réservoirs faibles doit être étudiée en détail pour préparer et atténuer les effets potentiels de ces changements. Dans cet article, évaluer les performances de la gestion des réservoirs d'eau CHEFFIA à l'aide des critères RRV( Fiabilité Résilience Intensité )

L'étude s'est concentrée sur le débit d'eau de 2006 à 2015 avec Utilisation des données pluviométriques pour la période 2006-2015 pour déterminer les événements secs et les précipitations en fonction d'un seuil prédéfini. Un seuil égal au taux d'évaporation moyen a été sélectionné dans la zone, calculé par des mesures effectuées au cours de la même période.

Les projections futures montrent une diminution du débit annuel des réservoirs et une augmentation de la demande, en particulier dans le secteur agricole. Quel que soit le scénario, la résilience du réservoir est fortement affectée, car le réservoir se remplit toujours, d'où la nécessité d'une évaluation détaillée de la résistance de tous les réservoirs. Les plans de développement devraient examiner avec soin les compromis et les conflits possibles entre les secteurs.



**Chapitre 1 : étude hydrologique**

## 1.Introduction:

L'hydrologie est une science qui étudie la phase du cycle de l'eau qui débute avec l'arrivée de celle-ci sur la surface de la terre. Elle englobe les précipitations, les eaux de surface, l'évaporation et l'évapotranspiration, les eaux souterraines. C'est ainsi que l'on peut distinguer les eaux de surface des eaux souterraines donc l'hydrologie de surface de l'hydrologie souterraine.

L'hydrologie de surface comprend :

- la potamologie ou hydrologie fluviale qui traite le problème de la dynamique des eaux ainsi que des propriétés physiques, mécaniques et chimiques des eaux de rivières.
- la glaciologie qui étudie les eaux de rétention à l'état solide
- la limnologie qui étudie les systèmes à l'état lacustre (lac).

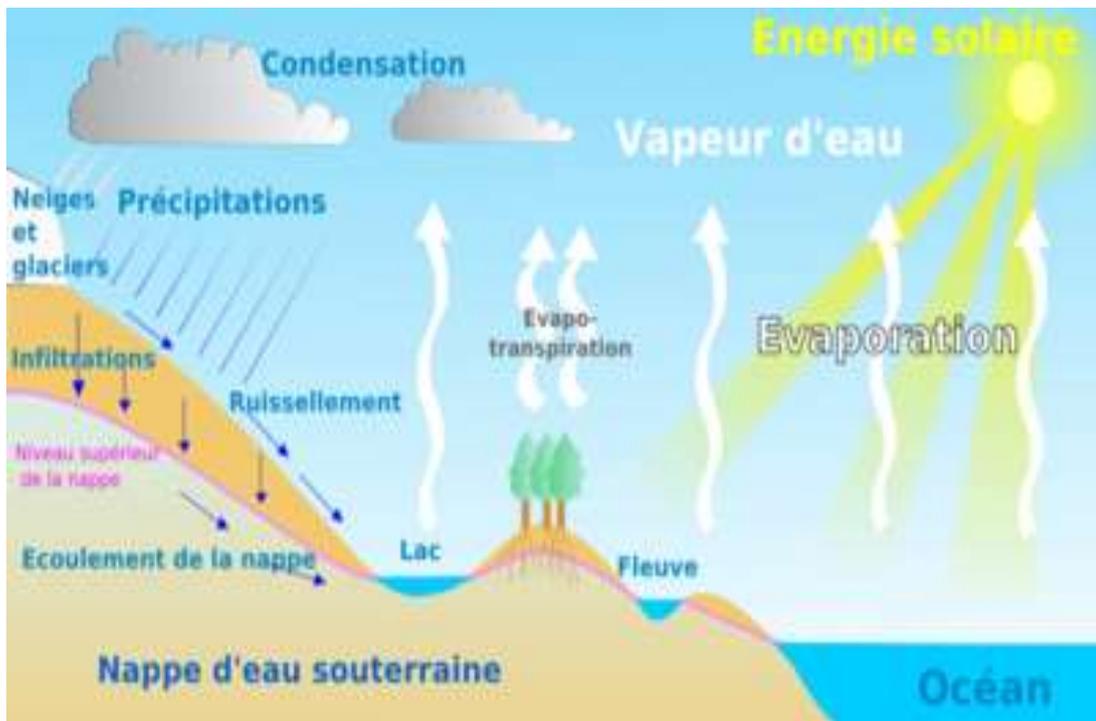
L'eau est présente sur la Terre en quantités importantes sous ses trois phases physiques: liquide, solide et gazeuse. En outre, on la trouve dans les trois principaux espaces environnementaux de l'homme : l'atmosphère, les mers et océans, et les continents.

Du fait que l'eau passe aisément d'un environnement à l'autre et d'une phase à l'autre selon le milieu, elle se caractérise comme une matière changeante dans l'espace et dans le temps.

## 2. Cycle De L'eau :

L'eau dans la nature suit un vaste cycle sous deux principaux états : gazeux et liquide. La vapeur d'eau atmosphérique se condense en nuage qui engendre les précipitations **P** sous forme de pluie, de grêle ou de neige. Parvenues sur le sol, une partie des précipitations s'écoule à sa surface vers le réseau hydrographique et les

étendues d'eau libres qu'elle alimente c'est le ruissellement *de* surface **R**. Une autre quantité franchit la surface du sol, pénètre dans le sol et sous-sol alimentant ainsi les nappes souterraines. Elle va constituer le stock d'eau et les réserves des nappes aquifères ; ce sont les eaux d'infiltration **I**. Sous l'action de la température, l'eau est reprise à l'état de vapeur au cours de toutes les phases de son cycle constituant ainsi évaporation **E**. A cette action, s'ajoute évaporation des plantes: c'est évapotranspiration **ET**. La vapeur d'eau ainsi formée retourne à l'atmosphère pour se condenser et reconstituer les nuages, qui transportés par le vent, peuvent engendrer n'importe où les précipitations et le cycle se referme. Ce cycle est synthétisé dans la *Figure1* ci-dessus. Comme il est dit :



**Figure 1: Cycle De L'eau dans la nature.**

### **3. Présentation du bassin versant de la MAFRAGH :**

#### **3.1. Définition :**

Un bassin versant ou de drainage se définit comme cette portion de surface terrestre à l'intérieur de laquelle les pentes topographiques amènent tout ruissellement qui s'y produit vers un seul et même exutoire. Un bassin de drainage se décrit par rapport à son exutoire. La frontière d'un bassin de drainage se définit par la direction vers laquelle se dirige le ruissellement superficiel de part et d'autre d'une ligne qui sépare les bassins; cette ligne porte le nom de ligne de partage des eaux.

Le bassin de la MAFREGH forme le versant nord du dernier tronçon de la chaîne septentrionale de L'ATLAS-TELLIEN constituée par les montagnes de la MEDJERDAH en ALGERIE et les montagnes de KROUNTRIO en TUNISIE.

#### **3.2. Morphométrie du bassin versant :**

##### **3.2.1Périmètre :**

Le périmètre correspond à la limite extérieure du bassin. Chaque bassin réagit d'une façon propre aux précipitations qu'il reçoit. Ces caractéristiques hydrologiques sont fonction d'une part du climat qu'il subit et d'autre part de son propre milieu physique.

##### **3.2.2. Surface :**

La surface topographique est le paramètre le plus important, il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologiques (apport, volume de précipitations ou infiltration...). Elle est déterminée par planimétrie sur cartes topographiques.

La superficie du Bassin versant de l'Oued BOU NAMOUSSA est de : 1160km<sup>2</sup>

### 3.2.3. Forme :

La forme du bassin versant influence fortement l'écoulement global et notamment le temps de réponse du bassin versant. C'est la configuration géométrique projetée sur un plan horizontal. Un bassin versant allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin ramassé même s'ils sont placés dans les mêmes conditions météorologiques.

L'indice admis par tous les hydrologues pour représenter la forme d'un BV est le coefficient de compacité de **Gravelius K<sub>c</sub>**. On l'établit en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Le coefficient K de Gravelius est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

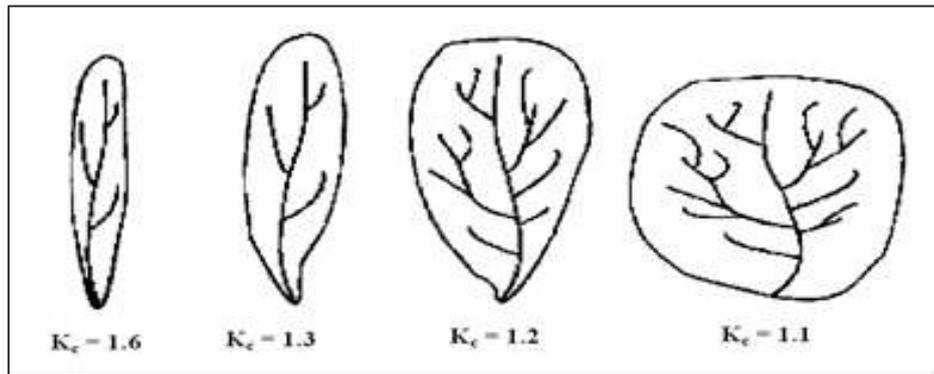
Avec :

**K<sub>c</sub>**: est l'indice de compacité de Gravelius.

**S** : surface du bassin versant [km<sup>2</sup>].

**P** : périmètre du bassin [km].

La *Figure* nous montre des exemples de valeur de K<sub>c</sub>.



**Figure.2. Types de bassins versants.**

$$Kc = \frac{P}{\sqrt{\pi S}} = 0.28 \frac{309.5}{\sqrt{\pi \cdot 1160}} = 2.54$$

Alors comme : **KC =2,544** on peut conclure que la forme de notre bassin est relativement allongée.

### **3.2.4. Rectangle équivalent :**

Appelé aussi rectangle de **Gravelius**, est une transformation purement géométrique en un rectangle de dimensions **L et l** ayant la même surface que le bassin versant. Il permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement. Les courbes de niveau sont des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petits côtés.

Le périmètre et la surface du rectangle sont respectivement :

$$P = 309.5 \text{ km} \qquad S = 1160 \text{ km}^2$$

La longueur **L** et la largeur **l** en Km sont donnés par la résolution de **P** et **S** :

$$\text{La longueur : } L = Kc \frac{\sqrt{S}}{1.128} \left( 1 + \sqrt{1 - 1 \left( \frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right) = 146.82 \text{ km}$$

$$L_{\text{largeur}} : l = Kc \frac{\sqrt{S}}{1.128} \left( 1 - \sqrt{1 - 1 \left( \frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right) = 7.90 \text{ km}$$

## 4. Caractéristique géologique :

### 4.1. Le Sol :

Le sol agit de différentes manières sur le régime d'une rivière. Sa nature et surtout sa couleur interviennent dans le bilan thermique. Par son influence sur le développement et la nature de la végétation, il agit indirectement sur l'évapotranspiration. Ce sont surtout les propriétés mécaniques du sol qui intéressent les hydrologues.

Un sol peut-être compact (roche) et est généralement imperméable, sauf en cas de fissures, diaclases etc. Il peut être meuble, et il est alors nécessaire de l'analyser pour connaître en particulier les proportions d'éléments plus ou moins fins ou grossiers qui le composent. En effet, la dimension des particules constituant le matériau est le facteur déterminant des phénomènes d'infiltration. En schématisant on dira que plus les particules seront d'une taille importante, plus le terrain sera perméable, c'est-à-dire favorable à l'infiltration. On adopte généralement la classification suivante à partir du diamètre des particules:

- **Gravier** > 2 mm.
- **Sable grossier** 2 à 0,2 mm.
- **Sable fin** 0,2 à 0,02 mm.
- **Limon** 0,02 à 0,002 mm.
- **Argile** < 0,002 mm.

Ceci nous amène à définir quelques termes couramment utilisés:

- La Perméabilité: propriété d'un milieu solide poreux de se laisser traverser par l'eau.
- L'infiltration: C'est le passage d'un fluide de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux. Cette remarque est très importante en Hydrologie compte tenu du rôle joué par l'état de la surface du sol dans le processus du ruissellement.
- L'absorption: Est un processus général de rétention de l'eau précipitée sur un bassin versant.

Donc pour la géologie du bassin versant de l'oued BOU NAMOUSSA les massifs montagneux sont essentiellement constitués par :

Des terrains de l'éocène supérieur et de l'oligocène ; terrain dits numidiens .ce sont des alternances d'argile et de grès.

#### **4. 2La géologie de substratum :**

La connaissance de la géologie d'un bassin versant s'avère importante pour cerner l'influence des caractéristiques physiographiques. La géologie du substratum influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface. Dans ce dernier cas, les caractères géologiques principaux à considérer sont la lithologie (nature de la roche mère) et la structure tectonique du substratum.

L'étude géologique d'un bassin versant dans le cadre d'un projet hydrologique a surtout pour objet de déterminer la perméabilité du substratum. Celle-ci intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume et sur le soutien apporté aux débits d'étiage par les nappes souterraines. Un bassin à substratum imperméable présente une crue plus rapide et plus violente qu'un bassin à substratum perméable, soumis à une même averse.

Les dépressions (cuvette de BOU NAMOUSSA ... etc.) ont un substratum constitué de schistes argileux et marneux du sénonien et de l'éocène inférieur.

Le trait caractéristique de la région, est la continuité du manteau d'éboulis qui recouvre le substratum.

- Stratigraphie :Le Sénonien-Paléocène est constitué d'argiles et de m'armes schisteuses avec intercalation de petits bancs de marno-calcaires et de calcaires d'une dizaine de centimètres d'épaisseur.

L'éocène inférieur – Eocène moyen est représenté dans la partie haute du bassin par des marno-calcaire à silex de faible étendue. Près de la cuvette de la CHAFIA, il passe à des argiles indurées et des marnes bitumineuses peu épaisses.

L'Eocène supérieur-Oligocène (Numidien) est constitués d'argiles mouchetées et de grès roux en bancs d'épaisseur variable (de 1 à 30 m). On passe latéralement très rapidement d'argiles aux grès et inversement les grès sont souvent quartzeux et ont une granulométrie très variable. Ils sont diaclases et alimentent les quelques petites sources de la région. Les dépôts quaternaires (éboulis et alluvions) couvrent de très vastes surfaces. Les éboulis sont formés de blocs de grès plus ou moins désagrégés emballés dans des argiles rouges et grises. Ils sont imperméables, leur épaisseur atteint souvent 15 m. Les alluvions occupent d'assez grandes surfaces dans les cuvettes (CHAFIA—LAMY).

- Tectonique :Après une sédimentation continue du sénonien à L'Eocène inférieure, les mouvements pyrénéens plissèrent intensément cette région. Les par deux mouvements de direction différente :

- le premier E-W
- le second plus intense N.NE – S.SW

### 4.3. Le couvert végétal :

L'activité végétative et le type de sol sont liés et leurs actions combinées influencent singulièrement l'écoulement en surface. Le couvert végétal retient, selon sa densité, sa nature et l'importance de la précipitation, une proportion variable de l'eau atmosphérique. Cette eau d'interception est en partie soustraite à l'écoulement.

La forêt, par exemple, intercepte une partie de l'averse par sa frondaison. Elle exerce une action limitatrice importante sur le ruissellement superficiel. La forêt régularise le débit des cours d'eau et amortit les crues de faibles et moyennes amplitudes. Par contre, son action sur les débits extrêmes causés par des crues catastrophiques est réduite.

A l'inverse, le sol nu, de faible capacité de rétention favorise un ruissellement très rapide. L'érosion de la terre va généralement de paire avec l'absence de couverture végétale.

Etant donné l'importance du rôle joué par la forêt, on traduit parfois sa présence par un indice de couverture forestière  $K$  :

$$K = \frac{\textit{Surface des forêts}}{\textit{Surface total du BV}} \times 100$$

#### 4.4. La Surface urbanisée :

Les surfaces imperméables jouent un très grand rôle en hydrologie urbaine. Elles augmentent l'écoulement de surface, réduisent les infiltrations et la recharge des nappes, et diminuent le temps de concentration.

On calcule souvent un taux d'imperméabilité qui est le rapport entre les surfaces imperméables et la surface totale.

### 5. Caractéristiques des altitudes (le relief) :

#### 5.1. Les altitudes max, min, moyenne et médiane :

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographique

➤ Les Altitudes Maximale et Minimale :

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'*exutoire*. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles interviennent aussi dans le calcul de la pente.

➤ L'Altitude Moyenne :

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

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

Avec :

$H_{\text{moy}}$  : Altitude moyenne du bassin [m].

$A_i$  : Aire (surface) comprise entre deux courbes de niveau [km].

$h_i$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m].

$A$  : Superficie totale du bassin versant [km<sup>2</sup>].

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

➤ L'Altitude Médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

## 5.2. Indice de pente globale $I_g$ :

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. On prend 2 points  $S_1$  et  $S_2$  sur l'axe de l'abscisse telle que 90% de la surface du bassin versant soit comprise entre ces 2 valeurs et que 5% de la surface totale du bassin versant soit inférieure à  $S_1$  et 5% soit supérieure à  $S_2$ .

Les altitudes correspondantes sont lues la courbe hypsométrique. Il est donné par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

Avec :

$D$  : Dénivelée entre  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  (m).

$L$  : Longueur du rectangle équivalent (Km).

$H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  sont respectivement les altitudes correspondantes à  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$ .

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

**Tableau 1: Variation de l'indice de pente global.**

Cet indice simple est étroitement corrélé avec l'indice de pente de Roche  $I_p$ .

### 5.3. Indice de pente de roche $I_p$ :

C'est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre 2 courbes de niveau  $H_i$  et  $H_{i-1}$ . Il est donné par la formule :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{S_i(H_i - H_{i-1})}$$

Avec :

$L$  : Longueur du bassin versant (m).

$S_i$  : Surface partielle (%) comprise entre consécutives  $H_i$  et  $H_{i-1}$  (m).

#### 5.4. 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 :

$$D_s = I_g \sqrt{S}$$

<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	$D_s > 500\text{m}$

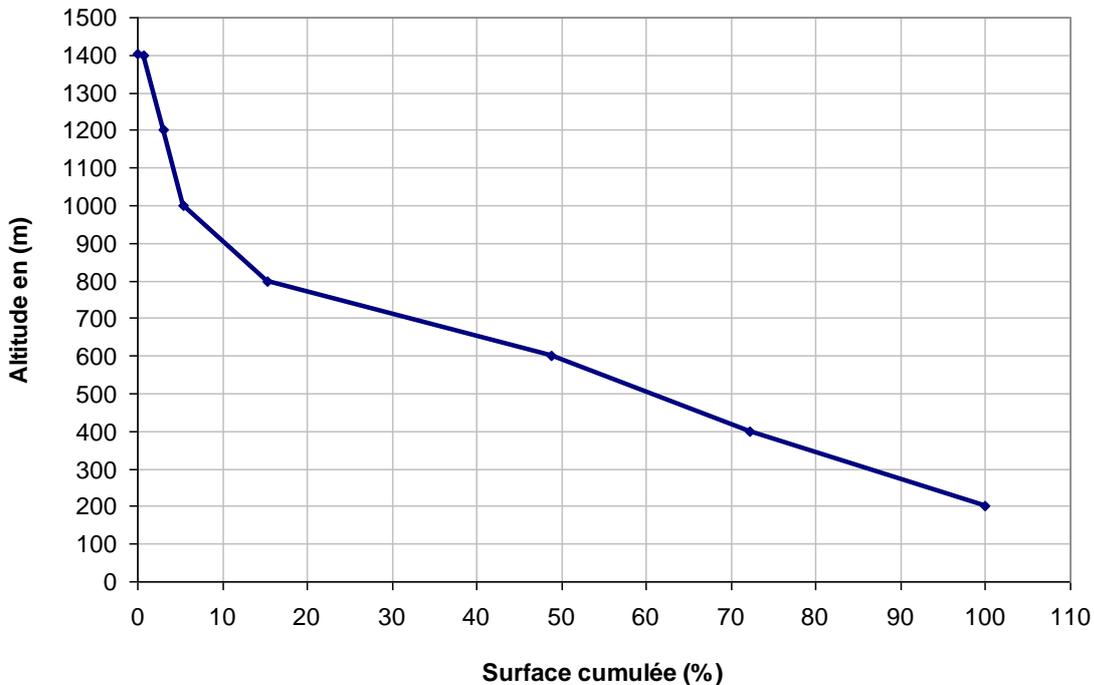
**Tableau2: Classification de l'O.R.S.T.O.M du relief.**

#### 5.5. Courbe hypsométrie :

La plupart des facteurs météorologique et hydrologiques (précipitation, température, débit spécifique...) étant fonction de l'altitude il est intéressant de calculer par planimétrie des cartes comportant des courbes de niveau du terrain la répartition du bassin versant en (km) ou en (%) de la superficie totale par tranche d'altitude

Elévation (m)	BORNE SUP	Surfaces partielles(Si) (km2)	Surfaces partielles (Si)(%)	Surfaces cumulées (km <sup>2</sup> )	Surfaces cumulées (%)
<0	0	0,8	0,07	0,8	100
0 – 200	200	322,02	27,76	322,82	99,93
200 – 400	400	271,48	23,4	594,3	72,17
400 – 600	600	389,04	33,54	983,34	48,77
600-800	800	113,65	9,8	1096,98	15,23
800-1000	1000	27,3	2,35	1124,29	5,43
1000-1200	1200	27,61	2,38	1151,9	3,08
1200-1400	1400	8,09	0,7	1159,98	0,7
>1400	1404	0,01	0,001	1160	0,001

**Tab.3.Répartition Hypsométrique du Bassin de l'Oued-Bounamoussa**



**Courbe 1 :Courbe Hypsométrique Oued Bounamoussa.**

Les altitudes caractéristique nécessaires pour les différents calculs hydrologiques sont :

- Altitude maximale :  $H_{max} = 1404 \text{ m}$
- Altitude minimale :  $H_{min} = 200 \text{ m}$
- Altitude moyenne :

C'est l'altitude pour laquelle 50% de la superficie totale du bassin est situé au-dessous de 50%, au-dessous du niveau de la mer.

$$H_{moy} = \frac{\sum S_i H_i}{S}$$

Avec  $S_i$  : surface partielle entre deux courbes de niveau ( $\text{km}^2$ ).

$H_i$  : altitude moyenne entre deux courbes de niveau successive(m).

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

$$H_{moy} = 390,67 \text{ m}$$

- Altitude à 95% :  $H_{95\%} = 254 \text{ m}$ .
- Altitude à 5% :  $H_{5\%} = 1048 \text{ m}$ .

### 1. les pentes :

#### a) pente moyenne :

La pente est assez importante elle renseigne sur la rapidité de transport des matériaux décroisons et sur la vitesse de l'eau qui lui est proportionnelle est donnée par l'expression :

$$I = \frac{(H_{max} - H_{min})}{L}$$

$H_{max}$  : Altitude maximal(m).

$H_{min}$  : Altitude minimale(m).

$L$  : Longueur équivalente(m).

$$I=8,200= 0,082\%$$

b)  pente globale :

Nécessaire pour le calcul de la dénivelée spécifique l'indice globale est donné par :

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

$L$  : longueur du rectangle équivalent (km).

$D$  : dénivelée utile (m).

$$D = H_{5\%} - H_{95\%}$$

$$D= 1048-254=794 \text{ m.}$$

$$I_g = 5,4 \text{ m/km}$$

c) Dénivelée spécifique :

$$D_s = I_g \cdot (S)^{1/2}$$

$I_g$  : indice de pente globale (m/km).

$S$  : surface du BV (km<sup>2</sup>).

$$D_s=183,92 \text{ m}$$

## 6. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant :

### 6.1. 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  $S$ .

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S}$$

$D_d$ : 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.

**6.2. Coefficient de torrentialité** : C'est le produit de la densité de drainage par la fréquence de thalwegs élémentaires.

$$C_t = D_d \frac{N_1}{S}$$

$C_t$ : coefficient de torrentialité.

$D_d$  : densité de drainage km/km<sup>2</sup>.

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

$S$  : surface du bassin versant km<sup>2</sup>.

### 6.3. Coefficient de ruissellement $C_r$ :

La capacité d'un bassin versant à ruisseler est caractérisée par le coefficient de ruissellement qui est très souvent utilisé en hydrologie de surface. Son calcul et son emploi sont simples, mais notons qu'il peut conduire à commettre de grossières erreurs. Ce coefficient est défini comme étant le rapport du volume d'eau ruisselé sur le volume d'eau total précipité sur le BV.

$$C_r = \frac{\text{Volume d'eau ruisselé}}{\text{Volume total précipité}}$$

En l'absence de mesure (cas le plus fréquent) sur les bassins de type Urbain, on utilise (en assainissement *urbain*) le rapport des surfaces imperméables raccordées au réseau à la surface totale du bassin versant.

$$C_r = \frac{\text{Surface impreniable}}{\text{Surface total du BV}} = C_{\text{impermiabilisation}}$$

Pour les bassins non urbains, ce coefficient est plus difficile à estimer et subit de fortes variabilités dans le temps.

Les tableaux suivants nous montrent la variation de coefficient de ruissellement en fonction de différents paramètres.

<b>Nature du sol</b>	<b>Coefficient de ruissellement</b>
<b>Toits</b>	<b>0.70 à 0.95</b>
<b>Asphalte</b>	<b>0.85 à 0.90</b>
<b>Pavé</b>	<b>0.75 à 0.85</b>
<b>Dalle</b>	<b>0.40 à 0.50</b>
<b>Gravier</b>	<b>0.15 à 0.30</b>
<b>Parc, gazon</b>	<b>0.05 à 0.25</b>

**Tableau 1: Variation de Cr en fonction de la nature de sols.**

Type d'occupation	Coefficient de ruissellement
Commercial	0.70 à 0.95
<b>Résidentiel :</b>	
Lotissements	0.30 à 0.50
Collectifs	0.50 à 0.75
Habitat dispersé	0.25 à 0.40
Industriel	0.50 à 0.80
Parcs et jardins	0.35 à 0.25
Terrains de sport	0.10 à 0.30
Terrains vagues	0.35 à 0.15

**Tableau 2: Variation de Cr en fonction de type d'occupation.**

Couverture végétale	morphologie	Pente (%)	Terrain avec Sable grossier	Terrain argileux ou limon eaux	Terrain argileux compact
Bois	Presque plat	0-5	0.10	0.30	0.40
	Ondulé	5-10	0.25	0.35	0.50
	Montagneux	10-30	0.30	0.50	0.60
Pâturage	Presque plat	0-5	0.10	0.30	0.40
	Ondulé	5-10	0.15	0.35	0.55
	Montagneux	10-30	0.22	0.42	0.30
Culture	Presque plat	0-5	0.30	0.50	0.30
	Ondulé	5-10	0.40	0.60	0.70
	Montagneux	10-30	0.52	0.72	0.32

**Tableau 3: Variation de Cr en fonction de couverture végétale et la morphologie du terrain.**

#### 6.4. Temps de concentration $T_c$ :

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.

Cette valeur est influencée par diverses caractéristiques morphologiques dont principalement : la taille (surface), la forme (surface et longueur) et le relief du bassin (longueur et pente). A ces facteurs s'ajoutent encore le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique.

Il est utilisé par certaines méthodes pour déterminer les crues (méthode de l'hydro gramme unitaire par exemple).

Il existe une multitude de formules pour déterminer le  $T_c$ , voici quelque un

##### Formule Algérienne :

Elle a été déterminée par M<sup>elles</sup> *Saadi Cherif* et *Tamani*, dans leur projet de fin d'études à l'USTHB-IGC, en 1992 :

$$T_c = 0,0055.S + 0,1657.L + 0,0078.D_H + 0,821$$

$T_c$ : temps de concentration du bassin versant en heures.

$S$  : surface du bassin versant en km<sup>2</sup>.

$L$  : longueur du cours d'eau principal en km.

$D_H$ : différence entre l'altitude moyenne et l'altitude minimale du Bassin Versant en mètres.

Cette formule a été déterminée à partir de l'analyse des événements « averse - crues » relevés sur 15 bassins versants du nord du pays.

##### La formule de GIONDOTTI :

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

$A$  : Superficie du bassin versant km<sup>2</sup>.

$L$  : Longueur du talweg principal km.

$$H = H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}$$

## 6.5. Bilan hydrologique :

On peut schématiser le phénomène continu du cycle de l'eau en trois phases:

- Les précipitations.
- Le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain.
- L'évaporation.

Une des parties les plus importantes d'hydrologie est la connaissance du bilan hydrique. Déterminer la part de l'eau qui précipite, la part qui s'évapore et celle qui s'infiltré et ruisselle constitue un problème majeur dans toute étude d'un bassin hydrologique.

Si l'on considère un bassin de très grande superficie, on peut dire, qu'en définitive, l'apport sous forme de pluie  $P$  (auquel il faudrait ajouter l'apport de la neige) se répartit en évapotranspiration  $E$ , en infiltration  $I$  et en ruissellement de surface  $R$  ; de sorte que le bilan annuel devrait s'écrire :

$$P = E + I + R$$

L'application de la méthode du bilan hydrique est limitée par la difficulté de quantifier les variables. Effectivement, les processus hydrologiques sont difficiles à observer directement sur le terrain et donc à mesurer.

## 7. Caractéristiques climatiques du bassin versant :

### 7.1. La variabilité des précipitations :

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.

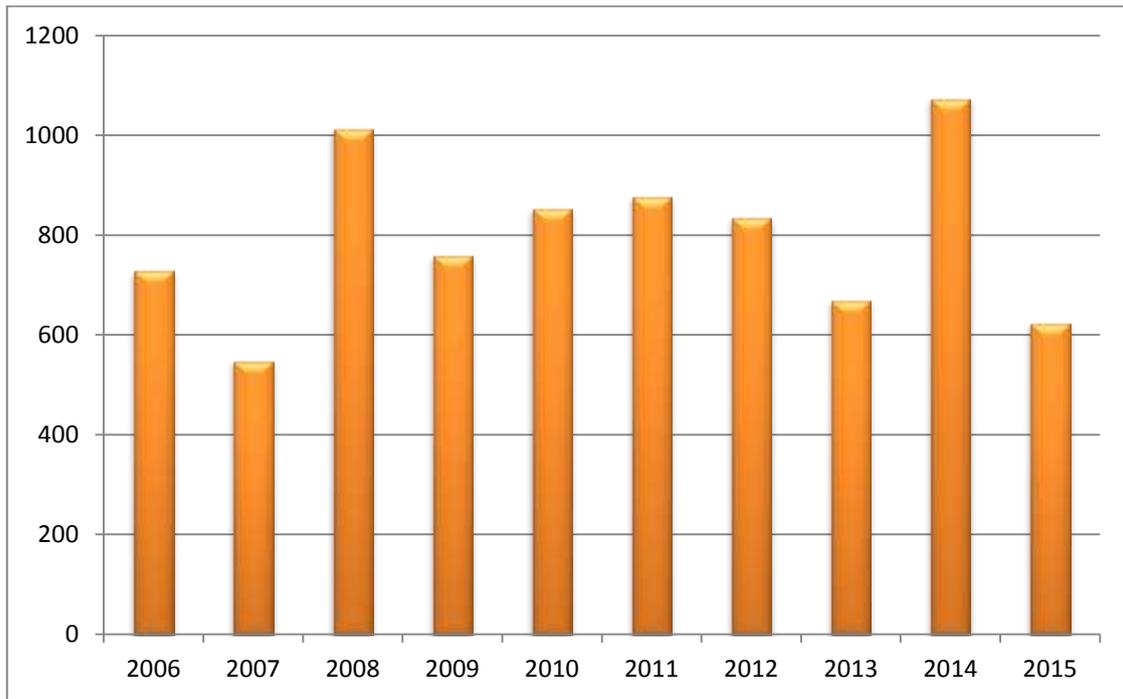
Les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble, variables aléatoires dans le temps et dans l'espace, permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large.

## 7.2. Pluie moyennes mensuelles :

On dispose - sur le tableau suivant- les données concernant les pluies du bassin versant dans la période entre 2005 et 2010

année	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
pluie mm	730,2	549	1013,4	759,3	854,8	877,8	835,9	669,5	1074,7	623,6

Tableau 4: pluie moyennes mensuelles.



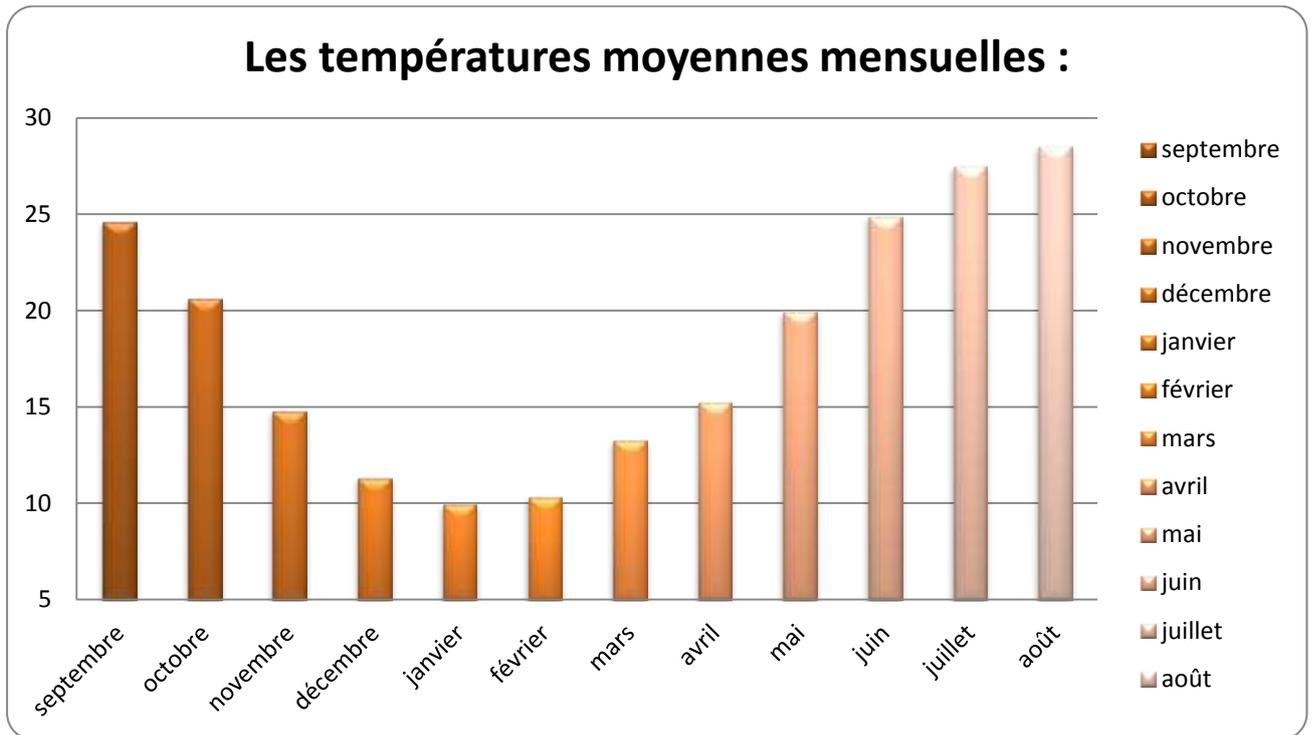
**Courbe2: pluie moyennes mensuelles.**

### 7.3.La température moyenne mensuelle :

Les données disponibles, montrent les caractéristiques du climat humide et avec des valeurs minimales pendant les mois de Janvier, Février, tandis que les valeurs maximales coïncident avec les mois de Juin, Juillet et Août où les précipitations sont rares.

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
Température Mensuelle Moyenne °C	24.61	20.64	14.83	11.37	9.98	10.33	13.29	15.25	19.97	24.91	27.54	28.57

**Tableau 5: Les températures moyennes mensuelles.**



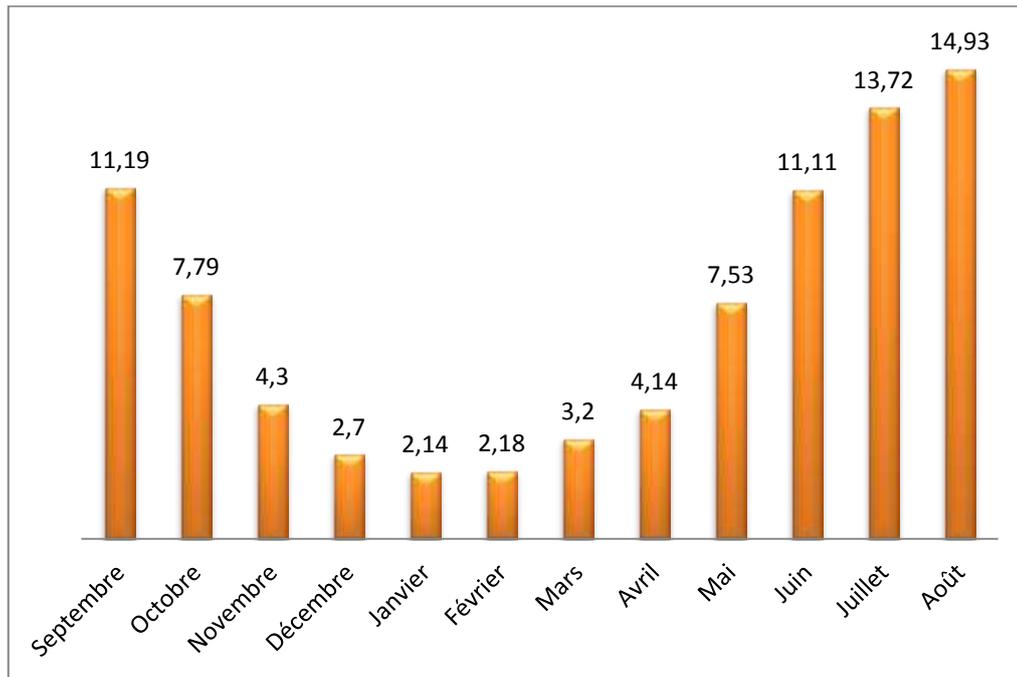
**Courbe3: Les températures moyennes mensuelles.**

#### 7.4. L'évaporation :

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.

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
<b>Evaporation moyenne mensuelle (mm)</b>	<b>11.19</b>	<b>7.78</b>	<b>4.30</b>	<b>2.70</b>	<b>2.14</b>	<b>2.18</b>	<b>3.20</b>	<b>4.14</b>	<b>7.53</b>	<b>11.11</b>	<b>13.72</b>	<b>14.93</b>

**Tableau 6:Evaporation moyenne mensuelle (mm).**

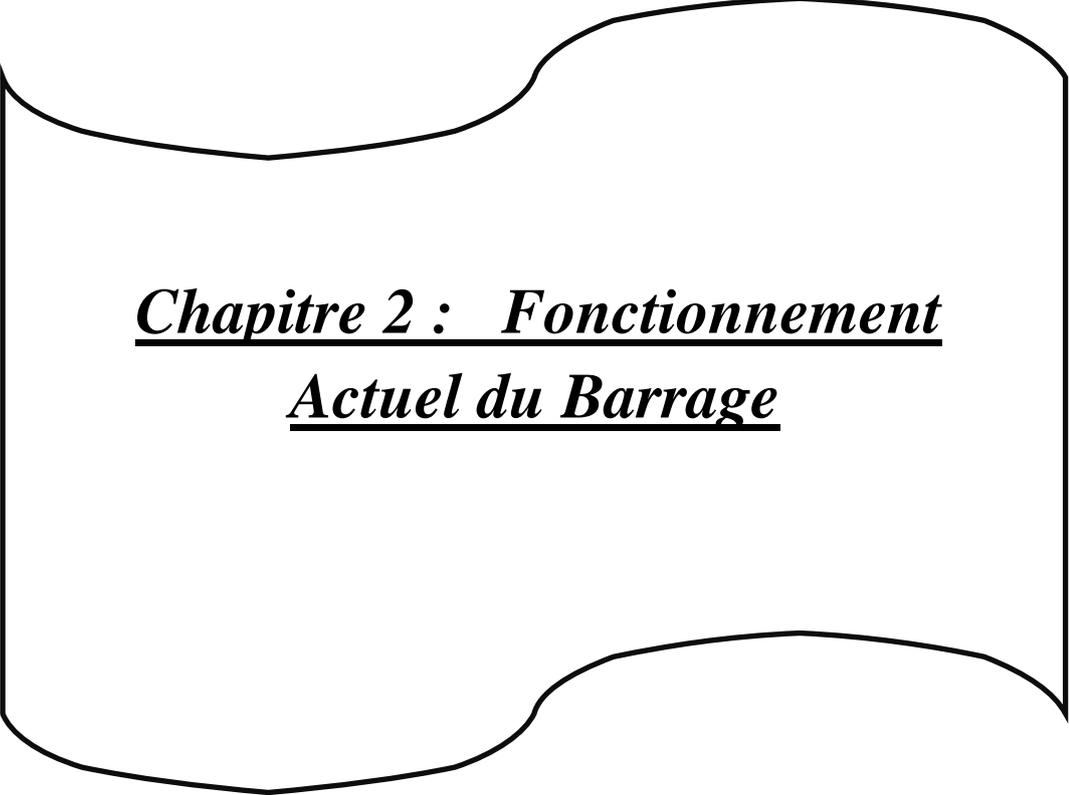


**Courbe 4:Evaporation moyenne mensuelle (mm).**

Tous les paramètres du Bassin Versant sont illustrés dans le Tableau suivant :

BV	Paramètre
Superficie	1160 km <sup>2</sup>
Périmètre	309.5 km
Longueur	146.82 km
Largeur	7.90 km
Alt.max	1404 m
Alt.min	200 m
Alt.moy	390.97 m
Indice de pente	5.4
Thalweg principal	83.67 km
Pluie moyenne annuelle	65.84 mm
Apport moyen annuel	131.519 hm <sup>3</sup>

**Tableau 7: Paramètres de BV oued bounamossa**



**Chapitre 2 : Fonctionnement**  
**Actuel du Barrage**

## 1. Caractéristique du barrage :

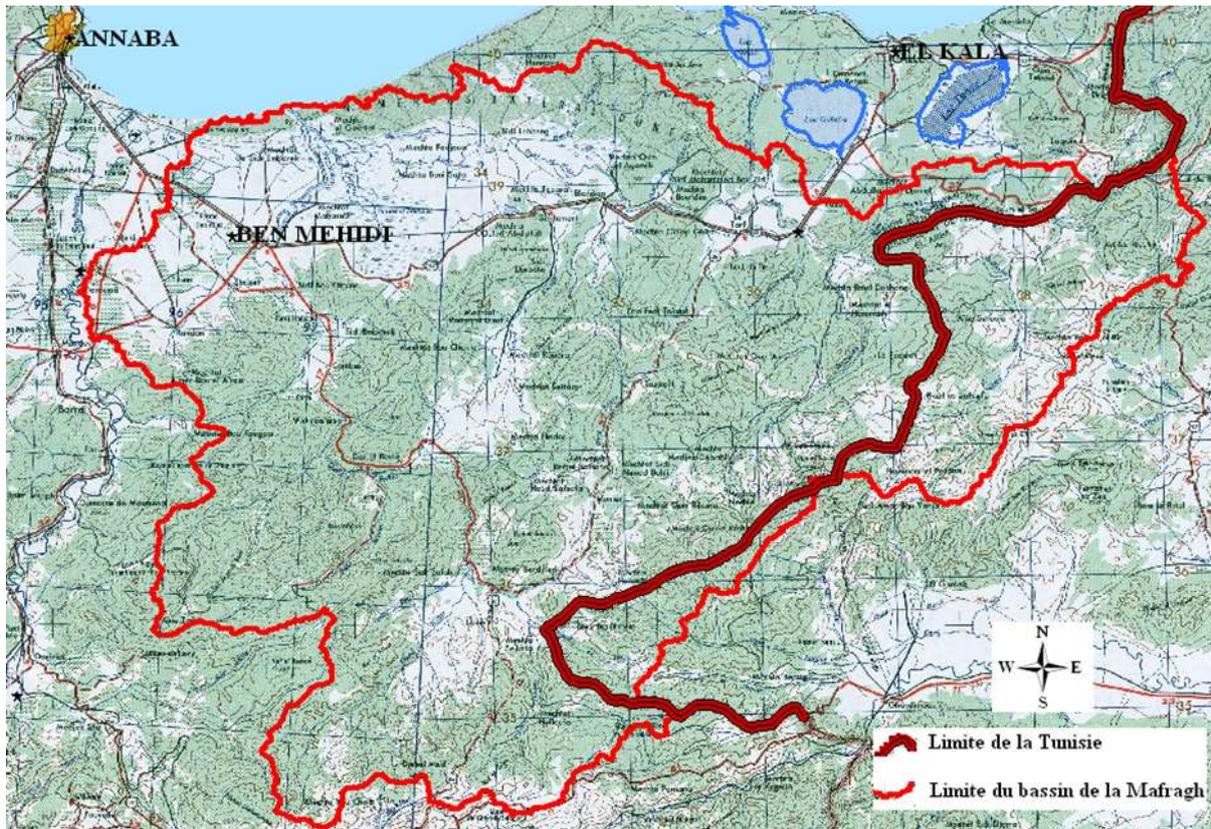
### 1.1. Situation géographique de la région d'étude :

Cheffia est située dans la partie centrale de la wilaya d'El Tarf à l'extrême Nord-est de l'Algérie, au relief montagneux.

La Cheffia est au centre d'une région forestière qui se poursuit au-delà de la frontière tunisienne. Située sur les bords de l'oued el-Kébir, qui devient en aval l'oued Bouna moussa, la localité a donné son nom à l'ouvrage hydraulique, un barrage de retenue, construit sur ce cours d'eau.

Le territoire de la commune de Cheffia, cerné par huit communes limitrophes, est délimité :

- Au l'Est par la commune de Zitouna.
- Au Sud-est par la commune de Aïn Karma
- Au Sud par la commune de Bouhadjar
- À l'Ouest par la commune de Asfour
- Au Sud-ouest par la commune de Hammam Beni-Salah
- Au Nord par la commune de Lac-des-Oiseaux
- Au Nord-est par la commune de Bouteldja
- Au Nord-ouest par la commune de Ben M'Hidi



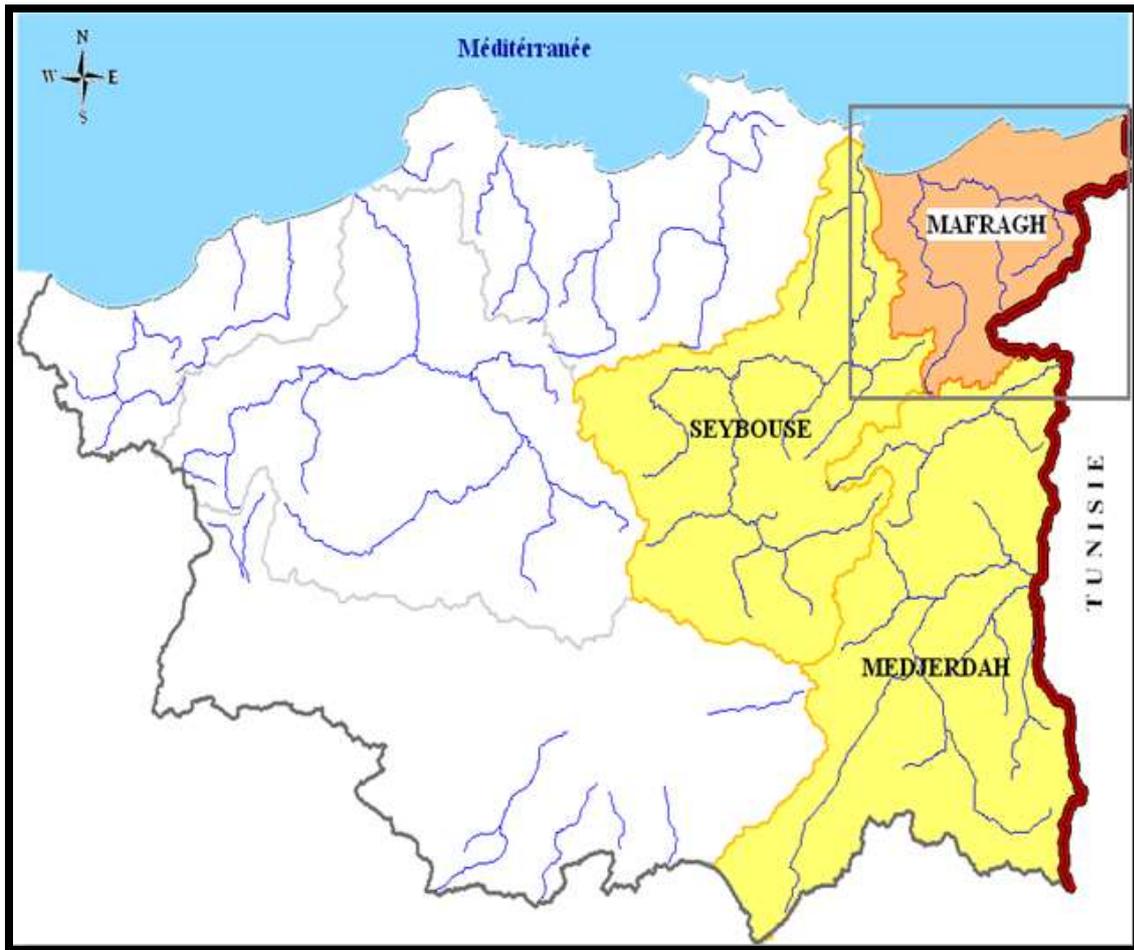
**Fig.3.Localisation géographique du Bassin versant de la Mafragh**

## **1.2. Situation géographique du bassin :**

Selon les cahiers de l'agence des bassins hydrographiques, le bassin versant de la Mafragh s'étendant de 7°45 à 8°45 de longitude Est et de 36°20 à 36° 55 de latitude Nord, est inclus dans le bassin versant des côtiers Constantinois-Est codifié sous le numéro 03

Drainé par deux oueds importants ( OuedBounamoussa à l'Ouest et Oued El Kebir-Est à l'Est), le bassin de la Mafragh est limité :

- Au Nord par le massif dunaire de Boutheldja formant obstacle naturel avec la mer Méditerranée
- Au Sud par le bassin de Medjerdah
- A l'Est par le bassin des côtiers de la Calle et les frontières Tunisiennes
- A l'Ouest par le bassin de la Seybouse



**Figure4 .Bassin Versant de la Mafragh**

### **1.3. Aperçu sur le bassin de la Mafragh :**

Le bassin de la MEFRAGH forme le versant nord du dernier tronçon de la chaîne septentrionale de L'ATLAS-TELLIEN constituée par les mots de la MEDJERDAH en ALGERIE et les mots de Krounio en Tunisie.

Il couvre une superficie de 2600 km<sup>2</sup> environ longeant la côte sur 70 km.

La MAFRAGH est constituée par la réunion de deux grands oueds : l'oued BOUNAMOUSA à l'oued Kebir à l'est. Elle se jette dans la méditerranée par un étroit couloir à travers le massif dunaire du littoral ; ainsi en période de crues la majeure partie des apports inonde la plaine formant un vaste marécage au pied de la chaîne numidique de Bone à la Calle.



Annaba et la CALLE, cette dépression est parsemée de marécages : marais M'Krada, Lac des Oiseaux, Lac Oubeira.

### **1.5. Cadre géologique :**

La région d'étude fait partie de l'ensemble géologique du Tell algérien nord-oriental. Cet ensemble s'étend de la région de Constantine à la frontière algéro-tunisienne.

Le bassin de la Mafragh (Bouamoussa et Kébir Est) comprend les unités suivantes :

- le Trias localisé au sud de la région d'étude (diapirs triasiques, calcaires vermiculés, ensemble grésopélimitique).
- les formations métamorphiques situées dans le massif de l'Edough qui domine la ville d'Annaba (schistes, micaschistes, gneiss, cipolins et amphibolites).
- les terrains sédimentaires d'âge Oligocène à Burdigalien inférieur ; il s'agit de grès, argiles et marnes.
- les dépôts du Quaternaire, les uns d'origine marine (dépôts alluvionnaires, grès de plage) et les autres relevant de la sédimentation continentale (grès, terre rouge, dunes, éboulis, alluvions).

### **1.6. Hydrogéologie :**

Les massifs montagneux sont essentiellement constitués par : des terrains de l'éocène supérieur et de l'oligocène, terrains dits numidiens. Ce sont des alternances d'argiles et de grès.

Les dépressions (cuvette de la CHEFFIA, cuvette de LAMY etc..) ont un substratum constitué de schistes argileux et marneux du sénonien et de l'éocène inférieur.

Le trait caractéristique de la région, est la continuité du manteau d'éboulis qui recouvre le substratum.

## **2-Les 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.

## **3-Le Système d'Utilisation :**

### **3-1-Pour la consommation domestique :**

Malgré les ressources hydriques de la wilaya, El-Taref et Annaba demeure insuffisamment alimentée en eau potable. Celle-ci est desservie à raison d'une heure 30 minutes à deux heures par jour, la population est défavorisée par rapport à toute cette eau mobilisable.

Selon la direction de l'hydraulique et de l'Algérienne des eaux, le barrage a une production quotidienne de 140000 m<sup>3</sup> pour la consommation domestique la 30% des quantités destinées à alimenter les populations se perdent suites aux ruptures des canalisations vétustes, et depuis la réception du barrage de *Cheffia* en 1986, et la station de traitement des eaux 15 années plus tard, les robinets sont « humides », mais loin de couler à toute les heures.

### **3-2-Pour l'Irrigation :**

L'irrigation représente les deux tiers de toute l'eau douce utilisée par les humains, et les terres irriguées produisent environ 40 % de toute la nourriture que nous consommons. C'est dire comme l'irrigation est vitale à notre survie.

La capacité du barrage *Cheffia* pour l'irrigation est de **13 000 Ha** à la plaine El-Taref et Annaba.

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.

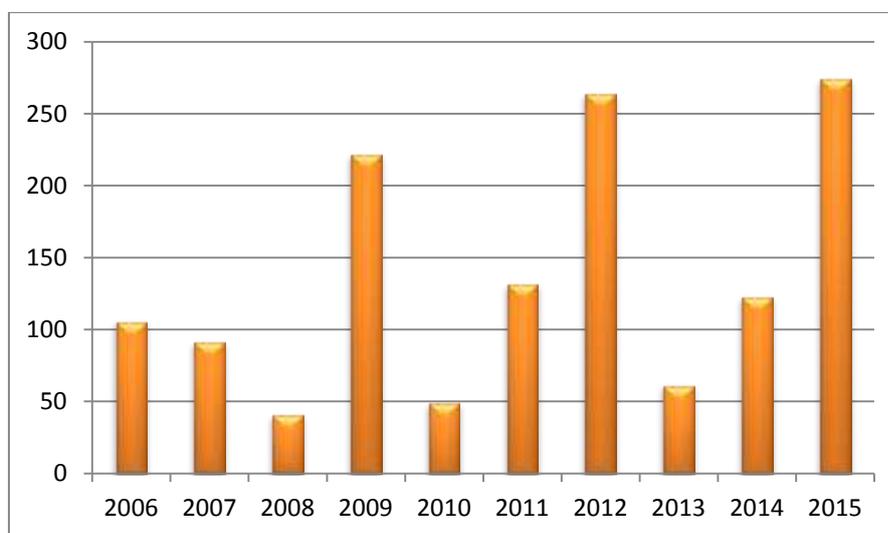
Il est aussi d'autres questions qui requièrent des recherches de plus grande envergure. Des gains appréciables peuvent être réalisés grâce à la consommation d'eau des cultures pour l'agriculture pluviale et on peut accroître de beaucoup l'efficacité d'utilisation de l'eau en s'adonnant à la culture irriguée. Des mesures prises à cet égard ne réduiraient pas seulement le besoin d'eau d'appoint pour les cultures vivrières, mais augmenteraient en outre la portée de la gestion locale.

#### 4-Les Apports

a- **Annuelle** : Les données concernant les apports au barrage de chefia sont disponibles de 2006 à 2015 .A partir de la lecture du graphique représentant cette série, on peut aisément déduire que l'apport maximal a eu lieu durant l'année 2015 et que l'apport minimal s'est produit dans l'année 2008

année	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012,0	2013	2014	2015
apport hm3	105,79	91,42	41	221,9	49,277	132	264	61,437	123,046	274,38

**Tableau 11: les apports annuels durent la période 2006-2015.**



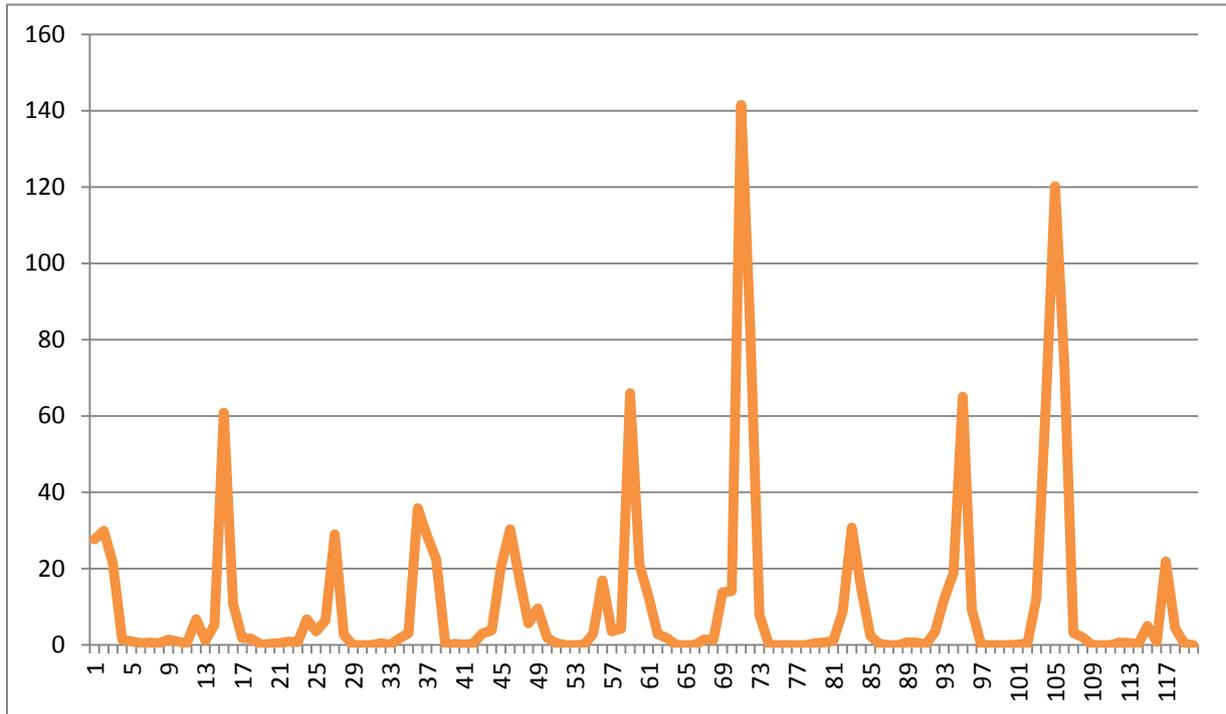
**Courbe5:apport annuels du barrage période 2006-2015**

**b-Apport Mensuelle de (2006-2015) :**

Les apports sont très accentués durant les mois de janvier et février et mars avec des valeurs pouvant atteindre les 45 hm<sup>3</sup>, et presque négligeables de l'ordre de 0,15 hm<sup>3</sup> durant les mois de juillet et aout. Il en ressort que la période où les apports sont importants comprend les mois pluvieux d'hiver et en va voir que l'année 2011/2012 Vu la plus grande proportion des apports.

mois	Apport(hm <sup>3</sup> )	mois	apport (hm <sup>3</sup> )	mois	Apport(hm <sup>3</sup> )	mois	apport (hm <sup>3</sup> )
1	27,7	31	0	61	12,458	91	0,042
2	29,95	32	0,47	62	2,85	92	3,477
3	21,5	33	0,106	63	1,811	93	12,03
4	1,415	34	1,637	64	0	94	18,85
5	0,978	35	3,09	65	0	95	65,09
6	0,499	36	35,87	66	0	96	9,374
7	0,658	37	28,606	67	1,464	97	0,081
8	0,502	38	22,581	68	1,301	98	0
9	1,38	39	93,3	69	13,75	99	0
10	0,87	40	0,353	70	14,105	100	0
11	0,461	41	0,118	71	141,506	101	0,147
12	6,73	42	0,339	72	83,69	102	0,369
13	1,17	43	3,0901	73	7,953	103	12,309
14	5,25	44	3,844	74	0,188	104	62,57
15	60,88	45	20,26	75	0	105	120,215
16	10,779	46	30,33	76	0	106	73,191
17	1,806	47	17,466	77	0	107	3,2
18	1,671	48	5,7	78	0,028	108	2,025
19	0,125	49	9,6226	79	0,45	109	0
20	0,289	50	1,89	80	0,65	110	0
21	0,525	51	0,513	81	1,199	111	0
22	0,887	52	0,001	82	8,86	112	0,644
23	0,779	53	0,023	83	30,73	113	0,615
24	6,73	54	0,057	84	15,04	114	0,144
25	3,616	55	2,88	85	2,34	115	5,026
26	6,47	56	16,99	86	0,355	116	0,808
27	29,002	57	3,62	87	0,019	117	21,933
28	2,68	58	4,26	88	0	118	4,381
29	0,008	59	65,99	89	0,779	119	0,33
30	0,0003	60	21,06	90	0,647	120	0

**Tableau 12: les apports mensuel durent la période 2006-2015.**



**Courbe6:apport mensuel du barrage période 2006-2015**

### **5-Pluies :**

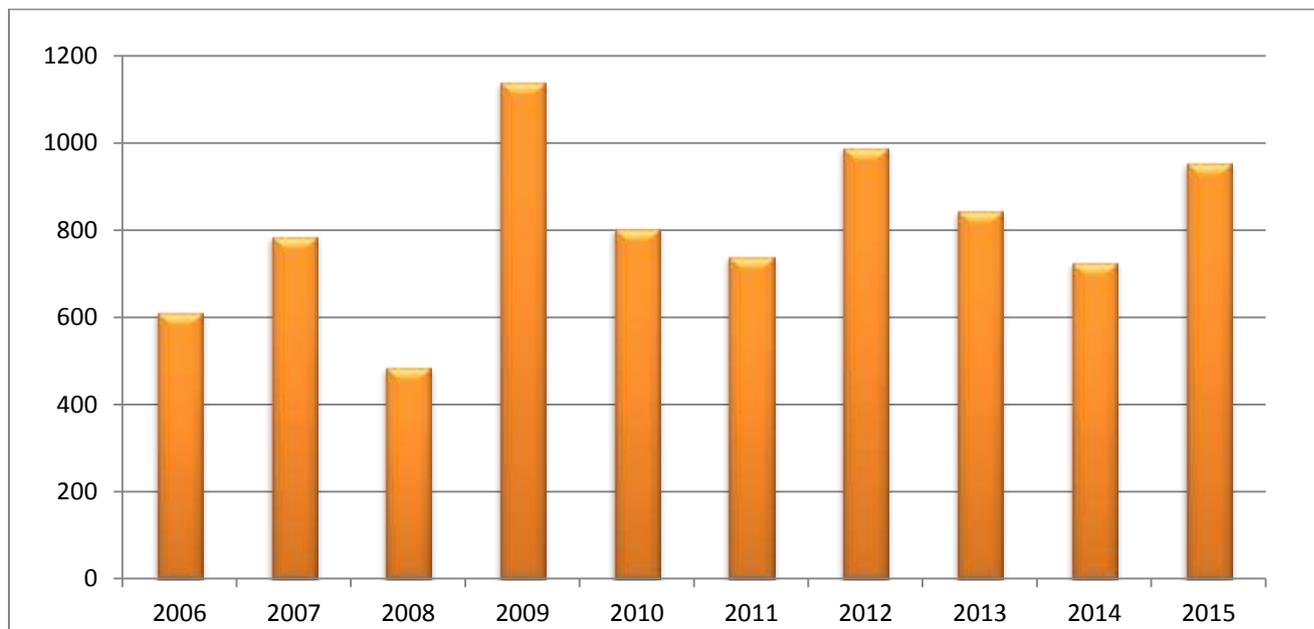
La pluviométrie est l'évaluation quantitative des précipitations, de leur nature (pluie, neige, grésil, brouillard) et distribution. Elle est calculée par diverses techniques

#### **a-Pluies Annuelle durant la période (2006/20015) :**

Les données concernant les pluies au barrage de cheffia sont disponibles de 2006 à 2015 .A partir de la lecture du graphique représentant cette série, on peut aisément déduire que les pluies maximal a eu lieu durant l'année 2009 et que les pluies minimal s'est produit dans l'année 2008.

année	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
pluies hm3	612	786,7	485,4	1139,3	803	739,3	989,7	845,4	726,3	955,2

**Tableau 13: les pluies annuels durent la période 2006-2015.**



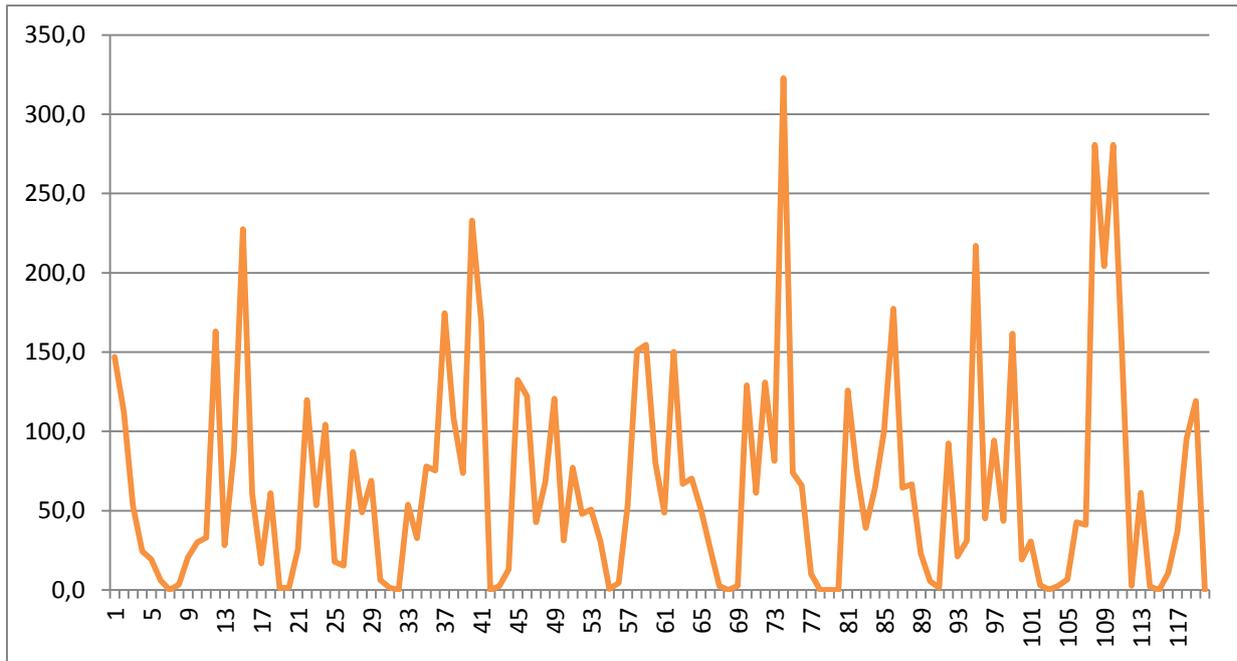
**Courbe7:pluies annuels du barrage période 2006-2015**

**b-Pluies Mensuelle de (2006-2015) :**

Les **pluies** sont très accentués durant les mois de janvier et février et mars avec des valeurs pouvant atteindre les 322 mm, et presque négligeables de l'ordre de 0,00 mm durant les mois de juillet et aout. Il en ressort que la période où les pluies sont importantes comprend les mois pluvieux d'hiver

mois	pluies hm3						
1	146,9	31	1,4	61	48,8	91	1,5
2	112,2	32	0,0	62	150,2	92	92,4
3	53,1	33	53,7	63	66,8	93	21,1
4	24,3	34	32,7	64	70,2	94	31,0
5	19,3	35	77,9	65	50,5	95	217,1
6	6,0	36	75,4	66	26,5	96	45,2
7	0,0	37	174,6	67	2,5	97	94,3
8	3,4	38	108,2	68	0,0	98	43,6
9	20,6	39	73,7	69	2,7	99	161,6
10	30,0	40	233,0	70	129,1	100	19,1
11	33,1	41	168,9	71	61,2	101	30,6
12	163,1	42	0,0	72	130,8	102	3,1
13	28,3	43	2,4	73	81,3	103	0,2
14	86,6	44	12,9	74	322,7	104	2,6
15	227,6	45	132,4	75	74,0	105	6,7
16	60,3	46	122,2	76	65,9	106	42,7
17	16,8	47	42,7	77	10,1	107	41,2
18	61,1	48	68,3	78	0,0	108	280,6
19	1,3	49	120,6	79	0,0	109	204,2
20	1,4	50	31,2	80	0,0	110	280,7
21	25,8	51	77,2	81	125,9	111	141,8
22	119,9	52	47,9	82	75,3	112	2,6
23	53,3	53	50,8	83	39,1	113	61,2
24	104,3	54	30,9	84	64,6	114	2,2
25	17,8	55	0,6	85	100,3	115	0,0
26	15,4	56	4,5	86	177,4	116	10,8
27	87,1	57	53,5	87	64,4	117	37,2
28	49,0	58	150,9	88	66,6	118	95,3
29	68,8	59	154,6	89	23,0	119	119,2
30	6,2	60	80,3	90	5,4	120	0,0

**Tableau 14: pluies mensuel durent la période 2006-2015.**



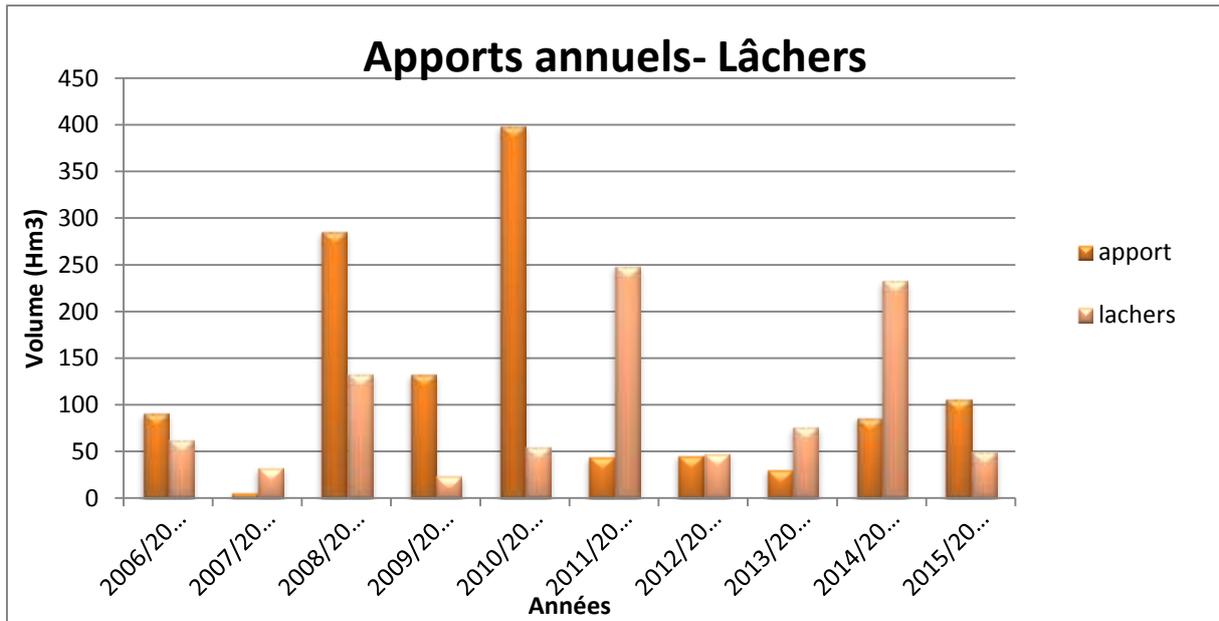
**Courbe 8: pluies mensuel du barrage période 2006-2015**

## 6- Apports Annuels -Lâcher :

Pendant les années de pluies abondantes, entrent aux barrages des quantités importantes d'eau, qui vont bien au-delà de leurs besoins, donc dans ce cas il doit lâcher les eaux surplus. Et dans notre étude barrage CHEFFIA Nous verrons les eaux lâcher pendant 10 ans (2006/2015), et en note que l'année (2011/2012) Expérimenté la plus grande quantité des lâcher augmente de **194,097** million mètre cube malgré que l'année (2010/2011) expérimenté la plus grande valeur des apports et se contrôler par le niveau d'eaux précédent dans le barrage et Le suivant tableau avec la courbe apparait le résultat.

	apport	AEP	irrigation	Vidanges	
année	totale lâchers				somme
<b>2006/2007</b>	<b>91,42</b>	<b>36,81</b>	<b>25,84</b>	<b>0,065</b>	<b>62,715</b>
<b>2007/2008</b>	<b>6,518</b>	<b>3,279</b>	<b>29,078</b>	<b>0</b>	<b>32,357</b>
<b>2008/2009</b>	<b>286,431</b>	<b>8,492</b>	<b>31,334</b>	<b>93,961</b>	<b>133,787</b>
<b>2009/2010</b>	<b>133,35</b>	<b>13,454</b>	<b>10,786</b>	<b>0</b>	<b>24,24</b>
<b>2010/2011</b>	<b>399,085</b>	<b>14,232</b>	<b>13,745</b>	<b>27,362</b>	<b>55,339</b>
<b>2011/2012</b>	<b>44,65</b>	<b>14,529</b>	<b>40,376</b>	<b>194,097</b>	<b>249,002</b>
<b>2012/2013</b>	<b>45,868</b>	<b>14,104</b>	<b>34,251</b>	<b>0</b>	<b>48,355</b>
<b>2013/2014</b>	<b>31,003</b>	<b>15,174</b>	<b>38,074</b>	<b>23,171</b>	<b>76,419</b>
<b>2014/2015</b>	<b>86,323</b>	<b>16,432</b>	<b>26,977</b>	<b>190,032</b>	<b>233,441</b>
<b>2015/2016</b>	<b>106,373</b>	<b>16,405</b>	<b>33,681</b>	<b>0</b>	<b>50,086</b>

**Tableau 15:l'apport annuel et les lâchers du barrage période 2006-2015**



**Courbe 9:l'apport annuel et les lâchers du barrage période 2006-2015**

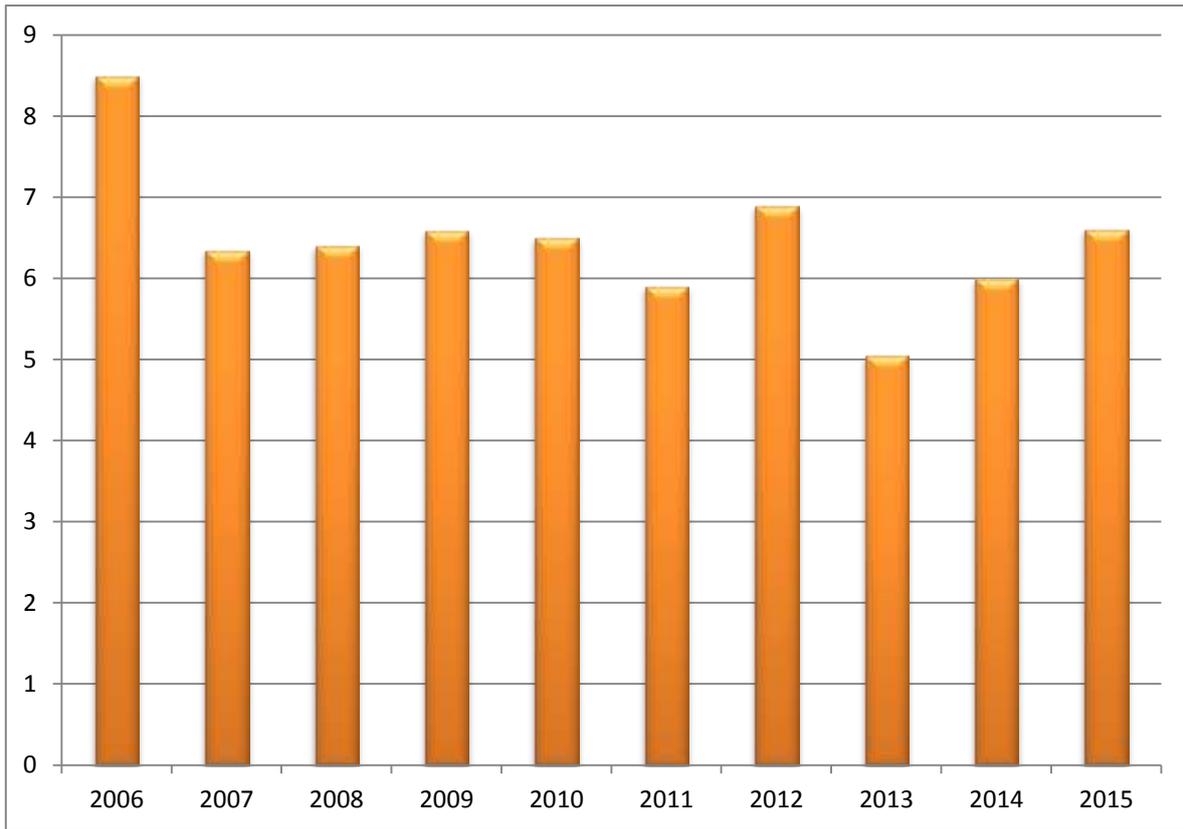
### 7-Evaporation Annuels et Mensuel :

L'évaporation est un passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux. Ce phénomène est donc une vaporisation progressive qui a des effets pour la température de l'environnement

**a-annuel :** comme remarque en note que 2006 Expérimenté le plus grande valeur d'évaporation (8.5 hm<sup>3</sup>).

année	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EVAP hm3	8,5	6,352	6,405	6,596	6,511	5,9	6,901	5,056	5,999	6,615

**Tableau 16: Evaporation annuels durent la période 2006-2015.**

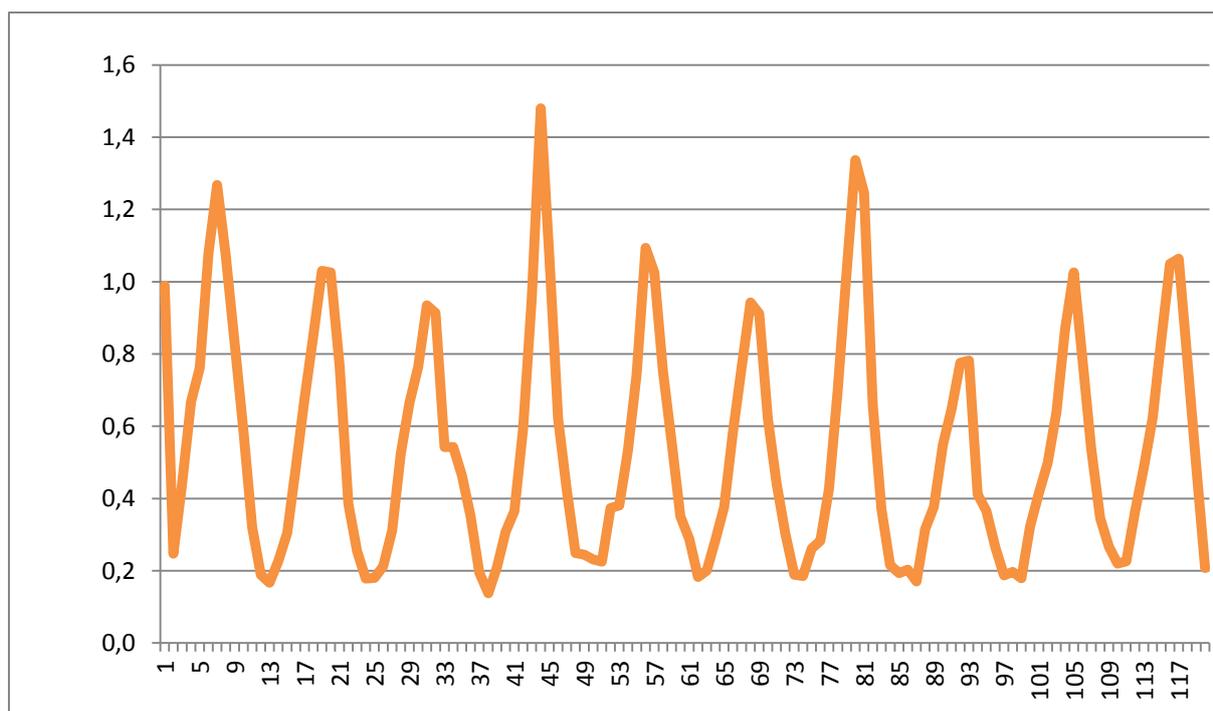


**Courbe 10:Evaporation annuel du barrage période 2006-2015**

**b- Mensuel :** Le processus d'évaporation, qu'il s'agisse de la surface de l'eau exposée ou de la surface du sol, implique plusieurs facteurs, dont certains sont des facteurs climatiques tels que le rayonnement solaire et la température. Dans ce cas, il est considéré comme un facteur essentiel, où nous observons que le taux d'évaporation augmente pendant l'été.

mois	EVAP hm3						
1	1,0	31	0,9	61	0,3	91	0,6
2	0,2	32	0,9	62	0,2	92	0,8
3	0,4	33	0,5	63	0,2	93	0,8
4	0,7	34	0,5	64	0,3	94	0,4
5	0,8	35	0,5	65	0,4	95	0,4
6	1,1	36	0,4	66	0,6	96	0,3
7	1,3	37	0,2	67	0,8	97	0,2
8	1,1	38	0,1	68	0,9	98	0,2
9	0,8	39	0,2	69	0,9	99	0,2
10	0,6	40	0,3	70	0,6	100	0,3
11	0,3	41	0,4	71	0,4	101	0,4
12	0,2	42	0,6	72	0,3	102	0,5
13	0,2	43	1,0	73	0,2	103	0,6
14	0,2	44	1,5	74	0,2	104	0,9
15	0,3	45	1,1	75	0,3	105	1,0
16	0,5	46	0,6	76	0,3	106	0,8
17	0,7	47	0,4	77	0,4	107	0,5
18	0,9	48	0,2	78	0,7	108	0,3
19	1,0	49	0,2	79	1,0	109	0,3
20	1,0	50	0,2	80	1,3	110	0,2
21	0,8	51	0,2	81	1,2	111	0,2
22	0,4	52	0,4	82	0,7	112	0,4
23	0,3	53	0,4	83	0,4	113	0,5
24	0,2	54	0,5	84	0,2	114	0,6
25	0,2	55	0,7	85	0,2	115	0,8
26	0,2	56	1,1	86	0,2	116	1,1
27	0,3	57	1,0	87	0,2	117	1,1
28	0,5	58	0,8	88	0,3	118	0,8
29	0,7	59	0,6	89	0,4	119	0,5
30	0,8	60	0,4	90	0,5	120	0,2

**Tableau 17: Evaporation mensuels durant la période 2006-2015.**

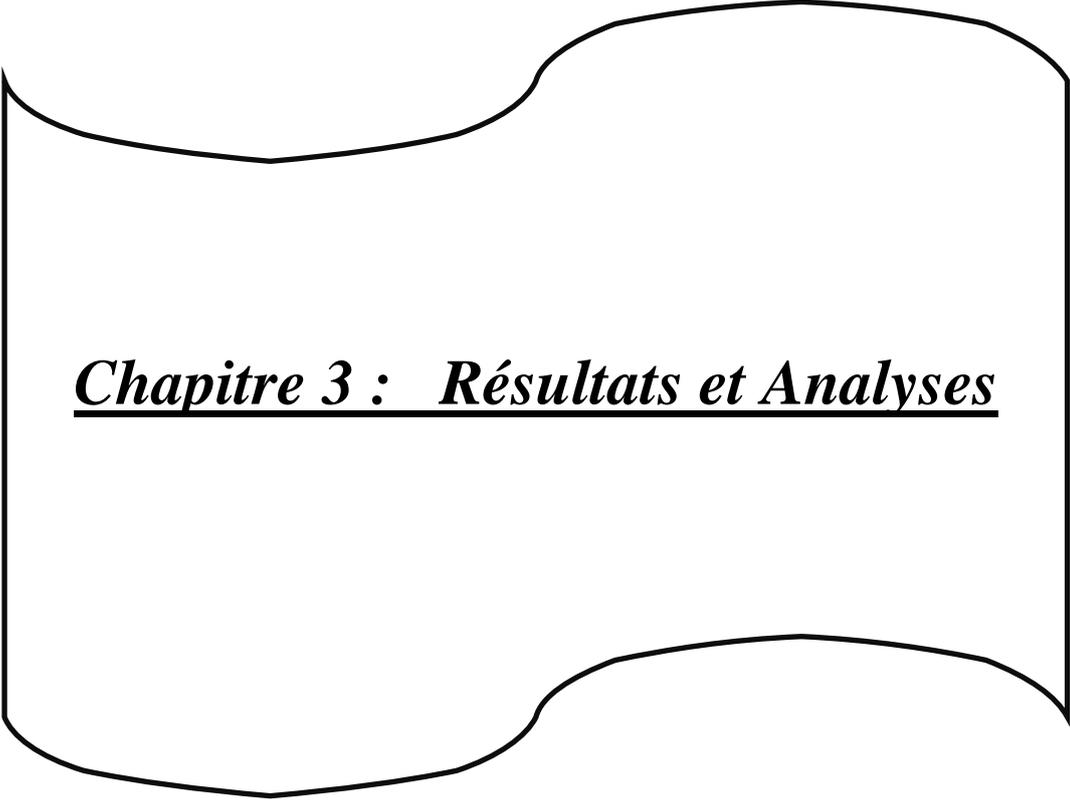


**Courbe 11:Evaporation mensuel du barrage période 2006-2015**

## 8-Conclusion :

L'Etat actuel du barrage :

- Les **pluies** sont très accentués durant les mois de janvier et février et mars avec des valeurs pouvant atteindre les 322 mm, et presque négligeables de l'ordre de 0,00 mm durant les mois de Juillet et Août. Il en ressort que la période où les pluies sont importantes comprend les mois pluvieux d'hiver
- **Les apports** sont très accentués durant les mois de Janvier et Février et mars avec des valeurs pouvant atteindre les 45 hm<sup>3</sup>, et presque négligeables de l'ordre de 0,15 hm<sup>3</sup> durant les mois de Juillet et Août. Il en ressort que la période où les apports sont importants comprend les mois pluvieux d'hiver et en va voir que l'année 2011/2012 Vu la plus grande proportion des apports.



**Chapitre 3 : Résultats et Analyses**

## **1-Introduction :**

L'optimisation est un outil mathématique d'aide à la décision, qui nous donne la meilleure gestion à réaliser face à des situations particulières. Elle donne simplement la règle de décision optimum par rapport à un critère choisi et par rapport aux probabilités d'occurrence des apports. Il s'agira par la suite de confronter les règles trouvées à la réalité en simulant le fonctionnement par des données réelles. Les indices de performance permettent de juger de la qualité de la règle de gestion lors de la simulation des règles déjà optimisées.

En outre ces indices doivent traduire les incidents qu'il y a eu lors de la simulation de la règle de gestion. Les incidents peuvent être de différentes nature nous pouvons par exemple citer la défaillance du stock, la demande non satisfaite ou le déversement important ou fréquent.

## **2-Gestion du Barrage :**

La connaissance des objectifs de fonctionnement des barrages vont permettre de définir la gestion d'un système. 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.

## **3-Les Principes de Gestion :**

### **3-1-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 humides, les gestionnaires et les utilisateurs doivent avoir un souci commun, la maîtrise de la contrainte liée à l'irrégularité de la ressource hydrique.

Dans la gestion des réservoirs d'eau, il existe de nombreuses incertitudes qu'on les classe en 3 grands types:

### **3-1-1-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.

### **3-1-2-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.

### **3-1-3-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.).

## **4-Les Objectifs de Gestion :**

Les grands objectifs de fonctionnement de la retenue vont permettre de définir la gestion d'un système. Ainsi, il faut bien connaître les réactions du système à son environnement afin d'en dégager les particularités. Par exemple,

dans les pays arides et semi-arides, les gestionnaires et les agriculteurs doivent faire face à la conjonction de la rareté et de l'irrégularité de la ressource, ainsi qu'à la disjonction entre la période des apports en eau et celle où les besoins en eau se déclarent.

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

#### **4-1-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.

#### **4-2-L'Alimentation en Eau Potable :**

La gestion d'une retenue permet une meilleure alimentation d'eau pour la consommation urbaine (domestique, industrielle, ...etc).

#### **4-3-L'Irrigation :**

L'irrigation représente les deux tiers de toute l'eau douce utilisée par les humains, et les terres irriguées produisent environ 40 % de toute la nourriture que nous consommons. C'est dire comme l'irrigation est vitale à notre survie. Ces faits suffiraient à faire valoir la nécessité de gérer soigneusement l'eau d'irrigation, qu'elle soit recueillie en surface ou pompée dans le sous-sol. Pourtant, d'autres facteurs expliquent pourquoi l'irrigation exige que l'on trouve de nouvelles manières, plus judicieuses, de la gérer.

En premier lieu, la somme des terres irriguées, par personne, diminue. Non seulement la croissance démographique devance-t-elle l'expansion de l'irrigation, mais de vastes régions de terres agricoles sont soustraites à

l'irrigation pour éviter la salinité et la contamination ou en raison de la prolifération urbaine.

De plus, d'énormes volumes d'eau d'irrigation, très coûteuse, sont gaspillés. Au moins 75 % de l'eau dérivée ou pompée pour l'irrigation est perdue par suite de l'évaporation, de fuites, de l'infiltration ou simplement de mauvaise gestion.

Enfin, la majeure partie de l'eau qui s'écoule dans les systèmes d'irrigation sert à diverses fins. Un canal d'irrigation, par exemple, peut être utilisé pour la pisciculture, laver des animaux ou du linge, éliminer des déchets et parfois (bien que ce soit déconseillé) comme source d'eau potable. La conservation de l'eau d'irrigation pour ces autres usages contribue à la productivité et à la santé publique.

On sait que 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.

On peut citer d'autre objectif mais ils sont hors de notre cadre d'étude :

- La production d'énergie électrique.
- Le maintien d'un niveau écologique minimum.

## **5-Les Critères de Performance :**

### **5-1-Définition :**

Connue aussi sur le nom de l'indice, le critère de performance est un outil d'évaluation d'une situation quelconque (la gestion du barrage dans notre cas).

### **5-2-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.

### **5-3-Gestion des risques par simulation**

L'optimisation permet d'établir les lâchers les moins pénalisants par rapport à un critère choisi qui dépend d'un paramètre de gestion. 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. 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.

### **5-4-Indices de performance :**

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

**a)-La défaillance du stock:** L'eau atteint un niveau inférieur où il ne reste que la tranche morte du barrage.

**b)-Le 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.

$$\text{Intensité} = \frac{\text{Intensité maximale de défaillance sur 1 mois}}{\text{Valeur Objectif}}$$

Avec :

Valeur Objectif d'alimentation en eau potable = intensité max de défaillance/la demande

- **La résilience :** temps de retour à un état normal après un incident :

$$\text{La réseillience} = \frac{\text{somme des mois de rétablissement}}{\text{somme des mois avec défaillance}}$$

Avec : Mois de rétablissement = Mois sans défaillance qui suit un mois de défaillance.

- **La fiabilité** =  $\frac{\text{la somme des mois sans défaillance}}{\text{le nombre des mois total}}$

**6-Paramètres de simulation :**

Abréviation	Nom du paramètre		Valeur	Unité
	Anglais	Français		
Catch	Catchment area	Surface BV	1 160 000 000	<b>m2</b>
Dinm	Days in month	Nbr dej /mois	30,42	/
Nmonth	Total number of months	Nbr de m total	120	/
Capacity	Reservoircapacity	Capacité de barrage	158 827 000	<b>m3</b>
Target	Supplytarget	Demande	240,0	<b>10<sup>6</sup> l/jour</b>
Warn	Warncapacity	Capacité max	170 000 000	<b>m3</b>
Warning	Warning index	Seuil critique de remplissage	0,51	<b>index</b>
Fail	Fail level	Niveau de défaillance	0,73	<b>index</b>
	/	Taux de remplissage initial du réservoir	0,89	<b>index</b>
Length	Actuallakelength	Longueur du lac	29000	<b>m</b>
Width	Widthtarget	Largeur objectif	980	<b>m</b>
Area	Area target	Surface objectif	28 420 000	<b>m2</b>
Depth	Depth minimum target	Profondeur objectif min.	1404	<b>m</b>
	Depth maximum target	Profondeur objectif max.	200	<b>m</b>

Tableau 18 : paramètres de simulation

**7- Détails pour l'alimentation en eau potable :**

<b>Objectif d'alimentation</b>	<b>876000</b>	<b>10<sup>6</sup> l</b>
<b>Eau fournie</b>	<b>140000</b>	<b>10<sup>6</sup> l</b>
<b>Défaillance d'alimentation totale</b>	<b>736000</b>	<b>10<sup>6</sup> l</b>
<b>Atteinte de l'objectif d'alimentation</b>	<b>16</b>	<b>%</b>
<b>Intensité de la défaillance max.</b>	<b>0,0</b>	<b>10<sup>6</sup> l/jour pendant 1 mois</b>

**Tableau 19 : détails pour l'alimentation en eau potable**

**8- Détails pour les débordements :**

<b>Intensité totale de débordement</b>	<b>1080416,7</b>	<b>10<sup>6</sup> m<sup>3</sup></b>
<b>Intensité maximale de débordement</b>	<b>2275000,0</b>	<b>10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> pendant 1 mois</b>

**Tableau 20 : détails pour les débordements**

**Remarque :** intensité de débordement = intensité maximale de débordement normalisée par rapport à Max (Pluie nette mensuelle).

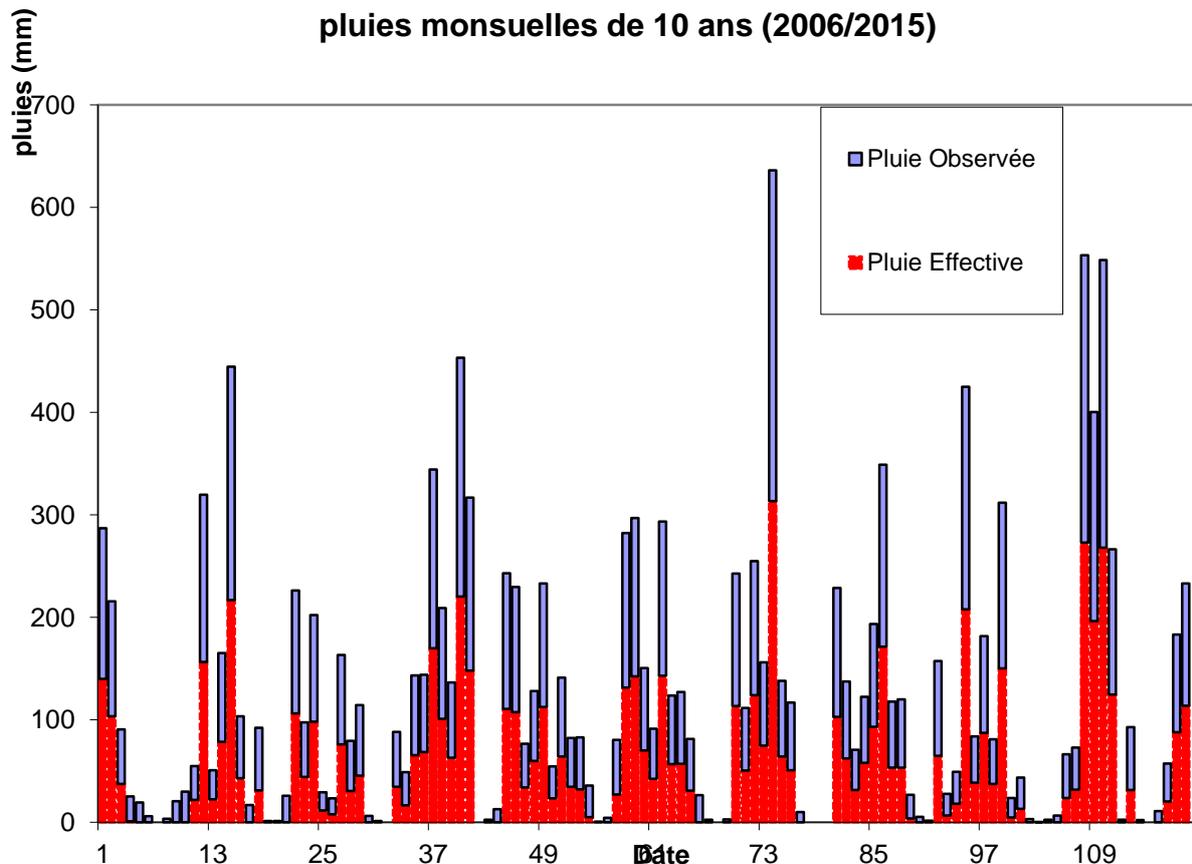
Pour la simulation on obtient les données de pluies et évaporation de 10 ans (120 mois) et le tableau suivant combine les données :

Année	Mois	Pluie Observée	Evaporation	Pluie effective	N° du Mois
		mm	mm	mm	
2006	1	146,9	7,0	139,9	1
2006	2	112,2	8,7	103,5	2
2006	3	53,1	15,6	37,5	3
2006	4	24,3	23,5	0,8	4
2006	5	19,3	26,8	0,0	5
2006	6	6,0	37,9	0,0	6
2006	7	0,0	44,6	0,0	7
2006	8	3,4	37,7	0,0	8
2006	9	20,6	331,4	0,0	9
2006	10	30,0	204,5	0,0	10
2006	11	33,1	11,3	21,8	11
2006	12	163,1	6,7	156,5	12
2007	1	28,3	5,9	22,4	13
2007	2	86,6	8,0	78,6	14
2007	3	227,6	10,7	216,9	15
2007	4	60,3	17,2	43,1	16
2007	5	16,8	23,9	0,0	17
2007	6	61,1	30,0	31,1	18
2007	7	1,3	36,5	0,0	19
2007	8	1,4	36,1	0,0	20
2007	9	25,8	26,9	0,0	21
2007	10	119,9	13,6	106,4	22
2007	11	53,3	8,9	44,4	23
2007	12	104,3	6,3	98,0	24
2008	1	17,8	6,3	11,5	25
2008	2	15,4	7,5	7,9	26
2008	3	87,1	10,9	76,2	27
2008	4	49,0	18,5	30,5	28
2008	5	68,8	23,4	45,4	29
2008	6	6,2	26,9	0,0	30
2008	7	1,4	33,5	0,0	31
2008	8	0,0	32,2	0,0	32
2008	9	53,7	19,1	34,6	33
2008	10	32,7	16,3	16,4	34
2008	11	77,9	12,4	65,6	35
2008	12	75,4	6,9	68,5	36
2009	1	174,6	4,9	169,7	37
2009	2	108,2	7,4	100,8	38
2009	3	73,7	10,8	62,9	39
2009	4	233,0	12,8	220,2	40
2009	5	168,9	20,8	148,1	41
2009	6	0,0	33,5	0,0	42
2009	7	2,4	36,9	0,0	43
2009	8	12,9	37,5	0,0	44
2009	9	132,4	21,8	110,6	45
2009	10	122,2	14,9	107,4	46
2009	11	42,7	8,8	33,9	47
2009	12	68,3	8,6	59,7	48
2010	1	120,6	8,1	112,5	49

2010	2	31,2	7,9	23,3	50
2010	3	77,2	13,2	64,0	51
2010	4	47,9	13,4	34,5	52
2010	5	50,8	18,8	32,1	53
2010	6	30,9	25,8	5,1	54
2010	7	0,6	38,1	0,0	55
2010	8	4,5	36,1	0,0	56
2010	9	53,5	26,5	27,0	57
2010	10	150,9	19,6	131,3	58
2010	11	154,6	12,4	142,3	59
2010	12	80,3	10,1	70,2	60
2011	1	48,8	6,4	42,4	61
2011	2	150,2	7,0	143,2	62
2011	3	66,8	10,0	56,8	63
2011	4	70,2	13,3	56,9	64
2011	5	50,5	19,7	30,8	65
2011	6	26,5	27,0	0,0	66
2011	7	2,5	33,2	0,0	67
2011	8	0,0	31,1	0,0	68
2011	9	2,7	21,8	0,0	69
2011	10	129,1	15,6	113,6	70
2011	11	61,2	10,7	50,5	71
2011	12	130,8	6,7	124,2	72
2012	1	81,3	6,5	74,8	73
2012	2	322,7	9,2	313,5	74
2012	3	74,0	10,0	64,0	75
2012	4	65,9	15,0	50,9	76
2012	5	10,1	24,6	0,0	77
2012	6	0,0	36,2	0,0	78
2012	7	0,0	47,0	0,0	79
2012	8	0,0	43,8	0,0	80
2012	9	125,9	23,2	102,7	81
2012	10	75,3	13,1	62,3	82
2012	11	39,1	7,6	31,5	83
2012	12	64,6	6,8	57,8	84
2013	1	100,3	7,1	93,2	85
2013	2	177,4	6,0	171,4	86
2013	3	64,4	11,1	53,3	87
2013	4	66,6	13,3	53,3	88
2013	5	23,0	19,3	3,7	89
2013	6	5,4	22,8	0,0	90
2013	7	1,5	27,3	0,0	91
2013	8	92,4	27,5	64,9	92
2013	9	21,1	14,5	6,6	93
2013	10	31,0	12,9	18,1	94
2013	11	217,1	9,3	207,8	95
2013	12	45,2	6,6	38,6	96
2014	1	94,3	6,9	87,4	97
2014	2	43,6	6,3	37,3	98
2014	3	161,6	11,3	150,3	99
2014	4	19,1	14,5	4,6	100
2014	5	30,6	17,6	13,0	101

2014	6	3,1	22,4	0,0	102
2014	7	0,2	30,6	0,0	103
2014	8	2,6	36,1	0,0	104
2014	9	6,7	27,6	0,0	105
2014	10	42,7	18,9	23,8	106
2014	11	41,2	9,4	31,8	107
2014	12	280,6	7,7	272,9	108
2015	1	204,2	8,0	196,3	109
2015	2	280,7	12,7	268,0	110
2015	3	141,8	17,2	124,6	111
2015	4	2,6	21,9	0,0	112
2015	5	61,2	29,6	31,6	113
2015	6	2,2	37,0	0,0	114
2015	7	0,0	37,4	0,0	115
2015	8	10,8	27,6	0,0	116
2015	9	37,2	17,0	20,2	117
2015	10	95,3	7,3	88,0	118
2015	11	119,2	5,5	113,8	119
2015	12	0,0	6,4	0,0	120

**Tableau 21 : pluies et évaporation de 10 ans**



**Courbe 12 : Pluies mensuelles (2006/2015)**

## 9-Méthode à appliquer :

Les différentes variables de décision définissant un scénario de gestion sont :

- La capacité de stockage du lac:  $V_s$
- L'objectif de prélèvement journalier  $P_{obj}$  pour la production d'eau potable
- le volume de remplissage critique  $V_c = a(\%) \cdot V_s$  en dessous duquel l'objectif de prélèvement journalier est réduit
- Le facteur de réduction de l'objectif de prélèvement en situation de remplissage critique:

$$P_{obj}^* = b(\%) P_{obj} \text{ (non étudié ci dessous).}$$

## 10-Simulation de l'évolution temporelle du remplissage du réservoir :

De l'équation de continuité appliquée au réservoir on tire le volume stocké dans le réservoir à la fin du pas de temps  $i+1$ , ainsi que le volume d'eau éventuellement débordé pendant la période  $D_t = [i, i+1]$ :

$$V_{i+1} = \text{Min}(V_i + P_{n,i} - p_i \cdot D_t ; V_s)$$

$$V_{deb,i+1} = \text{Max}(V_i + P_{n,i} - p_i \cdot D_t ; 0)$$

Avec

$P_{n,i}$ : pluie nette tombée pendant la période  $D_t = [i, i+1]$  :

$P_{n,i} = (\text{pluie brute} - \text{évapotranspiration}) \cdot \text{surface bassin versant} - \text{évaporation} \cdot \text{surface lac}$

Et avec  $p_i$  : débit réellement prélevé pour la production d'eau potable :

$$p_i = P_{obj} \text{ si } V_i > V_c$$

$$b(\%) P_{obj} \text{ si } b(\%) P_{obj} < V_i < V_c$$

$$0 \text{ si } V_i < b(\%) P_{obj}$$

## 11- Calcul des hauteurs de remplissage et de la surface au miroir :

Comme le réservoir a une section transversale triangulaire de fruit  $m$  et une longueur  $L$  indépendante du taux de remplissage, sa relation "hauteur-volume stocké" est :

$$V(h) = m h^2 L$$

D'où la hauteur d'eau dans le réservoir  $h_{i+1}$ , et la surface du plan d'eau  $A_{i+1}$  à la fin du pas de temps  $i+1$ :

$$h_{i+1} = \sqrt{\frac{V_{i+1}}{\frac{m}{L}}}$$

$$A_{i+1} = w_{i+1} \cdot L = 2 \cdot \sqrt{(V_i + 1 \cdot m \cdot L)}$$

## 12-Définition des défaillances :

Production eau potable : défaillance si  $p_i < 75$  (%)  $P_{obj}$

Déf  $E_{Pi} = \text{Max}((p_i - 0,75P_{obj}); 0)$

Récréation : défaillance si  $A_i < A_c = 150 \cdot 500 \text{ m}^2$

Déf  $Re_{ci} = \text{Max}((A_i - A_c); 0)$

Pêche : défaillance si  $h_i > H_{max} = 30 \text{ m}$  ou  $h_i < H_{min} = 15 \text{ m}$

Déf  $Pêche_i = h_i - H_{max}$  si  $h_i > H_{max} = 30 \text{ m}$

Déf  $Pêche_i = H_{min} - h_i$  si  $h_i < H_{min} = 15 \text{ m}$

## 13-Critères RRV :

Fiabilité R1 = fréquence des défaillances = (nombre de défaillances / nombre de mois de simulation).

Résilience R2 = probabilité de retrouver un état normal à la suite d'un état défaillant = (nombre de mois avec recouvrement / nombre de mois avec défaillance).

Intensité V = maximum sur la période de simulation des écarts obtenus entre la valeur mensuelle de la variable d'intérêt et la valeur critique de cette variable.

### 13-1-Normalisation des critères RRV :

Cette normalisation permet d'afficher les valeurs de tous les critères RRV sur un graphique comportant une seule échelle commune (de 0 à 100%). Pour les critères Fiabilité et Résilience, la valeur brute du critère peut être directement exprimée en %. Pour l'Intensité des défaillances, la normalisation suivante est suggérée:

**13-1-1-Production eau potable :**

Normalisation par l'intensité maximum possible de la défaillance

(obtenue si  $p_i = 0$  et donc  $Déf\ Max = Pobj$ )

Intensité =  $V_{EauPot} = \text{Max}(Déf\ E_{Pi} / Pobj)$

**13-1-2-Récréation :**

Normalisation par l'intensité maximum possible de la défaillance

(obtenue si  $A_i=0$  donc  $Déf\ Max = A_c$ ).

Intensité =  $V_{Recreat.} = \text{Max}(Déf\ Reci / A_c)$

**13-1-3-Pêche :**

Normalisation par la largeur de la plage des hauteurs satisfaisantes pour les poissons

( $D_h = H_{max} - H_{min}$ ). Une défaillance de 1.5m est intuitivement moins grave si la largeur de la plage

Satisfaisante est  $D_h = 10m$  que si cette largeur est de  $D_h = 0.5m$  uniquement.

Intensité =  $V_{pêche} = \text{Max}(Déf\ Pêche_i / D_h)$

**14-Autres critères possibles pour évaluer la performance du système :**

Degré de satisfaction global de la demande sur l'ensemble de la période de simulation:

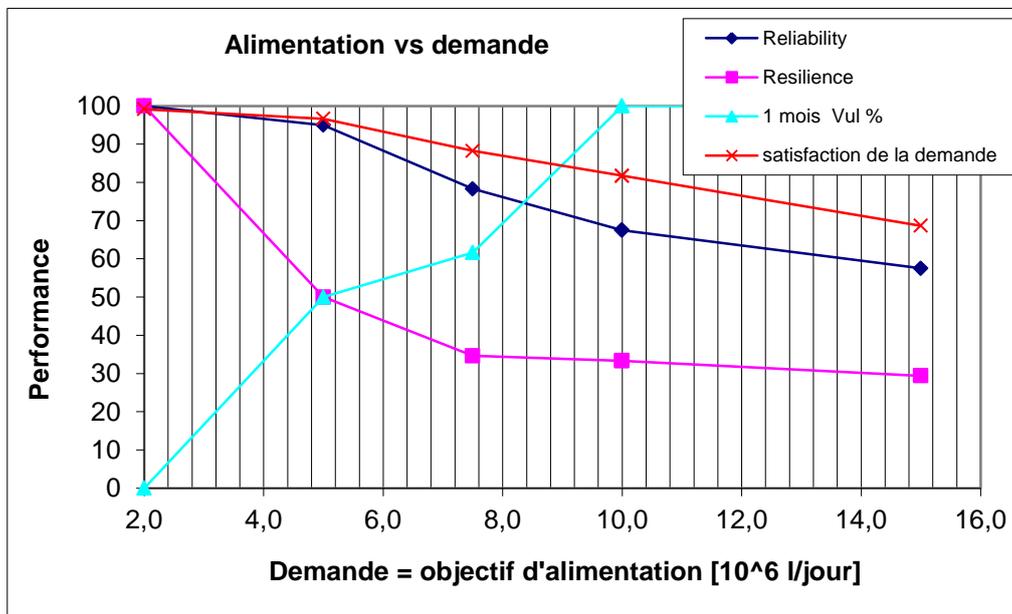
$D = S(p_i.Dt) / S(p_{obj}.Dt) = S p_i / (n * p_{obj})$  avec  $n$  nombre de pas de temps de simulation.

Critères RRV sur les défaillances "débordement"

**Résultats : (toutes choses égales par ailleurs)**

**a-Variable de décision modifiée : objectif de prélèvement journalier ...**

Si on parvenait à diminuer la demande en eau jusqu'à 2000 m<sup>3</sup>/jour par rapport aux 7500 m<sup>3</sup>/jour actuellement demandés, ceci constituerait la solution la plus simple pour satisfaire tous les domaines (cf. Graphique Performance Eau Potable ci dessus et graphiques similaires obtenus pour Récréation et Pêche dans la feuille EXCEL). Il faudrait pouvoir disposer d'une autre source . Conséquence pour la ville de façon à compenser la différence entre les besoins réels et les prélèvements effectués dans le lac. Peu réaliste!

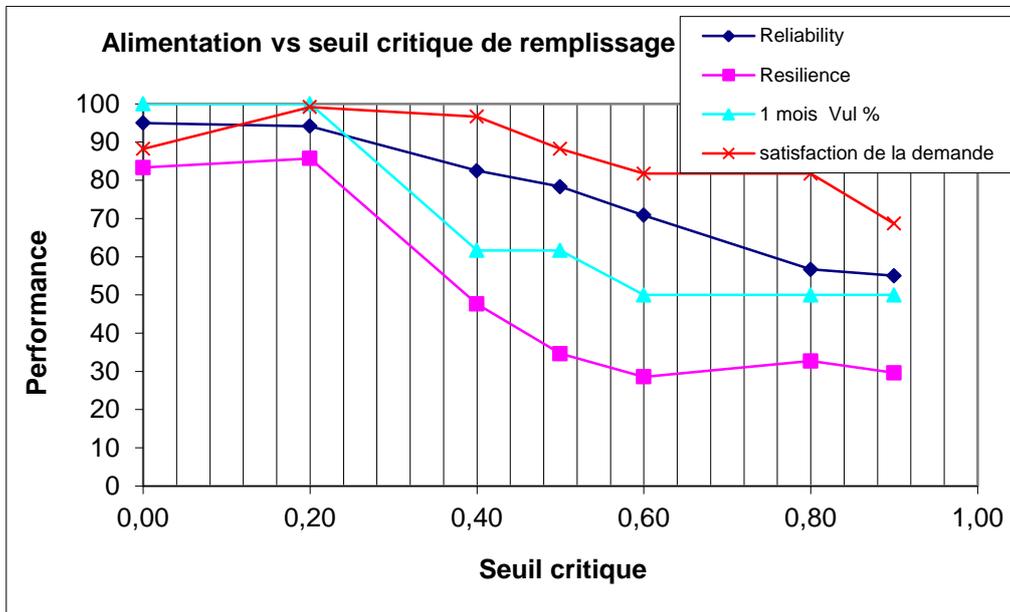


**Courbe13 : alimentation vs demande**

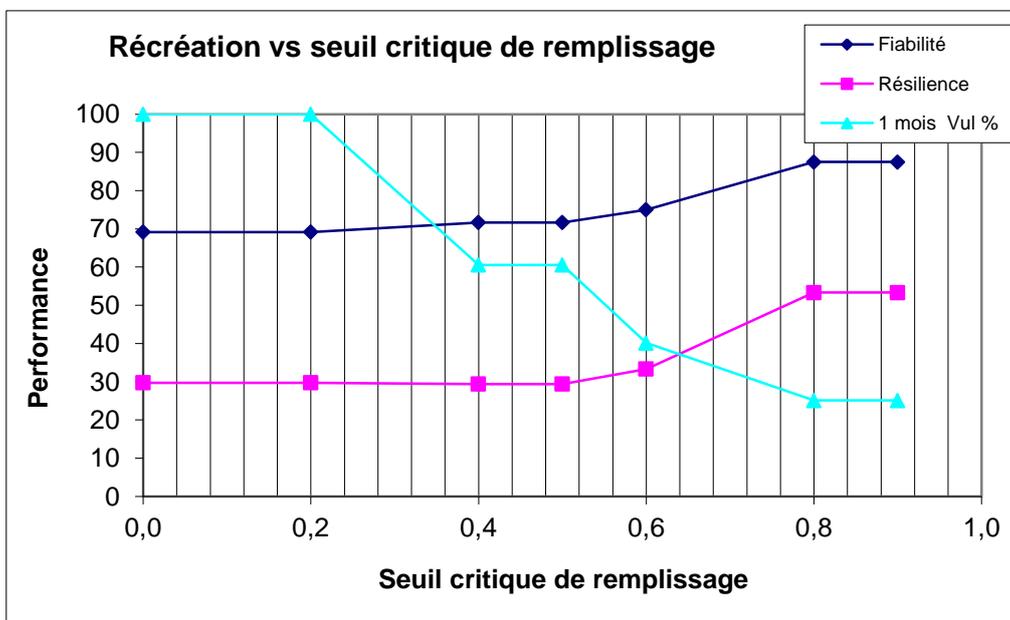
**b-Variable de décision modifiée : seuil critique de remplissage à partir duquel on réduit l'objectif de production journalier**

1) Si on abaisse le seuil critique jusqu'à 20 % de la capacité maximum de stockage du réservoir, on obtient une meilleure satisfaction de la demande, ce qui s'exprime également par une fiabilité et une résilience élevées. Mais la vulnérabilité est en même temps très élevée! On a un cas typique de contradiction des critères! Au gestionnaire de décider s'il veut prendre ce risque.

2) Pour les deux autres domaines, un abaissement du seuil critique diminue la fiabilité et la résilience pour augmenter la vulnérabilité. On a alors une contradiction entre les différents intérêts. Modifier le seuil critique n'est pas une bonne solution!



**Courbe14 : alimentation vs seuil critique de remplissage**



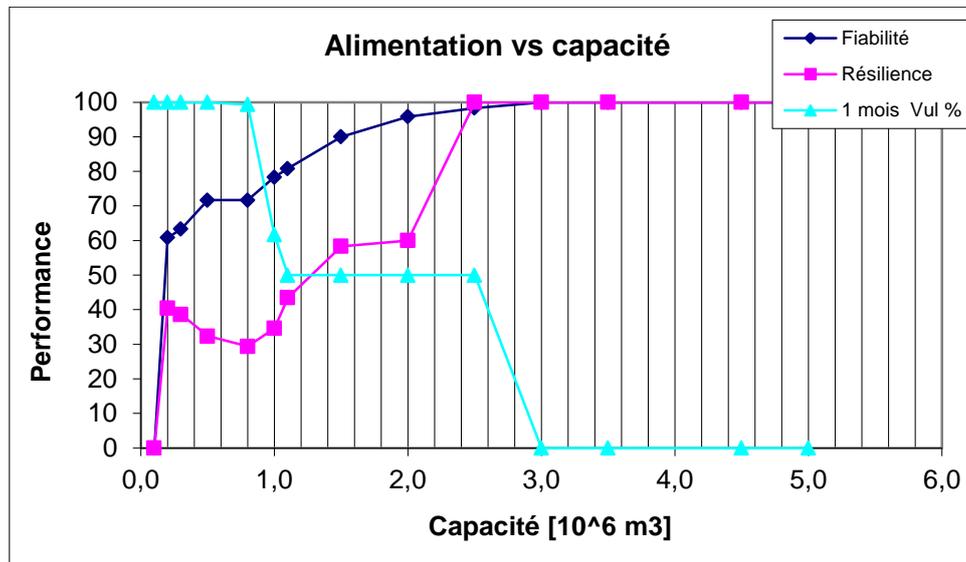
**Courbe15 : récréation vs seuil critique de remplissage**

**c-Variabile de décision modifiée : capacité totale de stockage du réservoir**

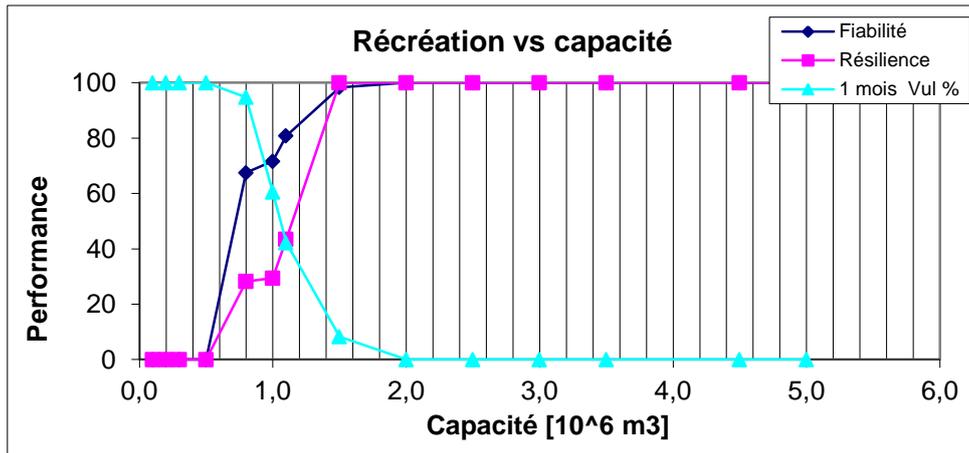
1) Pour chaque domaine, on trouve une capacité qui satisfait les trois critères. On peut améliorer la satisfaction des différents utilisateurs en augmentant la capacité.

2) Mais on voit que l'on ne peut pas satisfaire les trois domaines en même temps, notamment les objectifs de la pêche et de l'alimentation en eau potable sont contradictoires.

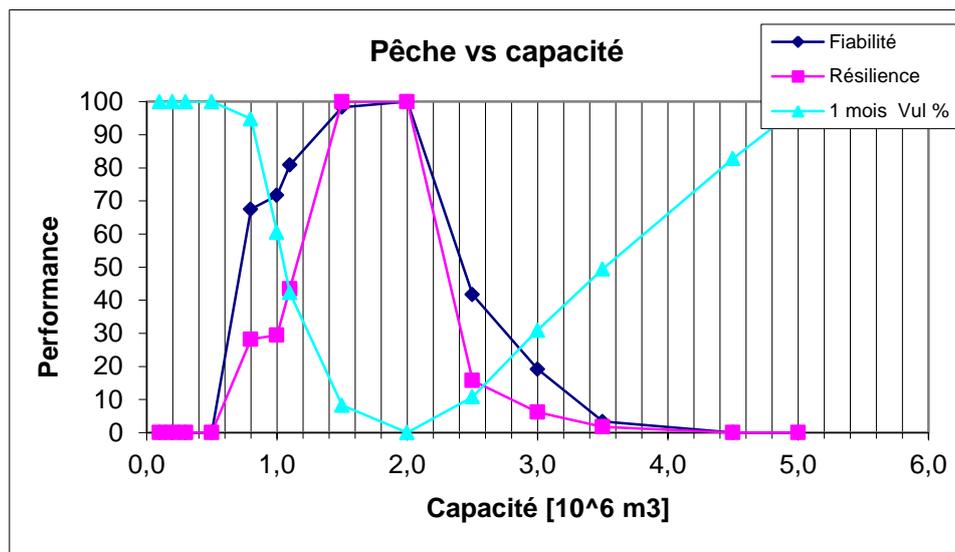
3) Que faire? Tester l'influence des objectifs sur le résultat (analyse de sensibilité) et trouver un compromis. Les profondeurs-objectif sont sans doute des grandeurs approximatives. Et on voit que si on augmente la profondeur maximale de 30m à 32m, on trouve une solution qui satisfait tous les domaines.



**Courbe16 : alimentation vs capacité**



**Courbe17 : récréations vs capacité**

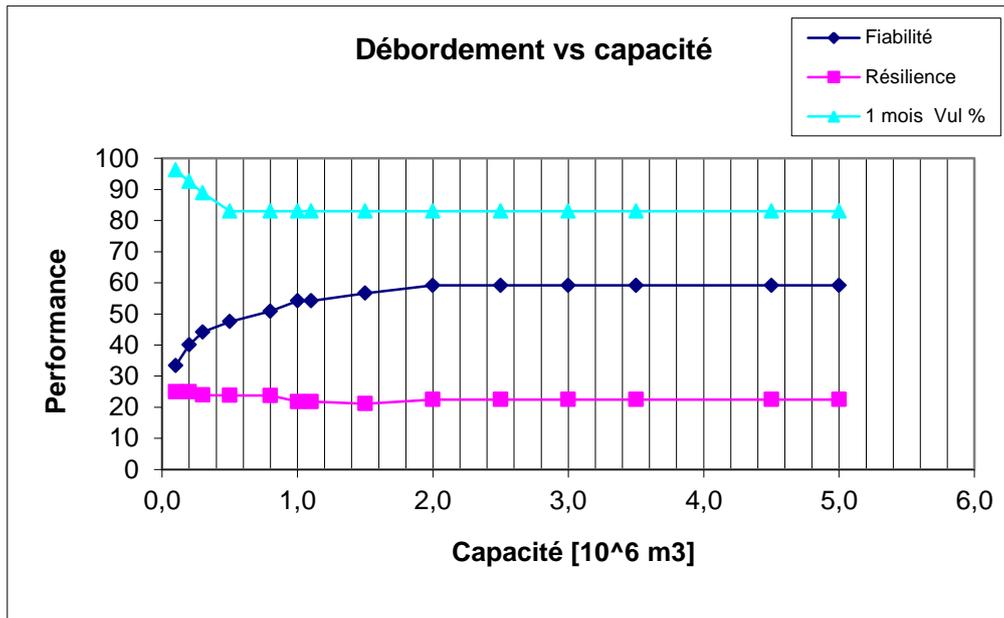


**Courbe18 : pêche vs capacité**

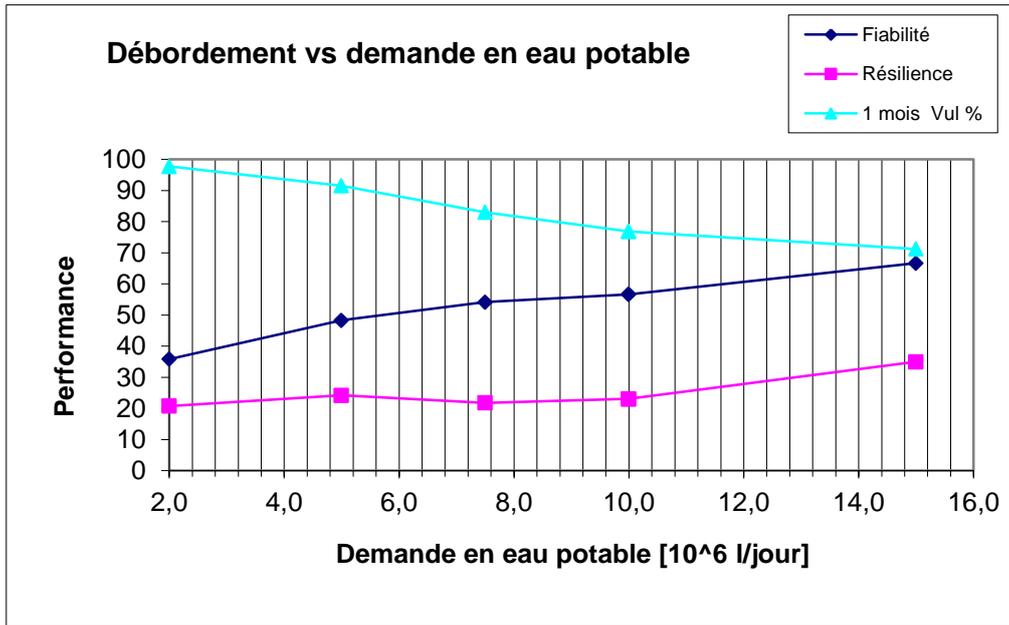
### 15-Analyse complémentaire vis à vis des débordements:

Les caractéristiques des débordements sont peu sensibles aux différentes variables de décision (et insensible au seuil de remplissage critique). La fréquence des débordements est très importante (>40%) et la résilience faible quels que soient les paramètres de la stratégie de gestion choisis.

L'intensité maximum des débordements (normalisée par la hauteur maximum de pluie mensuelle nette observée sur la période de simulation) est aussi très importante : quelle que soit la stratégie de gestion choisie parmi celles possibles ici, la proportion de la pluie nette non absorbée par la retenue pour le mois le plus pluvieux de la période est supérieure à 70%. Dans le cas où la retenue devrait aussi être utilisée pour la gestion des hautes eaux, d'autres principes de gestion devraient donc être mis en place.



**Courbe 19 : débordement vs capacité**



**Courbe 20 : débordement vs demande en eau potable**