

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1**



FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE, DE LA GEOGRAPHIE ET DE  
L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

DEPARTEMENT DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

LABORATOIRE DES SCIENCES DU TERRITOIRE, RESSOURCES NATURELLES ET  
ENVIRONNEMENT (LASTERNE)

**THESE DE DOCTORAT DE 3<sup>ème</sup> CYCLE (LMD)**  
**Spécialité : Hydrologie et gestion des hydrosystèmes**

Par :  
**Halima LAKACHE**

Sous la direction de: Pr Azeddine MEBARKI  
Co-directeur: Dr Zeineddine NOUACEUR

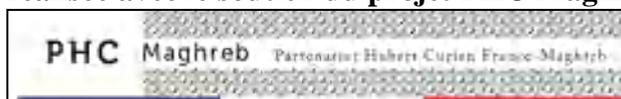
**Thème :**

**Etude de la variabilité des apports hydrologiques des oueds  
Rhumel-Endja au barrage Béni Haroun (Algérie Orientale).  
Enjeux du climat et de l'environnement**

*Thèse soutenue publiquement à Constantine le 14 /07/2022 devant le jury composé de :*

<b>Hafiza TATAR</b>	Professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine 1	Président
<b>Azeddine MEBARKI</b>	Professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine 1	Rapporteur
<b>Zeineddine NOUACEUR</b>	Maître de Conférences (A) à l'Université de Rouen-Normandie (France)	Co-rapporteur
<b>Abdelaziz LOUAMRI</b>	Maître de Conférences (A) à l'Université Frères Mentouri Constantine 1	Examineur
<b>Nadir MAROUF</b>	Maître de Conférences (A) à l'Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi	Examineur
<b>Valérie MESNAGE</b>	Maître de Conférences (A) à l'Université de Rouen-Normandie (France)	Examineur

**Cette thèse a été réalisée avec le soutien du projet PHC Maghreb (17 MAG 32)**



## AVANT – PROPOS

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat, sous la direction de Pr Azeddine MEBARKI (Professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine 1) et de Zeineddine NOUACEUR (Maître de Conférences à l'Université de Rouen-Normandie).

Il a bénéficié du soutien du projet de coopération Hubert Curien, PHC Maghreb 17 MAG 32 «*Qualité des lacs de barrage au Maghreb, envasement et eutrophisation, pour une gestion intégrée des ressources en eau potable*» (coordinatrice Valérie MESNAGE), entre notre laboratoire LASTERNE de la Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire et nos partenaires l'UMR M2C CNRS 6143 et l'UMR IDEES CNRS 6226 de l'Université de Rouen-Normandie (France), le Laboratoire Géoressources et Environnement de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès (Maroc) et l'INRAP- Pôle Technologique Sidi Thabet (Tunisie).

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, le Professeur **Azeddine MEBARKI**, directeur du laboratoire LASTERNE à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1, Je lui suis infiniment reconnaissant pour ses conseils, sa patience et sa rigueur scientifique.

Je tiens également à remercier Monsieur **Zeineddine NOUACEUR**, (UMR IDEES CNRS 6226, Université de Rouen), d'avoir codirigé ce travail de recherche tout au long de la période de mes stages à l'Université de Rouen, je le remercie chaleureusement pour ses précieux conseils et son aide.

Ma vive gratitude va également à **Valérie MESNAGE**, Maître de Conférences/HDR (UMR CNRS 6143 M2C), pour son précieux soutien et ses orientations claires autour de la problématique de cette thèse, je la remercie également pour son enthousiasme et ses encouragements.

J'exprime également ma sincère reconnaissance aux autres membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail: Madame **Hafiza TATAR**, Monsieur **Abdelaziz LOUAMRI** et Monsieur **Nadir MAROUF**.

Ma gratitude va à l'ensemble du personnel du laboratoire LASTERNE et je remercie également Monsieur **Ahmed BOUGHRARA**, Maître de Conférences, pour son aide.

Je tiens à remercier les directions de l'ONM Constantine, l'ANRH d'Alger et la direction de l'ANBT de Béni Haroun, pour avoir mis à ma disposition les bases de données nécessaires à la réalisation de cette thèse. Un grand merci pour toutes les équipes de ces directions.

Merci à mes collègues et amis (e): Farah Boutouatou, Sabrina Tarmoul, Rokia Azioune, Saadi Iskounen, Ammar Deffaf, Yacine Kitouni, Naouel Mihoubi, Soufiane Kheniche, pour leurs aides.

A titre plus personnel, je remercie ma petite famille, mes parents toujours là pour m'accorder leur soutien et de m'avoir donné la chance de faire de longues études. Merci à mes frères, mes sœurs, pour leurs encouragements et leur soutien tout au long de ce travail. Ma dernière pensée revient à celui qui va partager ma vie. Merci d'avoir été là pour m'encourager et m'aider.

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>ABH-CSM</b>	Agence de bassin hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue
<b>AEP</b>	Alimentation en Eau Potable
<b>ANBT</b>	Agence Nationale des Barrages et des Transferts ( <b>ex ANB</b> Agence Nationale des Barrages)
<b>ANRH</b>	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
<b>APD</b>	Avant-Projet Détaillé
<b>BCR</b>	Béton Compacté au Rouleau
<b>CE</b>	Conductivité électrique
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	Calcium
<b>Cl<sup>-</sup></b>	Chlorure
<b>DBO5</b>	Demande Biochimique en Oxygène
<b>DCO</b>	Demande chimique en oxygène
<b>ETP</b>	Evapotranspiration Potentielle
<b>INSID</b>	Institut National des Sols, Irrigation et Drainage
<b>GR2M</b>	Génie Rural à Deux paramètres Mensuels
<b>LEM</b>	Laboratoire des Études Maritimes
<b>MAO</b>	Mostaganem-Arzew-Oran
<b>MES</b>	Matières En Suspension
<b>MGCTI</b>	Méthode Graphique Chronologique de Traitement de l'Information
<b>MNT</b>	Modèle Numérique du Terrain
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	Magnésium
<b>Mn</b>	Manganèse
<b>NGA</b>	Niveau Géodésique Algérien
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	Nitrate
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	Ammonium
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	Nitrites
<b>OMS</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>ONID</b>	Office National de l'Irrigation et du Drainage
<b>ONM</b>	Office National Météorologique
<b>PHE</b>	Niveau des plus hautes eaux
<b>PNE</b>	Plan National de l'Eau
<b>PH</b>	Potentiel d'hydrogène
<b>PO<sub>4</sub><sup>-3</sup></b>	Phosphate
<b>NRN</b>	Niveau de retenue normal
<b>RS</b>	Résidu Sec
<b>SIG</b>	Système d'Information Géographique
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	Sulfates
<b>TSS</b>	Transport Solide Spécifique
<b>UNESCO</b>	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
<b>°C</b>	Degré Celsius
<b>µS/cm</b>	Micro Siemens par centimètre

## RESUME

Cette recherche contribue à approfondir la connaissance de l'hydrologie algérienne, à travers l'exemple d'un important bassin, physiquement contrasté, de l'Est algérien, formé par les oueds Rhumel et Endja. Ces deux oueds drainent une superficie respective de 5315 km<sup>2</sup> et de 2160 km<sup>2</sup>, et confluent dans l'oued El Kébir où est érigé le plus grand barrage du pays, «Béni Haroun».

L'étude de la variabilité spatio-temporelle du signal d'entrée (pluie) et de sortie (débit) dans le bassin, est basée sur les séries temporelles de données hydro-pluviométriques. L'approche statistique de la méthode «matrice Bertin» appliquée pour les pluies sur 42 ans (1971/72-2011/2012) a permis de déceler les différentes périodes humides et sèches. Le caractère sévère de la sécheresse apparaît entre 1987/88 à 2001/02 et une phase humide survient à partir de l'année hydrologique 2002/03 avec une plus grande fréquence d'années humides et très humides. Par ailleurs, l'utilisation des méthodes spectrales des ondelettes et la cohérence en ondelettes a mis en évidence une évolution des pluies et des débits, structurée selon plusieurs modes de variabilité qui s'expriment pour différentes échelles temporelles. La variabilité des débits est fortement influencée par une variabilité d'origine pluviométrique (les pourcentages de cohérence restent à un niveau > 50 %) et seulement une part relativement réduite de cette variabilité est à expliquer par d'autres facteurs à caractère physiographique.

La variabilité est encore plus marquée à l'échelle journalière et pendant les événements, extrêmes, en particulier les crues. L'analyse des crues et des étiages a fait appel à de nombreux outils statistiques pour caractériser et modéliser ces événements extrêmes.

L'analyse des données du bilan d'eau (2003/04-2017/18) du barrage de Béni Haroun confirme le retour à une plus grande fréquence d'années humides à partir de 2003, année de mise en eau du barrage. L'apport moyen observé (1013.9 hm<sup>3</sup>/an) s'avère bien plus important que l'apport théorique (435 hm<sup>3</sup>/an) défini par les études de projet. Les défluent sont considérables, en particulier ceux liés aux déversements de crue, analysés sur des chroniques de crue ayant marqué la vie du barrage.

Par ailleurs, les données de transports solides mesurés aux stations hydrométriques traduisent une dynamique érosive beaucoup plus importante dans le sous-bassin de l'oued Endja. Au site du barrage Béni Haroun, le cumul des apports solides se révèle sous-estimé comparé au résultat de la campagne bathymétrique réalisée en 2013, ayant abouti à un envasement annuel de 8.3 hm<sup>3</sup>/an (soit une dégradation spécifique du bassin de l'ordre de 1728 t/an /km<sup>2</sup>).

Enfin, les résultats des analyses physico-chimiques de 2005 à 2014, disponibles sur le site de la retenue de Beni Haroun, montrent qu'un grand pourcentage des teneurs liés à la pollution agricole, industrielle et domestique est supérieur aux normes, ce qui indique que les eaux de la retenue du barrage ne peuvent être affectées à la consommation humaine sans traitement préalable. Cependant, la qualité de l'eau du barrage s'est nettement améliorée durant l'année 2018 par comparaison aux données de l'année 2014.

**Mots clés:** variabilité hydro-pluviométrique, bilan de régularisation, flux solides, qualité des eaux, bassin Rhumel-Endja, barrage Béni Haroun

## ABSTRACT

This research is concerned with the contribution of deep knowledge of Algerian hydrology, throughout the example of a large, physically contrasted basin in eastern Algeria, formed by the Rhumel and Endja wadis. These two wadis drain an area of 5315 km<sup>2</sup> and 2160 km<sup>2</sup>, respectively, and converge into the El Kebir oued where the largest dam in the country is erected, named "Béni Haroun".

The study of the spatio-temporal variability of the input (rainfall) and output (flow) signals in the basin are based on time series of flow and rainfall data. The statistical approach of the "Bertin matrix" method applied for rainfall over 42 years made it possible to detect the different wet and dry periods. The severe drought character appears between 1987/88 to 2001/02 and a wet phase occurs from the hydrological year 2002/03 with a higher frequency of wet and very wet years. In addition, the use of spectral wavelet methods wavelet coherence demonstrated an evolution of rainfall and flows, structured according to several modes of variability which are expressed for different time scales. The variability of the flows in the sub-basins is strongly influenced by rainfall variability origin (the coherence percentages remain at a level > 50%) and only a relatively small part of this variability can be explained by other physiographic factors.

In the context of daily scale, the variability is more important, mainly, during extreme events, especially floods. The analysis of floods and low flows made use of numerous statistical tools to characterize and model these extreme events.

The analysis of the data of the water balance (2003/04-2017/18) of the Beni Haroun dam confirms the return to a greater frequency of wet years from 2003, year of impoundment of the dam. The average observed inflow (1013.9 hm<sup>3</sup>/year) is much higher than the theoretical inflow (435 hm<sup>3</sup>/year) defined by the project studies. The outflows are considerable, in particular those linked to the flood spills, analyzed on flood chronicles which marked the life of the dam.

In addition, the data on solid transport measured at the hydrometric stations show a much greater erosive dynamic in the Wadi Endja sub-basin. At the Beni Haroun dam site, the cumulative solid input is underestimated compared to the result of the bathymetric campaign carried out in 2013, which resulted in an annual siltation of 8.3 hm<sup>3</sup>/year (a specific degradation of the basin of the order of 1728 t / year / km<sup>2</sup>).

Finally, the results of physico-chemical analyses from 2005 to 2014, available on the site of the Beni Haroun reservoir, show that a large percentage of the contents linked to agricultural, industrial and domestic pollution is higher than the standards, which indicates that the water of the reservoir of the dam cannot be used for drinking water supply without prior treatment. However, the quality of the water in the dam has improved significantly during 2018 compared to the data of 2014.

**Keywords:** hydro-rainfall variability, water balance, solid flows, water quality, Rhumel-Endja basin, Beni Haroun dam

## ملخص

تساهم هذه الدراسة في تعميق الهيدرولوجيا الجزائرية ، من خلال حوض كبير متباين فيزيائيا يقع في الشرق الجزائري والمتكون من واد الرمال والنجا. يمتد هذان الوديان على مساحة تصريف قدرها على التوالي 5315 كلم<sup>2</sup> و 2160 كلم<sup>2</sup>، ونقطة التقائهما تكون وادي الكبير حيث انجز أكبر سد في البلاد، بني هارون.

تستند دراسة التغير المكاني والزمني للمداخل (الامطار) والمخارج ( الجريان ) في الحوض على سلسلة من المعطيات الزمنية الهيدرولوغيا. تم تطبيق النهج الإحصائي لطريقة معالجة المعلومات الزمنية "مصفوفة برتن " على الأمطار على مدى 42 سنة (1970/1971-2011/2012) جعل من الممكن الكشف عن الفترات الرطبة والجافة المختلفة. حيث تظهر زيادة واضحة للسنوات الجافة ما بين الفترة 1987/1988 إلى 2001/2002 وتظهر فترة رطبة إبتداءا من السنة الهيدرولوجية 2002/2003 مع تردد أكبر للسنوات الرطبة وشديدة الرطوبة. علاوة على ذلك، إن استخدام طرق اطياف الموجات واطياف الترابط قد أوضح أن تطور هطول الأمطار و تدفقها (السلسلة المشتركة 1973/1974 - 2004/2005) تم تنظيمها وفقاً لعدة أنماط من التباين التي يتم التعبير عنها في نطاقات زمنية مختلفة. يتأثر تباين التدفقات في الأحواض بشدة عن طريق اختلاف التساقط (نسب الترابط < 50٪) و جزء صغير من هذا التغير مرتبط بعوامل أخرى مثل الخصائص الفيزيائية للحوض.

يكون التغير بارزا أيضا على مستوى المناسيب اليومية وأثناء الأحداث القصوى، وخاصة الفيضانات. فان تحليل معطيات الفيضانات وصيبيات الشح يستدعي تطبيق العديد من الأدوات الإحصائية لتمييز ونمذجة هذه الأحداث.

يؤكد تحليل موازنة تعديل مياه سد بني هارون (2003/2004-2017/2018) عودة السنوات الرطبة ابتداءا من سنة 2003 ،وهي السنة التي تصادف بداية امتلاء السد. حيث قدر متوسط حجم تغذية السد ب 1013.9 هم<sup>3</sup>/سنة وهو أعلى بكثير من الحجم النظري (435 هم<sup>3</sup>/سنة) الذي حددته دراسات المشروع. فان التدفقات الخارجية تتميز بأحجام معتبرة، لا سيما تلك المرتبطة بالتفريغات الفيضية الناتجة عن الصيبيات القصوى المسجلة خلال فترة استغلال السد.

من جهة أخرى، تُظهر بيانات النقل الصلب المقاسة في المحطات الهيدرومترية ديناميكية التعرية التي تظهر بشكل كبير في الحوض الفرعي لوادي النجا. فان تراكم النقل الصلب عند موقع سد بني هارون يظهر تباعد كبير مقارنةً بنتيجة الرفع الطبوغرافي الذي انجز سنة 2013، والتي نتج عنها ترسب سنوي قدره 8.3 هم<sup>3</sup>/سنة (أي تفهقر نوعي للحوض قدره 1728 طن / سنة / كم<sup>2</sup>).

أخيراً، تظهر نتائج التحاليل الفيزيائية الكيميائية لمياه سد بني هارون للفترة 2005 إلى 2014 تأثير التلوث الزراعي والصناعي والمنزلي على نوعية المياه، مما يدل على أن هاته المياه لا يمكن استهلاكها للشرب دون معالجة مسبقة. ان جودة مياه السد تحسنت بشكل ملحوظ خلال سنة 2018 مقارنة بمعطيات سنة 2014.

**الكلمات المفتاحية:** تغير هيدرولوغيا، الموازنة المائية، تدفق الرواسب، نوعية المياه، حوض الرمال النجا، سد بني هارون

## Table des matières

AVANT – PROPOS

LISTE DES ABREVIATIONS

RESUME

ABSTRACT

INTRODUCTION GENERALE ..... 1

### CHAPITRE 1: DONNEES, METHODES ET CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

INTRODUCTION..... 6

1. PROBLEMATIQUE DE LA THESE ET ETAT DE L'ART ..... 6

1.1. Problématique ..... 6

1.2. Revue bibliographique générale sur la zone d'étude ..... 7

2. METHODOLOGIE ET DONNEES UTILISEES ..... 8

2.1. Traitement des données hydro-pluviométriques ..... 8

2.1.1 *Les données pluviométriques* ..... 8

2.1.2 *Les données hydrologiques* ..... 11

2.1.3 *Méthodes de traitement des données hydro-pluviométriques*..... 13

2.2. Les données des débits de crue et d'étiage ..... 15

2.3. Bilan de régularisation des eaux..... 16

2.4. Données et méthodes de quantification du transport solide en suspension..... 17

2.4.1 *Données de transport solide des oueds*..... 17

2.4.2 *Évaluation de la charge solide*..... 19

2.4.3 *Envasement* ..... 19

2.5. Les données de la qualité des eaux superficielles ..... 20

2.6. Traitement géo- spatial ..... 20

2.6.1 *Modèle Numérique de terrain (M.N.T) et Système d'Information Géographique (SIG)* ..... 20

2.6.2 *Exploitation de la cartographie hydro-climatique disponible* ..... 21

3. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE: PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE .... 21

3.1. Le bassin versant et le barrage ..... 21

3.2. Contexte oro-hydrographique ..... 23

3.2.1 *Le relief*..... 23

3.2.2 *Le réseau hydrographique* ..... 24

3.2.3 Profils en long et paramètres morphométriques.....	24
3.3. Contexte géologique du bassin versant.....	26
3.3.1 Géologie du bassin.....	26
3.3.2 Les domaines hydrogéologiques.....	28
3.3.3 Le site géologique du barrage.....	29
3.4. Couvert végétal.....	30
3.5. Contexte climatique du bassin versant.....	31
3.5.1 Les précipitations.....	31
3.5.2 Les températures.....	32
3.5.3 Relation pluies - températures : le diagramme ombro-thermique et l'indice Emberger.....	33
3.5.4 Calcul du bilan hydrique (modèle de Thornthwaite).....	35
CONCLUSION.....	38

## **CHAPITRE 2 : BILANS D'ÉCOULEMENT ET VARIABILITE HYDROPLUVIOMETRIQUE**

INTRODUCTION.....	41
1. LES PRECIPITATIONS ET LEUR VARIABILITE.....	42
1.1. La pluviométrie annuelle moyenne dans la zone d'étude.....	42
1.2. Précipitations interannuelles: variabilité et durée de récurrence.....	43
1.2.1. Le caractère variable de la pluviométrie dans le bassin Rhumel-Endja.....	43
1.2.2. Récurrence des pluies annuelles.....	49
1.3. Les précipitations mensuelles et les régimes saisonniers.....	51
1.3.1. Les précipitations mensuelles et leur variabilité.....	51
1.3.2. Le régime pluviométrique saisonnier du bassin.....	54
2. LES APPORTS HYDROLOGIQUES ET LEURS VARIATIONS.....	57
2.1. Les variations spatiales de l'écoulement annuel et le bilan hydrologique.....	57
2.1.1. Variabilité amont -aval des modules absolus et spécifiques.....	57
2.1.2. Le profil hydrologique du bassin de l'oued Rhumel-Endja au barrage de Béni Haroun.....	58
2.1.3. Bilans hydrologiques annuels des bassins jaugés (1973 /74 -2004 /05).....	60
2.1.4. Cartographie de l'écoulement annuel moyen. Synthèse des travaux réalisés (série normale de 30 ans).....	66
2.2. Les variations temporelles de l'écoulement.....	73
2.2.1. Les variations interannuelles.....	73

2.2.2. <i>Les écoulements mensuels et les régimes saisonniers</i> .....	79
<b>3. CYCLICITE ET TENDANCE DES PLUIES ET DES DEBITS</b> .....	<b>82</b>
3.1. Recherche de tendance pluviométrique avec la méthode de la matrice (MGCTI)	82
3.2. Recherche de tendance hydro-pluviométrique grâce à la méthode des ondelettes	85
3.2.1. <i>Le sous bassin d'oued El Kébir-amont (Oued Endja supérieur)</i> .....	85
3.2.2. <i>Le sous bassin d'oued Bouselah</i> .....	85
3.2.3. <i>Le sous bassin d'oued Rhumel Seguin</i> .....	86
3.2.4. <i>Le sous bassin Rhumel aval</i> .....	86
3.2.5. <i>Le sous bassin d'oued Smendou</i> .....	86
3.2.6. <i>Barrage Béni Haroun</i> .....	86
3.3. Relation pluie-débit .....	90
3.3.1. <i>Relation pluie-débit selon la méthode des écarts centrés réduits</i> .....	90
3.3.2. <i>Relation pluie-débit selon la méthode des cohérences en ondelettes</i> .....	96

## **CHAPITRE 3 : ECOULEMENTS EXTREMES ET RISQUES HYDROLOGIQUES**

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>102</b>
<b>1. ETUDE DES CRUES</b> .....	<b>103</b>
1.1. Etude des précipitations extrêmes.....	103
1.1.1. <i>Paramètres statistiques des pluies journalières maximales annuelles</i> .....	103
1.1.2. <i>Variation intra-annuelle des précipitations journalières maximales annuelles</i>	104
1.1.3. <i>Etude fréquentielle des pluies journalières maximales (<math>P_{jmax_F}</math>)</i> .....	107
1.1.4. <i>Elaboration des cartes des gradex, <math>P_{jmax_{F0,90}}</math> et <math>P_{jmax_{F0,98}}</math></i> .....	110
1.2. Les débits extrêmes observés .....	112
1.2.1. <i>Les variations spatio-temporelles des débits maximums</i> .....	112
1.2.2. <i>La récurrence des débits de crue maximum annuels</i> .....	116
1.2.3. <i>Fréquence d'apparition mensuelle des débits de crue</i> .....	120
1.2.4. <i>Hydrogrammes journaliers et horaires des crues</i> .....	122
1.2.5. <i>La puissance et apports des crues des différents oueds</i> .....	132
1.3. La méthode ANRH de simulation des $Q_{jmax}$ et $Q_{imax}$ et des hydrogrammes de crues .....	135
1.3.1. <i>Prédétermination des débits moyens</i> .....	135
1.3.2. <i>Le modèle d'hydrogramme de crue</i> .....	137

1.4. Evènements de crue extrêmes connus en Algérie et dans le bassin de l'oued Rhumel Endja .....	143
1.4.1. <i>Les inondations en Algérie</i> .....	143
1.4.2. <i>Historique des crues et inondations dans la région de Constantine</i> .....	145
<b>2. ETUDE DES ETIAGES</b> .....	<b>147</b>
2.1. Les définitions .....	147
2.2. Critères de détermination statistique des débits d'étiage. Application au bassin du Rhumel-Endja .....	147
2.2.1. <i>Les débits d'étiage issus de la courbe des débits classés</i> .....	147
2.2.2. <i>Indicateurs statistiques des débits d'étiage: QMNA et VCNd</i> .....	150
2.3. Analyse des liaisons entre écoulements superficiels et souterrains: les courbes de tarissement et volume d'eau mobilisé .....	159
2.3.1. <i>Les courbes de tarissement</i> .....	159
2.3.2. <i>Calcul du volume d'eau mobilisé</i> .....	164
2.4. Sévérité des étiages .....	165
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>166</b>

## **CHAPITRE 4 : GESTION ET REGULARISATION DES ECOULEMENTS DE SURFACE: ROLE DU BARRAGE DE BENI HAROUN**

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>170</b>
<b>1. LA STRATEGIE DES BARRAGES EN ALGERIE</b> .....	<b>172</b>
1.1. Historique des barrages en Algérie .....	172
1.1.1. <i>La période coloniale</i> .....	172
1.1.2. <i>La période de l'Indépendance</i> .....	172
1.2. Régularisation des eaux superficielles et transferts inter- bassins.....	172
<b>2. LE BARRAGE DE BENI HAROUN ET SON SYSTEME DE TRANSFERT</b> .....	<b>174</b>
2.1. Historique: études et réalisation.....	174
2.2. La digue, la retenue et les ouvrages annexes.....	175
2.2.1. <i>La digue</i> .....	175
2.2.2. <i>Les ouvrages annexes</i> .....	177
2.3. Le système de transfert de Beni Haroun .....	178
<b>3. REGULARISATION DES APPORTS AU BARRAGE DE BENI HAROUN</b> .....	<b>183</b>
3.1. Bilan d'eau du réservoir et courbe de remplissage .....	183

3.2. Apports et réserves: variations interannuelles et mensuelles .....	184
3.2.1. <i>Variation interannuelle des apports, précipitations et réserves</i> .....	184
3.2.2. <i>Variations mensuelles en année humide et en année sèche</i> .....	187
3.3. Volumes régularisés au profit de l'AEP .....	188
3.4. Les pertes: évaporation et fuites.....	189
3.4.1. <i>Variations annuelles et mensuelles des évaporations</i> .....	189
3.4.2. <i>Fuites d'eau</i> .....	191
3.5. Vidange de fond et déversement de crue .....	191
4. GESTION DES CRUES DU BARRAGE DE BENI HAROUN: QUELQUES EXEMPLES .....	194
4.1. Rappel.....	194
4.2. Vidange et laminage des crues au barrage de Béni Haroun.....	194
CONCLUSION.....	201
<b>CHAPITRE 5 : DEBITS SOLIDES ET RISQUE D'ENVASEMENT DU BARRAGE DE BENI HAROUN</b>	
INTRODUCTION.....	204
1. RELATION ENTRE DEBITS SOLIDES ET DEBITS LIQUIDES INSTANTANES .....	204
1.1. Bassin de l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane.....	204
1.2. Bassin de l'oued Rhumel à Grarem .....	206
2. LA CHARGE SOLIDE DES OUEDS A L'ECHELLE ANNUELLE .....	208
2.1. Variabilité interannuelle des apports solides et liquides.....	208
2.2. Transport solide spécifique en lien avec les précipitations et la lame écoulee ....	211
3. FLUCTUATIONS DES APPORTS SOLIDES ET LIQUIDES A L'ECHELLE MENSUELLE ET SAISONNIERE .....	214
3.1. L'oued Endja supérieur à Douar Tassadane .....	214
3.2. L'oued Rhumel à Grarem.....	215
4. ANALYSE DE LA CHARGE SOLIDE DES OUEDS EN PERIODE DE CRUE ...	217
4.1. Méthodologie.....	217
4.2. Application au bassin de l'oued Rhumel à Grarem .....	218
4.3. Application au bassin de l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane.....	219
5. ETIMATION DE L'ENVASEMENT DU BARRAGE DE BENI HAROUN ET STRATEGIE DE PROTECTION .....	224

5.1. Charge sédimentaire aux stations hydrométriques .....	224
5.2. L'envasement du barrage d'après la bathymétrie de 2013 .....	225
5.3. Comparaison avec les barrages de l'Est Algérien .....	227
5.4. L'envasement des barrages, un phénomène préoccupant dans les pays du Maghreb .....	228
5.5. Stratégie de protection des barrages contre l'envasement .....	228
CONCLUSION.....	230

## CHAPITRE 6 : QUALITE DES EAUX DU BARRAGE DE BENI HAROUN

INTRODUCTION.....	233
1. DEFINITION, PRINCIPE ET METHODE DE MESURE .....	233
1.1. Les paramètre physicochimiques .....	233
1.1.1. <i>Température (T °C)</i> .....	233
1.1.2. <i>Potentiel d'hydrogène (pH)</i> .....	234
1.1.3. <i>Conductivité électrique (CE)</i> .....	234
1.1.4. <i>Les Résidus Secs</i> .....	234
1.1.5. <i>Calcium (Ca<sup>2+</sup>)</i> .....	235
1.1.6. <i>Magnésium (Mg<sup>2+</sup>)</i> .....	235
1.1.7. <i>Chlorure (Cl<sup>-</sup>)</i> .....	235
1.1.8. <i>Sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</i> .....	236
1.2. Les substances indésirables.....	236
1.2.1. <i>Turbidité</i> .....	236
1.2.2. <i>Matières en suspension</i> .....	236
1.2.3. <i>Oxygène dissous</i> .....	236
1.2.4. <i>L'Azote ammoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)</i> .....	237
1.2.5. <i>Les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</i> .....	237
1.2.6. <i>Les Nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)</i> .....	237
1.2.7. <i>Les phosphates (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)</i> .....	238
1.2.8. <i>Demande biochimique en oxygène (DBO<sub>5</sub>)</i> .....	238
1.2.9. <i>Demande chimique en oxygène (DCO)</i> .....	238
1.2.10. <i>La toxicité du fer</i> .....	238
1.2.11. <i>La toxicité du manganèse</i> .....	238
1.3. Evaluation de la qualité des eaux de surface.....	239

1.3.1. Grille de qualité des eaux brutes du barrage .....	239
1.3.2. Normes de potabilité physico-chimique .....	240
<b>2. BILAN DE LA QUALITE DES EAUX DU BARRAGE DE BENI HAROUN DE 2005-2014 .....</b>	<b>241</b>
2.1. Les caractéristiques physico-chimiques des eaux .....	241
2.1.1. Faciès hydro-chimiques (méthode de Piper).....	241
2.1.2. Les paramètres physico-chimiques.....	242
2.2. Les substances indésirables.....	249
2.2.1. Nitrate ( $NO_3^-$ ).....	249
2.2.2. Les matières phosphorées ( $PO_4^{3-}$ ).....	250
2.2.3. Matière en suspension .....	251
2.2.4. DBO5 .....	252
2.2.5. DCO.....	252
2.2.6. Matière organique dissoute .....	253
2.2.7. L'ammonium ( $NH_4^+$ ).....	254
2.2.8. Les Nitrites ( $NO_2^-$ ).....	255
2.2.9. Manganèse .....	256
2.2.10. Le Fer .....	256
2.3. Évolution annuelle de la qualité des eaux du barrage de Béni Haroun.....	257
2.3.1. La qualité des eaux entre 2005-2014.....	257
2.3.2. La comparaison de la qualité des eaux de l'année 2014 et l'année 2018.....	259
2.3.3. Synthèse de la qualité des eaux brute du barrage entre les années 2005 et 2014 .....	259
2.3.4. Le traitement des eaux du barrage de Béni Haroun avant leur distribution ....	260
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>261</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>263</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>270</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>289</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>297</b>
<b>LISTE DES PHOTOS .....</b>	<b>300</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>302</b>

---

**INTRODUCTION GENERALE**

---

Ce travail de thèse a pour but de mieux comprendre le comportement hydrologique et la variabilité spatio-temporelle des apports d'un important bassin, physiquement très contrasté, de l'Est algérien. Il est formé par les oueds Rhumel et Endja, sources d'alimentation du plus grand barrage d'Algérie, Béni Haroun.

Le fonctionnement et la gestion du barrage de Béni Haroun dépendent de la variabilité des apports (liquides et solides), aux différents états du cycle de l'eau, de plus en plus influencés par le changement climatique et les actions anthropiques. Sa capacité de mobilisation de près de 1 milliard de m<sup>3</sup> d'eau lui permet de jouer un rôle capital de stockage et de régularisation des eaux au profil de cinq wilayas de l'Est algérien (Mila, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna, Khenchela, ....), aux fins d'AEP des centres urbains et d'irrigation des terres agricoles dans les Hautes plaines semi-arides.

Ce travail s'articule autour de six chapitres:

Le **premier chapitre**, après avoir posé la problématique de cette thèse, s'attarde sur les différentes séries de données temporelles récoltées auprès des organismes techniques et sur les méthodes de leur traitement. Ensuite seront présentés les grands traits du contexte physico-climatique du bassin.

En plus des données d'observations climatiques, en particulier pluviométriques relevées aux stations de l'ANRH et de l'ONM, les données des pluies spatialisées issues des grilles mensuelles établies par l'ANRH (modèle de régression pluies-relief), ont été également exploitées. Les données de débits (apports, crues, étiages) et les données de concentration en matières en suspension des oueds, relèvent des stations hydrométriques de l'ANRH. Les données du bilan d'eau et de la variation des réserves du barrage de Béni Haroun ainsi que les levés bathymétriques de 2013 sont fournies par l'ANBT. Il en est de même des données physico-chimiques des eaux superficielles mesurées au site de la retenue de Béni Haroun. Enfin, les informations cartographiques du contexte physique (topographiques, géologiques, hydrogéologiques, précipitations, ETP, écoulements) sont largement exploitées dans le cadre de cette recherche.

Aussi, avons-nous adopté différentes approches méthodologiques. Les analyses de ces bases de données ont nécessité l'utilisation de plusieurs outils: Excel, Hydrolab, logiciel R, logiciel Surfer, logiciel Arc Gis, MNT à maille de 100 m (coordonnées métriques Lambert Nord Algérie).

Le contexte physico-climatique du bassin, est la première étape de la connaissance des facteurs intervenant dans l'alimentation en eau et dans les apports: facteurs orographiques, morphologiques, lithologiques, climatiques. Leur interaction est déterminante dans le comportement hydrologique de ces oueds.

L'étude de la variabilité du signal d'entrée (pluie) et de sortie (débit) dans le bassin, est basée sur l'analyse détaillée des données hydro-pluviométriques, objet central du **deuxième chapitre**.

La variabilité spatio-temporelle des précipitations permet d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique et leur variabilité dans le temps et dans l'espace. Ceci en se basant sur les données pluviométriques de neuf stations réparties sur le bassin dont la période d'observation s'étale entre 1970/71 et 2011/12. La cartographie pluviométrique conduit à connaître la variabilité spatiale de la lame d'eau précipitée à l'amont du barrage de Béni Haroun.

Les données d'observations des débits de la période commune 1973/74-2004/05 sont issues de cinq (5) stations hydrométriques (Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Grarem et Bouchdira), complétées par les séries trentenaires de données simulées par modélisation de l'étude ANRH. Les résultats de ces analyses aideront à mettre en évidence les termes du bilan d'écoulement et des régimes hydrologiques, et leur évolution de l'amont à l'aval.

La détermination des discontinuités et des périodes caractéristiques dans la série des pluies est établie par l'approche statistique de la méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI) de type matrice Bertin. Aussi, les analyses spectrales des signaux des débits et des pluies (analyses par la transformation en ondelettes continues), permettent de détecter les structures (périodicités, cyclicité) et leur évolution au cours du temps. Les relations pluie-débit seront traitées par les écarts centrés réduits et la cohérence en ondelettes pour la vérification des modes déjà existants dans les signaux pluies et débits. Ceci permettra de définir les périodes sèches ou humides ainsi que la réactivité du bassin Rhumel-Endja à l'échelle évènementielle.

La variabilité des débits est encore plus marquée à l'échelle journalière et pendant les événements extrêmes, en particulier les crues et à un degré moindre les étiages. C'est l'objet principal du **troisième chapitre**.

Ce chapitre discute les données observées des crues (débits journaliers et débits instantanés maximums annuels, débits horaires). Il permet de dresser un historique des événements extrêmes et d'analyser quelques hydrogrammes types observés aux stations hydrométriques. Aussi, nous nous intéresserons à l'étude de la prédétermination des débits de crue (modélisation des quantiles pour différentes période de retour) et à l'application du modèle de simulation de l'hydrogramme de crue adopté par l'ANRH.

Pour les étiages, nous étudierons les courbes des débits classés (Etiage absolu, DCE, DC6, DC9, DC11, DCE) en année humide et en année sèche et les indicateurs statistiques des débits d'étiage QMNA « Quantité Mensuelle miNimale Annuelle» et VCNd (débit minimum sur  $d$  jours consécutifs de l'année). L'analyse du tarissement a notamment pour objectif la détermination des coefficients de tarissement (lois de tarissement de Maillet) qui traduisent les rythmes de vidange des aquifères, en relation avec les caractéristiques hydrogéologiques du bassin versant.

Le **quatrième chapitre** est dédié à l'étude du bilan de régularisation des apports du barrage de Béni Haroun, sur la base des données de la période d'exploitation 2003/04-2017/18 fournies par l'A.N.B.T. La méthode du bilan d'eau permet de suivre l'évolution des gains et pertes de capacité de la retenue.

Les volumes d'eau déversés au cours des crues exceptionnelles ont manifestement marqué la vie du barrage Béni Haroun, de même qu'elles ont contribué à accélérer l'envasement de la retenue.

L'objet du **cinquième chapitre** sera l'analyse de la variabilité annuelle, mensuelle et saisonnière des apports solides. L'étude a nécessité le traitement d'une chronique de mesures directes de la concentration en matières en suspension (MES) et des écoulements liquides, relevées par l'ANRH aux stations de Grarem (bas Rhumel) et de Douar Tassadane (haut bassin de l'oued Endja). Deux séries respectives (1973/74–2004/05 à Douar Tassadane et 1973/74-2000/01 à Grarem) de débits solides journaliers ont été générées à l'aide d'une fonction de type puissance liant les débits solides instantanés et les débits liquides instantanés.

Pour l'estimation de l'envasement du barrage de Béni Haroun, nous avons pris en compte les résultats des levés bathymétriques réalisés sur la retenue du barrage (ANBT, 2013).

L'aspect qualitatif de l'eau de Béni Haroun sera abordé au **sixième chapitre**. L'objectif est de suivre et d'évaluer la qualité physicochimique des eaux brutes de barrage de Béni Haroun sur une période de 10 ans (2005-2014): Cette qualité est évaluée par la mesure de la température, du pH, de la conductivité électrique, du résidu sec, Turbidité, MES, O<sub>2</sub> dissous, MO, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/ PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/ DCO/ DBO<sub>5</sub>.

Notre méthodologie du travail se résume dans le schéma-de présentation suivant (Figure 1) :

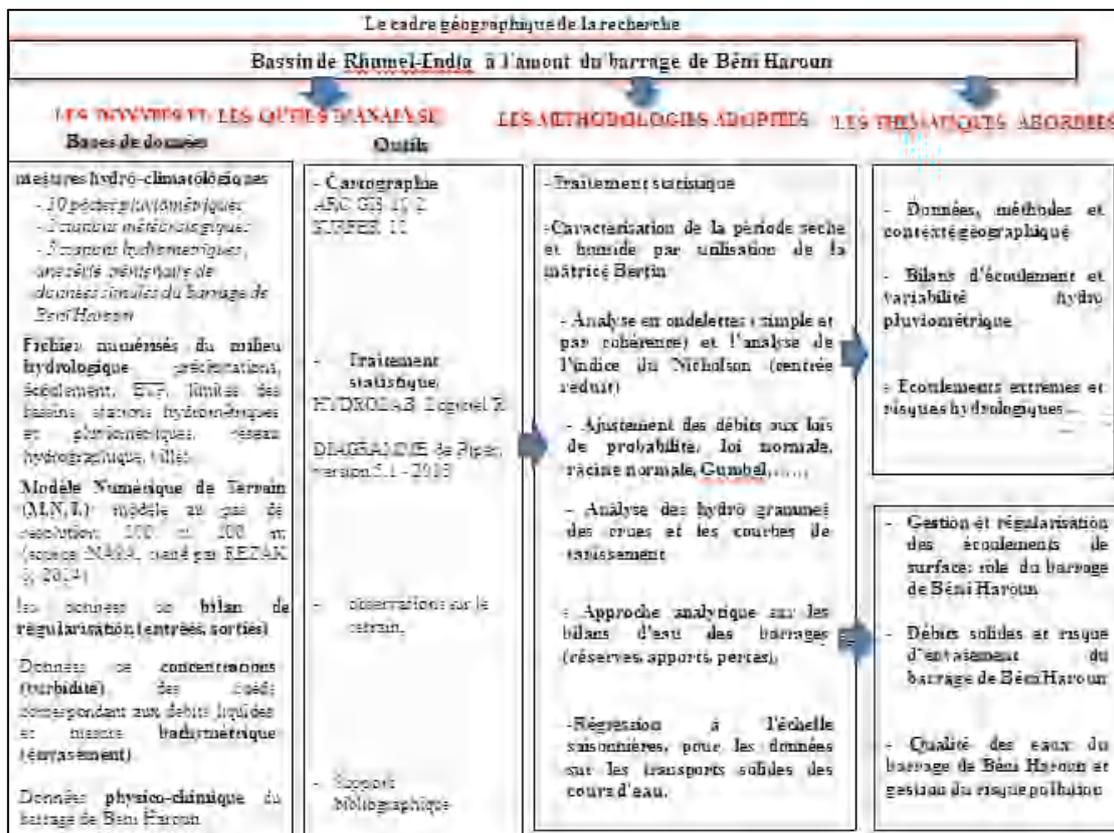


Figure 1: Présentation schématique: thèmes, approches et moyens d'investigation

---

**CHAPITRE 1**  
**DONNEES, METHODES ET CONTEXTE GEOGRAPHIQUE**

---

## **INTRODUCTION**

Ce premier chapitre est consacré, dans un premier temps, à une présentation générale de la problématique de la thèse et à un bref aperçu bibliographique concernant le terrain d'étude. Dans un second temps, seront passées en revue les données utilisées ainsi que les différentes méthodes employées dans le cadre de cette thèse. Enfin, une description générale du bassin des oueds Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun sera fournie à travers leurs caractéristiques physiographiques, hydrographiques, géologiques et climatiques, bases indispensables à la compréhension des mécanismes hydrologiques.

### **1. PROBLEMATIQUE DE LA THESE ET ETAT DE L'ART**

#### **1.1. Problématique**

Cette recherche contribue à approfondir la connaissance de l'hydrologie algérienne, à travers l'exemple d'un important bassin exoréique de l'Est algérien, formé par les oueds Rhumel et Endja drainant respectivement une superficie de 5315 km<sup>2</sup> et de 2160 km<sup>2</sup>. Ces deux oueds alimentent le barrage « Béni Haroun », considéré comme le plus grand barrage du pays.

A l'instar des bassins à écoulement exoréique de l'Algérie orientale (Seybouse, Soummam, etc.....), le bassin versant du Rhumel-Endja présente des caractères physiques nettement contrastés: on passe d'un domaine semi-aride à un domaine humide méditerranéen, d'un secteur relativement plat à un secteur montagneux (Mebarki, 1982). Le barrage «Béni Haroun » érigé sur ce bassin, a une capacité de mobilisation de 963 millions de m<sup>3</sup>d'eau. Il se situe dans la région bien arrosée du Tell oriental, au Sud de laquelle se situent de grands centres urbains (Mila, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna, Khenchela, ....) et de vastes terres irrigables en milieu semi-aride (Hautes plaines). Il joue le rôle de stockage mais aussi de transfert des eaux régularisées au profil de six wilayas de l'Est algérien. Le fonctionnement du barrage « Béni Haroun» dépend donc du comportement hydrologique des oueds Rhumel-Endja, lui-même de plus en plus influencé par le changement climatique, et les actions anthropiques, (prélèvement, pollution .....etc.) exercées sur cette ressource.

Cette étude est axée sur l'analyse et la compréhension du comportement des cours d'eau aux différents états du cycle hydrologique et de la variabilité des apports (liquides et solides) en amont de la retenue. Elle vise aussi la mise en évidence des relations existantes entre cette variabilité et les caractéristiques du climat.

Dans cette dynamique de recherche, nous abordons l'analyse de la régularisation et la gestion des apports du Rhumel-Endja par le barrage Béni Haroun. Il en est de même de l'estimation de l'envasement en relation avec les apports solides engendrés par l'érosion hydrique et charriés par les oueds jusqu'au lac du barrage. Enfin, l'étude de la qualité des eaux du barrage de Béni Haroun contribue à connaître le comportement des éléments chimiques dans les eaux de surface du barrage de Béni Haroun.

Afin de mener à bien cette investigation il est impératif pour nous de répondre à différentes questions dont les plus importantes sont listées ci-dessous :

- **Comment à partir des séries hydrométrique, discontinues dans le temps et dans l'espace, aboutir à une connaissance valable des apports et du comportement hydrologique des oueds jusqu'au barrage Béni Haroun ? Quelle est l'ampleur de la variabilité des apports hydrologiques et l'impact des fluctuations climatique (accentuées sous l'effet du changement climatique global)?**
- **Dans quelles proportions cette variabilité est encore marquée à l'échelle journalière, en particulier pendant les événements extrêmes (étiages, crues) ?**
- **Quel constat peut-on établir sur le fonctionnement hydrologique du barrage de Béni Haroun à partir des données de calcul de son bilan de régularisation ? Quels sont les impacts de la variabilité des apports sur le fonctionnement de cet ouvrage et quel bilan peut-on tirer autour des pertes en eau et des volumes d'eau évacués au cours des crues exceptionnelles?**
- **Quel est le rythme d'envasement du barrage en relation avec les mesures des débits solides mesurés sur les oueds et la bathymétrie réalisée sur la retenue?**
- **Enfin, comment fluctue la qualité des eaux du barrage de Béni Haroun, et quels enseignements peut-on en tirer?**

## **1.2. Revue bibliographique générale sur la zone d'étude**

Le bassin de Rhumel-Endja et le barrage de Béni Haroun, ont fait l'objet de plusieurs études, soit initiées par les pouvoirs publics, soit des études universitaires (thèses, mémoires).

Plusieurs travaux géologiques, à caractère régional, ont intégré le bassin des oueds Rhumel-Endja, en particulier la thèse de Vila (1980) sur la chaîne alpine d'Algérie orientale et les contributions de Wildi (1983) sur la chaîne tello-rifaine de l'Afrique du Nord.

En hydrologie, dans sa thèse de doctorat de 3ème cycle, Mebarki (1982) a abordé dans le détail l'étude hydrologique et les ressources en eau du bassin du Kébir Rhumel. La thèse d'état de Mebarki (2005) a étudié les apports des cours d'eau, les bilans de l'écoulement et leur disparité spatiale dans l'Est algérien tout en utilisant les moyens de la cartographie automatique. L'auteur a également procédé à l'analyse des débits d'étiage, des rejets et protection des hydrosystèmes «méditerranéens».

Des travaux menés sur l'érosion et les transports solides des oueds algériens ont concerné le bassin du Kébir-Rhumel, comme la thèse de Demmak (1982) ayant conduit à la mise en point d'une formule de calcul de la dégradation spécifique.

Par ailleurs, Marouf (2012) a poursuivi le travail de recherche sur le bassin du Kébir-Rhumel, en particulier l'étude du transport solide, basée sur les mesures des concentrations à la station d'El Anser, et l'étude, à l'aide des données de mesures des paramètres de pollution, de la qualité des eaux du barrage de Béni Haroun. Les résultats de l'analyse hydro-sédimentaire ont montré qu'environ vingt millions de tonnes de la charge sédimentaire annuelle sont charriés vers la retenue du barrage de Béni Haroun.

Dans son mémoire de magister, Guerroudj (2006) a étudié l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau superficielle et souterraines du bassin versant du Kébir-Rhumel.

Kerdoud (2006) a axé sa recherche de magister, sur la pollution des oueds dans le bassin du barrage de Béni Haroun, à partir de données d'analyse de la qualité des eaux.

Les travaux de Melghit (2012) ont tenté d'évaluer la qualité des eaux de l'oued Rhumel et de ses affluents, et de déterminer leur niveau de pollution (vis-à-vis de la pollution organique et d'une éventuelle contamination métallique).

Boulahbel et Mébarki (2013), ont étudié les termes du bilan de régularisation sur 8 années de fonctionnement (de 2003/2004 à 2010/2011) du réservoir du barrage de Béni Haroun.

Toumi et Rémini (2018), ont étudié la perte de capacité de stockage d'eau au barrage de Béni Haroun, par le phénomène d'envasement, en se basant sur les levés bathymétriques réalisés en 2013. Ils ont, d'autre part, évalué les quantités d'eau évaporées du lac ainsi que la variation des débits de fuites en fonction de la fluctuation du niveau d'eau dans le lac.

## **2. METHODOLOGIE ET DONNEES UTILISEES**

Le choix du bassin de Rhumel-Endja comme terrain d'étude nous a été dicté par le caractère physiquement très contrasté de ce bassin versant, alimentant le plus grand barrage (Béni Haroun) en exploitation en Algérie; ce dernier s'intègre dans l'un des plus grands systèmes de transfert des eaux de l'Est Algérien. L'enjeu climatique, environnement et socio-économique est très important.

C'est un bassin équipé d'un bon nombre de stations pluviométriques et hydrométriques, qui a fait l'objet de plusieurs études, et qui dispose, par conséquent, d'une bonne base documentaire et de données de mesures (pluviométriques, hydrométriques, mesures des concentrations en matières en suspension, données du bilan de régularisation du barrage de Béni Haroun, relevés bathymétriques, données des caractéristiques physico-chimiques de la qualité des eaux superficielles...)

Afin de répondre aux objectifs assignés à ce travail de recherche, plusieurs méthodes ont été appliquées, comme les méthodes statistiques pour le traitement des données temporelles, l'utilisation de la géostatique, de la cartographie automatique (SURFER) et le SIG (ARC GIS) pour les données spatiales.

### **2.1. Traitement des données hydro-pluviométriques**

#### ***2.1.1 Les données pluviométriques***

Pour la pluviométrie, nous avons sélectionné dix stations situées à travers le bassin versant à l'amont du barrage de Béni Haroun (Figure 2). L'examen visuel des données fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) a montré que certaines séries chronologiques présentent des lacunes d'observations; aussi ces séries sont hétérogènes, (Tableau 1). Les données exploitables utilisées pour cette analyse concernant la période 1970/71-2011/12. Les données de la station Mechtat Serradj, au vu de leur faible fiabilité,

n'ont pas été prises en compte dans les calculs des différents paramètres annuels et mensuels; seules les données des pluies journalières maximales annuelles de cette station ont fait l'objet de traitements statistiques.

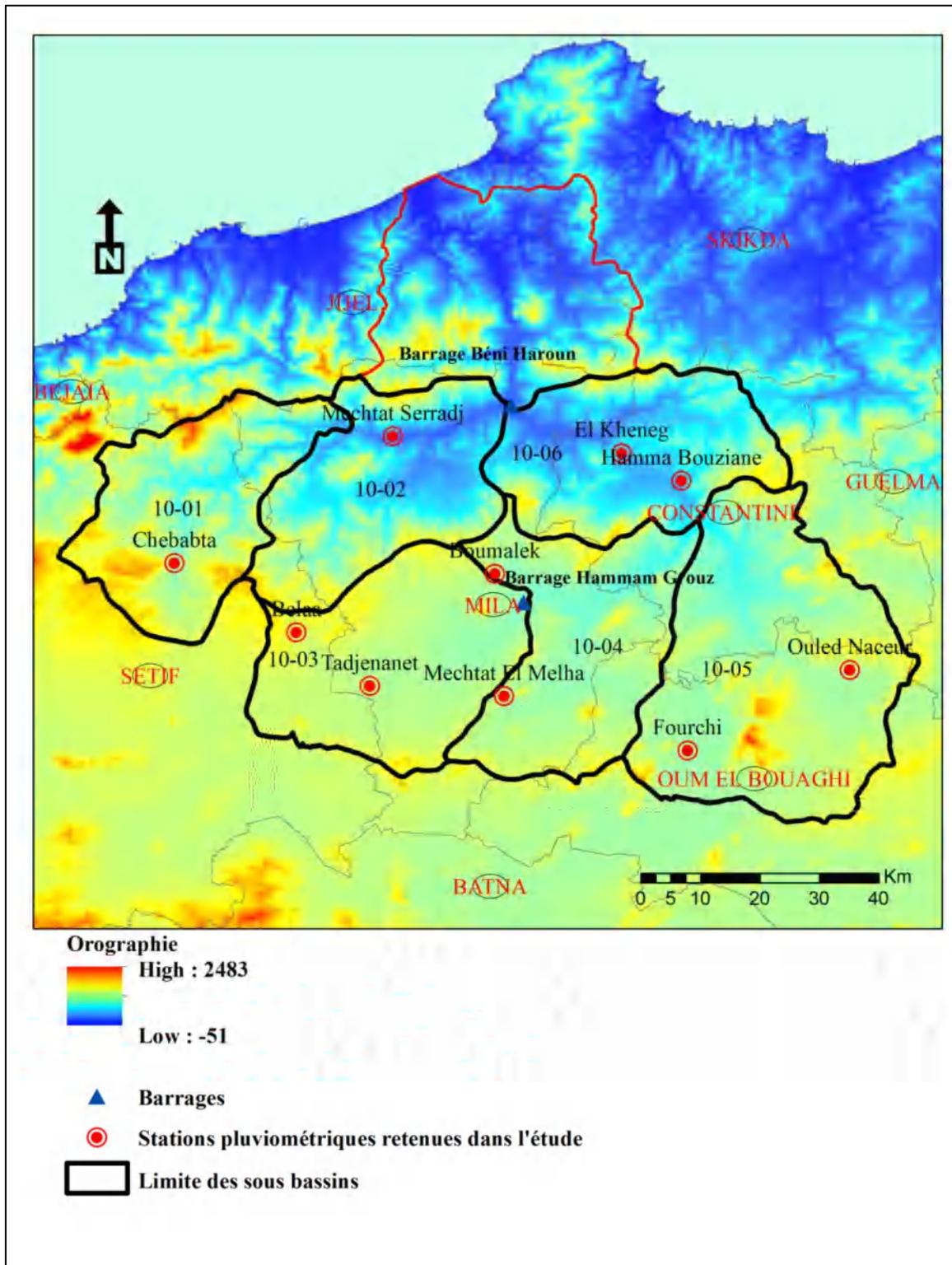


Figure 2: Localisation géographique des stations pluviométriques

Tableau 1: Caractéristiques des stations pluviométriques du bassin du Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun (d'après ANRH, Alger)

Station	code	X (Km Lambert Nord Algérie)	Y (Km Lambert Nord Algérie)	Z (m)	Période d'observation
Chebabta	100110	763.3	338.8	710	1970/71-2011/12
Mechta Serradj	100206	800	360.3	350	1970/71-2011/12
Belaa	100302	783.8	327.10	990.00	1970/71-2011/12
Tadjenanet	100303	796.15	318	845	1970/71-2011/12
Boumalek	100401	817.15	337.00	830.00	1970/71-2011/12
Mechtat Melha	100404	818.7	316.25	830	1975/76-2001/12
Fourchi	100511	849.55	307.045	775	1970/71-2011/12
Ouled Naceur	100527	876.8	320.7	839	1968/69-2011/12
Hamma Bouziane	100603	848.5	352.8	460	1970/71-2011/12
El Kheneg	100620	838.5	357.45	300	1977/78-2011/12

Avant tout travail statistique, même simple (calcul de la moyenne) sur une longue chronique de relevés pluviométriques, il convient de faire un prétraitement qui consiste à repérer pour éventuellement corriger ou supprimer :

- Les erreurs grossières faites lors de l'observation (perte d'eau, absence de l'observateur, incompétence, etc.) ou à la recopier des données (oubli, mauvaise interprétation, etc.),
- Les erreurs systématiques dues par exemple au déplacement du site d'observation au cours du temps, ou à des défauts d'appareillage (éprouvette et diamètre du seau ne correspondant pas), etc. Il est donc nécessaire, avant toute utilisation des variables pluviométriques, de contrôler leur qualité par l'emploi d'outils statistiques et graphiques, afin de réduire les erreurs systématiques qui pourraient les affecter. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode des doubles cumuls.

La méthode des " **double cumuls** " est la plus utilisée. La courbe des doubles cumuls est obtenue en portant en abscisses les totaux annuels cumulés de la station de base, et en ordonnées les totaux annuels cumulés de la station à vérifier. Si les points sont distribués de façon linéaire, on conclut que la série est homogène, au contraire, s'il apparaît une ou plusieurs cassures dans la distribution des points, la série n'est pas homogène. Nous avons utilisé la station de base Tadjenanet dont la fiabilité a été préalablement vérifiée, pour contrôler les autres stations du bassin.

A titre d'exemple, la figure 3 montre que la distribution des points de la station pluviométrique de Belaa est représentée d'une façon linéaire, ce qui signifie que cette série utilisée est homogène.

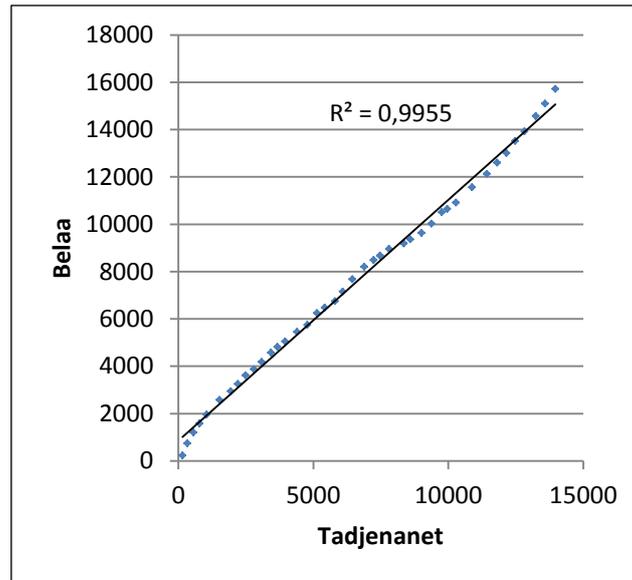


Figure 3: Exemple d'application de la méthode des " double cumulés " sur les données pluviométriques des stations à contrôler (Belaa)

Dans la pratique courante, de nombreuses causes sont à l'origine de l'absence de l'information scientifique observé ou enregistrées (défaut de transmission, erreur de stockage, manipulation erronée,...). Afin de combler ces données manquantes, nous avons utilisé le programme « Bouche trous » de Hydrolab (programme écrit en basic et présenté sous forme de macros sur Excel) appliqué aux racines carrées des pluies annuelles des stations (Laborde, 2000).

### 2.1.2 Les données hydrologiques

Le service Hydrologie de l'A.N.R.H nous a fourni les données de sept stations hydrométriques, réparties à travers le bassin du Rhumel-Endja.

Tableau 2: Les stations hydrométriques du bassin-versant du Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun (Source: ANRH-Constantine)

Station	Oued	Code ANRH	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Les séries disponibles
<b>Douar Tassadane</b>	<b>Oued El Kébir (amont de l'oued Endja)</b>	<b>100109</b>	<b>960</b>	<b>1973/74-2010/11</b>
<b>Koudiat Tendart</b>	<b>Bou Selah</b>	<b>100208</b>	<b>170</b>	<b>1973/74-2004/05</b>
O.Athménia 1	Rhumel amont	100301	1130	1964/65-1983/84 1993/94-2004/05
O.Athménia 2	Rhumel amont	100313		
<b>Ain Smara</b>	<b>Rhumel Seguin</b>	<b>100403</b>	<b>2200</b>	<b>1971/72-2002/03</b>
<b>Grarem</b>	<b>Rhumel aval</b>	<b>100601</b>	<b>5320</b>	<b>1971/72-2000/01</b>
<b>Bouchdira</b>	<b>Smendou</b>	<b>100602</b>	<b>295</b>	<b>1971/72-2004/05</b>
El Kheneg	Rhumel	100620	4570	1983/84-1998/99

Le long du bassin de l'oued Rhumel jusqu'au barrage de Béni Haroun, on dénombre cinq (5) stations de mesures (Oued Athménia, Ain Smara, Grarem, El Kheneg et Bouchdira) alors que dans le bassin de l'oued Endja, on dénombre deux (2) stations seulement (Koudiat Tendart et Douar Tassadane) (Tableau 2 et Figure 4).

Les chroniques des débits, au pas de temps journalier, sont structurées suivant l'année hydrologique allant du 1er septembre au 31 août. Ces séries ne sont pas concomitantes (durées d'observations variables).

Pour le choix d'une série de débits commune et homogène, nous avons opté en définitive pour une période de référence de 32 ans (1973/74-2004/05), couverte par cinq stations: **Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Bouchdira et Grarem**. Le comblement des lacunes sur les séries d'observations, a été effectué mois par mois, grâce à des régressions établies entre les débits mensuels des stations. Ainsi, pour combler les lacunes d'une station Y, on choisit la station de référence X avec laquelle elle est mieux corrélée. Par application de l'équation de la droite de régression linéaire  $Y=aX+b$ , l'on reconstitue mois par mois les données manquantes.

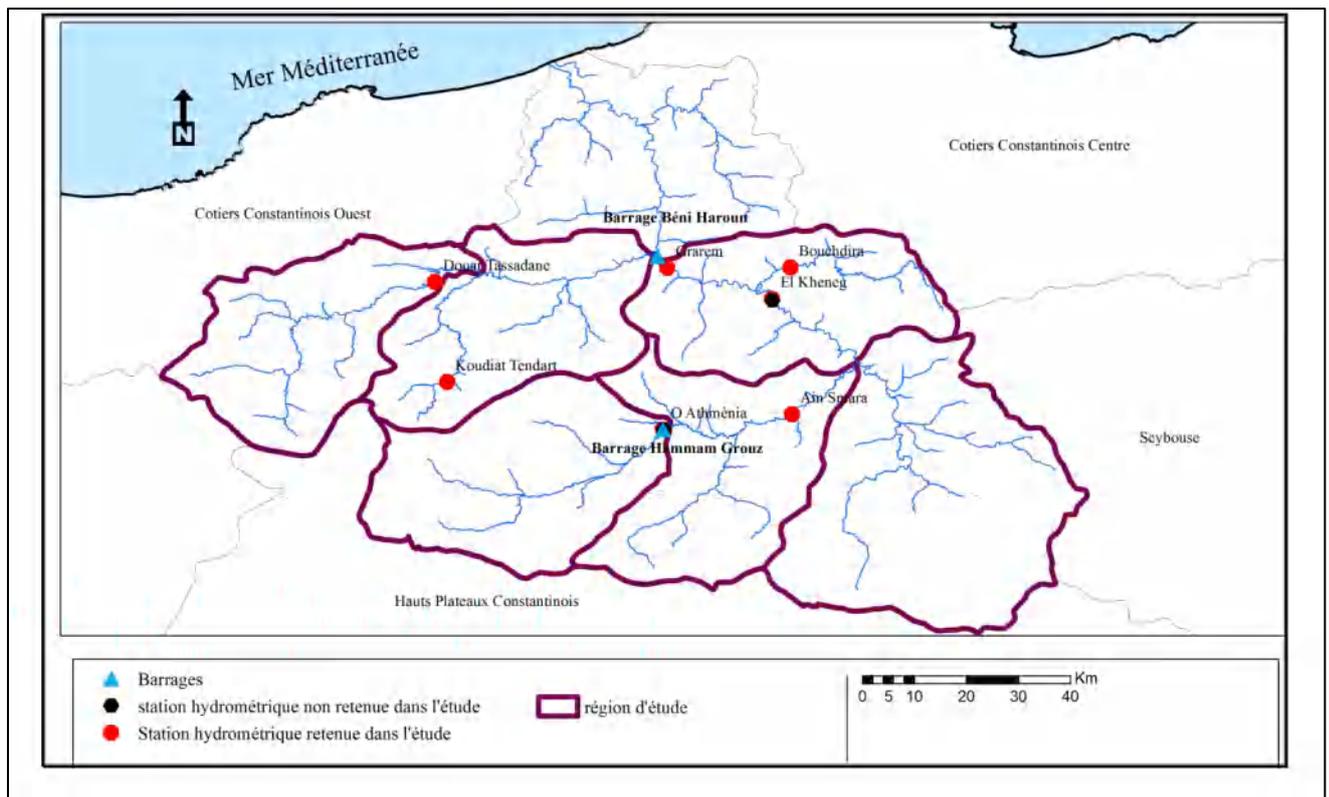


Figure 4: Equipement hydrométrique et barrages de la région d'étude

Par ailleurs, nous avons exploité les données des apports simulés de l'ANRH correspondant à une série chronologique mensuelle du bassin au barrage de Béni Haroun, couvrant la même période de 32 ans (1973/74-2004/05). Ces données sont extraites de l'étude de synthèse qui a permis de simuler de façon satisfaisante les apports mensuels en eau de surface à l'aide du modèle LOIEAU (version simplifiée de GR2M modèle du Génie Rural à 2 paramètres

Mensuels) (Assaba, 2004). C'est un modèle caractérisé par une structure associée à un réservoir de production et à un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin (Kabouya, 1990 ; Makhoulouf et Michel, 1994).

Pour les besoins d'analyse des bilans d'écoulement, nous avons utilisé directement les données pluviométriques spatialisées issues des grilles mensuelles des pluies établies par l'ANRH (2011) sur la base d'un modèle de régression pluies-relief (Mebarki et Laborde, 2012). Ces données simulées aux bassins concernent 6 stations pour la période commune 1973/74-2004/05.

### 2.1.3 Méthodes de traitement des données hydro-pluviométriques

Différentes approches méthodologiques existent pour analyser la variabilité des apports hydrologiques et climatiques, comme les analyses statistiques de tendances, et les modèles mathématiques et statistiques. Ces méthodes ont déjà été utilisées dans plusieurs études concernant les précipitations et les débits des bassins du Nord de l'Algérie (Taïbi et al, 2013, 2015; Hirsch et al, 2007; Meddi et al, 2009) et ont démontré qu'au cours du dernier siècle, cette région a connu une alternance de périodes sèches et humides.

Cette étude utilisera des approches basées sur l'analyse de la variable centrée réduite, la méthode de la matrice et les analyses spectrales issues du traitement du signal, comme les analyses en ondelettes continues, qui permettent de détecter les structures (périodicités, fluctuations) et leur évolution au cours du temps (discontinuités) des signaux (Torrence and Compo 1998 ; Labat et al, 2000, 2010 ; Massei et al, 2009, 2011). La méthode classique pour étudier ces données est l'analyse de Fourier (Priestley, 1992; Brockwell et Davis, 1987). Une nouvelle approche, appelée «transformation en ondelettes » a été proposée et utilisée la première fois par Morlet (1983). Contrairement à la méthode de la transformée de Fourier, la transformée en ondelettes permet une localisation dans le temps de la variabilité d'un signal donné.

#### 2.1.3.1. Méthode des variables centrées réduites

L'indice centré réduit est le rapport de l'écart à la moyenne interannuelle sur l'écart type des hauteurs pluviométriques annuelles. Il permet à travers l'exploitation des données obtenues sur une longue série de mesures de mettre en évidence les tendances et de différencier les périodes sèches et les périodes humides (Soro et al, 2011). Cet indice, défini comme une variable centrée réduite (Lamb, 1982), est donné par l'équation suivante:

$$X = (P_i - P_m) / \sigma$$

Avec

X : Ecart centré réduit (pluviométrique ou hydrologique)

P<sub>i</sub> : Hauteur de pluie ou débit pendant une année i ;

P<sub>m</sub>: Pluie moyenne annuelle (ou débit moyen annuel) des séries étudiées au bassin

σ : Ecart type des précipitations annuelles (ou débits annuels) des séries étudiées

Cet indice a été utilisé dans plusieurs domaines partout dans le monde (Goula et al, 2006 ; Niang, 2008; Fossou et al, 2015).

### 2.1.3.2. Analyses en ondelettes continues et cohérence

**Les méthodes spectrales des ondelettes** et la cohérence en ondelettes permettent de montrer l'évolution des pluies et des débits selon différentes échelles temporelles.

Les analyses en ondelettes continues permettent une localisation temporelle de la variabilité d'un signal donné. Elle décompose le signal à la fois en temps et en fréquence, qui permettent de décrire correctement ces fluctuations hydrologiques ou climatiques, périodiques ou non.

Grossman et Morlet (1984) ont introduit la transformée en ondelettes qui, contrairement à la transformée de Fourier, décompose le signal en une somme de fonctions de taille finie localisées dans le temps pour chaque fréquence repérée dans le signal. Pour cela, une ondelette mère est dissociée en ondelettes filles pour retrouver la fréquence donnée et ensuite translatée pour analyser les fréquences voisines. Donc ces analyses ont été développées pour pallier les inconvénients de l'analyse de Fourier classique.

Les ondelettes filles ont le résultat de la décomposition de l'ondelette de référence (ondelette mère), Chaque ondelette a une longueur finie (une échelle) et est fortement localisée dans le temps. L'ondelette mère comprend deux paramètres pour l'exploration en temps-fréquence : un paramètre d'échelle  $a$  et un paramètre de localisation temporelle  $b$  (éq. 1) :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Le paramétrage en échelles et la translation des ondelettes filles permettent la détection des différentes fréquences composant le signal. De plus, ces composantes fréquentielles peuvent être détectées et étudiées au cours du temps, ce qui permet une meilleure description des processus non stationnaires (Torrence et Compo, 1998). La transformée en ondelettes continues d'un signal  $S(t)$  produit un spectre local en ondelette (éq. 2) :

$$S(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt$$

Dans la transformée en ondelettes, il existe nombreux types d'ondelettes tels que Morlet, dérivées d'ondelettes gaussiennes, Paul. Nous avons utilisé celle de Morlet car elle offre une bonne résolution fréquentielle et des résultats de bonne qualité sur les types des données (Rossi, 2010; Mesquita, 2009 ; Torrence et Compo, 1998).

La cohérence en ondelettes (Larocque *et al*, 1998) définit la fonction de cohérence  $CO_{xy}(f)$  comme une relation de la linéarité entre le signal d'entrée et de sortie, grâce à l'utilisation des spectres simples d'énergie  $S_x$  et  $S_y$  et du spectre d'énergie de la fonction d'intercorrélacion  $S_{xy}$

**La fonction de cohérence** indique le déphasage entre le signal d'entrée et de sortie (Mesquita, 2009). La valeur de la linéarité de la relation « entrée-sortie » est comprise entre 0 et 1 ;

$$CO_x(yf) = S_{xy}(f) / S_x(f) S_y(f)$$

Avec :

$S_{xy}(f)$ , transformée de Fourier de la fonction d'intercorrélacion des variables d'entrée x et de sortie y.

$S_x(f)$  et  $S_y(f)$ , transformées de Fourier des autocorrélogrammes du signal d'entrée x et du signal de sortie y.

### 2.1.3.3. Méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI)

La méthode graphique chronologique de traitement de l'information (**MGCTI**), de type matrice BERTIN", permet dans un premier temps d'analyser la répartition spatio-temporelle du paramètre météorologique, puis dans un second temps de déterminer les dates de changement de cycle. Cette méthode a été utilisée surtout dans le domaine climatique (Nouaceur et al, 2013; Laignel et al, 2014). Nous présentons cette méthode en trois étapes comme le montre la figure 5.

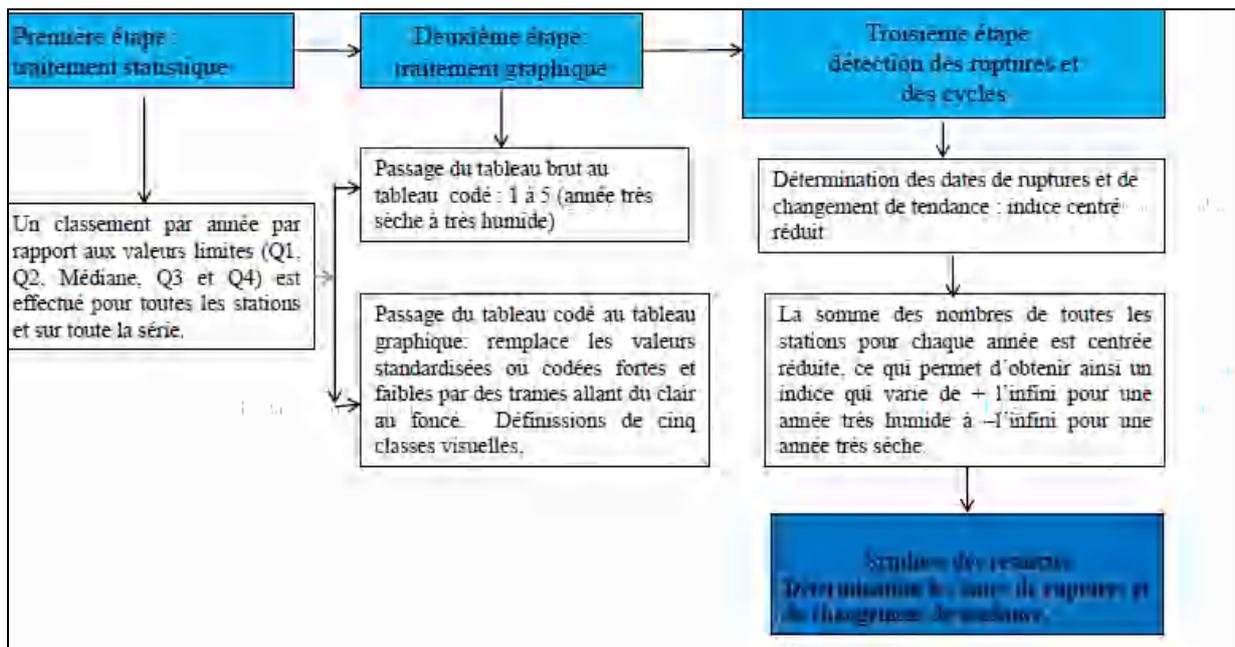


Figure 5: Schéma représentatif de la méthode de matrice Bertin

## 2.2. Les données des débits de crue et d'étiage

Pour l'étude des crues, nous avons utilisé les débits journaliers maximums annuels des cinq stations sélectionnées plus haut, alors que pour les débits des crues horaires, les données ne sont disponibles que sur quatre stations (Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara et Grarem). Les périodes d'observation de ces débits de crue ne sont pas homogènes (Tableau 3).

Tableau 3: Caractéristiques des séries de débits de crue des stations hydrométriques  
(Source: ANRH Alger)

Code	Nom	Cours d'eau	période	Q max instantané (m <sup>3</sup> /s)	Q moy (m <sup>3</sup> /s)	Date et heure du Q max instantané
100109	Douar Tassadane	O. El Kébir amont	1973-2003	609.44	12.60	25/01/2003 à 17h :00
100208	Koudiat Tendart	Oued Bouselah	1997/2003	180	5.23	25/01/2003 à 15 h :00
100403	Ain Smara	O Rhumel Seguin	1971-2001	670	8.79	07/10/1994 à 23 h : 00
100601	Grarem	O. Rhumel aval	1972/2001	1886.66	28.78	30/12/1984 à 7 h : 00

Les étiages sont traités essentiellement à partir des séries de débits journaliers. Cette analyse se base sur les débits minimaux journaliers, relevés aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Bouchdira et Grarem.

Nous étudierons les courbes des débits classés aux stations hydrométriques (Etiage absolu, DCE, DC6, DC9, DC11, DCE) et les indicateurs statistiques des débits d'étiage QMNA « Quantité Mensuelle miNimale Annuelle» et VCNd (débit minimum sur  $d$  jours consécutifs de l'année).

### 2.3. Bilan de régularisation des eaux

Le calcul des principaux termes du bilan d'eau d'un barrage (apports ou entrées, défluent ou sorties, stock ou réserve), permet de suivre l'évolution du gain et perte de capacité d'une retenue. Il permet, on outre, d'estimer les déficits de régularisation, lies aussi bien au régime irrégulier des apports qu'à l'importance des pertes (évaporation et fuites).

La relation simplifiée du bilan s'écrit comme suit :

$$\text{Apport hydrologique ou affluent (hm}^3\text{)} = \text{défluent (hm}^3\text{)} + \Delta V \text{ (hm}^3\text{)}$$

Avec ;

Défluent: somme des sorties du barrage (évaporation, fuite, déversement de crue, vidange de fond, et consommation).

$\Delta V$  ou variation de stock : volume qui reste dans la cuvette (réserve finale – réserve initiale).

Au Maghreb, plusieurs travaux ont été menés sur les bilans d'eau des réservoirs. Pour l'Algérie, nous citons les travaux de Mebarki, 1994, 2010 ; Boulahbal et al, 2013; Louamri, 2013; Mihoubi, 2009; Amirèche, 2009 ; Benfetta et al, 2016 ; Boutouatou et al, 2019. Au Maroc, nous notons la publication de Abdellaoui et al, 2002. Enfin, pour la Tunisie, il convient de citer Kingumbi (1999).

## 2.4. Données et méthodes de quantification du transport solide en suspension

L'étude de transport solide s'est accrue depuis les années 1970 pour diverses raisons (Horowitz, 2002). Cet intérêt s'oriente vers l'évaluation de l'érosion et de la perte en sol, l'évaluation de l'impact environnemental, ainsi que l'estimation des volumes morts des retenues des barrages et leur influence sur les pertes capacité de ces dernières (Walling, 1977). Le traitement des données de transports solides à l'aide de modèles régressifs s'appuie le plus souvent sur des relations statistiques elle liant le débit solide au débit liquide.

### 2.4.1 Données de transport solide des oueds

En Algérie, les mesures des matières en suspension (concentrations en sédiments en suspension) sont effectuées aux stations de jaugeage, par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H).

La charge de la matière en suspension est obtenue à partir des échantillons d'eau prélevés sur les rives de l'oued au moyen d'un conteneur de 50 cl de volume. La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à 105°C pendant 30 minutes. On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé, ce qui établit la concentration donnée en g/l. La fréquence des prélèvements effectués dépend de la variation de la hauteur d'eau. En période de crue, à chaque variation de 10 cm de hauteur d'eau un échantillon est prélevé.

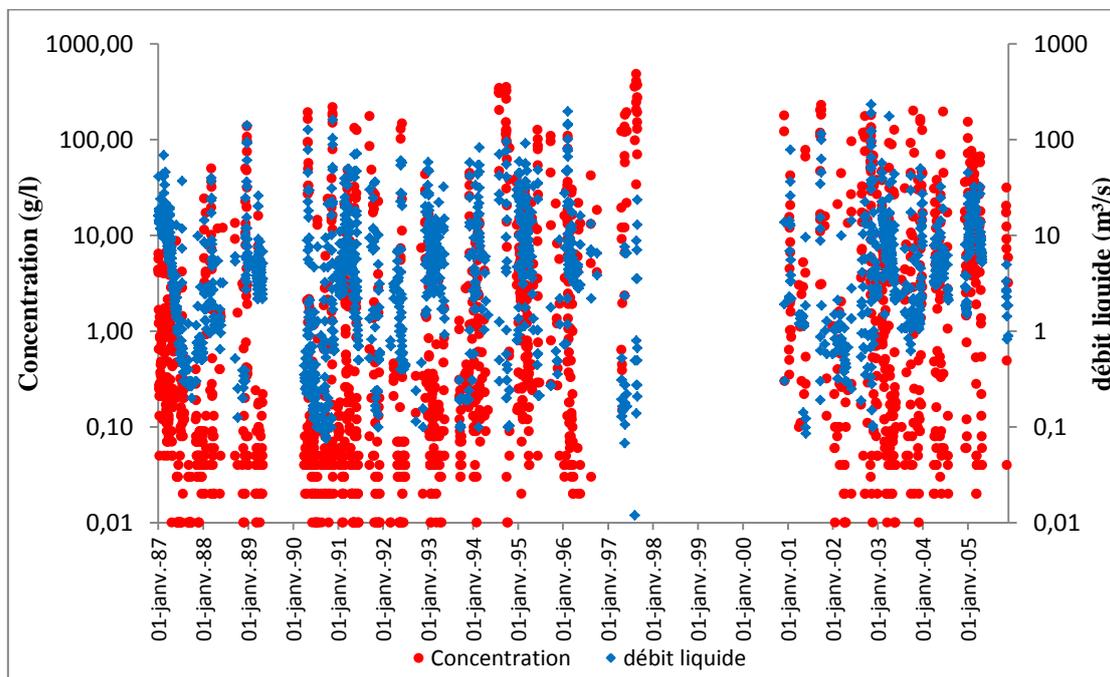


Figure 6: Mesures des concentrations en matières en suspension et débits liquides instantanés à la station de Douar Tassadane (période: 1987/88-2004/05)

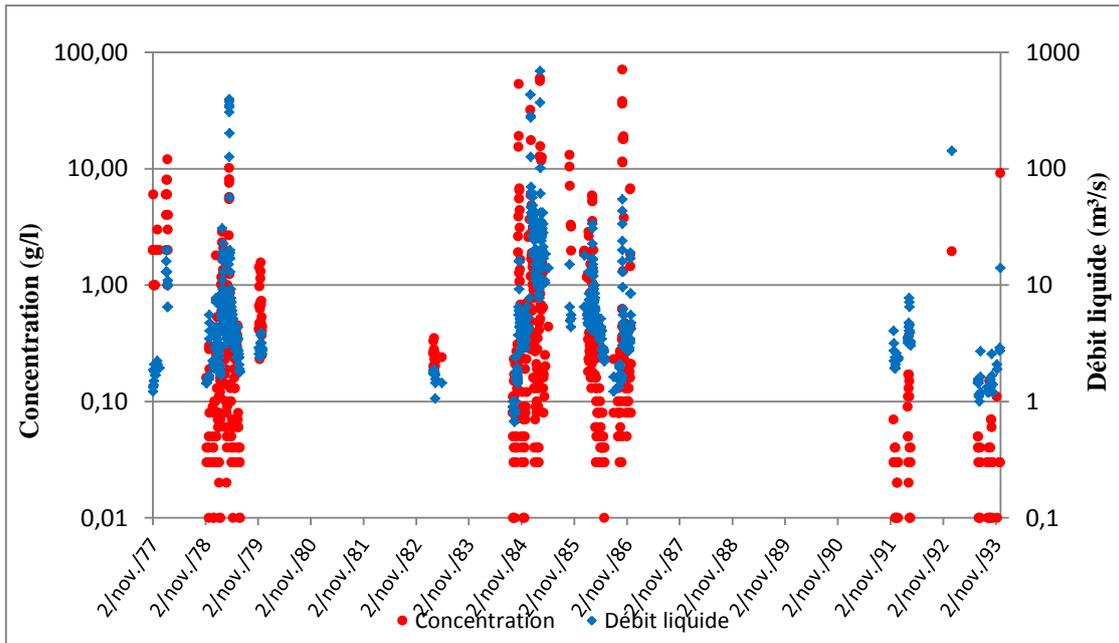


Figure 7: Mesures des concentrations en matières en suspension et débits liquides instantanés à la station de Grarem (période : 1977/78- 1992/93)

L’approche méthodologique adoptée dans cette partie consiste à développer un modèle régressif pour l’évaluation du débit solide ( $Q_s$ ) journalier à partir du débit liquide ( $Q_l$ ) observé et ce, sur la base des données de valeurs instantanées des débits liquides ( $m^3/s$ ) et des débits solides ( $kg/s$ ). Cette base de données est constituée de 1969 observations instantanées réparties sur la période 1987/88-2004/05 pour la station de Douar Tassadane et de 767 valeurs instantanées réparties sur la période 1977/78- 1992/93, pour la station la station de Grarem (Figures 6 et 7).

Les valeurs instantanées de transport solide observées vont de 0.05 à 485.79 g/l pour la station de Douar Tassadane et de 0.01 à 70.88 g/l pour la station de Grarem. Les moyennes sont respectivement de 13.01 et 1.36 g/l (Tableau 4).

Tableau 4: Paramètres statistiques de la concentration ( $C$ ), du débit liquide ( $Q_l$ ) et du débit solide ( $Q_s$ ) des stations de Douar Tassadane et Grarem

Paramètres statistique	station de Douar Tassadane			station de Grarem		
	C (g/l)	Ql $m^3/s$	Qs (Kg/s)	C (g/l)	Ql $m^3/s$	Qs (Kg/s)
Nombre de valeurs	1970	1970	1970	762	762	762
Minimum	0,05	0	0	0,01	0,67	0,01
Maximum	485,790	234,200	35322,48	70,88	691,60	41219,36
Moyenne	13,010	9,198	426,14	1,36	12,96	143,19
Ecart-type	42,191	17,615	2324,27	5,37	46,88	1765,08
Coef de variation	3,243	1,915	5,45	3,96	3,62	12,33

Pour déterminer la relation débit solide – débit liquide, une approche à différentes échelles temporelles, basée sur les modèles de régression, est adoptée, en tenant compte des données disponibles.

### 2.4.2 Évaluation de la charge solide

Les informations fournies par les prélèvements de matériaux peuvent être employés afin d'estimer le débit solide total en établissant une relation entre le débit solide et le débit liquide. Cette relation, appelée droite du transport solide, sert à estimer le débit solide total d'une rivière à partir de la mesure continue correspondante du débit liquide. La relation entre le débit solide QS et le débit liquide Ql est souvent exprimée mathématiquement par l'équation :

$$QS = a * QL^b$$

Le modèle "courbe du transport solide" proposé dès 1895 par Kenedy (Lefort, 1992 in Bouanani et al, 2013) a fait l'objet de nombreuses études en Algérie (Terfous et al. 2001; Benkhaled et Remini, 2003; Louamri et al, 2010; Louamri, 2013).

### 2.4.3 Envasement

Pour l'estimation de l'envasement du barrage de Béni Haroun nous avons pris en compte les résultats des levés bathymétriques réalisés sur la retenue du barrage (ANBT, 2013). Nous avons tenté de les confronter aux résultats de calcul de la charge solide des oueds à travers l'estimation de la dégradation spécifique moyenne du bassin-versant à l'amont du barrage (Figure 8)

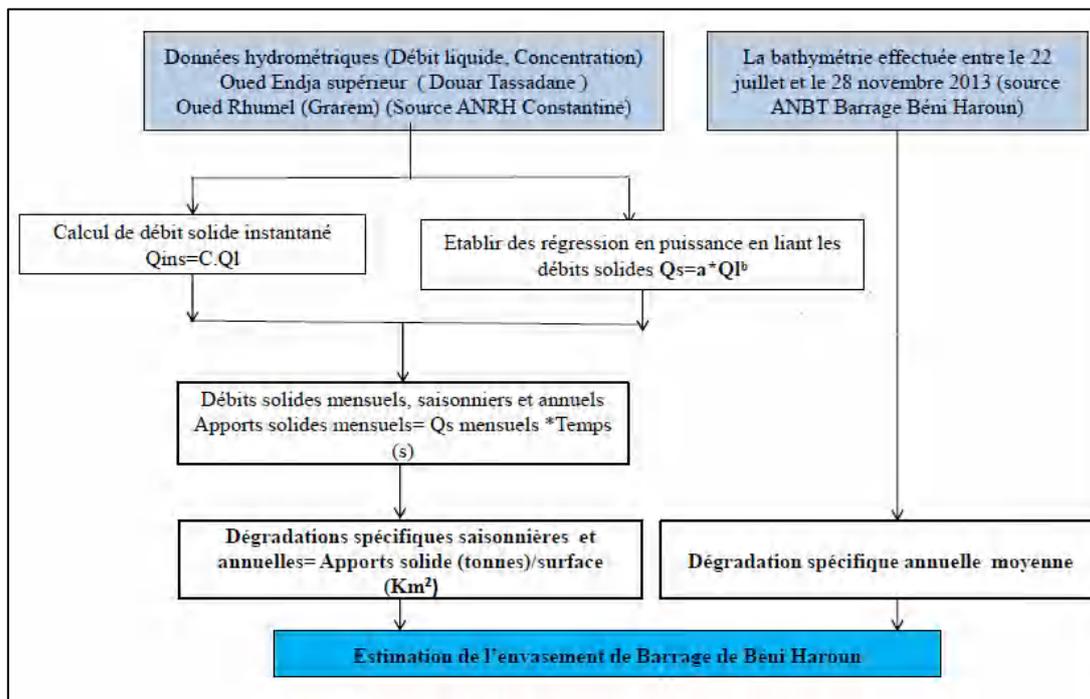


Figure 8: Schéma méthodologique de l'estimation de l'apport solide et de l'envasement au barrage de Béni Haroun

## 2.5. Les données de la qualité des eaux superficielles

Les résultats des analyses chimiques mensuelles durant une période de dix ans (2005- 2014) plus l'année 2018, nous ont été fournies par l'ANRH. Ces données concernent les paramètres: CE, pH, température de l'eau (T), Résidus Sec,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , turbidité (TU), matière en suspension (MES), demande chimique en oxygène (DCO), demande biologique en oxygène pendant 5 jours ( $\text{DBO}_5$ ), matière organique (MO) et oxygène dissout (OD).

La surveillance de la qualité des eaux du barrage de Béni Haroun, est faite par un point de prélèvement fixe, se situant au sein de la retenue et dont les coordonnées Lambert Nord Algérie sont : X=820.058 et Y=368.369 (Figure 9).

D'après Rodier (2009), un grand soin doit être apporté à l'opération de prélèvement d'un échantillon d'eau, il conditionne pour l'interprétation des résultats analytiques. Dans le cas d'un lac ou d'une retenue d'eau (barrage), un seul point est choisi. Environ 4 litres d'eau sont prélevées, pour une seule station, et sont conservées dans des flacons. Ces derniers et leurs bouchons doivent être lavés trois fois avec de l'eau à analyser, puis remplis complètement et bouchés pour éviter les bulles d'air. Les échantillons sont conservés grâce à un conservateur et gardés à basse température (2 à 4°C) (Berkat, 2016).



Figure 9: Localisation du point de prélèvement physico-chimique de la retenue de Beni Haroun. (Google earth, 2018)

## 2.6. Traitement géo- spatial

### 2.6.1 Modèle Numérique de terrain (M.N.T) et Système d'Information Géographique (SIG)

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé un Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.) à la maille de 100 m (traité par Rezak et al, 2014), il est librement disponible sur le site internet [http://hydroinformatique.polytechnice.fr/hydrologie\\_algerie](http://hydroinformatique.polytechnice.fr/hydrologie_algerie). Le système de projection est de

type géographique, Lambert Nord Algérie, bien adapté aux besoins de l'hydrologie algérienne.

### **2.6.2 Exploitation de la cartographie hydro-climatique disponible**

Dans cette étude, nous avons utilisé la carte des précipitations de 1965/66 à 1994/95 établie par l'ANRH dans le cadre l'étude générale visant à évaluer en tout point du territoire algérien la ressource en eau de surface mobilisable aux échelles annuelles et mensuelles (ANRH, 1993).

La carte des écoulements moyens probables sur une période allant de septembre 1965 à août 1995 est basée sur l'utilisation d'un modèle hydrologique LOIEAU calé sur les observations de 70 stations de jaugeage réparties à travers le Nord algérien (Laborde et al, 2003; Mébarki, 2005).

## **3. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE: PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

La présentation de la région d'étude est une synthèse des travaux, études, et thèses réalisées sur cette zone (Mebarki, 1982; Mebarki, 2005 ; Mebarki, 2009 ; Assaba, 2004; Kerdoud, 2006 ; Boulaiche, 2015; Marouf, 2012 ; Benchabane, 2015).

### **3.1. Le bassin versant et le barrage**

Les disparités physiques de la région de l'Est algérien se résument dans deux systèmes hydrologiques juxtaposés, nettement opposés: les bassins septentrionaux, à écoulement relativement fourni, de type exoréique (Côtiers constantinois, Soummam, Kébir Rhumel, Seybouse et Medjerda), et les bassins méridionaux, à écoulement plutôt modeste, de type endoréique (Hauts Plateaux, Chott Melghir et Chott Hodna) avec des Oueds à régime quasi-temporaire (Mebarki, 2005).

Notre champ d'étude concerne le bassin exoréique du Kébir -Rhumel à l'amont du barrage de Béni Haroun. Il est limité au Nord par le sous bassin du bas-Kébir et le bassin des Côtiers constantinois; au Sud, par le bassin des Hauts Plateaux Constantinois; à l'Ouest par le bassin de la Soummam et à l'Est par le bassin de la Seybouse (Figure 10).

Le bassin versant de Rhumel-Endja comporte deux grandes unités de paysage, une région montagneuse au Nord et une région de haute plaine, au Sud, parsemée de quelques montagnes et de collines isolées. Le bassin contrôlé par le barrage Beni Haroun s'étend sur une superficie de 7715 km<sup>2</sup>, dont la partie amont (haut Rhumel) est contrôlée par le barrage de Hammam Grouz (Figure 10).

Le barrage de Béni Haroun, mis en exploitation en 2003, est situé sur l'oued El Kébir, dans la région bien arrosée du Tell oriental de la wilaya de Mila, à une quarantaine de km au Nord de Constantine. Il est alimenté par deux principaux oueds (l'oued Rhumel et l'oued Endja) qui se rejoignent à environ 3,5 kilomètres en amont du barrage pour former l'oued El Kébir; ce dernier traverse vers le Nord-Ouest le massif de la petite Kabylie avant de rejoindre la mer Méditerranée, entre Jijel et Collo.

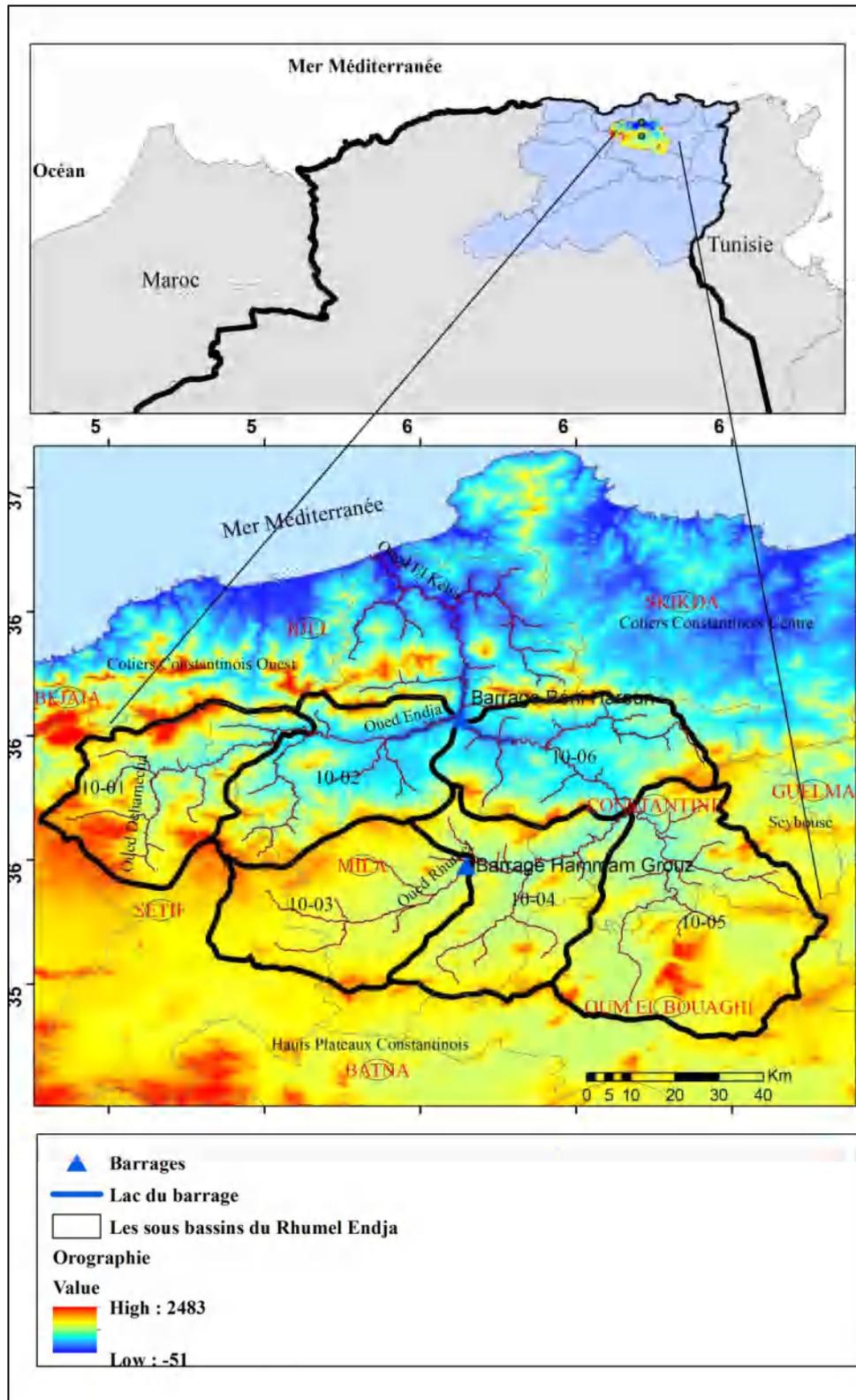


Figure 10: Présentation de la zone d'étude, vue à travers un Modèle Numérique de Terrain (MNT à maille de 100 m, coordonnées métriques Lambert Nord Algérie, traité par REZAK, 2014)

Le lac de retenue, épouse la partie captée de l'Oued El Kébir et les deux vallées de l'Oued Rhumel et de l'Oued Endja, sur une surface de 39,29 Km<sup>2</sup>, soit près de 4 000 ha. Sa capacité

est de 963 hm<sup>3</sup> et son volume utile de 732hm<sup>3</sup>. Le barrage permet de régulariser un apport annuel de 435 hm<sup>3</sup> (ANBT, 2000; Mebarki, 2009).

### 3.2. Contexte oro-hydrographique

#### 3.2.1 Le relief

Le relief de la zone d'étude montre des contrastes topographiques remarquables, avec des massifs culminants à des hauteurs très élevées (avec des pentes variant entre 35 à 60 %) et des vallées profondes. Au Nord, un ensemble de reliefs forme une imposante barrière rocheuse (la chaîne Numidique) qui partage la petite Kabylie d'El Milia au Nord et le Nord Constantinois au Sud. Cette chaîne, d'orientation sensiblement Sud-Ouest/Nord-Est, est composée essentiellement de massifs calcaires jurassique (M'sid Aicha: 1462 m; Sidi Driss: 1364 m), recouvert par endroits par le charriage du socle Kabyle (portion du Djebel Sidi Driss) et de massifs gréseux oligocènes (chainons des Zouarha: 1292 m ; Les massifs gréseux (ou gréseux argileux) sont plaqués sur un complexe marneux senonien-éocène assez tectonisé (Mebarki, 1982) (Figure 11).

Au sud, les hautes-plaines présentent des aspects de relief plat et dénudé et au chevelu hydrographique assez lâche, émergent en horsts d'un ensemble de terrains à dominante marneuse. Ces massifs d'orientation générale Sud-Ouest/Nord-Est, dominent les plaines environnantes de plusieurs centaines de mètres (Djebel Guerioun: environ 900 m, Djebel Fortas : 700 m) et donnent lieu ainsi à un relief compartimenté (Mébarki, 1982).

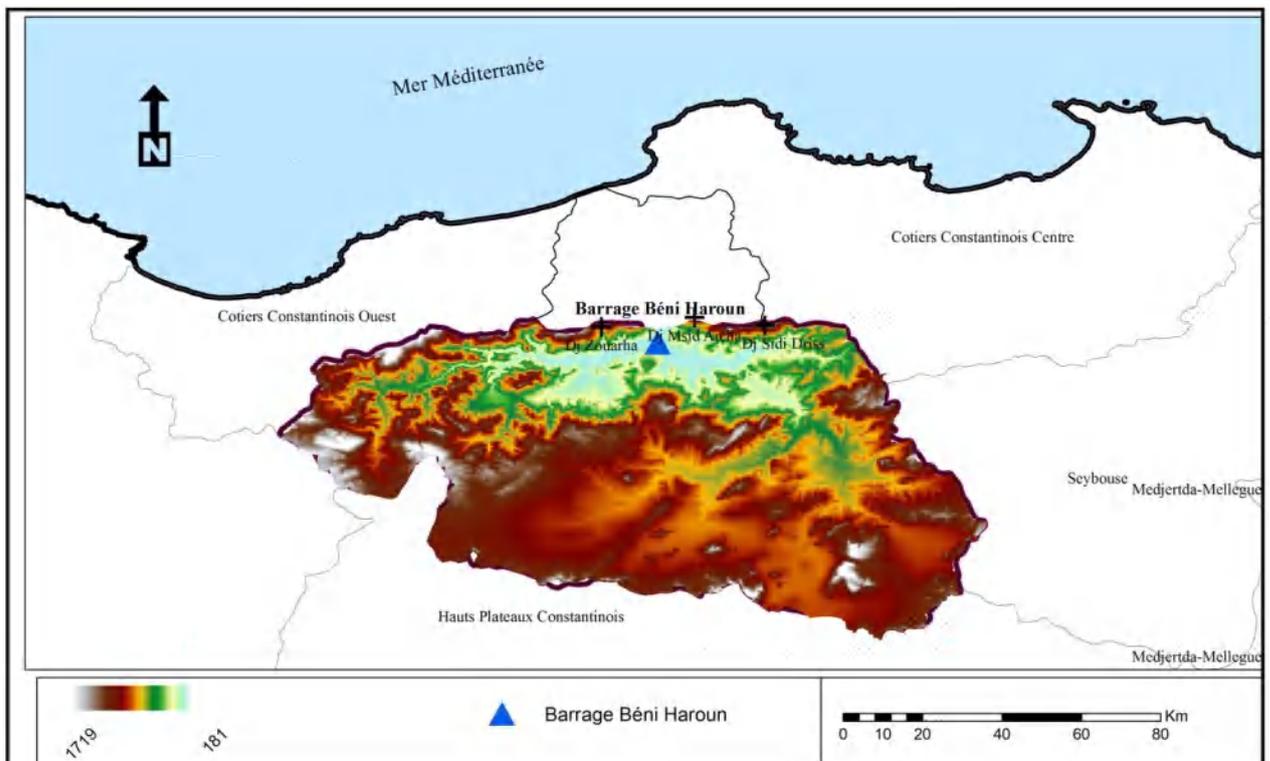


Figure 11: Carte des altitudes du bassin des oueds Rhumel - Endja

### 3.2.2 Le réseau hydrographique

L'oued Rhumel et l'oued Endja, drainent respectivement une superficie de 5315 Km<sup>2</sup> et de 2160 Km<sup>2</sup> et dont la confluence donne naissance à l'oued El Kébir (Figure 12).

L'affluent principal, l'oued Rhumel, présente un linéaire de plus de 123 Km. Il prend naissance vers 1 160 m dans les hautes plaines sétifiennes (au Nord-Ouest de Bellaa), et draine, suivant une orientation Sud-Ouest–Nord-Est, les sous-bassins semi-arides de Tadjenanet et Chelghoum Laid; puis il s'encaisse profondément (200 m de dénivellation) dans des gorges calcaires du Rocher de Constantine. Depuis, il s'écoule en direction Nord-Ouest et plus au Nord, aux environs de Sidi Merouane, il conflue avec l'oued Endja pour prendre ensuite le nom d'El Kébir (Mebarki, 1982).

Le deuxième cours d'eau, l'oued Endja, draine la partie occidentale du bassin versant du Kébir-Rhumel; il recouvre une zone intermédiaire entre le domaine tellien à influence méditerranéenne, et le domaine des hautes plaines semi-arides à forte influence continentale. Sa partie amont est formée par la confluence des oueds Dehamcha (au Nord d'El Eulma) et Menâa (aux environs d'Ain el Kébir). Dans la partie aval, l'oued Endja ne reçoit pas d'affluents importants sur sa rive gauche, mais sur sa rive droite, il collecte les eaux des oueds Djemila, Bouselah, Redjas et Melah (Mebarki, 1982) (Figure 12).

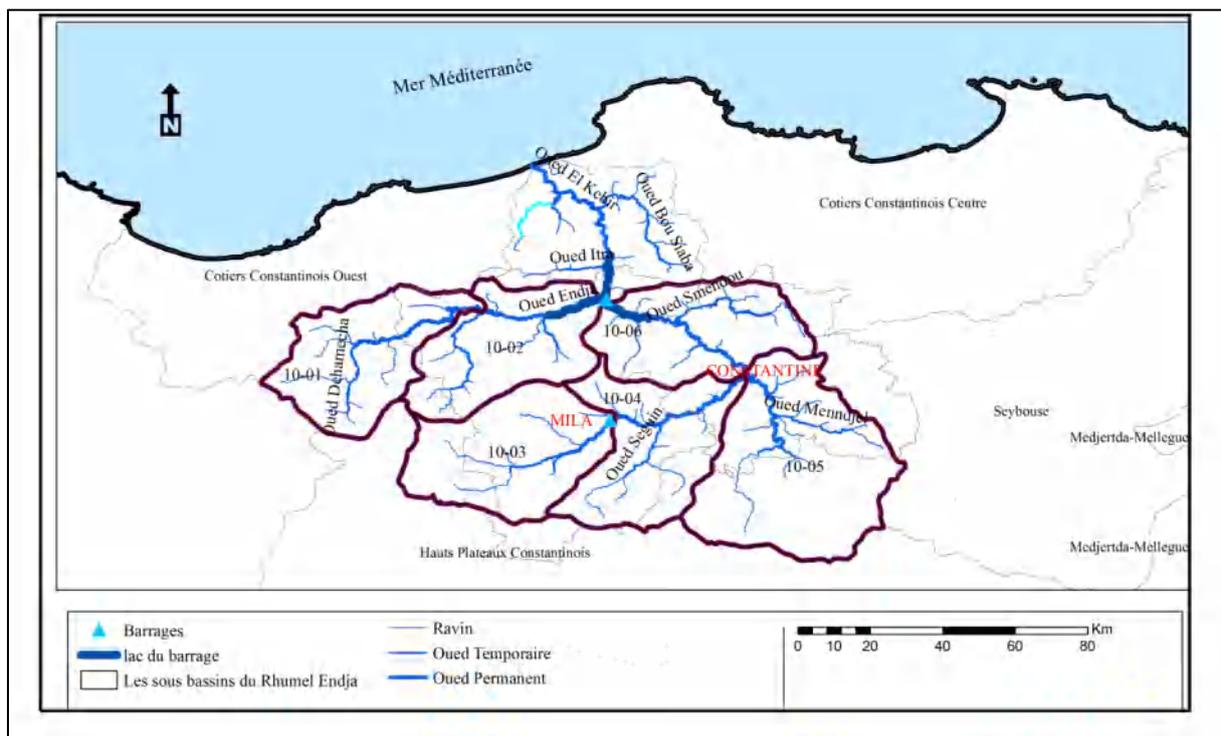


Figure 12: Réseau hydrographique du bassin d'étude

### 3.2.3 Profils en long et paramètres morphométriques

Les grands traits qui résultent des profils sont les faibles pentes des oueds parcourant la zone des hautes plaines (Oued Rhumel à Constantine 6.5 %, Oued Boumerzoug à Constantine 4%) et les fortes pentes des effluents de l'oued Smendou (18.5 %) en confluence avec oued

Rhumel (Figure 13). L'importance de rupture de pente au niveau des gorges de Constantine et l'encaissement profond du lit de l'oued Rhumel permet d'augmenter la vitesse de propagation de crues, à l'aval du rocher de Constantine, ce qui provoque un transport considérable de sédiments en aval vers la retenue de Béni Haroun (Marouf, 2012; Mebarki, 1982).

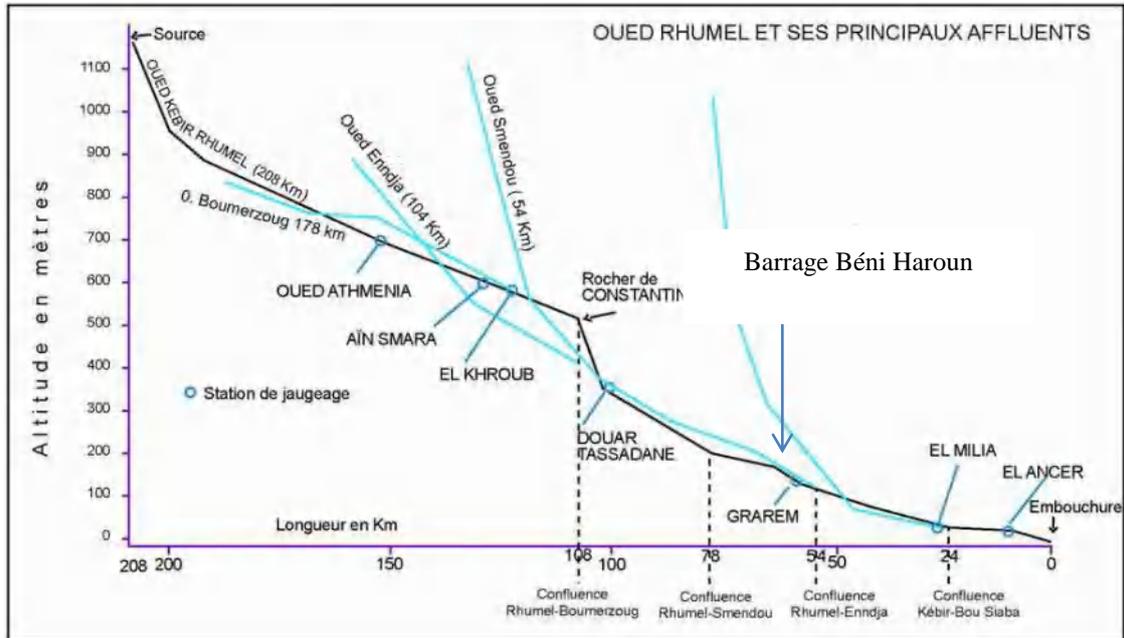


Figure 13: Profils en long du Kébir -Rhumel (d'après Mebarki, 1982 et 1984)

Le tableau 5 récapitule les principales caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins aux stations hydrométriques. Les différents paramètres morphométriques et hydrographiques, interviennent et souvent de façon combinée dans les modalités de l'écoulement.

Tableau 5: Caractéristiques morphométriques du bassin de l'oued Rhumel (D'après Mebarki, thèse doctorat de troisième cycle, 1982)

Code	Nom de Station	Oued	S (km)	P (m)	C	Lé	H min (m)	H max (m)	H moy (m)	IP	L oued (m)	Dd (km/km <sup>2</sup> )	Ct
100109	Douar Tassadane	El Kébir	960	125	1.15	38.1	390	1662	955	0.125	58	4.6	64
100208	Koudiat. Tendart	Bouselah	170	52.5	1.127	14.1	620	1386	945		18	5.5	74
100301	Oued Athmènia	Rhumel	1130	140	1.17	44.7	710	1285	900		59	2.2	8.36
100403	Ain Smara	Rhumel	2200	198	1.18	65.3	602	1377	861		87	3.1	13.5
100501	El Khroub	Bou Merzoug	1630	150	1.04	40.4	575	1729	861		45		
100601	Grarem	Rhumel	5320	305	1.17	98.5	150	1729	806		160	2.84	12.38
100620	El kheneg	Rhumel	4570	317					883			2.96	12.38

*S: superficie ; P: périmètre; C: coefficient de compacité; Lé: Longueur du rectangle équivalent; Hmin: altitude minima; Hmax: altitude maxima; H moy: altitude moyenne; Ip: Indice de pente de Roche; L oued: Longueur du thalweg principal; Dd: densité de drainage; Ct: coefficient de torrentialité.*

### **3.3. Contexte géologique du bassin versant**

#### **3.3.1 Géologie du bassin**

Cette région fait partie de la chaîne alpine d'Afrique du Nord, dont le cadre géologique complexe est caractérisé par la présence de nappes de charriage. Les études géologiques antérieures (Wildi, 1983; Kiken, 1983; VILA, 1980, Sary, 1976; Bertraneu, 1955), ont montré le morcellement de la région en plusieurs structures, chacun unité est caractérisée par une histoire tectonique particulière de déformations, ces ensembles incluent plusieurs nappes d'étendue régionale.

Le bassin versant de Rhumel-Endja appartient au domaine de l'Atlas tellien qui rassemble les formations les plus tectonisées du Nord de l'Algérie. Quatre grandes unités peuvent être identifiées du Nord au Sud. La partie septentrionale du bassin versant est dominée par les nappes telliennes et les nappes de flysch alors que la partie sud est principalement composée par les dépôts associés à la nappe néritique constantinoise et aux formations peu ou pas tectonisées (formations mio-plio-quadernaires) (ANBT Béni Haroun, Avant-Projet Détaillé, 1997).

Dans cette partie de l'Algérie du Nord, on peut identifier les zones suivantes de la chaîne Alpine, du Nord au Sud (Figure 14) :

*Zones internes :* La partie Nord de la région est occupée par le socle de la petite Kabylie constitué en général de gneiss, phyllades et de calcaires métamorphiques. Ce socle forme une écaille épaisse de 2 à 3Km entièrement charriée vers le sud sur des terrains sédimentaires plus ou moins métamorphisés d'âge Jurassique à Eocène. Par contre, la bordure sud de cet ensemble, reposent en discordance des terrains conglomératiques et grés-micacés d'âge Oligocène supérieur et Miocène inférieur appelés Oligo-Miocène Kabyle (OMK) (Benchaabane, 2015). on note aussi que des nappes d'écoulement de flyschs Crétacé et Eocène charriées sur ces zones internes, elles appartenant à plusieurs séries distinctes dont les deux suivantes sont présentes dans la zone du projet : le flysch Massylien, et le flysch de Ziane

*Zones externes :* Les zones externes sont représentées en générale dans cette partie par des nappes telliennes, formé par : le mol néritique du Constantinois composé d'une séquence carbonatée d'âge Jurassique à Crétacé supérieur, la zone épi-tellienne formée d'une séquence carbonatée et détritique allant du Crétacé à l'Eocène et les séries ultra-telliennes à faciès bathyaux allant du Crétacé à l'éocène. Aussi, on note que la série Numidienne de l'oligocène, argileuse à la base et gréseuse au sommet, se trouve toujours située au-dessus des unités plus anciennes décrites ci-avant.

*Formations néogènes :* Ces formations se sont déposées en discordance sur toutes les autres unités précédentes. Dans le nord, il s'agit de formations marines d'âge Burdigalien. Vers le

sud, dans la cuvette structurale de Constantine, on trouve des dépôts continentaux allant du Miocène moyen au Pliocène, voir plus récent.

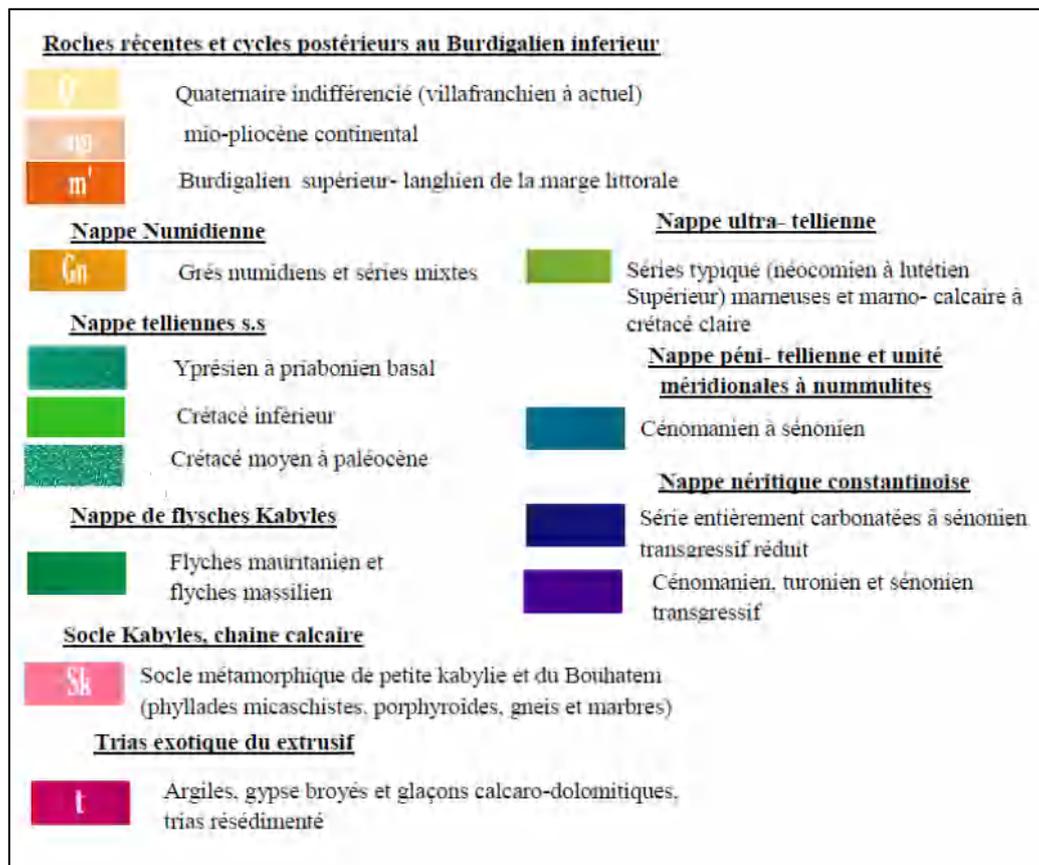
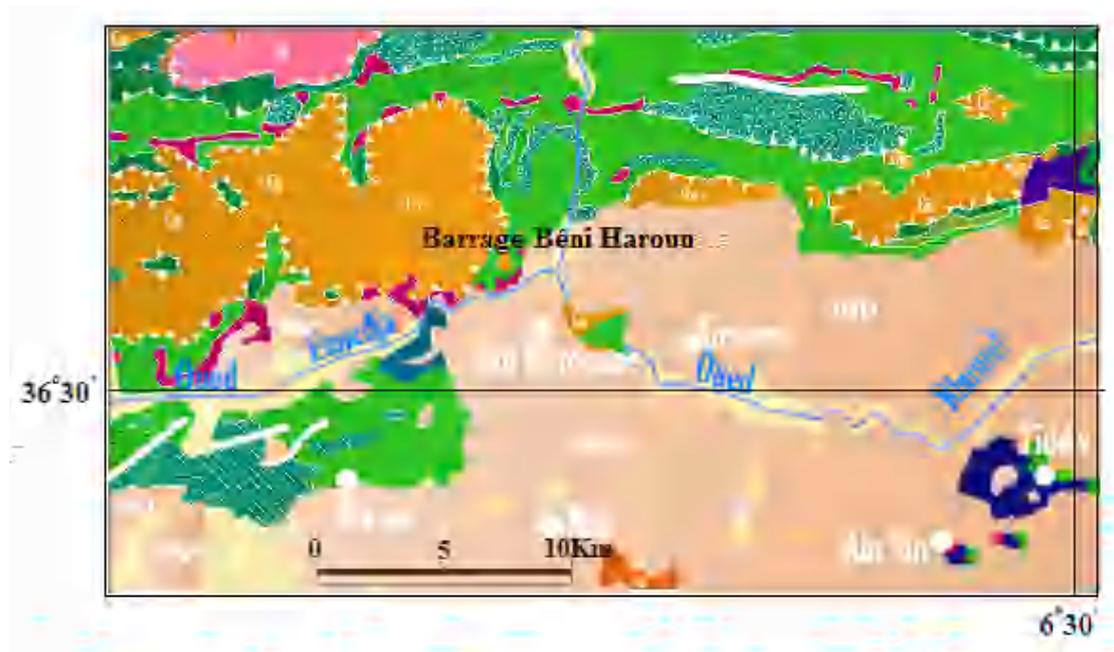


Figure 14: Formations géologiques du bassin de Rhumel-Endja (Extrait de la carte structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale de J-M Vila, 1980) (Benchabane, 2015)

*La tectonique de la région :* Au cours du Miocène, des granites et des micro-granites traversent le socle Kabyle et tous les terrains sédimentaires décrits ci-dessus. Ainsi, la mise en place de ces derniers, donne au Nord Constantinois sa physionomie actuelle. En remarque aussi, la présence de grandes failles délimitent d'une part des bassins effondrés dans lesquels les formations sédimentaires ont été préservées de l'érosion et d'autre part, des zones surélevées où affleure le socle de la petite Kabylie ainsi que plus au Nord des formations sédimentaires sur lesquelles ce socle a été charrié. Il est à signaler que le long de plusieurs accidents tectoniques, des remontées de lambeaux du Trias, auxquels sont associés des amas de gypse et des grès sont observés au voisinage du site (vallées de l'oued El Dib et de l'oued Endja) (Benchabane, 2015).

### 3.3.2 Les domaines hydrogéologiques

Le bassin versant Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun est composé de domaines géologiques et hydrogéologiques très différents, délimités par Mébarki et Thomas (1985) (Figure 15). Le barrage de Béni Haroun, reçoit les écoulements issus de l'ensemble des domaines DI et DII, DIII et une partie du domaine DIV.

*Domaine des Hautes-Plaines sud-constantinoises (DI) :* les massifs carbonatés du néritique constantinois et les plaines plio-quadernaire constituent ce domaine. Les épais massifs de calcaires jurassiques et crétacés émergent en horsts très karstifiés. Au pied de ces massifs, dans la zone d'éboulis, émergent de grosses sources karstiques (Ain Fesguia : 90 l/s, Ain Fourchi : 300 l/s, Ain Boumerzoug : 400 l/s). La source thermale de Hammam Grouz (110 l/s) émerge à l'aval du barrage de Hammam Grouz.

*Le bassin néogène de Constantine-Mila (DII) :* d'âge mio-pliocène et à dominance argileuse. Quelques affleurements de calcaires lacustres renferment des ressources exploitées localement. Les nombreux horsts de calcaires néritiques d'âge jurassique-crétacé donnent lieu à des aquifères karstiques hydrothermaux (Hamma Bouziane-Constantine).

*Le domaine des « nappes » tectoniques de Djemila (DIII) :* situées à l'Ouest du domaine DII, ces « nappes » sont formées d'une alternance de marnes et de calcaires marneux (Jurassique-Crétacé-Eocène). Excepté la source faiblement thermale de Ain Hammam (150 l/s), les sources, issues des niveaux calcaires les plus épais, ont un débit relativement faible.

*La dorsale Kabyle et des massifs gréseux numidiens (DIV) :* au Nord de Grarem et de la confluence de l'oued Endja et de l'oued Rhumel, ce domaine est constitué essentiellement de grès numidiens sous lesquels apparaissent des calcaires jurassiques très tectonisés de la dorsale kabyle. Le débit des émergences issues des calcaires n'est pas négligeable.

*Le socle granitique et cristallophyllien de la petite Kabylie d'El-Milia :* Au Sud d'El-Milia, la vallée du Kébir-Rhumel s'encaisse dans les formations du socle. A l'opposé des formations du socle, la basse vallée de l'oued Kébir (1 à 2 Km de largeur), et constituée des graviers et des sables alluviaux très abondants, est la ressource en eau la plus importante du secteur (Mebarki et Thomas, 1988).

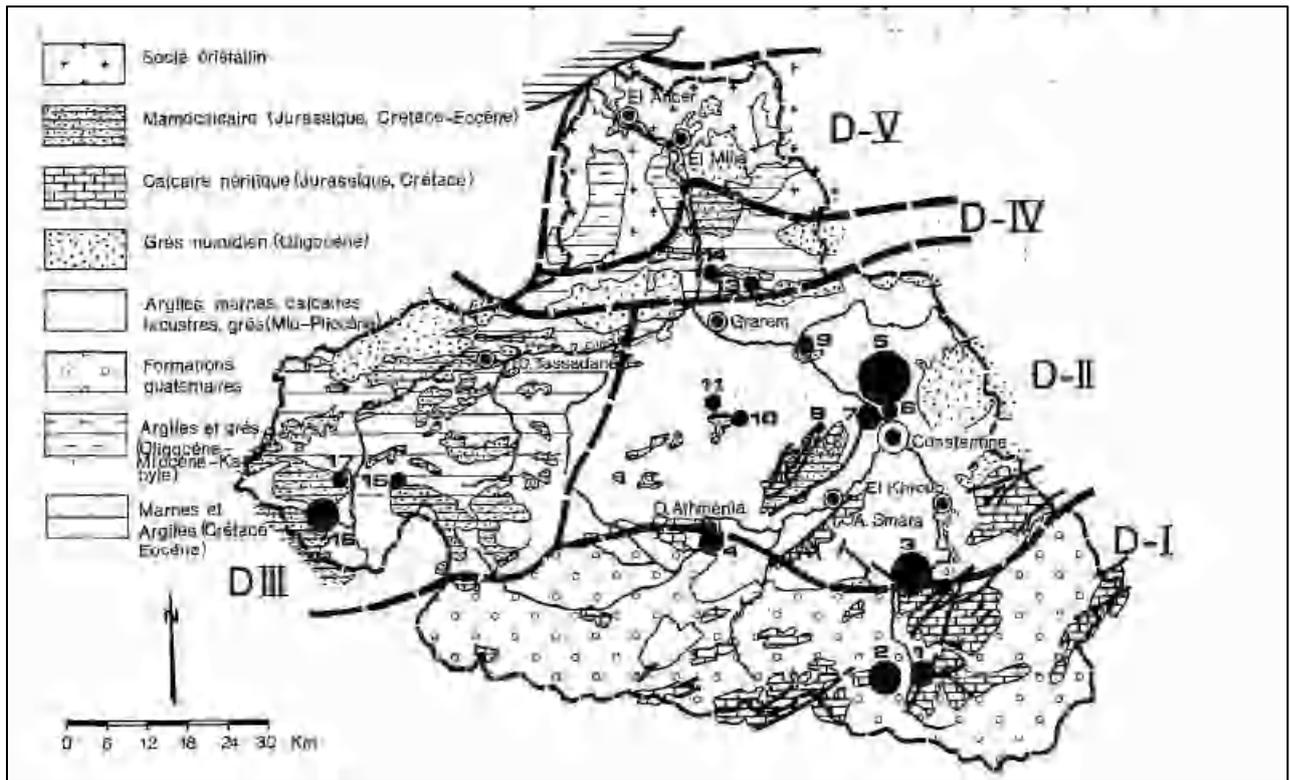


Figure 15: Les grands domaines hydrogéologiques du Kèbir-Rhumel (Mebarki et Thomas, 1988)

### 3.3.3 Le site géologique du barrage

Ce site du barrage de Béni Haroun a fait l'objet d'études géologique, géotechnique et sismique (études de HARZA Engineering Company en 1984 et 1986 et de Promon en 1990 ; travaux de reconnaissances réalisés par DRAGADOS et par International Geophysical Technology en 1997).

Selon le rapport de synthèse du bureau d'études TRACTEBEL Ingénierie (Avant-Projet Détaillé, 1997), le site du barrage est caractérisé par une barre calcaire éocène d'environ 100 m d'épaisseur d'orientation globale Est-Ouest, reposant sur les marnes noires paléocène à l'aval et surmonté par des marnes éocène à l'amont (Figure 16). Le substratum de la zone de la cuvette du site du barrage située à la limite Nord de la province géomorphologique « dépression miocène de Constantine » est principalement constituée de dépôts d'alluvions sablo-graveleux dans le lit des oueds et sur plusieurs niveaux de terrasses, de colluvions provenant en grande partie de l'érosion des argiles miocènes assez répandues et d'écoulements au pied des formations rocheuses. Les principaux traits structuraux dans la zone de la retenue sont liés aux plissements et aux failles.

Les unités rocheuses présentes sur le site du barrage, sont de l'amont à l'aval: des marnes éocènes (à l'amont de l'emprise du barrage); une barre de calcaires éocènes, d'âge Yprésien (appui du barrage); des marnes noires du Paléocène constituées de schistes (situées à l'aval immédiat de la digue).

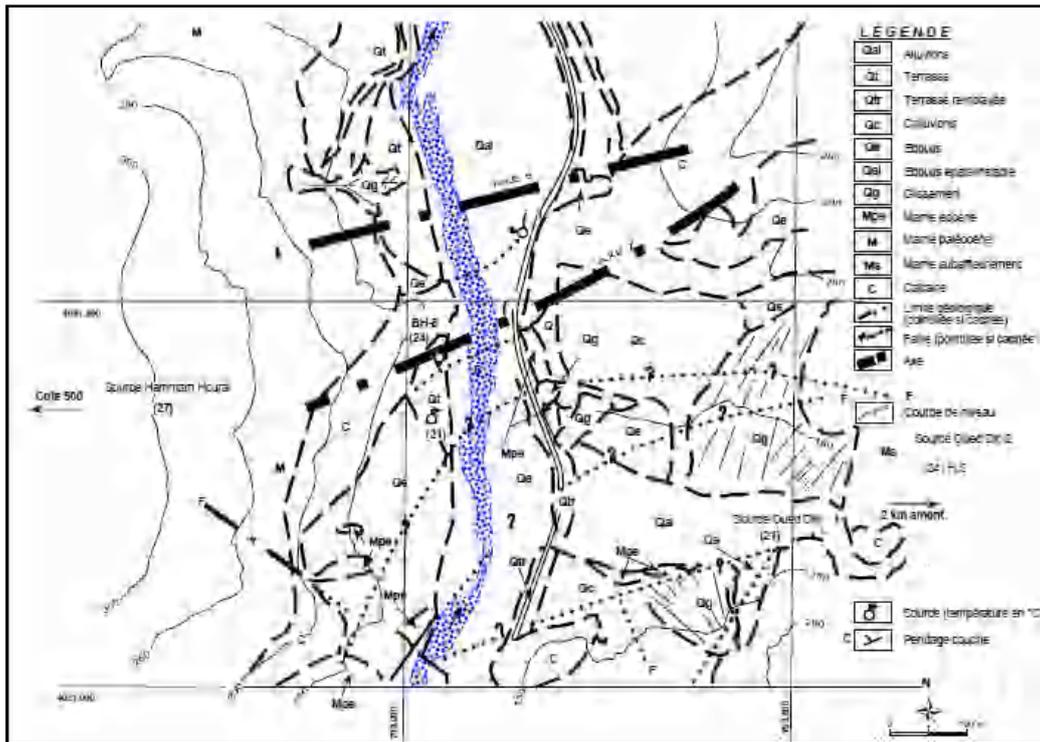


Figure 16: Contexte géologique du site du barrage de Beni Haroun (d'après étude d'Avant-Projet Détaillé A.N.B.T, 1997)

### 3.4. Couvert végétal

La couverture végétale est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du sol (Bouanani, 2004). Elle joue un rôle essentiel dans la protection du sol, en exerçant une protection mécanique directe sur l'écoulement fluvial, 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.

La végétation est de type méditerranéen dans le Nord du pays, elle est dominée par les steppes dans les hauts plateaux.

La couverture végétale du bassin du Rhumel-Endja est analysée d'une manière succincte, à partir de la carte d'occupation du sol produite par l'INSID (Institut National des Sols, Irrigation et Drainage) (Figure 17).

Le bassin de Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun est caractérisé par un couvert végétal très réduit en dehors de quelques zones où se maintient encore un matorral clair (forêt, maquis, reboisement). Zones de forêt, maquis et reboisement, leur principale localisation est la partie Nord du bassin, où la pluviométrie est relativement élevée et les pentes sont fortes favorisent des forêts (chêne liège, chêne zeen) (Mebarki, 1982; 2005). Dans les marges semi-arides, les forêts laissent place à des massifs calcaires en grande partie nus.

Les zones de cultures (céréales, grande culture en sec, culture maraichères ; polyculture, oléiculture) représentent la part majoritaire dans le bassin. Dans cette couverture végétale

saisonnaire, ce sont des cultures céréalières qui dominent largement, d'autant que l'on va du Nord au Sud.

Les sols nus sont vulnérables à l'érosion hydrique et nécessitent des aménagements de mise en défens.

Les cultures irriguées se font par pompage direct soit à es oueds ; des puits et des retenues collinaires. Le nouveau périmètre irrigué de Teleghma - Ouled hamla est, depuis 2018, irrigué à partir des eaux du transfert de Béni Haroun.

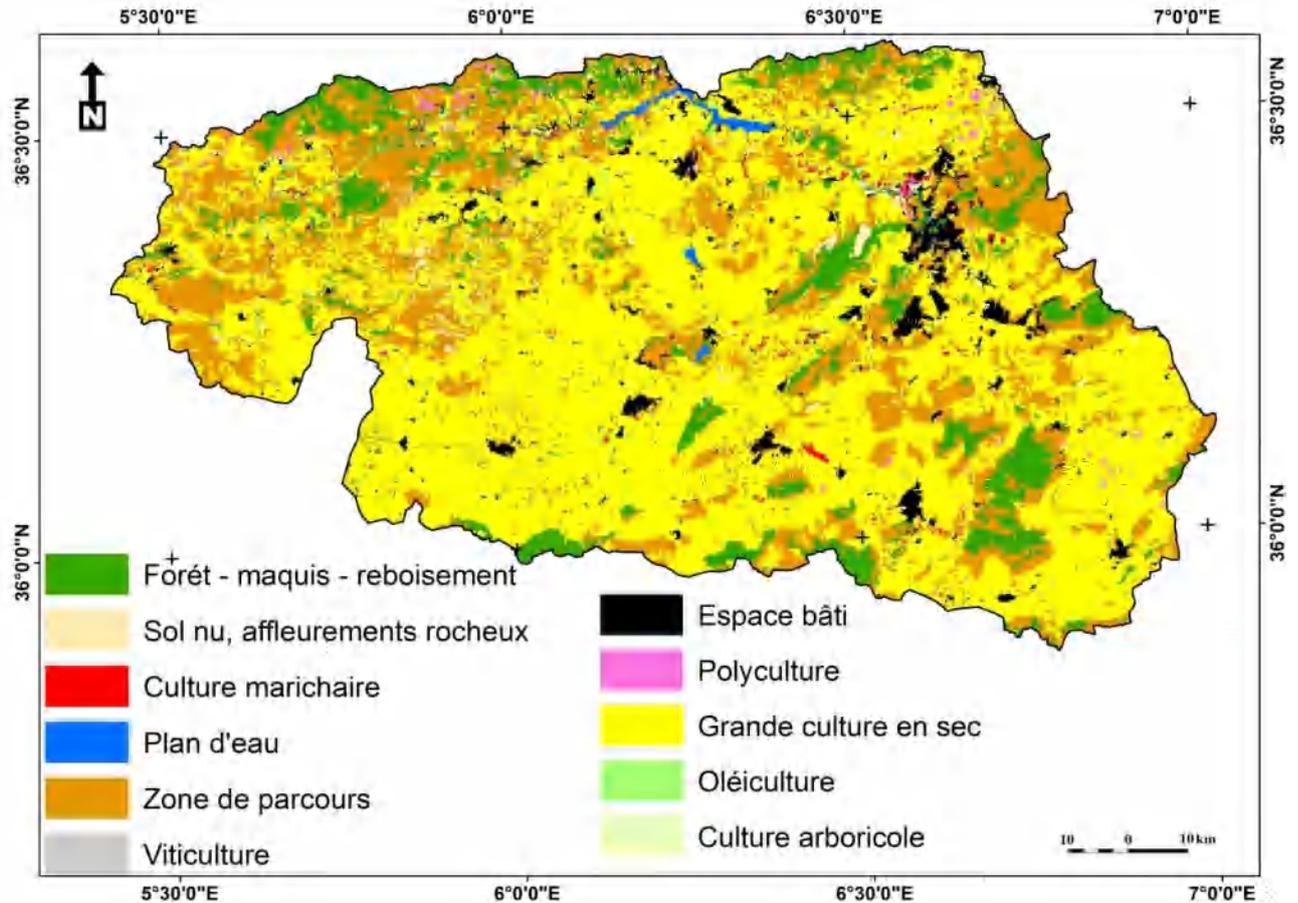


Figure 17: Couverture végétale du bassin Rhumel-Endja (INSID, 2011)

### 3.5. Contexte climatique du bassin versant

Le climat du bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun est tempéré et subhumide au Nord et de type semi-aride, continental au Sud.

Nous présentons le contexte climatique global à travers essentiellement les facteurs pluies et températures que nous compléterons par l'estimation du bilan hydrique.

#### 3.5.1 Les précipitations

Les pluies méditerranéennes sont caractérisées par une très forte variabilité saisonnière et annuelle. La répartition de la pluviométrie algérienne est soumise à un double gradient, latitudinal et altitudinal (Mebarki, 1982; Ghachi, 1986; Meddi, 1995; Assaba, 2004). Les

précipitations décroissent du littoral vers l'intérieur, altérées, néanmoins, par l'effet orographique de l'Atlas saharien, avant de s'accroître à nouveau dans le Piémont saharien où les pluies se raréfient (Mebarki, 2005). La pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs (Seltzer, 1946; Gausson, 1948; Chaumont et Paquin, 1971; Medinger, 1953; ANRH, 1993; Benabadji et Bouazza, 2000; Talia, 2002; Meddi et al, 2003, 2007 et 2010; Medjerab, 2005; Hirche et al, 2007; Bekkoussa et al, 2008).

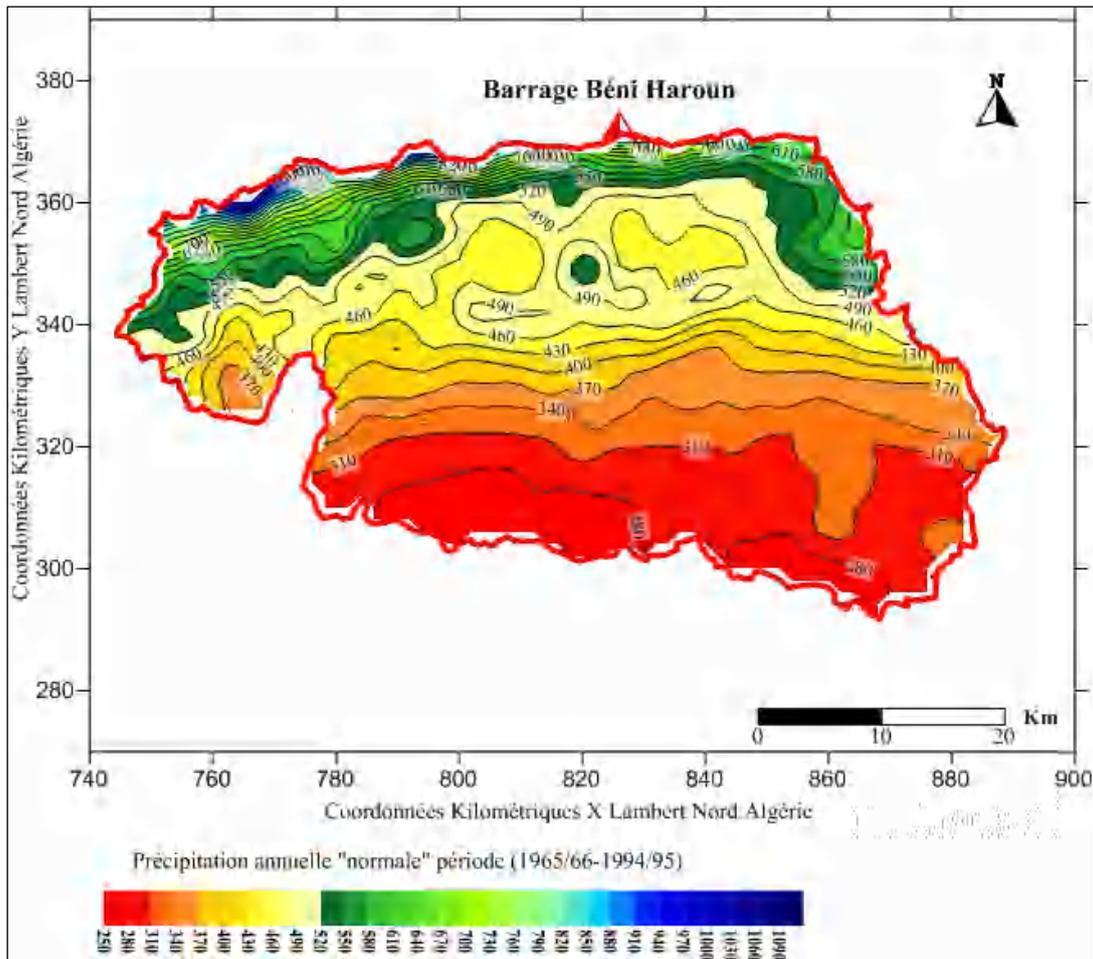


Figure 18: Carte des précipitations annuelles moyennes du bassin Rhumel-Endja (période: 1965/66-94/95) (ANRH, 1993 in Mébarki, 2005)

La carte des isohyètes annuelles moyennes du bassin du Rhumel-Endja a été extraite à partir de la carte des précipitations de l'ANRH, élaborée sur la base des séries d'observations de la période: 1965/66-1994/95 (ANRH, 1993) (Figure 18). Les précipitations décroissent du Nord au Sud: elles atteignent 800 mm par an, au Nord; elles tournent autour de 300 mm au Sud). Ce contraste trouve son originalité dans de multiples facteurs comme l'influence méditerranéenne au Nord et continentale au Sud ainsi que la répartition des ensembles montagneux.

### 3.5.2 Les températures

La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface, dans le sol ou dans le sous-sol, ainsi que sur le taux de salinité des eaux. De ce fait, elle conditionne

aussi le développement et la répartition des différents types de végétation (naturelle ou cultivées) ainsi que le déficit d'écoulement dans le bassin versant.

Les données de température proviennent de la station météorologique de Ain El Bey (Constantine) émanant de l'Office National Météorologique (période 1978/79 à 2003/04), et de la station du barrage Béni Haroun, ANBT (2004/05-2017/18) (annexe 1).

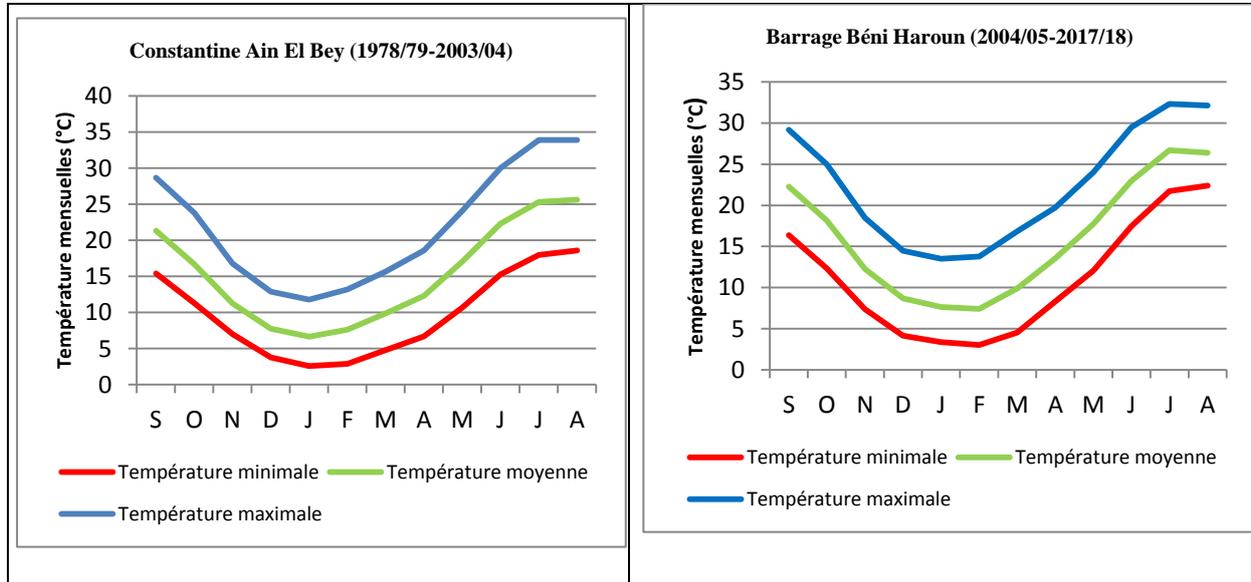


Figure 19: Température moyenne, maximale et minimale des deux stations

Les courbes de températures annuelles montrent la variation des températures maximales et minimales (Figure 19). Le mois le plus froid c'est janvier, et le mois le plus chaud est août. La température la plus basse de la station de Constantine est atteinte au mois de janvier (+2.6 °C) et le maximum est de (+33.90 °C) au mois d'août. Dans la station climatique du Barrage la température maximale est atteinte (+32.33°C) au mois de juillet, et la température la plus basse est atteinte (+3.01° C) au mois de Février.

La saison froide s'étale du mois de novembre au mois d'avril avec un minimum de + 6.66 °C au mois de janvier à la station de Constantine de + 7.41 °C en février à la station de barrage.

### 3.5.3 Relation pluies - températures : le diagramme ombro-thermique et l'indice Emberger

Afin de caractériser les régimes thermiques et pluviométriques nous utilisons deux méthodes de travail, le diagramme ombro-thermique et l'indice Emberger.

#### 3.5.3.1. La méthode du diagramme ombro-thermique :

Cette méthode permet de déterminer les périodes humides et sèches. Le graphique mensuelle issue de cette application montre les précipitations en ordonnées à droite et les températures moyennes en °C en ordonnées à gauche avec une échelle double de celle des précipitations (Bagnouls et Gaussen, 1957). Ce type de représentation permet d'apprécier la variabilité mensuelle des paramètres (pluie et température) et d'évaluer ainsi les contrastes saisonniers.

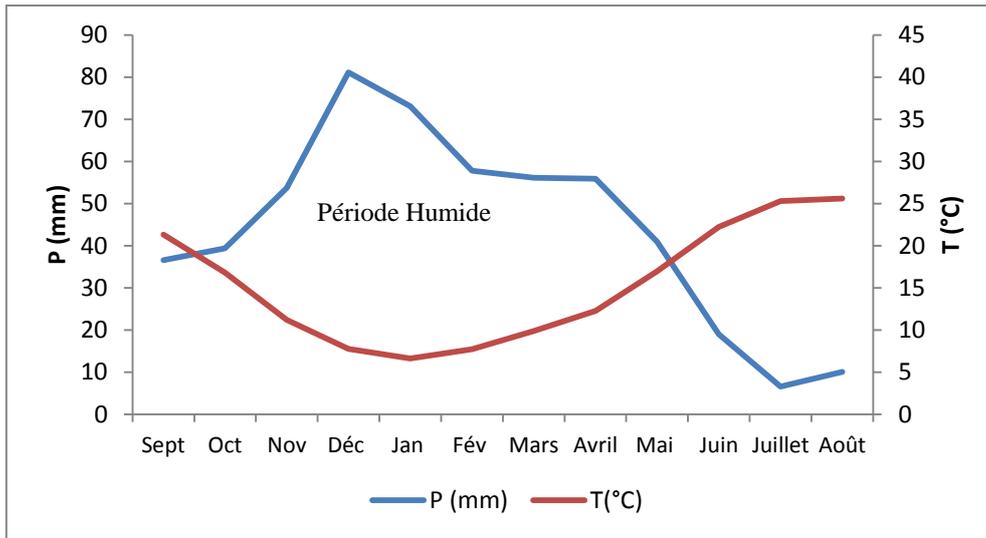


Figure 20: Courbe ombro-thermique de la station de Constantine (1978/79-2003/04)

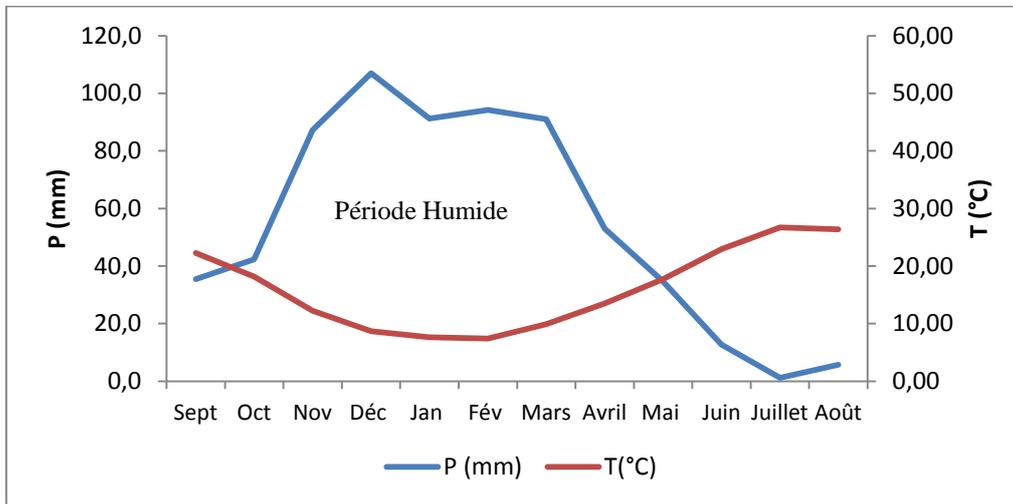


Figure 21: Courbe ombro-thermique de la station de Barrage Béni Haroun (2004/05-2017/18)

Le mois le plus sec est celui où le total moyen des précipitations est égal ou inférieur au double de la température. Les courbes montrent une période sèche qui s'étend du mois de juin au mois d'octobre et une période humide qui s'étale d'octobre au mois de mai pour les deux stations (Figure 20 et 21).

### 3.5.3.2. La méthode du diagramme d'Emberger :

basée sur le calcul du quotient pluvio- thermique d'Emberger (Q). C'est un quotient qui est fonction de la température moyenne maximale (M) du mois le plus chaud, de la moyenne minimale (m) du mois le plus froid en degrés Celsius et de la pluviosité moyenne annuelle (P) en mm ce quotient est d'autant plus élevé que le climat de la région est humide. Il est calculé selon la formule suivante :

$$Q_2 = [P / (M^2 - m^2)] \cdot 2000$$

Où :

$P$  : précipitations moyennes annuelles (mm)

$M$  : moyenne des températures maxima du mois le plus chaud en degré absolu kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ )

$m$  : moyenne des températures minima du mois le plus froid en degré absolu kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ )

Avec :

$$M \text{ et } m \text{ (en } ^{\circ}\text{K)} = M \text{ et } m \text{ (} ^{\circ}\text{C)} + 273.15$$

Tableau 6: Valeurs de coefficient pluvio-thermique d'Emberger des stations météorologiques

Stations	M	m	M-m	p	Q	Etage bioclimatique
Constantine	34	3	31	530	58.62	semi-aride
Barrage de Béni Haroun	32	3	29	655.6	77.78	Sub humide

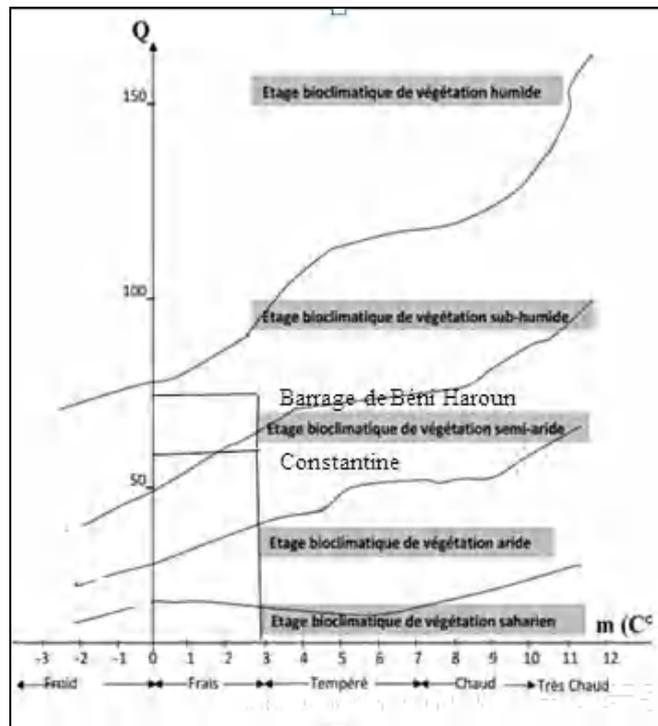


Figure 22: Diagramme d'Emberger

Cette application permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une région méditerranéenne, et de la situer dans le diagramme (position de chaque station en fonction de la valeur de Q et de la température minimale du mois le plus froid (Tableau 6 et Figure 22)).

### 3.5.4 Calcul du bilan hydrique (modèle de Thornthwaite)

Le calcul du bilan hydrique permet de qualifier les transferts d'eau issue des précipitations, et convient de caractériser l'état du sol en humidité. Le bilan hydrique est établi sur la base des données connues des précipitations  $P$  et de l'évapotranspiration potentielle  $E.T.P$ ,

L'évapotranspiration : est la restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre, quelque soit sa nature (sols, végétaux, et eaux libres) à l'atmosphère (Brutsaert, 1982 ; Jensen et al. 1990). Son origine est agronomique et les formules pour la calculer ont souvent été mises au point dans des conditions particulières à l'échelle de la parcelle. L'évapotranspiration est directement liée à l'influence des facteurs climatiques (température, humidité, insolation, radiation, etc.) aux caractères physiologiques du couvert végétal et à la réserve en eau du sol.

L'évapotranspiration potentielle (E.T.P) est dictée par les conditions atmosphériques qui règlent l'évaporation. THORNTHWAITE (1948) est l'un des premiers auteurs à introduire la notion d'évapotranspiration potentielle, et à en présenter la formule de calcul convenable.

$$ETP_{corr} = 16. [10T / I]^a. K$$

Avec :  $I = \sum i$  où :  $i = [T/5]^{1.514}$

**E.T.P** : l'évapotranspiration potentielle non corrigée (mm);

**T** : la température moyenne mensuelle (°C);

**I** : l'indice thermique annuel;

**i** : l'indice thermique mensuel ;

**a** : un exposant climatique défini ainsi:

$$a = 0.0161 I + 0.5$$

**K** : coefficient de correction dépendant de la latitude de la région soit (36°).

L'évapotranspiration réelle (E.T.R) c'est la réponse exacte du milieu sous forme d'évaporation et de transpiration aux exigences atmosphériques.

Pour déterminer le bilan hydrique on estime que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau qui peut être reprise par l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. La quantité d'eau stockée dans la RFU (réserve facilement utilisable) suivant les sols et sous-sols considérés, avec une moyenne de l'ordre de 100 mm) (Mebarki, 1982).

Le bilan hydrique de **Thornthwaite** est établi mensuellement pour déterminer les variations des paramètres suivants: l'évapotranspiration réelle (ETR), la réserve facilement utilisable (RFU), le déficit agricole (Da) et l'excédent (Ex).

Tableau 7: Bilan d'eau selon Thornthwaite pour la station de Constantine (1978/79-2003/04)

Mois		sept - 1	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
<b>P (mm)</b>	max		36,6	39,4	53,7	81,1	73,1	57,8	56,1	55,9	41,0	19,0	6,6	10,1	530,4
<b>ETP (mm)</b>			100,7	64,5	29,6	15,8	12,6	16,6	28,5	43,3	81,7	126,9	158,9	153,0	832,1
<b>RFU (mm)</b>	100	0	0	0	24,1	89,4	100	100	100	100	59,3	0	0	0	
<b>ETR (mm)</b>			36,6	39,4	29,6	15,8	12,6	16,6	28,5	43,3	81,7	78,3	6,6	10,1	399,2
<b>Da (mm)</b>			64,1	25,1	0	0	0	0	0	0	0	48,6	152,3	142,9	433,0
<b>Ws (mm)</b>			0	0	0	0	0	0	27,6	12,6	0	0	0	0	40,22

Tableau 8: Bilan d'eau selon Thornthwaite pour la station de Béni Haroun (2004/05-2017/18)

Mois		sept - 1	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
<b>P (mm)</b>	max		35,5	42,3	87,2	107,0	91,2	94,2	91,0	52,9	34,7	12,7	1,2	5,7	655,6
<b>ETP (mm)</b>			104,1	69,3	31,3	17,0	14,2	13,7	25,7	47,0	82,8	128,9	169,4	156,9	860,2
<b>RFU (mm)</b>	100	0	0	0	55,9	100	100	100	100	100	52,0	0	0	0	
<b>ETR (mm)</b>			35,5	42,3	31,3	17,0	14,2	13,7	25,7	47,0	82,8	64,6	1,2	5,7	381,0
<b>Da (mm)</b>			68,6	27,0	0	0	0	0	0	0	0	64,2	168,2	151,2	479,2
<b>Ws (mm)</b>			0	0	0	0	0	80,5	65,3	5,9	0	0	0	0	151,8

Partant de connaissance des précipitations P, de l'évapotranspiration potentielle ETP et d'une valeur maximale standard de la réserve facilement utilisable du sol : RFU =100 mm, terme intermédiaire suffisamment courants des sols algériens (Mebarki, 2005), la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite est adoptée afin de quantifier mensuellement les différentes composantes du bilan.

L'ETP dépasse largement les précipitations. A l'échelle mensuelle, on distingue deux saisons: l'une humide, pendant laquelle les précipitations sont supérieurs à l'ETP (novembre –avril) pour les deux stations. Pendant cette période on a les valeurs maximum des précipitations, coïncident avec les valeurs les plus faibles de l'ETP. Par contre pour la saison sèche qui s'étale de (mai – décembre), ces paramètres évoluent inversement.

- l'E.T.R qui est égale à 399,2 mm (75.26 % des précipitations) à la station de Constantine et 381,0 mm (58.11 % des précipitations) à la station de Barrage (Tableaux 7, 8 et Figures 23, 24). ;

- La reconstitution des réserves du sol est atteint son maximum (100 mm) au mois de décembre puis demeure jusqu'au mois de mai. Ensuite la valeur de la RFU diminue jusqu'à l'épuisement total au mois de Juin pour les deux stations.

- Le déficit agricole est de l'ordre de 433 mm (station de Constantine) et 479.2 mm (station de Barrage de Béni Haroun), commence à partir du mois de Juin, jusqu'au mois de Octobre (début de précipitation. La réserve utile est nulle). (Figures 23 et 24, Tableaux 7 et 8).

- Un excédent de l'ordre de 40.22 mm (station de Constantine) est enregistré durant les mois de mars et avril où la R.F.U atteint son maximum et 151.8 mm (station de Barrage Béni Haroun) est enregistré les mois de Février, mars et Avril.

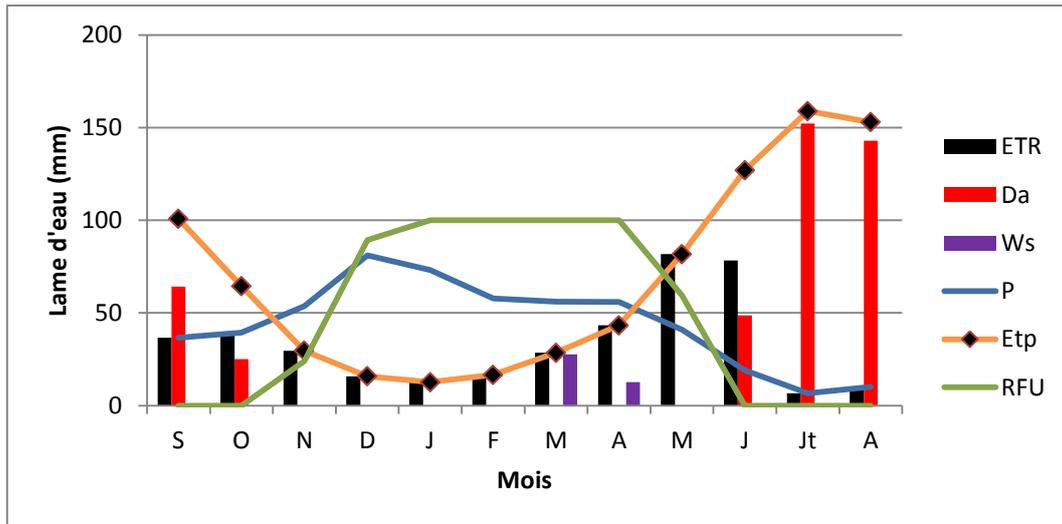


Figure 23: Paramètres mensuels du bilan hydrique de Thornthwaite, station de Constantine (1978/79-2003/04)

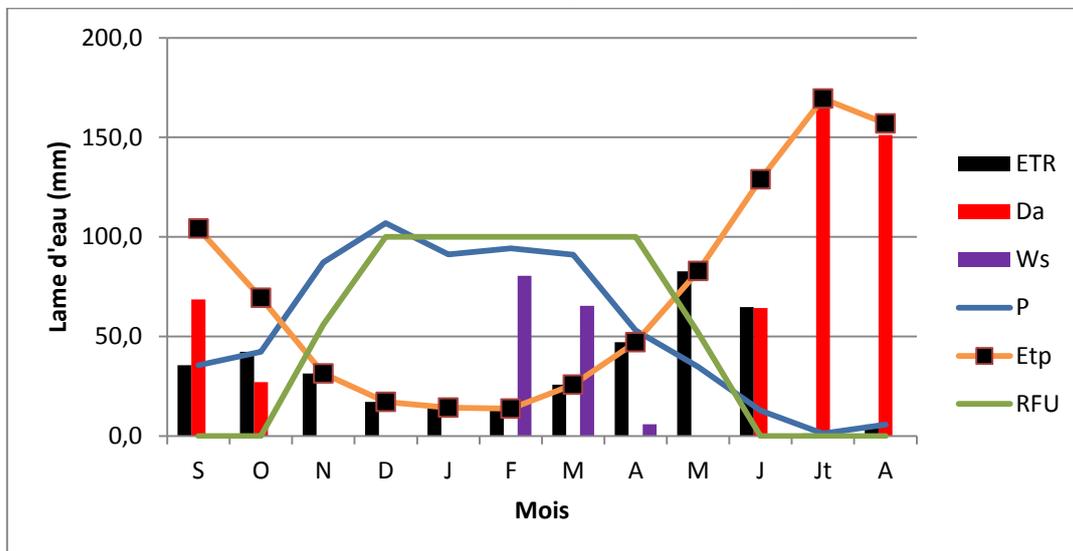


Figure 24: Paramètres mensuels du bilan hydrique de Thornthwaite, station de Barrage Béni Haroun (2004/05-2017/18)

## CONCLUSION

La variabilité spatio-temporelle des apports hydro-pluviométrique des oueds Rhumel et Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun, est un élément majeur à prendre en compte pour une meilleure compréhension du fonctionnement de l'hydro-système dans son contexte climatique et environnemental, et la gestion de son principal barrage (Béni Haroun).

L'exploitation de plusieurs séries de données (données pluviométriques, données des pluies spatialisées, données hydrométriques, données de concentration en matières en suspensions, mesures bathymétriques du barrage de Béni Haroun, données du bilan d'eau et de la variation des réserves du barrage, caractéristiques physico-chimiques et qualité des eaux superficielles.....) ainsi que l'utilisation d'approches méthodologiques différentes permettent le développement des cinq chapitres qui vont suivre dans cette thèse.

Le bassin versant du Rhumel-Endja est, dans son contexte physique général, nettement contrasté: on passe d'un domaine semi-aride à un domaine humide méditerranéen, d'un secteur relativement plat à un secteur montagneux. La partie septentrionale du bassin est dominé par les nappes telliennes et les nappes du flysch alors que la partie Sud est principalement composée par les dépôts associés à la nappe néritique constantinoise et aux formations peu ou pas tectonisées (formations Mio-Plio-quaternaires).

Sur le plan climatique, le bassin est également marqué par de forts contrastes, avec un climat humide et pluvieux au Nord, où les précipitations moyennes annuelles atteignent 800 mm et semi aride au Sud où les précipitations moyennes annuelles tournent autour de 300 mm. La température la plus basse de la station de Constantine est atteinte au mois de janvier (+2.6 °C) et le maximum est observé au mois d'août (+33.90 °C) ; au niveau du barrage de Béni Haroun, la température la plus basse (+3.01° C) est enregistrée au mois de février et la température maximale (+32.33°C) au mois de juillet. Quant à l'évapotranspiration, elle évolue suivant les deux saisons pluvio-thermiques ; elle est très élevée en saison chaude, ce qui accentue le déficit hydrique après épuisement de la réserve utile des sols.

---

**CHAPITRE 2**

**BILANS D'ÉCOULEMENT ET VARIABILITÉ  
HYDROPLUVIOMÉTRIQUE**

---

## INTRODUCTION

La compréhension et la quantification de l'impact de la variabilité climatique à l'échelle continentale et régionale représentent aujourd'hui une préoccupation majeure pour l'ensemble du globe. En effet, les implications de cette variabilité sur certains systèmes hydrologiques peuvent être parfois désastreuses (inondations, sécheresse) et nécessitent donc, une meilleure connaissance des principaux processus hydrologiques et de leur variabilité.

De nombreux travaux réalisés pour comprendre le fonctionnement des systèmes hydrologiques dans le monde concluent à une augmentation du ruissellement global en relation avec l'intensification du cycle hydrologique qui est l'une des conséquences du réchauffement climatique (Labat, 2005; Slimani, 2009; Mesquita, 2009; Massei *et al*, 2006; Labat, 2008; Labat, 2010). Cette relation a été aussi établie en Amérique du Nord, au Brésil et en Chine (Bouhaddioui *et al*, 2006 ; Tootle *et al*, 2005; Cappuro *et al*, 2005).

Au Maghreb, plusieurs travaux menés sur la variabilité hydro-pluviométrique dans les bassins versants ont détecté des discontinuités temporelles des débits en relation avec le changement climatique. Pour l'Algérie, nous citons les travaux de Bouanani *et al* (2005), de Meddi *et Meddi* (2007), de Meddi *et Hubert* (2003), de El Mahi *et al* (2004). Au Maroc, nous notons les publications de Bouchaou *et al* (2002), de Laftouhi et Persoons (2007). Enfin, pour la Tunisie, il convient de citer Kingumbi (2006) et Lahache *et Pillet* (2008).

Les questions scientifiques qui seront abordées dans ce chapitre sont les suivantes:

- **Comment à partir des séries hydro-pluviométrique, discontinues dans le temps et dans l'espace, aboutir à une connaissance valable des apports des oueds et du bilan hydrologique des bassins (unitaires et emboîtés) jusqu'au barrage Béni Haroun ?**
- **Quelle est l'ampleur de la variabilité des apports hydrologiques et comment traduit-elle l'impact des facteurs climatiques ?**

Dans un premier volet, nous nous intéressons à l'étude des pluies et des apports et de leur variabilité, avec une caractérisation utilisant les ressources de la statistique et de la cartographie.

Le deuxième volet est basé sur la détermination des discontinuités et des périodes caractéristiques dans la série des pluies. L'approche statistique de la méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI) de type matrice Bertin est mise en œuvre pour déterminer les dates de changement du cycle (Nouaceur *et al*, 2013; Laignel *et al*, 2014). Aussi, les analyses spectrales des signaux des débits et des pluies (analyses par la transformation en ondelettes continues), permettent de détecter les structures (périodicités, cyclicité) et leur évolution au cours du temps. Cette méthode a été utilisée dans plusieurs domaines scientifiques sur plusieurs sites mondiaux, dans le domaine hydrodynamique (Futatani *et al*, 2011) ainsi que dans les domaines hydrologiques et hydrogéologiques (Moreau, 1995). L'analyse en ondelettes a été utilisée pour caractériser la variabilité des différents paramètres, tels que la température, l'humidité de l'air, les précipitations, les

fluctuations climatiques, les débits journaliers (Zamrane, 2016; Rossi, 2010; Slimani, 2009 ; Mesquita, 2009 ; Chadid, 2003).

Les relations pluie-débit seront traitées par les écarts centrés réduits. Jelassi (2014) et Kingumbi *et al* (2000) l'ont utilisé dans le but de comprendre l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie centrale. Gaula *et al* (2006), ont également adopté cette méthode pour analyser la variabilité interannuelle des débits de N'zi et N'zo (Chine). Enfin, Nouaceur *et al* (2013) ont utilisé cet indice pour déterminer les périodes caractéristiques de changement climatique au Maghreb. Cet indice est à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet de distinguer les périodes caractéristiques des cycles pluviométriques ou hydrologiques. On utilise également la cohérence en ondelettes pour la vérification des modes déjà existants dans les signaux pluies et débits. Ceci permettra de définir les périodes sèches ou humides ainsi que la réactivité du bassin Rhumel-Endja à l'échelle événementielle.

## 1. LES PRECIPITATIONS ET LEUR VARIABILITE

En plus de l'abondance ou de la faiblesse des cumuls précipités, leur distribution dans le temps et dans l'espace est déterminante dans l'analyse du cycle hydrologique et le comportement des oueds. En climat méditerranéen, les précipitations annuelles sont très variables et présentent de fortes amplitudes d'une année sur l'autre. Aussi, les variations mensuelles et saisonnières des précipitations, conditionnent fortement le régime d'écoulement saisonnier.

### 1.1. La pluviométrie annuelle moyenne dans la zone d'étude

Pour chacun des neuf (9) postes pris en compte dans cette étude (Mechtat Serradj non comprise), nous avons calculé la hauteur de pluie interannuelle sur une période de 42 ans, de 1970/71 à 2011/12. Les valeurs moyennes annuelles des précipitations augmentent du Sud au Nord, du bassin du Rhumel-Endja. Ces valeurs varient entre 280.4 mm à la Mechtat El Melha, et 591.6 mm à El Kheneg.

La carte pluviométrique qui couvre cette période d'observation est établie par interpolation simple (logiciel SURFER) des pluies moyennes interannuelles observées aux postes pluviométriques (Figure 25).

La configuration générale des isohyètes ne diffère pas beaucoup de celle de la carte pluviométrique établie par ANRH sur la base du modèle de régression pluie-relief (ANRH, 2002; Mebarki, 2003).

D'après la grille des précipitations ayant servi à l'élaboration de cette carte, nous avons pu calculer la lame d'eau moyenne précipitée sur le bassin qui est de l'ordre de 404.15 mm/an. On observe une décroissance latitudinale des précipitations: elles sont fortes au Nord (plus de 550 mm), moyennes dans la zone médiane du bassin (comprises entre 500 et 400 mm) et faibles au Sud (moins de 300 mm). Dans la partie ouest du bassin, la station de Chebabta 403 mm, profite probablement des effets topographiques locaux. Dans la partie Sud du bassin, le climat semi-aride est dominant. C'est là où l'effet de la latitude est très sensible: les perturbations cycloniques arrivent appauvries en vapeur d'eau suite à leur passage sur l'écran

montagneux du Tell; le rôle de l'abri aérologique est, par ailleurs, déterminant (Mebarki, 1982).

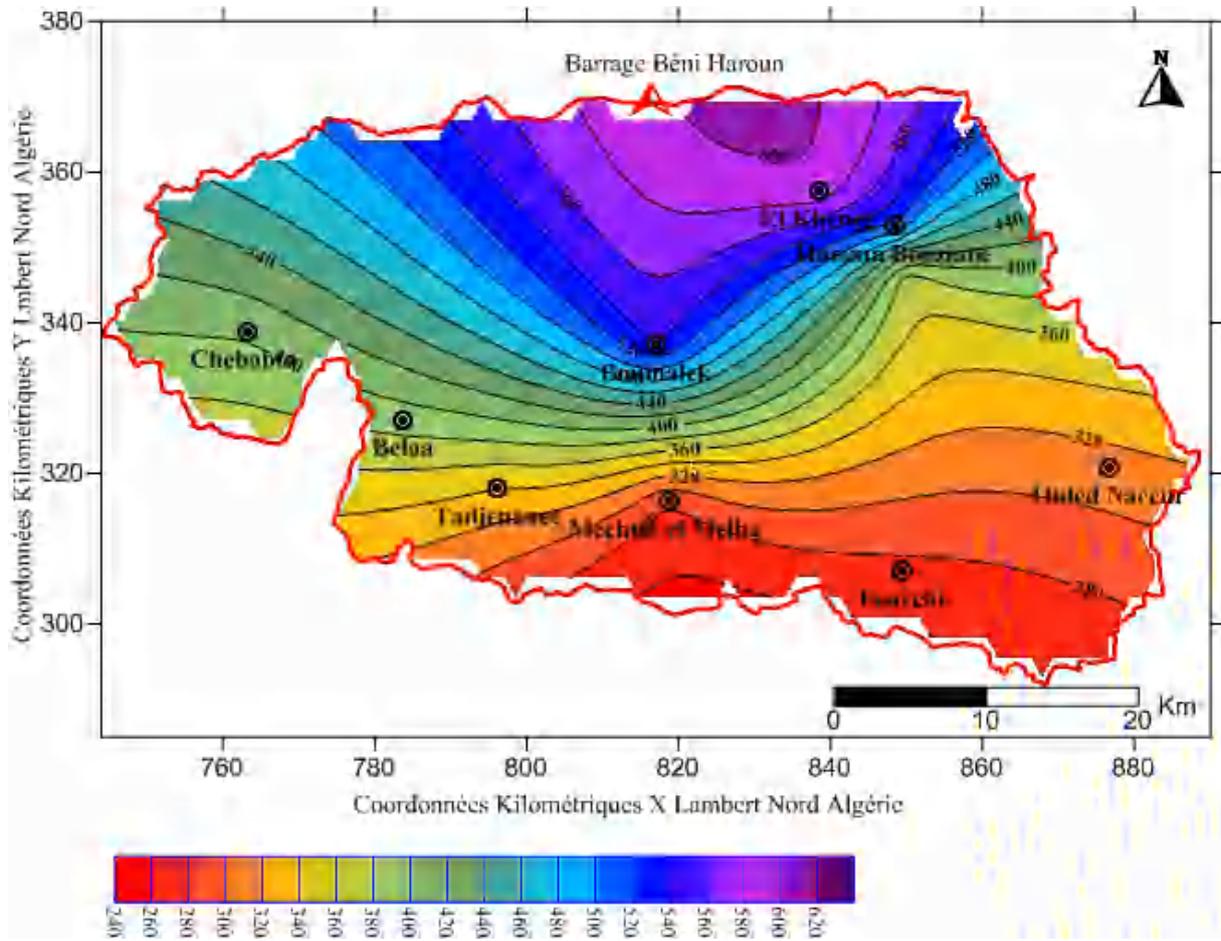


Figure 25: Pluies annuelles dans le bassin du Rhumel-Endja à Beni Haroun (période moyenne 1970/71-2011/12)

## 1.2. Précipitations interannuelles: variabilité et durée de récurrence

### 1.2.1. Le caractère variable de la pluviométrie dans le bassin Rhumel-Endja

#### 1.2.1.1. Le Coefficient de variation

Pour mieux saisir la variation pluviométrique interannuelle, on s'est basé sur le calcul du coefficient de variation (Cv), paramètre qui mesure le degré de dispersion relative des valeurs particulières autour de la moyenne globale. Les valeurs de Cv de neuf stations, oscillent entre 0,23 et 0,48, (Tableau 9). Le caractère de variabilité des pluies annuelles, est à quelques exceptions (Boumalek) généralement plus fort dans les stations de la zone méridionale (Hautes Plaines) (Ouled Naceur 0,45, Belaa 0,36, Fourchi 0,36, Mechtat el Melha 0,31), que dans celles situées dans la moitié septentrionale du bassin (Hamma Bouziane 0,23, Chebabta 0,26 et El Kheneg 0,28) (Tableau 9).

Tableau 9: Précipitations annuelles moyennes (en mm), sur la période 1970/71-2011/12, pour neuf stations d'ANRH sur le bassin du Rhumel-Endja

	El Kheneg	Hamma Bouziane	Chebabta	Boumalek	Belaa	Tadjenanet	Mechtat el Melha	Ouled Naceur	Fourchi
Minimum (mm)	302,5	297,4	227,4	203,5	136,5	151,2	139,1	64,5	175,5
Maximum (mm)	955,3	932,9	621,4	1557,3	653,1	597,0	549,8	613,1	791,7
Ecart type (mm)	168,7	120,6	108,3	233,5	140,9	96,7	89,3	141,5	135,2
Moyenne (mm)	591,6	521,3	403,2	542,4	389,5	339,4	280,4	312,2	373,6
CV	0,28	0,23	0,26	0,43	0,36	0,284	0,31	0,45	0,36

### 1.2.1.2. L'écart à la normale

Afin de caractériser la pluviosité propre à chaque année, il convient de tenir compte de " l'écart à la moyenne " correspondant à l'excédent ou au déficit de précipitations de l'année considérée, rapporté à la moyenne de 42 ans. Nous avons ainsi relevé toutes les années pluviométriques extrêmes, humides et sèches (Tableau 10).

$$e_i = \frac{P_i - P_m}{P_m} (100\%)$$

P<sub>i</sub> : pluie moyenne de l'année extrême i (mm)

P<sub>m</sub> : pluie moyenne interannuelle (mm)

Tableau 10: Ecart à la moyenne des précipitations annuelle extrêmes (1970/71-2011/12)

	Moyenne annuelle (1970/71-2004/05) P <sub>m</sub> (mm/an)	Année sèche extrême	P <sub>i</sub> (mm/an)	Ecart à la moyenne (e <sub>i</sub> ) en %	Année humide extrême	P <sub>i</sub> (mm/an)	Ecart à la moyenne (e <sub>i</sub> ) en %	Ecart max-min (mm/an)
El Kheneg	591,6	<b>1993/94</b>	302,5	<b>-48,87</b>	<b>2002/03</b>	955,3	<b>61,47</b>	932,9
Hamma Bouziane	521,3	2001/02	297,4	<b>-42,95</b>	1984/85	932,9	<b>78,96</b>	932,9
Chebabta	403,2	1996/97	227,4	<b>-43,61</b>	1984/85	621,4	<b>54,10</b>	394,0
Boumalek	542,4	<b>1993/94</b>	203,5	<b>-62,48</b>	<b>2002/03</b>	1557,3	<b>187,12</b>	1353,8
Belaa	389,5	2000/01	136,5	<b>-64,96</b>	2008/09	653,1	<b>67,67</b>	516,6
Tadjenanet	339,4	1970/71	151,2	<b>-55,46</b>	<b>2002/03</b>	597,0	<b>75,88</b>	445,8
Mechtat el Melha	280,4	1970/71	139,1	<b>-50,40</b>	1995/96	549,8	<b>96,08</b>	410,7
Ouled Naceur	312,2	<b>1993/94</b>	64,5	<b>-79,34</b>	2010/11	613,1	<b>96,39</b>	548,6
Fourchi	373,6	1973/74	175,5	<b>-53,02</b>	1995/96	791,7	<b>111,93</b>	616,2

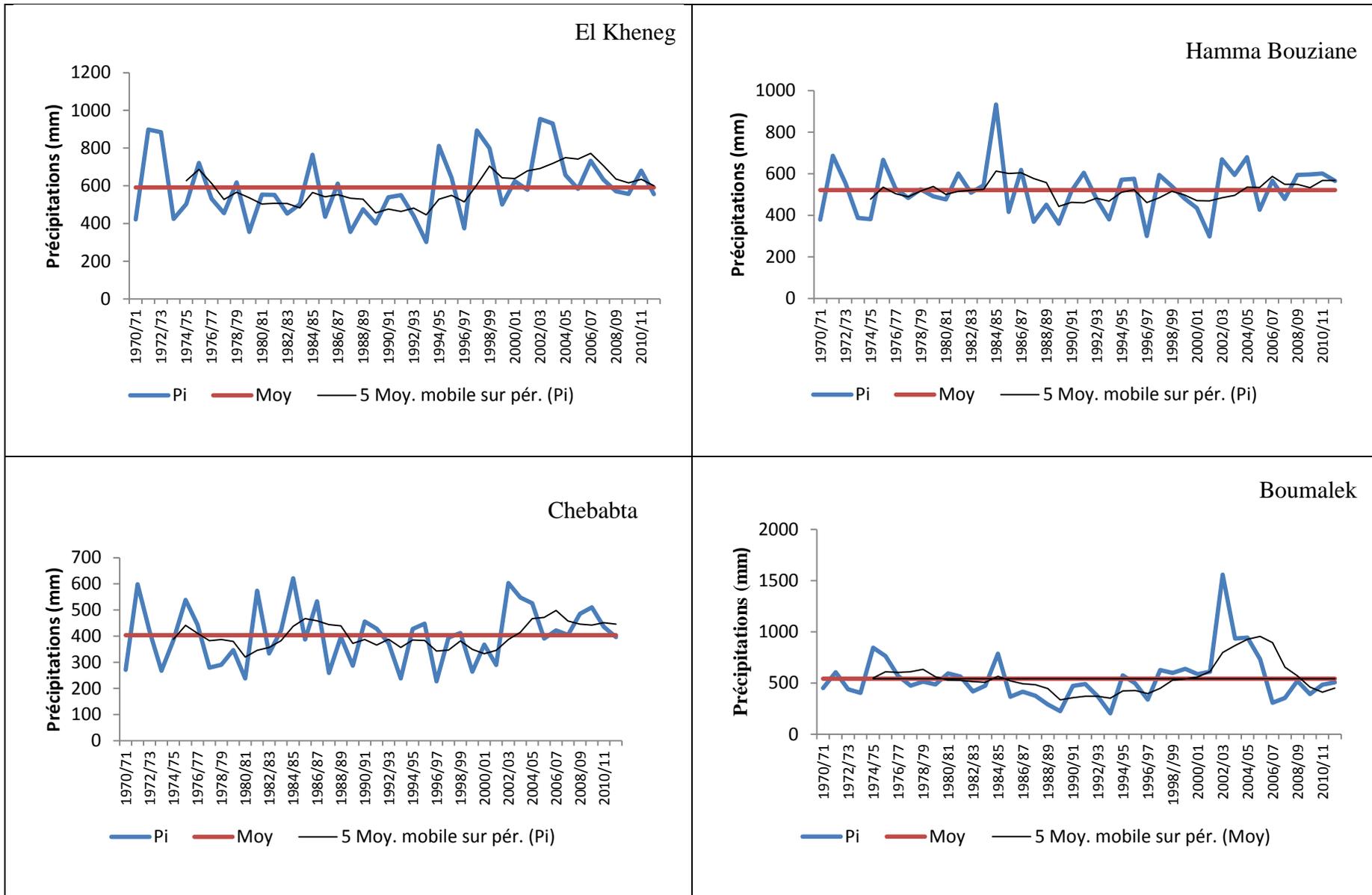
L'année la plus pluvieuse de la série est 2002/03 à Boumalek avec un écart à la moyenne très élevé (187.12 %), et 1984/85 à Hamma Bouziane avec un écart à la moyenne de 78.96 %, suivie par Chebabta avec 54,10 %. D'autres années telles 1995/96, 2008/09 et 2010/11 sont également marquées par une forte pluviosité,

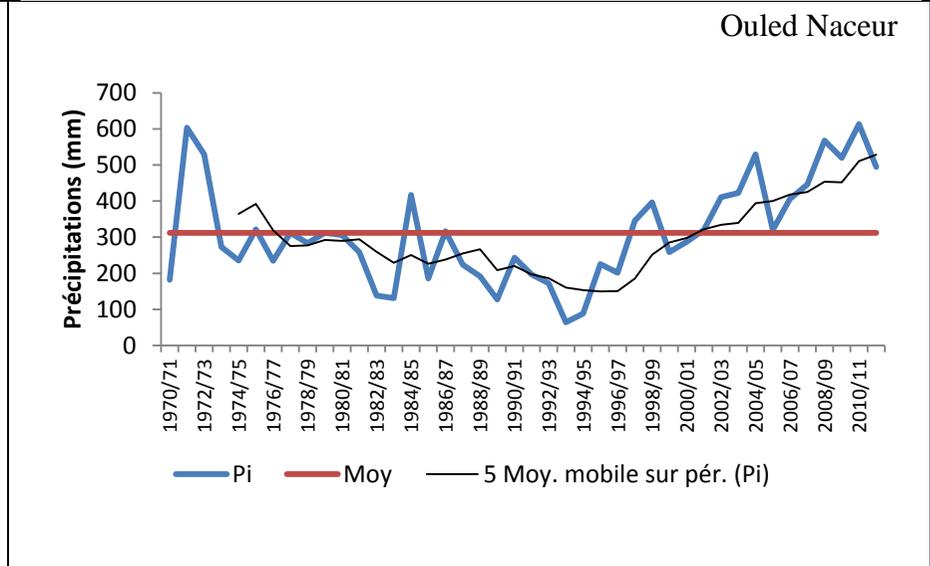
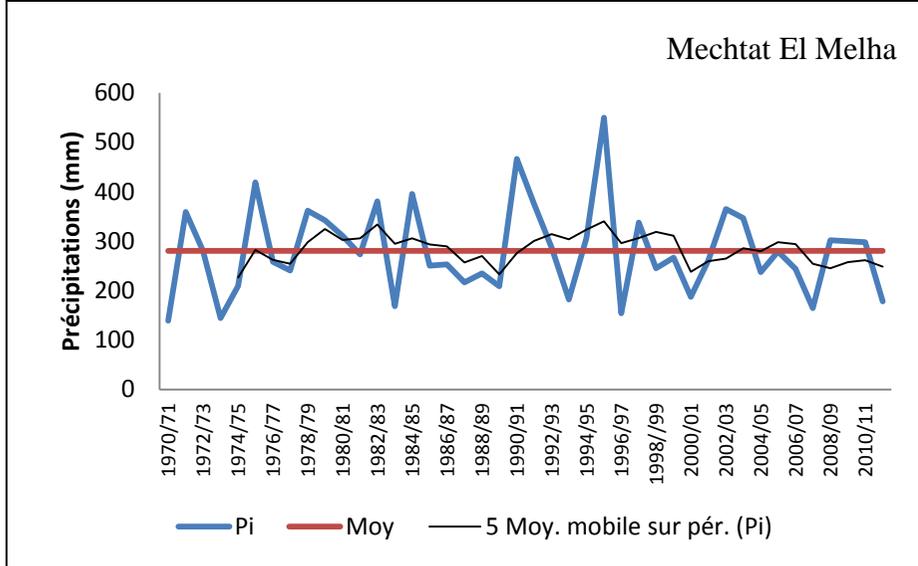
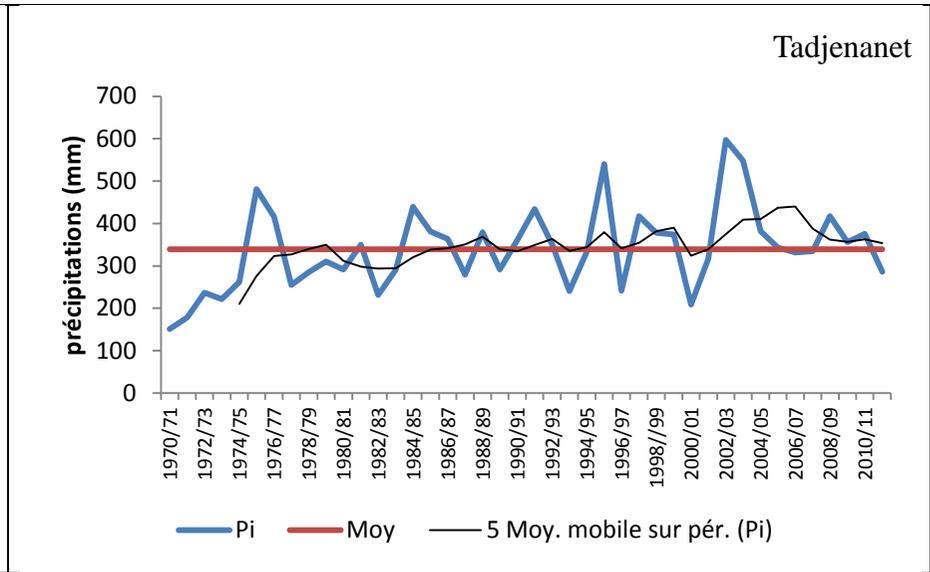
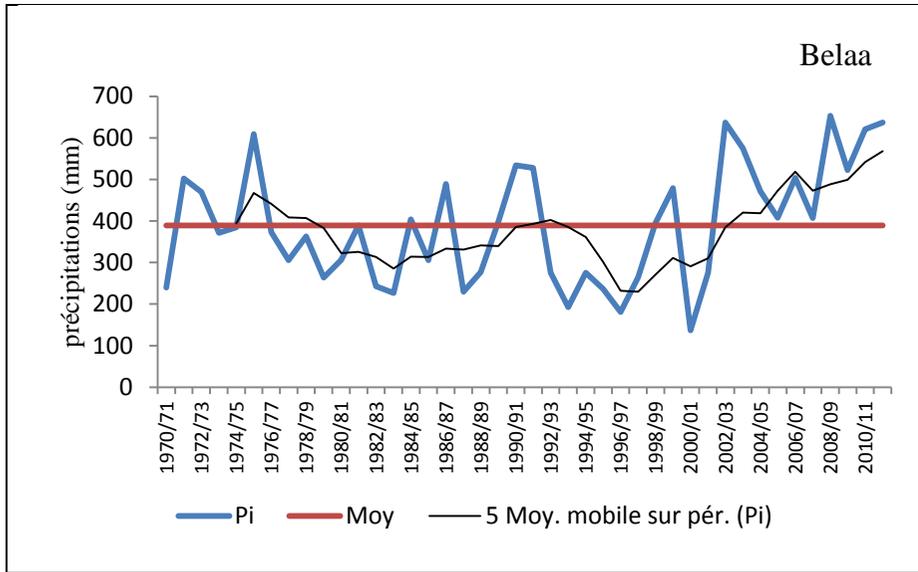
A Ouled Naceur, Boumalek et El Kheneg, c'est l'année 1993/94 qui enregistre un déficit respectivement de -79.34, -62.48 et - 48,87 %. Les années 2000/01, 2001/02, 1973/74 et 19970/71 ont connu également une sécheresse relativement prononcée (Tableau 10).

L'écart à la moyenne de ces années extrêmes sèches et humides est plus prononcé dans la partie Nord du bassin, que dans la partie Sud du bassin. Cependant, de nombreux contrastes spatiaux ont été décelés dans plusieurs stations au milieu de chaque domaine climatique.

En analysant les graphes des répartitions interannuelles des pluies aux stations, nous distinguons une succession irrégulière d'années sèches (pluies inférieures à la moyenne) et d'années humides (pluies supérieures à la moyenne) (Figure 26). Le nombre des années où la pluviosité est inférieure ou supérieure à la moyenne est différent d'une station à une autre. On notera une prédominance des années sèches. Par exemple, la station d'El Kheneg a connu 25 années sèches contre 19 d'années humides. Le contraire a été observé au niveau du sous bassin de l'oued Endja, la station de Chebabta a connu 22 d'années humides contre 20 années sèches.

Nous reviendrons plus en détail sur la tendance pluviométrique dans les prochains titres.





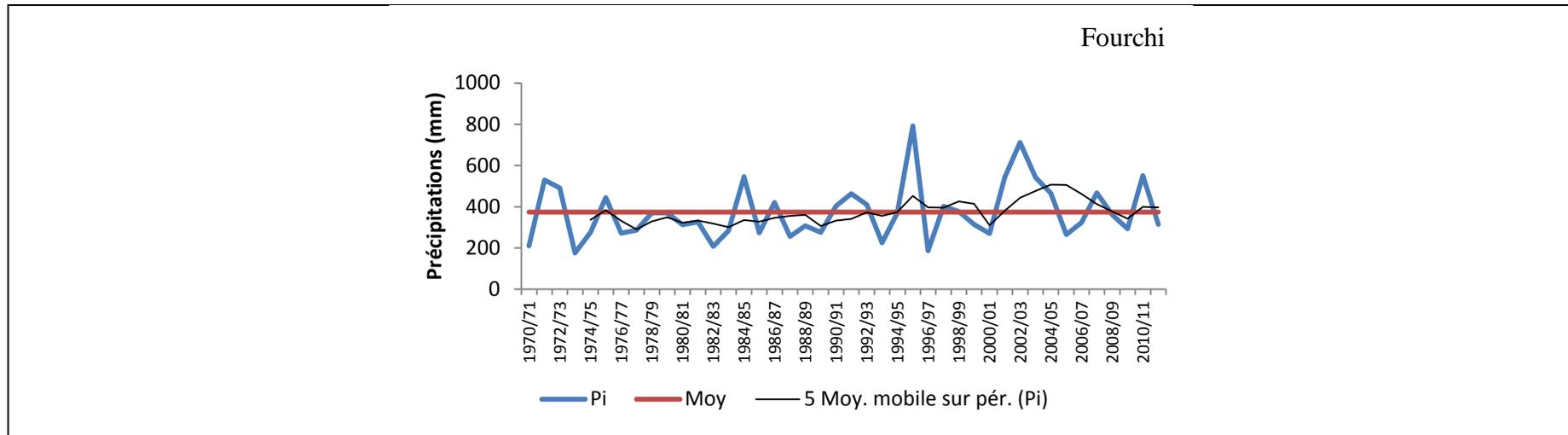


Figure 26: Variations interannuelles des précipitations (1970/71-2011/12)

### 1.2.2. Récurrence des pluies annuelles

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

Les pluies annuelles s'ajustent en général suivant une loi racine normale (Figure 27). L'estimation numérique des pluies fréquentielles en année humide et en année sèche, se fait en appliquant l'équation de la variable réduite de GAUSS, en transformant les moyennes en racines carrées.

L'expression de la loi racine-normale est :  $F(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$

Avec :  $u = \frac{x - \sqrt{P}}{\sigma\sqrt{p}}$

F (P) : Probabilité qu'une valeur quelconque P soit inférieure ou égale à p ;

u : Variable réduite de Gauss ;

$\sqrt{P}$  : Moyenne des racines carrées de la série d'observations ;

$\sigma\sqrt{P}$  : Écart -type des racines carrées de la série d'observations.

P : Pluie en dixièmes de millimètres

Cette loi est caractérisée par deux paramètres: la moyenne des racines carrées des pluies mensuelles ( $\sqrt{P}$ ) et l'écart- type des racines carrées des pluies mensuelles ( $\sigma\sqrt{P}$ )

Les quantiles estimés pour les différentes stations du bassin de l'Oued Rhumel-Endja, et pour les probabilités de retour retenues, sont présentés dans le tableau 11. A titre d'exemple, la pluie décennale sèche (fréquence 0,1) est de 387.92 mm pour la station d'El Kheneg (Nord du bassin) et 217.83 mm pour la station de Belaa (Hautes Plaines). Quant à la pluie décennale humide (fréquence 0,9), elle est respectivement de 810,22 mm et 577,96 mm.

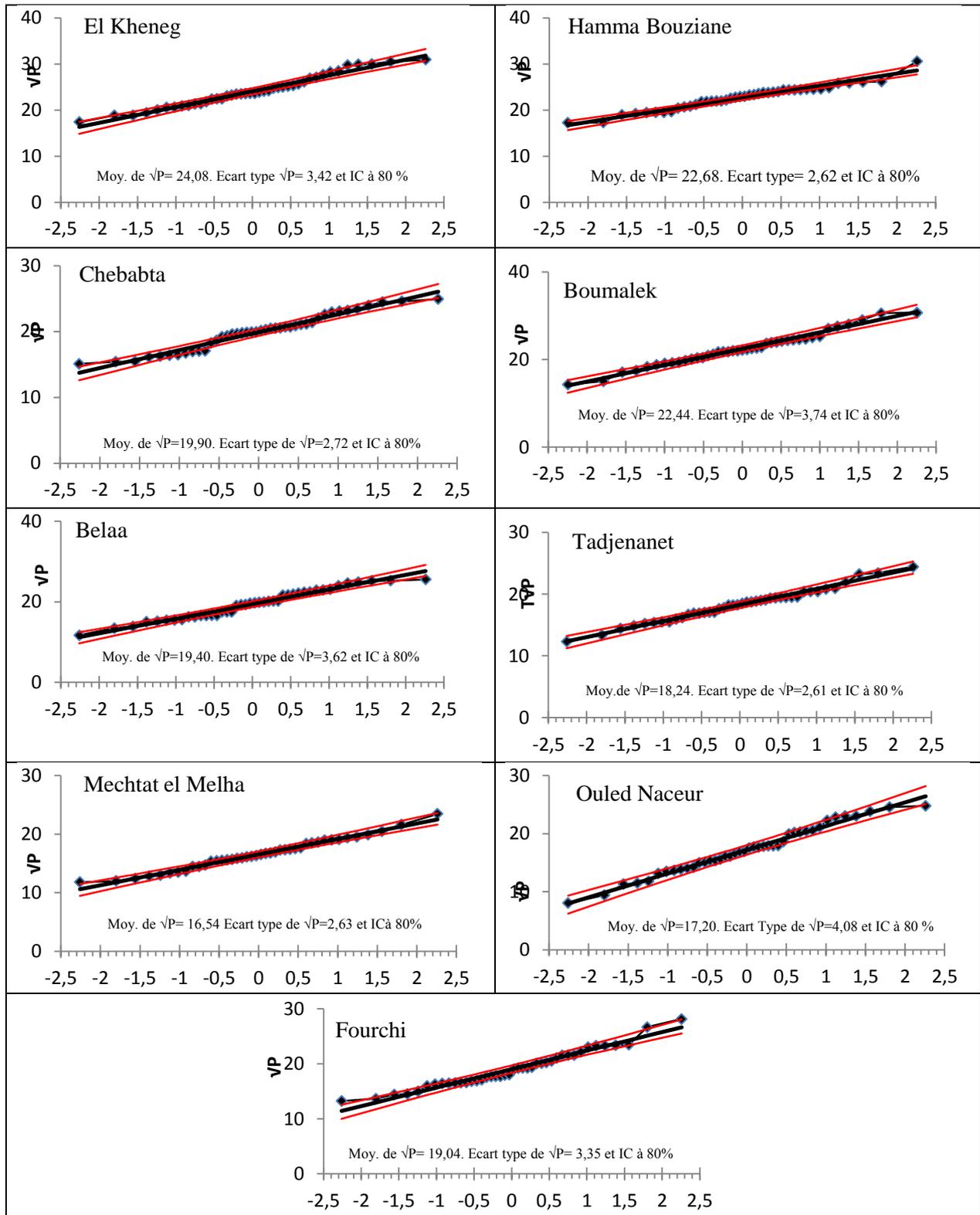


Figure 27: Ajustement à la loi Racine-normale des précipitations annuelles (1970/71-2011/12)

Tableau 11: Précipitations annuelles fréquentielles (mm)

Station	P (année sèche) (mm)			P (mm)	P (année humide) (mm)		
	T= 100 ans f = 0,01 U=-2,327	T= 50 ans f = 0,02 U=-2,054	T= 10 ans f = 0,10 U=-1,282	T= 2 ans f = 0,5 U=0	T= 10 ans f = 0,90 U=1,282	T= 50 ans f = 0,98 U=2,054	T= 100 ans f = 0,99 U=2,327
	<b>El Kheneg</b>	259,91	290,88	387,92	579,85	810,22	967,50
<b>Hamma Bouziane</b>	275,00	299,24	373,31	514,38	678,02	787,45	828,10
<b>Chebabta</b>	184,16	204,87	269,39	396,01	546,95	649,58	687,98
<b>Boumalek</b>	188,71	217,80	311,36	503,55	741,73	907,33	969,89
<b>Belaa</b>	120,48	143,15	217,83	376,36	577,96	720,14	774,16
<b>Tadjenanet</b>	148,02	165,87	221,83	332,70	465,96	557,00	591,14
<b>Mechtat el Melha</b>	108,58	124,05	173,41	273,57	396,47	481,45	513,48
<b>Ouled Naceur</b>	59,38	77,79	143,27	295,84	503,13	654,35	712,58
<b>Fourchi</b>	126,44	147,84	217,42	362,52	544,51	671,89	720,14

### 1.3. Les précipitations mensuelles et les régimes saisonniers

L'étude de la variation inter-mensuelle et inter-saisonnière des précipitations, s'avère déterminantes sur l'écoulement fluvial saisonnier, et sur le comportement hydrologique annuel de l'Oued (Ghachi, 1986; Guidoum, 2004).

En général, la plupart des précipitations tombent en Algérie entre les mois d'octobre et d'avril, mais d'importantes variations ont été observées, non seulement dans la hauteur moyenne mensuelle des chutes de pluie, mais également dans la période durant laquelle elles se produisent (Guidoum, 2017).

#### 1.3.1. Les précipitations mensuelles et leur variabilité

D'après la Figure 28, décembre et janvier sont les mois les plus pluvieux dans la majorité des stations du bassin. Pour les stations qui sont situées dans la partie Sud du bassin comme Mechtat el Melha, Tadjenanet, Fourchi et Belaa, les mois d'octobre, mai et avril sont respectivement les plus arrosés de l'année. Le mois de juillet par contre est le mois le plus sec dans la totalité des stations retenues dans l'étude.

La forte variabilité inter mensuelle des précipitations apparaît à travers les valeurs du coefficient de variation mensuel (Tableau 12). Les valeurs du coefficient de variation les plus fortes concernant les mois d'été, un maximum en juillet (qui concerne toutes les stations pluviométriques). Une variabilité aussi marquée en été s'explique par la faiblesse des précipitations estivales ainsi que par le caractère orageux des averses. En revanche, la valeur minimale de ce coefficient est observée aux mois de février, mars et avril dans toutes les stations ; il atteint 0.47 en mars à Tadjenanet, c'est le coefficient de variation le plus faible de toutes les stations (Tableau 12). Sur le plan spatial, cette variabilité, comme pour les précipitations annuelles, est relativement plus accentuée dans la partie méridionale du bassin. Cependant, ceci reste très nuancé selon les mois de l'année et les secteurs géographiques.

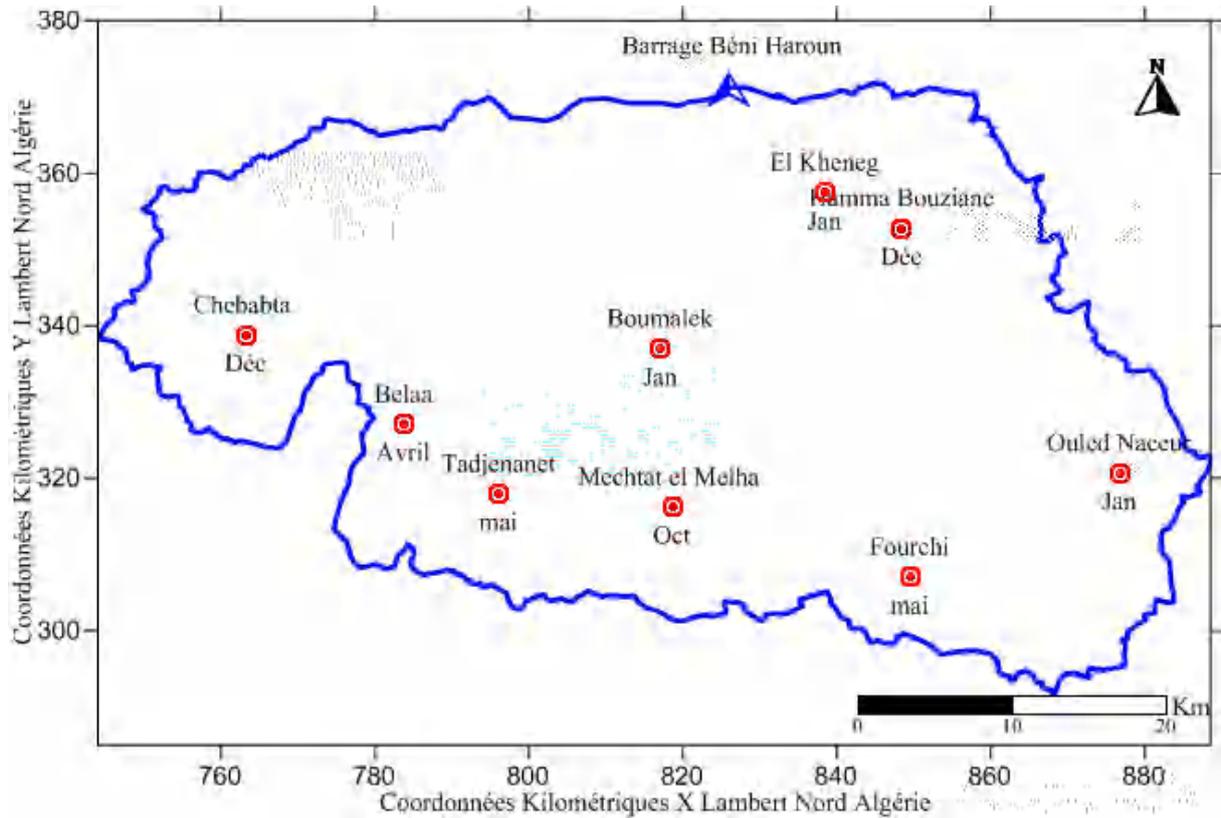


Figure 28: Répartition spatiale du mois le plus humides aux stations (1970/71-2011/12)

Les valeurs moyennes mensuelles pluviométriques, relative à la période 1970/71-2011/12, représentés par des graphiques traduisent clairement les variations mensuelles de la distribution des précipitations à l'échelle annuelle, et permet de distinguer successivement (Figure 29) :

- Un régime de transition tellien, avec un maximum pluviométrique en décembre et janvier et la présence d'un pallier lors de la décroissance des pluies (mars-avril). Il correspond aux stations situées dans le Nord du bassin (El Kheneg, Hamma Bouziane, Chebabta et Boumalek) relevant de l'étage sub humide.
- Un régime bimodal caractérisé par la présence de deux maximums, l'un en hiver (décembre-janvier et février) et l'autre au printemps (mars, avril et mai) C'est le régime caractéristique particulier aux Hautes Plaines (Tadjenanet, Fourchi.....) donc à bioclimat semi-aride.

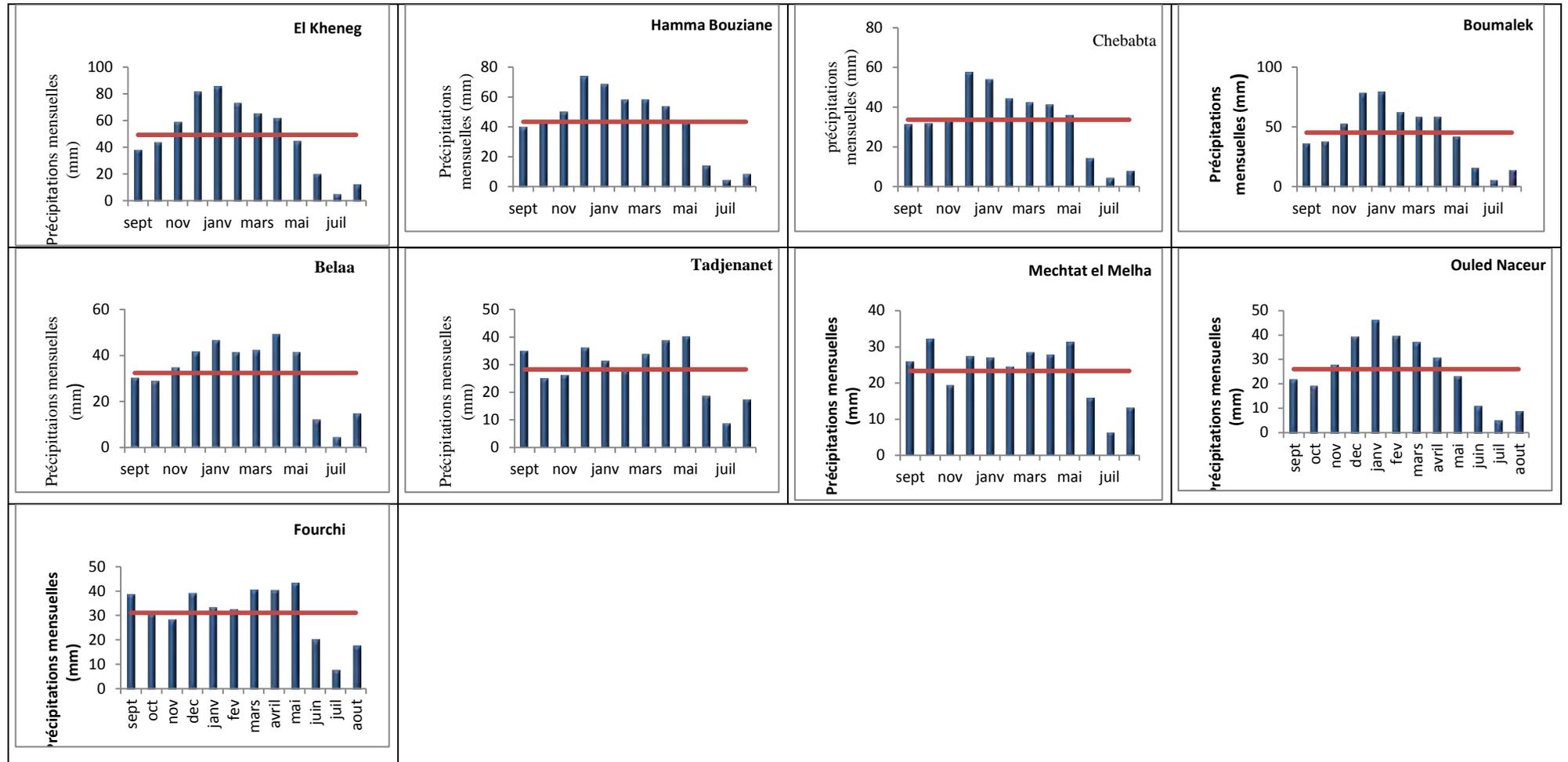


Figure 29: Les variations mensuelles des précipitations (1970/71-2012)

Tableau 12: Moyenne, écart-type, et coefficient de variation des séries pluviométriques (mm) (1970/71-2011/12)

Station		sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	année
El Kheneg 100620	<b>P moy</b>	38,4	44,1	58,9	81,5	85,3	72,9	65,3	61,9	44,8	20,5	5,4	12,6	<b>591,6</b>
	<b>Ecart type</b>	36,9	31,9	45,6	55,3	63,1	47,2	45,2	40,7	32,5	21,9	7,8	12,3	<b>168,7</b>
	<b>C.V</b>	0,96	0,72	0,77	0,68	0,74	0,65	0,69	0,66	0,73	1,07	1,45	0,97	<b>0,3</b>
Hamma Bouziane 100603	<b>P moy</b>	40,3	45,0	50,4	74,0	68,7	58,4	58,5	54,0	43,6	14,3	5,1	9,0	<b>521,3</b>
	<b>Ecart type</b>	32,8	38,3	38,4	58,8	48,8	42,1	33,1	33,7	29,8	13,2	8,3	8,4	<b>120,6</b>
	<b>C.V</b>	0,81	0,85	0,76	0,79	0,71	0,72	0,57	0,62	0,68	0,92	1,64	0,93	<b>0,2</b>
Chebabta 100111	<b>P moy</b>	31,6	32,3	34,5	57,8	54,2	44,7	42,6	41,7	36,2	14,6	4,7	8,3	<b>403,2</b>
	<b>Ecart type</b>	28,1	26,3	29,7	42,0	42,7	31,7	30,5	27,1	25,7	14,4	7,3	9,4	<b>108,3</b>
	<b>C.V</b>	0,89	0,81	0,86	0,73	0,79	0,71	0,72	0,65	0,71	0,99	1,55	1,13	<b>0,26</b>
Boumalek 100401	<b>P moy</b>	36,2	38,0	52,5	78,2	79,2	62,1	58,6	58,7	42,2	16,0	5,9	14,6	<b>542,4</b>
	<b>Ecart type</b>	27,4	31,5	48,4	71,6	66,6	46,1	36,4	42,7	31,3	18,0	9,8	14,4	<b>233,5</b>
	<b>C.V</b>	0,76	0,83	0,92	0,92	0,84	0,74	0,62	0,73	0,74	1,13	1,65	0,98	<b>0,4</b>
Belaa 100302	<b>P moy</b>	30,4	29,1	34,8	41,7	46,7	41,4	42,5	49,3	41,6	12,3	4,7	14,9	<b>389,5</b>
	<b>Ecart type</b>	21,8	24,1	33,5	32,3	42,1	37,2	35,4	37,2	33,3	11,9	7,2	23,7	<b>140,9</b>
	<b>C.V</b>	0,72	0,83	0,96	0,77	0,90	0,90	0,83	0,75	0,80	0,97	1,53	1,59	<b>0,4</b>
Tadjenanet 100303	<b>P moy</b>	35,0	25,0	26,3	36,2	31,3	28,0	33,8	38,7	40,0	18,7	8,9	17,5	<b>339,4</b>
	<b>Ecart type</b>	18,0	14,9	15,6	25,2	19,1	16,6	17,9	18,3	24,8	14,4	8,7	13,3	<b>96,7</b>
	<b>C.V</b>	0,52	0,60	0,59	0,70	0,61	0,59	0,53	0,47	0,62	0,77	0,98	0,76	<b>0,3</b>
Mechtat El Melha 100404	<b>P moy</b>	26,0	32,2	19,5	27,4	27,1	24,6	28,6	27,9	31,4	16,0	6,5	13,2	<b>280,4</b>
	<b>Ecart type</b>	23,0	40,7	16,1	20,2	21,4	24,2	24,7	22,6	26,2	19,7	8,8	15,5	<b>89,3</b>
	<b>C.V</b>	0,88	1,26	0,83	0,74	0,79	0,99	0,86	0,81	0,84	1,23	1,35	1,17	<b>0,3</b>
Ouled Naceur 100527	<b>P moy</b>	22,1	19,5	28,0	39,5	46,0	39,7	37,1	30,9	23,5	11,2	5,5	9,3	<b>312,2</b>
	<b>Ecart type</b>	20,1	20,6	28,0	30,5	36,9	25,3	28,3	34,6	19,5	14,0	9,6	12,0	<b>141,5</b>
	<b>C.V</b>	0,91	1,05	1,00	0,77	0,80	0,64	0,76	1,12	0,83	1,25	1,76	1,30	<b>0,5</b>
Fourchi 100511	<b>P moy</b>	38,8	30,5	28,5	39,1	33,5	32,6	40,6	40,4	43,3	20,5	8,0	17,8	<b>373,6</b>
	<b>Ecart type</b>	41,9	25,0	29,4	35,8	30,7	30,1	22,7	29,9	28,6	22,5	10,7	23,0	<b>135,2</b>
	<b>C.V</b>	1,08	0,82	1,03	0,92	0,92	0,92	0,56	0,74	0,66	1,10	1,34	1,29	<b>0,4</b>

### 1.3.2. Le régime pluviométrique saisonnier du bassin

Pour déterminer le régime saisonnier, on calcule la somme des précipitations par saison puis on procède à un classement saisonnier par ordre de pluviosité décroissante en désignant chaque saison par son initiale (A : Automne, H : Hiver, P : Printemps, E : Eté). L'importance des totaux pluviométriques saisonniers par rapport au total annuel de chaque station (Musset, 1935 in Farah, 2014), ainsi que leur indicatif saisonnier, sont résumés sur le tableau 13.

Tableau 13: Le régime saisonnier des précipitations période (1970/71 – 2011/12)

Stations		Hiver	Printemps	Été	Automne	Régime
<b>El Kheneg</b>	P mm % du total annuel	239,75 (41%)	171,99 (29%)	38,51 (7%)	141,39 (24%)	HPAE
<b>Hamma Bouziane</b>	P mm % du total annuel	201,08 (39%)	156,12 (30%)	28,44 (5%)	135,65 (26%)	HPAE
<b>Chebabta</b>	P mm % du total annuel	156,66 (39%)	120,47 (30%)	27,71 (7%)	98,40 (24%)	HPAE
<b>Boumalek</b>	P mm % du total annuel	219,52 (40%)	159,57 (29%)	36,54 (7%)	126,76 (23%)	HPAE
<b>Belaa</b>	P mm % du total annuel	129,81 (33%)	133,44 (34%)	31,96 (8%)	94,31 (24%)	HPAE
<b>Tadjenanet</b>	P mm % du total annuel	95,49 (28%)	112,57 (33%)	45,07 (13%)	86,31 (25%)	PHAE
<b>Mechtat el Melha</b>	P mm % du total annuel	79,11 (28%)	87,80 (31%)	35,77 (13%)	77,70 (28%)	PHAE
<b>O. Naceur</b>	P mm % du total annuel	125,18 (40%)	91,47 (29%)	25,92 (8%)	69,63 (22%)	HPAE
<b>Fourchi</b>	P mm % du total annuel	105,19 (28%)	124,29 (33%)	46,32 (12%)	97,76 (26%)	PHAE

L'organisation des saisons n'est pas homogène dans la région d'étude, elle dépend du régime pluviométrique propre à chaque secteur géographique. Ainsi nous avons deux saisons qui se partagent le maximum. Les pluies hivernales (décembre, janvier et février) sont les plus abondantes dans presque la totalité de la zone d'étude, Néanmoins, le régime saisonnier HPAE est prédominant au Nord du bassin (Figure 30), les stations les plus arrosées sont celles de El Kheneg et Hamma Bouziane avec respectivement 239.75 mm et 201.08 mm (Tableau 13 et Figure 30). Le printemps (mars, avril et mai) est la seconde saison la plus arrosée de l'année. Elle est caractérisée par l'abondance relative des pluies orageuses plus présentes en cette saison. Ce régime est relativement présent dans secteur des Hautes plaines (Belaa, Tadjenanet, Mechtat el Melha et Fourchi), ou la tendance climatique est semi-aride (Figure 31).

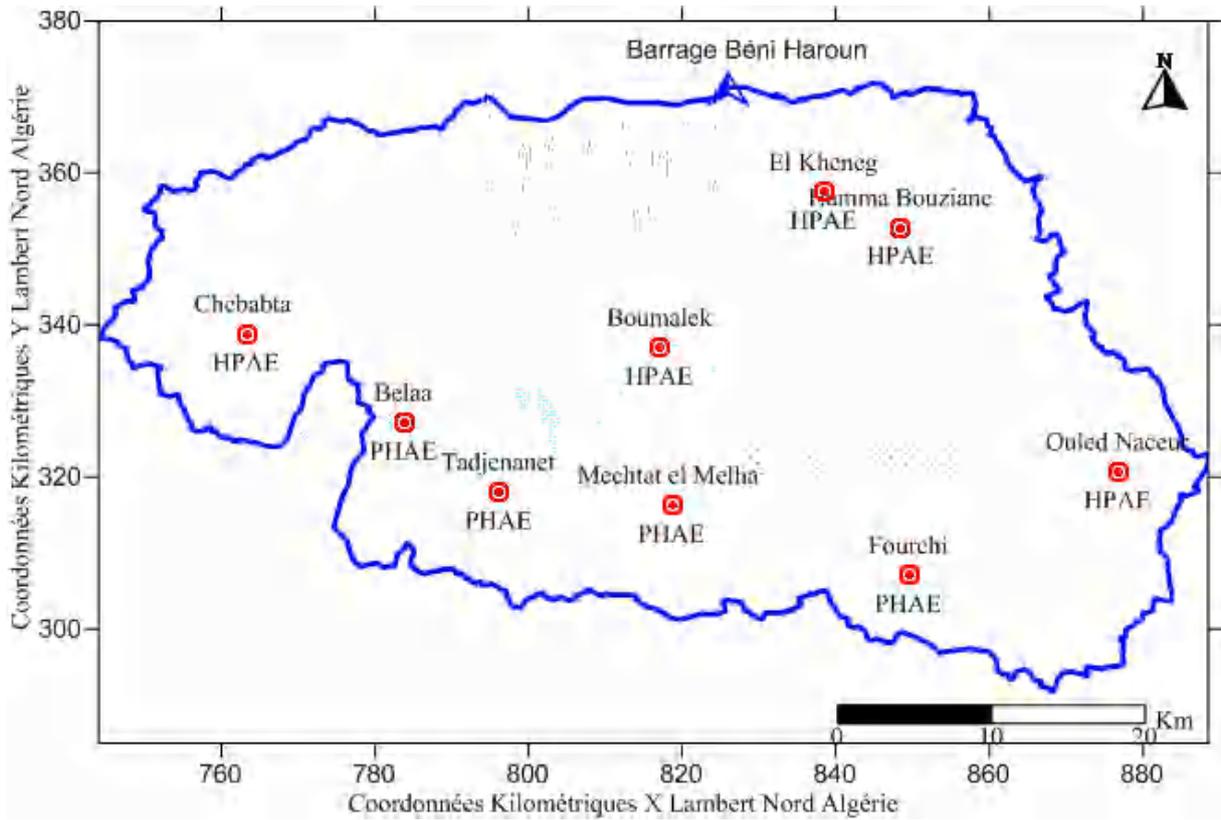


Figure 30: Régime saisonnier des pluies dans les stations de la zone d'étude (1970/71-2011/12)

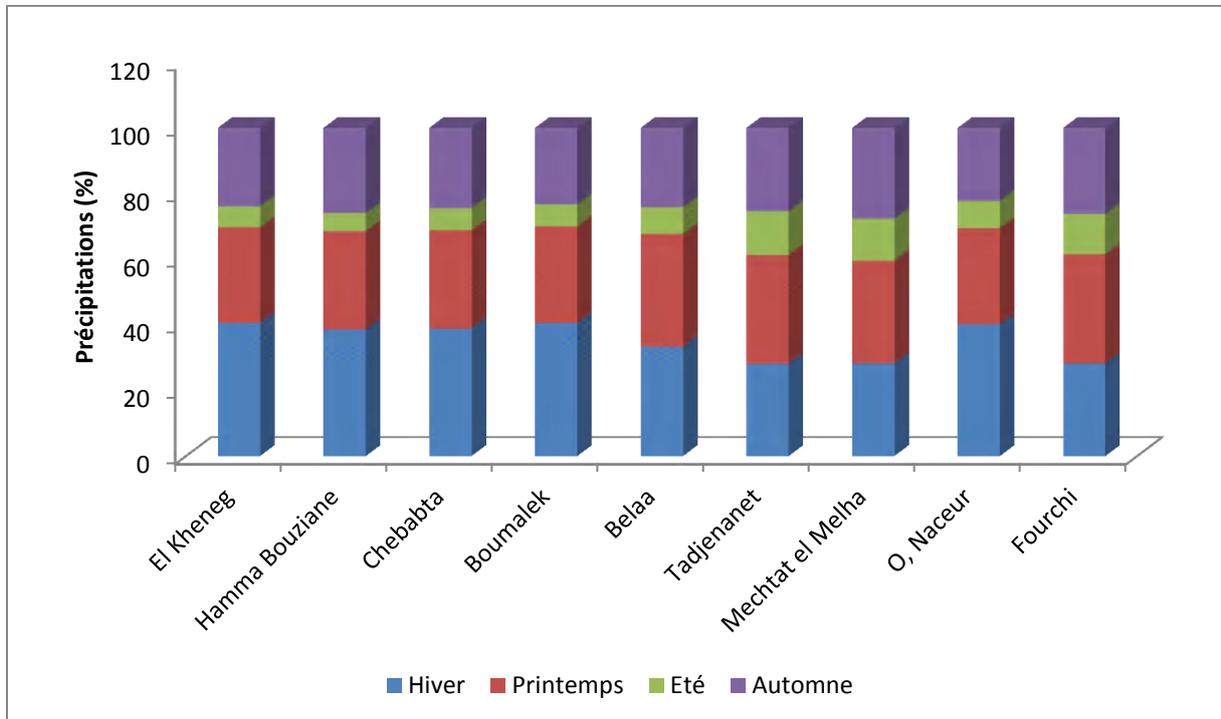


Figure 31: Moyenne des précipitations dans le bassin Rhumel-Endja (1970/71-2011/12)

## 2. LES APPORTS HYDROLOGIQUES ET LEURS VARIATIONS

### 2.1. Les variations spatiales de l'écoulement annuel et le bilan hydrologique

#### 2.1.1. Variabilité amont -aval des modules absolus et spécifiques

L'écoulement moyen annuel (ou l'abondance annuelle) est la première grandeur à connaître pour un bassin versant donné. Le module brut ou absolu (volume d'eau écoulé en 365 jours à la sortie d'un bassin) est généralement exprimé en  $m^3/s$  et le module spécifique se traduit en  $l/s/km^2$ . Sa valeur moyenne peut servir notamment à l'estimation d'autres caractéristiques hydrologiques qui lui sont liées (Cemagref, 1989 in Mebarki, 2005).

Les valeurs des débits dans le bassin étudié correspondant à la période 1973/74-2004/05 mettent en évidence l'augmentation Sud-Nord de l'abondance du bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun (Tableau 14). Cette répartition spatiale des débits, bien exprimée par les valeurs des débits spécifiques, traduit étroitement les caractéristiques climatiques et physico-géographiques du bassin déjà analysées dans le chapitre I (Contexte, données et méthodes).

Tableau 14: Apports hydrologiques annuels moyens de l'oued Rhumel-Endja à Béni Haroun

Sous bassin	Station	superficie du bassin (Km <sup>2</sup> )	module brut Q (m <sup>3</sup> /s)	module spécifique q (l/s/km <sup>2</sup> )	Apport Va (hm <sup>3</sup> /an)
Oued Rhumel	O. Rhumel à Ain Smara	2200	1,14	0,52	36,04
	O. Rhumel à Grarem	5320	5,3	0,99	165,8
	O. Smendou à Bouchdira	295	1,8	6,00	55,82
Oued Endja	O. El Kébir (Endja superieur) à Douar Tassadane	960	3,24	3,37	102,14
	O. Bouselah à Koudiat Tendart	170	0,48	2,80	15,03
Oued Rhumel-Endja et El Kébir	Oued Rhumel-Endja et El Kébir à Béni Haroun (débit simulé par LOIEAU)	7725	16,50	2,14	520,3

L'apport modeste du bassin de Rhumel-Seguin s'explique essentiellement par le caractère semi-aride du climat (précipitations de moins de 400 mm par an; évapotranspiration élevée). Il enregistre un débit annuel observé de 1.14  $m^3/s$  à la station d'Ain Smara, et offre donc le plus petit débit spécifique (0,52  $l/s/km^2$ ) de tous les oueds du bassin Rhumel-Endja.

Dans le bassin moyen, après le franchissement du Rocher de Constantine, le module du Rhumel s'accroît pour atteindre 5.3  $m^3/s$  à la station de Grarem qui contrôle une surface drainée de 5320  $km^2$ . Il est renforcé par l'apport conséquent de l'oued Smendou (1.8  $m^3/s$  à la station de Bouchdira), affluent issu des monts élevés et bien arrosés du Djebel Ouahch (Constantine) (Mebarki, 2005).

Le bassin de l'oued Endja dans la partie Ouest du bassin versant du Rhumel-Endja, est caractérisé par une pluviométrie relativement élevée (700 mm). Le débit mesuré à la station de Douar Tassadane est de 3.24 m<sup>3</sup>/s et de 0.47 m<sup>3</sup>/s à la station de Koudiat Tendart, cette dernière contrôle les débits de l'affluent, oued Bouselah.

A l'issue d'un bassin de 7725 km<sup>2</sup>, l'apport estimé (simulations du modèle LOIEAU) au barrage de Béni Haroun, atteint 16.5 m<sup>3</sup>/s, soit un apport de 520.3 hm<sup>3</sup> par an.

Les variations spatiales de l'écoulement superficiel à l'échelle du bassin Rhumel-Endja peuvent être encore mieux caractérisées par les débits spécifiques, synthétisant l'interaction des divers facteurs physico-géographiques (morpho métriques, litho pédologiques, climatiques et biogéographiques). L'accroissement du débit spécifique de l'amont à l'aval est mis en évidence comme dans le cas de bien d'autres oueds algériens (Soummam, Seybouse...) (Mébarki, 2005).

Particulièrement faible dans le bassin amont du Rhumel (hautes plaines), le module spécifique reste modeste sur la vallée inférieure du Rhumel (1.00 l/s/km<sup>2</sup> à la station de Grarem). Le débit spécifique s'accroît nettement dans le bassin d'oued Endja (3.4 l/s/km<sup>2</sup> à la station de Douar Tassadane et 2.80 l/s/km<sup>2</sup> à la station de Koudiat Tendart) où la pluviométrie est relativement élevée et les pentes sont fortes (secteur montagneux) favorisent ainsi l'écoulement de surface. L'oued Smendou, affluent drainant un sous bassin de 295 km<sup>2</sup>, caractérisé par des conditions d'alimentation et de ruissellement favorables, enregistre le plus fort débit spécifique ( $q = 6$  l/s/km<sup>2</sup>).

Bien que le débit soit soutenu par les apports de l'oued Endja et de l'oued Smendou, le module spécifique se rapportant à l'ensemble du bassin versant (2.14 l/s/km<sup>2</sup> au barrage de Béni Haroun) reste modéré, car traduisant les effets de la semi-aridité du sous bassin du Rhumel qui draine les 2/3 de la totalité de l'aire hydrographique (Tableau 14).

### ***2.1.2. Le profil hydrologique du bassin de l'oued Rhumel-Endja au barrage de Béni Haroun***

Les profils hydrologiques ou profil apports –surfaces sont des graphiques mettant en relation les apports et les surfaces drainées et montrent l'évolution spatiale des apports à l'intérieur du bassin hydrologique. La relation qui lie le débit moyen annuel  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) et la surface  $A$  (km<sup>2</sup>) correspondante du bassin versant obéit à une loi générale de type :  $Q = h A^g$ , où  $h$  et  $g$  sont des paramètres caractéristiques de chaque bassin (Tricart et Hirsch, 1960; Corbonnois et al, 1999; Corbonnois, 2000 ; Bravard et Petit, 2000 in Mébarki, 2005 et Louamri, 2013).

Pour le bassin de Oued Rhumel-Endja jusqu'à barrage de Béni Haroun, le profil surface - apport est établi pour les aires emboîtées le long du cours principal ainsi que pour les affluents (Tableau 15 et Figure 32).

Tableau 15: Modules absolus et spécifiques des bassins emboîtés et unitaires

	Surface (S) (km <sup>2</sup> )	Débit (Q) (m <sup>3</sup> /s)	Débit spécifique (q) (l/s/km <sup>2</sup> )	Apport (Va) (hm <sup>3</sup> /an)
<b>Cours principal</b>				
Ain Smara (AS)	2200	1,14	0,52	36,04
Grarem (G)	5320	5,26	0,99	165,83
G+DT+KT	6470	8,95	1,38	282,25
G+DT+KT+B	6765	10,72	1,58	338,07
Barrage Béni Haroun (Q simulé LOIEAU)	7725	16,50	2,14	520,34
<b>Affluents</b>				
Douar Tassadane (DT)	960	3,24	3,37	102,14
Koudiat Tendart (KT)	170	0,48	2,80	15,03
Bouchdira (B)	295	1,77	6,00	55,82

Les Hautes Plaines produisent un écoulement relativement faible à cause de la faiblesse des précipitations puis les débits s'accroissent d'une façon considérable de Constantine jusqu'à Grarem (passage du domaine semi-aride au domaine tellien subhumide), puis l'apport consistant de l'oued Endja fait multiplier par 3 l'apport de l'oued El Kébir au barrage de Béni Haroun (Figure 32).

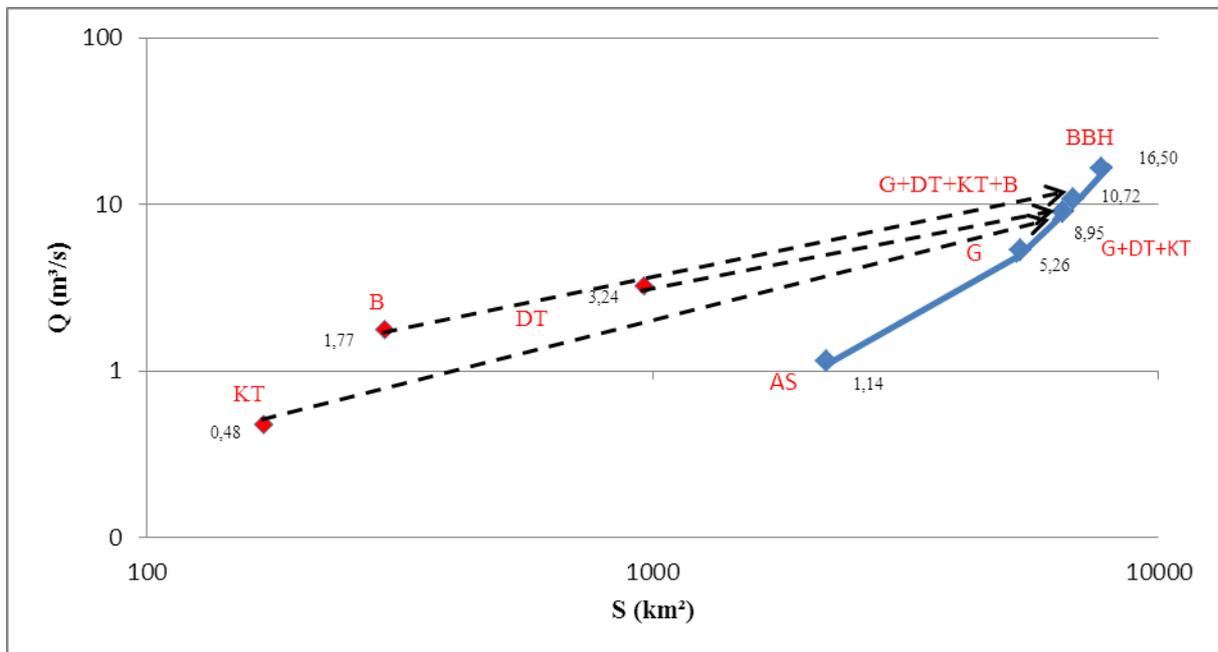


Figure 32: Profil hydrologique (modules-surfaces) du Bassin Rhumel –Endja jusqu'au barrage Béni Haroun

DT : Douar Tassadane ; KT : Koudiat Tendart ; AS: Ain Smara ; G : Grarem ; B : Bouchdira ; BBH: Barrage Béni Haroun

La régression entre  $Q$  et  $S$  (établie avec seulement 5 points) donne un ajustement de type linéaire sur un diagramme bi-logarithmique, avec un coefficient de corrélation de l'ordre de 0,98 (Figure 33). La variance résiduelle (2 %) est à relier principalement à la pluviométrie et les caractéristiques lithologiques.

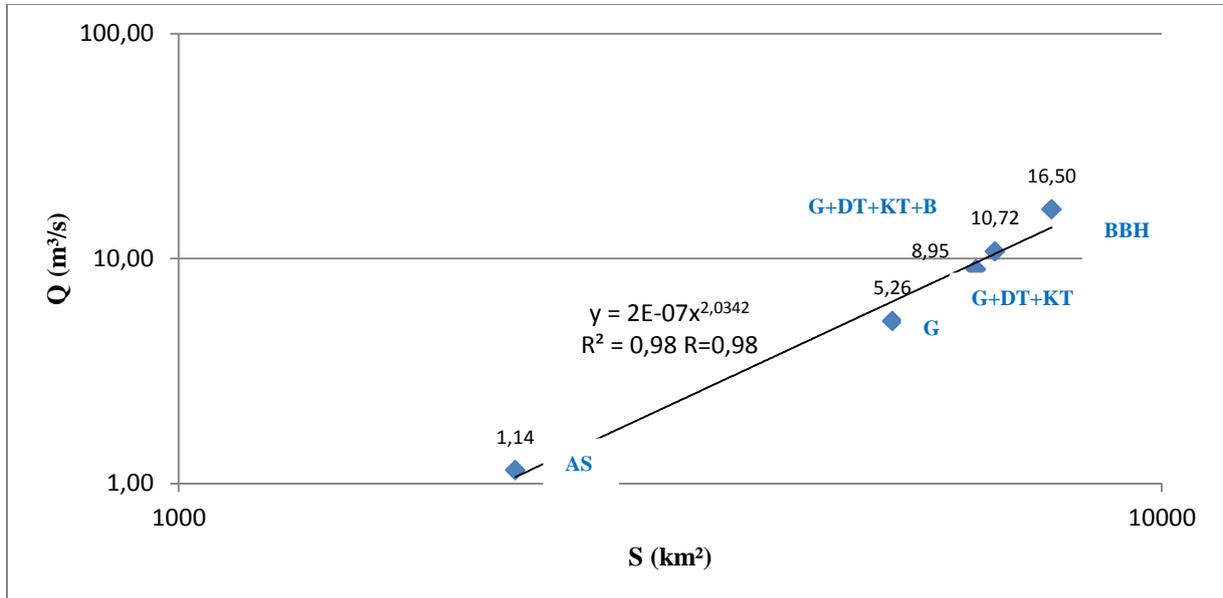


Figure 33: Relation entre les logarithmes des modules et des surfaces d'Oued Rhumel-Endja a Béni Haroun (cours d'eau principal)

DT: Douar Tassadane; KT : Koudiat Tendart; AS: Ain Smara; G: Grarem; B: Bouchdira ; BBH: Barrage Béni Haroun

### 2.1.3. Bilans hydrologiques annuels des bassins jaugés (1973 /74 -2004 /05)

Le bilan hydrologique permet d'estimer et de comparer les entrées et sorties d'eau dans les bassins versants étudiés.

L'équation de bilan hydrologique:  $P$  (mm) =  $E$  (mm) +  $D$  (mm).

**P** = Lamme d'eau annuelle moyenne précipitée.

**E** = Lamme d'eau annuelle moyenne écoulée.

**D**= déficit de l'écoulement.

Pour ce faire ce bilan, trois données sont à calculer :

**-La lame précipitée moyenne P (mm)** Elle peut être estimée par la méthode des isohyètes. Ici, dans notre étude nous avons utilisé les précipitations aux bassins.

**-La lame d'eau écoulée Ec (mm)** : représente la hauteur d'eau écoulée à l'exutoire défini comme étant le rapport entre le débit et la surface du bassin versant en fonction de temps (nombre de secondes de l'année).

La lame d'eau écoulée est donnée par la relation:  $E = Q/S*31536$ , avec: E: lame d'eau écoulée en mm, Q: débits en m³/s, S : surface du bassin versant en Km².

**-Le déficit d'écoulement D (mm)** : exprime la différence entre la hauteur d'eau reçue par un bassin versant et les écoulements superficiels issus de ce bassin pendant une même période. Il correspond théoriquement à la quantité d'eau évapotranspirée et la quantité infiltrée vers les nappes souterraines, mais cette partie d'eau infiltrée pourra ultérieurement être drainée par l'oued et ressortir par des résurgences ou des sources, elle correspond donc à un écoulement différé pouvant être comptabilisé avec les débits. Ceci laisse supposer que le déficit d'écoulement correspond uniquement à l'évapotranspiration réelle théorique. Le déficit d'écoulement est donné par la relation:  $D = P - E$ , avec: D: le déficit d'écoulement en mm, P : les précipitations en mm, E: la lame d'eau écoulée en mm.

Pour exprimer (en pourcentage) la tranche d'eau précipitée qui ruisselle on utilise le **coefficient d'écoulement C (%)**, correspondant au rapport entre la lame d'eau écoulée et les précipitations :  $C = E / P$ , avec : C : coefficient d'écoulement en %, P: les précipitations en mm, E: la lame d'eau écoulée en mm.

Le bilan hydrologique a été calculé pour chaque sous bassin (Tableau 16 et Figure 34). Les résultats traduisent des nuances régionales marquées de l'amont à l'aval du bassin.et sur les affluents.

Tableau 16: Bilans hydrologiques moyens 1972/73-2004/05 des bassins contrôlés par des stations hydrométriques

Sous bassin	Station	Surface Km <sup>2</sup>	Pluie moyenne P (mm)	Lame écoulée EC mm	Coefficient d'écoulement C %	Déficit d'écoulement D=ETR mm	Volume annuel moyen hm <sup>3</sup> /an
Oued Endja	O, El Kébir à Douar Tassadane (Oued Endja supérieur)	960	537,14	106,40	19,81	430,74	102,14
	O, Bouselah à Koudiat Tendart	170	420,92	88,43	21,01	332,49	15,03
Oued Rhumel	O,Rhumel à Ain Smara	2200	358,47	16,38	4,57	342,09	36,04
	O, Rhumel à Grarem	5320	405,70	31,17	7,68	374,53	165,83
	O, Smendou à Bouchdira	295	794,11	189,22	23,83	604,90	55,82
Oued Rhumel-Endja et Oued El Kébir	O. Rhumel-Endja et Oued El Kébir à Béni Haroun	7725	434,20	67,36 (*)	15,51 (*)	366,84 (*)	520,34 (*)

(\*) Débit simulé par modèle LOIEAU

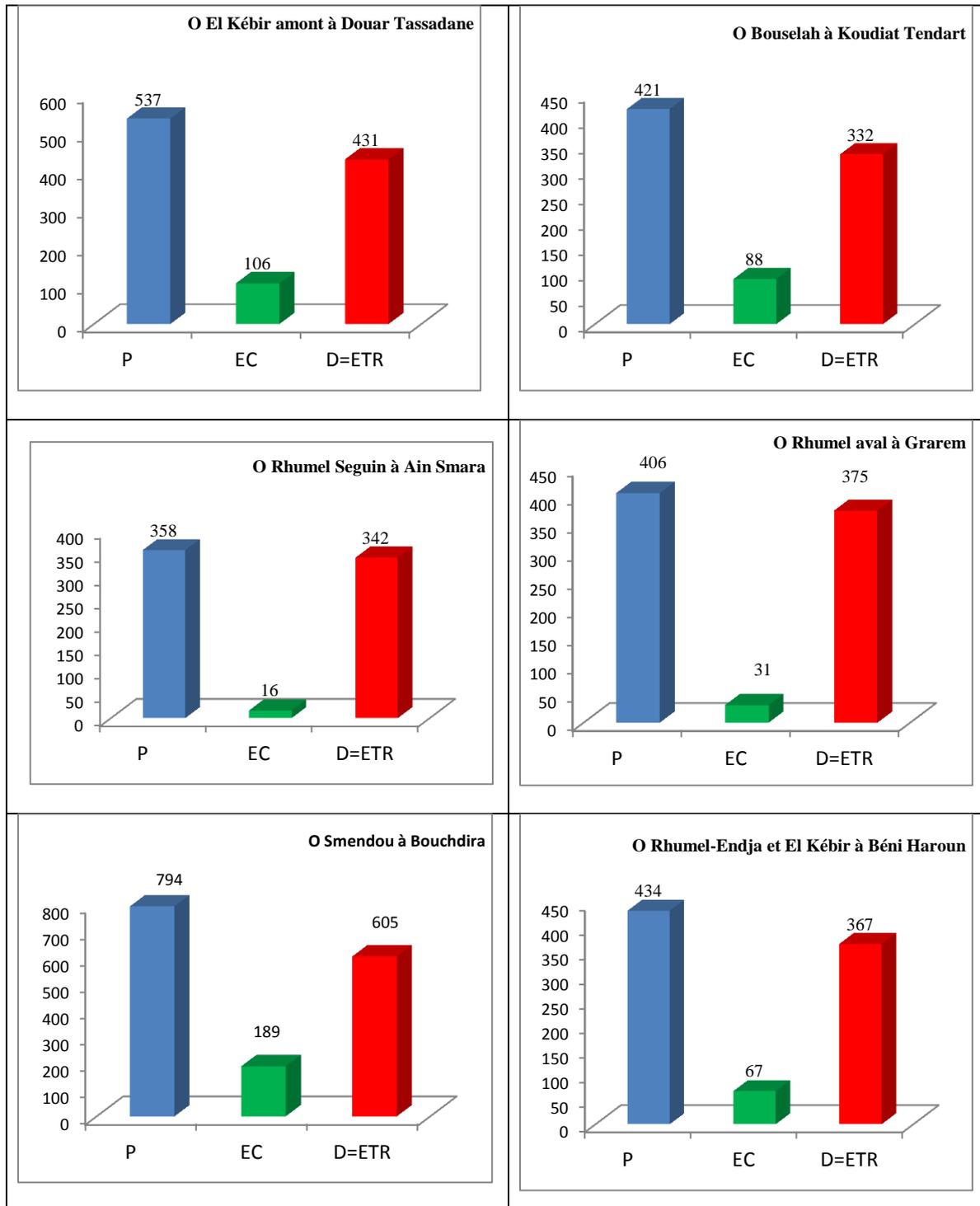


Figure 34: Bilans d'écoulement annuels moyens des bassins du Rhumel-Endja

La figure 35 et le Tableau 17 est établie pour montrer les trois termes du bilan hydrologique annuel moyen amont-aval du bassin Rhumel-Endja. Les Hautes Plaines produisent une lame d'eau écoulee relativement faible à cause de la faiblesse des précipitations (358.47 mm) et l'importance de la perméabilité. La station de Ain Smara, qui contrôle Oued Rhumel Seguin (2200 km<sup>2</sup>) enregistre une lame écoulee de 16.38 mm. La lame d'eau écoulee s'accroissent d'une façon considérable de l'oued Rhumel et l'oued Endja: (G+DT+KT: 43.62 mm) et

(G+DT+KT+B : 49.97). A l'issue d'un bassin de 7725 km<sup>2</sup>, l'apport estimé (simulations du modèle LOIEAU) au barrage de Béni Haroun, atteint 67.37 mm.

Tableau 17: Bilans hydrologiques moyens amont- aval du bassin de Beni Haroun (période commune: 1972/73-2004/05)

Cours principale (Stations)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Pluie moyenne P (mm)	Débit absolu (m <sup>3</sup> /s)	Lame écoulee EC (mm)	Coefficient d'écoulement C %	Déficit d'écoulement D=ETR (mm)
Ain Smara (AS)	2200	358,47	1,14	16,38	4,57	342,09
Grarem (G)	5320	405,70	5,26	31,17	7,68	374,53
G+DT+KT	6470	454,59	8,95	43,62	9,60	410,96
G+DT+KT+B	6765	539,47	10,72	49,97	9,26	489,49
Barrage Béni Haroun (BBH)	7725	434,20	16,50 (*)	67,36 (*)	15,51 (*)	366,84 (*)

(\*) Débit simulé par modèle LOIEAU

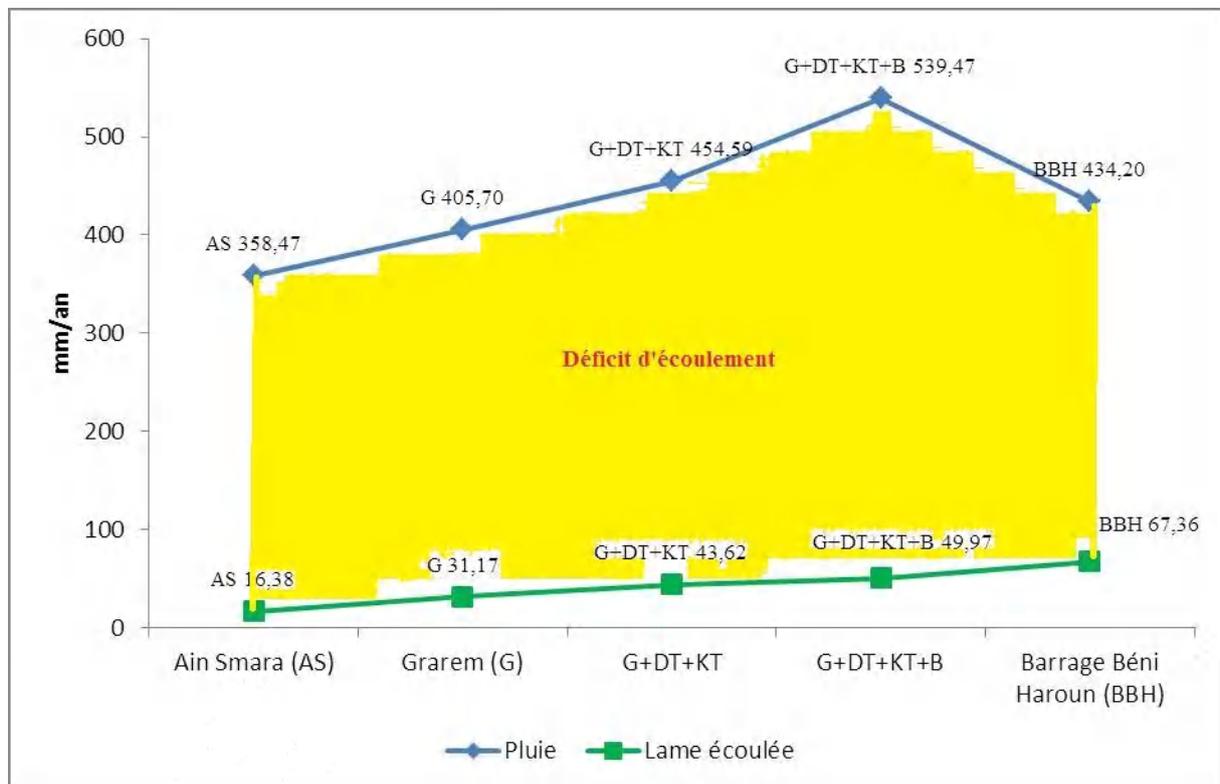


Figure 35: Bilans hydrologiques moyens amont- aval du bassin de Beni Haroun (période commune : 1972/73-2004/05)

### 2.1.3.1. Les pluies moyennes aux bassins

L'estimation de la tranche d'eau précipitée est établie au niveau des bassins jaugés, pour la période de référence considérée (1973/74-2004/05). Les données sont issues des grilles mensuelles des pluies établies par l'ANRH sur la base d'un modèle de régression pluies-relief (Mebarki et Laborde, 2012).

Afin d'avoir une vue globale sur la variabilité des lames précipitées, nous nous avons tracé les graphiques (box plots) correspondant aux précipitations annuelles des différents sous bassins (Figure 36). Les pluies annuelles les plus élevées ont été recueillies au sein du sous bassin Smendou à Bouchdira (1286.82 mm en 2004/05) et O El Kébir à Douar Tassadane (895.39 mm en 1984/85). Le sous bassin O. Rhumel à Ain Smara est la moins précipitée avec des lames relativement peu variables qui varient de 220.12 mm (en 1982/83) à 636.39 mm (en 2002/03) et une moyenne de 358.47 mm.

Nous pouvons voir que pour la période de 1973/74 à 2004/05, trois années ont été exceptionnellement pluvieuses: 1984/85, 2002/03 et 2004/05. Les lames d'eau précipitées aux six bassins enregistrés pendant ces années, s'élèvent à plus de 600 mm d'eau. Les années qui ont été particulièrement sèches sont 1996/97, 2001/02 et 1982/83.

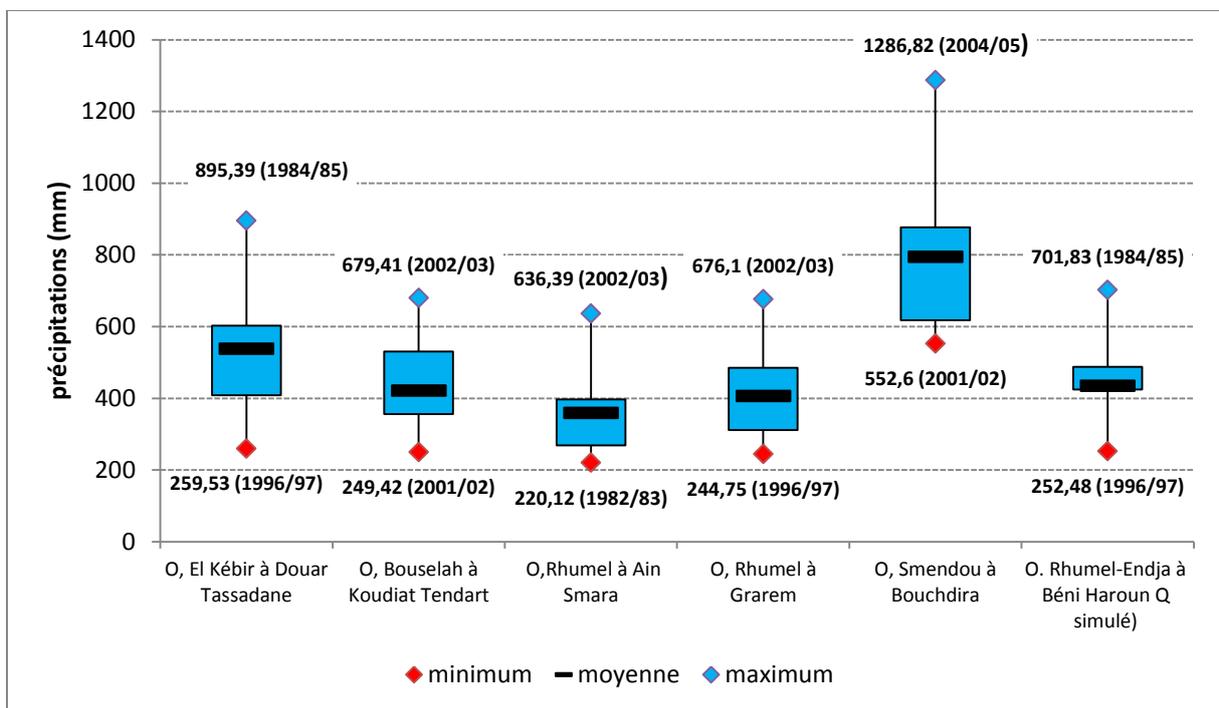


Figure 36: « Boîtes à moustaches » des pluies interannuelles aux bassins (P simulées ANRH) (période: 1973/74-2004/05)

### 2.1.3.2. Ecoulement (Ec) et coefficient d'écoulement annuels

Afin d'avoir une vue globale sur la variabilité des lames écoulées, nous nous avons tracé les graphiques (box plots) correspondant aux écoulements annuelles des différents sous bassins (Figure 37) et les histogrammes des coefficients d'écoulements annuelles (Figure 38).

Dans le bassin Rhumel Seguin drainant les Hautes Plaines semi-aride, la lame d'eau écoulee est 16.38 mm et, de ce fait, le coefficient d'écoulement est 4.57 %. Les conditions d'alimentation et d'écoulement y sont, en effet, très défavorable.

Dans le bassin de Rhumel aval à Grarem, la lame d'eau écoulee s'élève à 31.17 mm et 67 mm dans le barrage de Béni Haroun. Sur elle atteint 88.43 mm dans le bassin de Oued Bouselah à

Koudiat Tendart (affluent d'oued Endja) et 106.40 mm dans le bassin du Kébir amont à Douar Tassadane ou l'influence montagnarde est déjà marquée.

L'oued Smendou c'est un affluent de 295 km<sup>2</sup> situé dans la partie aval du bassin de l'oued Rhumel et à l'amont de lac de retenue du barrage de Béni Haroun, il se caractérise par des précipitations et des écoulements irréguliers, la lame d'eau est 189.22 mm à la station de Bouchdira durant la période de 1973/74-2004/05.

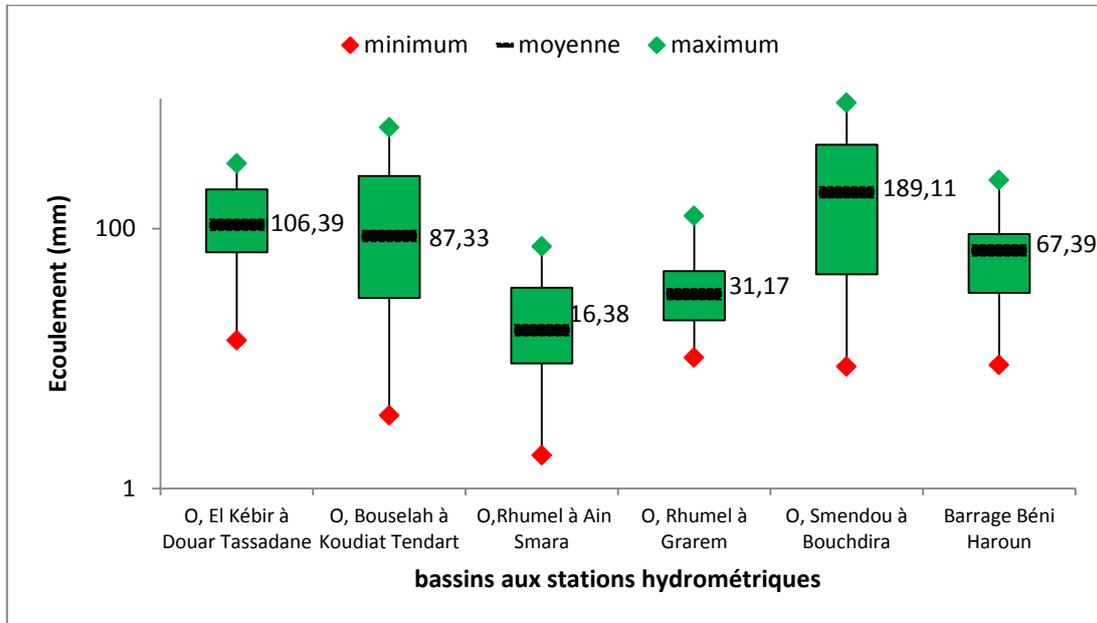


Figure 37: Variations de la lame écoulée pour les bassins aux stations hydrométriques (1973/74-2004/05)

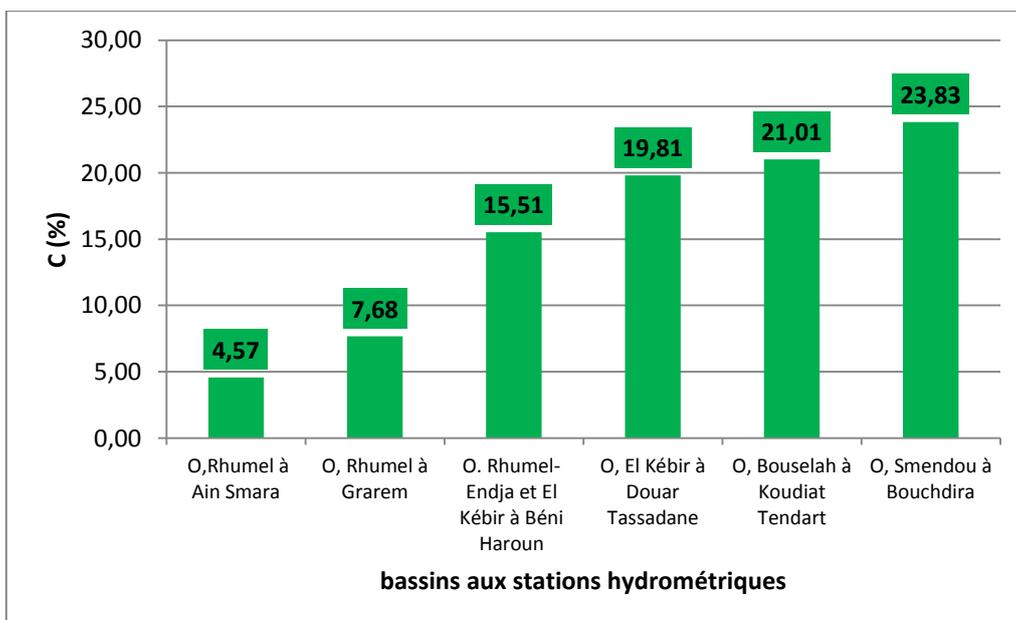


Figure 38: Rangement par ordre croissant du coefficient d'écoulement annuel moyen des bassins aux stations hydrométriques (1973/74-2004/05)

Les valeurs de  $C$  rangées par ordre croissant varient entre 4.57 % (oued Rhumel à Ain Smara) et 23.83 % (oued Smendou à Grarem) (Figure 38). La moyenne est de 15.40 %, l'écart type de 7.72 %, d'où un coefficient de variation de 0,5.

### 2.1.3.3. Le déficit d'écoulement ( $D$ )

Le déficit moyen annuel d'écoulement est très élevé en Algérie (Ghenim, 2013). Dans ce cas d'étude, il oscille au niveau du bassin étudié entre 332.49 mm à Koudiat Tendart et 605 mm à Bouchdira. L'organisation spatiale des valeurs du déficit d'écoulement est latitudinale: valeurs croissantes du Sud (Hautes Plaines, 342.09 mm pour le bassin de l'oued Rhumel à Ain Smara) vers le Nord (versant Sud Tellien 367 mm pour le barrage de Béni Haroun, et 374.53 mm pour le bassin de l'oued Rhumel à Grarem; 430.74 mm pour celui de l'oued El Kébir à Douar Tassadane) (Figure 39). Ces variations entre sous bassin mettent bien en valeur le rôle déterminant de l'abondance pluviométrique, des températures et par conséquent l'évapotranspiration.

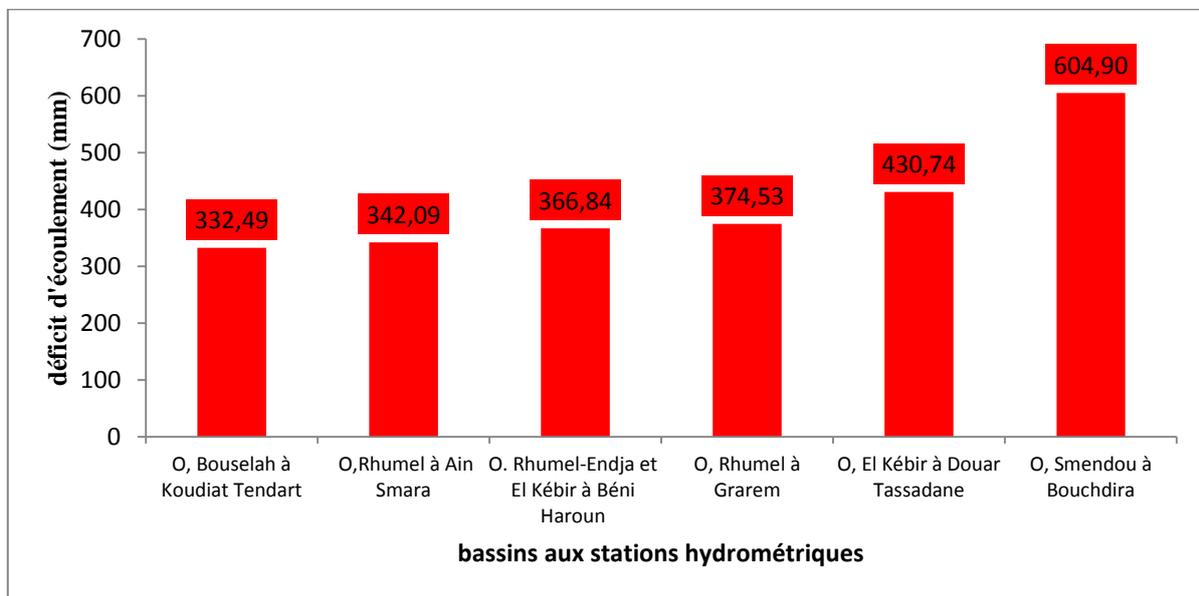


Figure 39: Répartition par ordre croissant des déficits d'écoulement annuel pour les bassins aux stations hydrométriques (1973/74-2004/05)

### 2.1.4. Cartographie de l'écoulement annuel moyen. Synthèse des travaux réalisés (série normale de 30 ans)

La méthode de la cartographie automatique est une nouvelle technique appliquée à l'aide d'un logiciel du type SURFER, qui facilite l'interpolation des données et leur représentation spatiale. Elle remplace les méthodes classiques et permet le passage d'une information ponctuelle et brute à une information traitée, interpolée et numérisée (Mebarki, 2006).

La cartographie de l'écoulement moyen annuel est réalisée selon deux méthodes, le modèle bilan en tenant compte du déficit d'écoulement de Turc et le modèle LOIEAU (Mebarki, 2005 et 2009).

2.1.4.1. La cartographie automatique de l'écoulement moyen tenant compte du déficit d'écoulement de Turc (méthode Mebarki, 2005)

La cartographie de l'écoulement moyen annuel est basée sur le modèle bilan tenant compte du déficit d'écoulement de Turc (Mebarki, 2005). Après avoir vérifié la bonne corrélation ( $R=0,94$ ) entre l'ETR cartographiée du modèle de Turc et l'E.T.R. déduite des bilans observés dans les bassins jaugés de l'Est algérien, l'auteur a proposé de cartographier de l'écoulement aux nœuds d'une grille de 2 km de côté, en appliquant la formule simple du bilan:  $EC = P - ETR$  en bornant, toutefois, l'écoulement minimal à 5 mm par an.

Le déficit d'écoulement assimilé en année moyenne à l'évapotranspiration réelle (ETR), est cartographié directement en le calculant, aux nœuds de chaque maille, par la formule universelle du déficit d'écoulement (D) de Turc, combinant les pluies (P) et les températures (T) :

$$D = P / (0,9 + P^2 / L^2) - 0,5$$

**D** : déficit d'écoulement d'eau (mm par an)

**P** : précipitations (mm par an)

**T** : température annuelle de l'air (°C)

**L** :  $300 + 25 t + 0,05 t^3$

La formule de Turc a montré sa bonne corrélation avec les déficits d'écoulement issus des bilans hydrologiques interannuels des bassins jaugés de l'Algérie orientale. Bien que mal adaptée aux bassins de très faible étendue, elle convient par le fait qu'elle se base sur deux paramètres climatiques mesurés (*P* et *T*) dont les variations sont en rapport avec celles du relief et qui ont fait, par ailleurs, l'objet de régionalisation (Mébarki, 2005) :

- La lame d'eau précipitée d'une période de référence commune à celle de l'information disponible sur les des débits des cours d'eau, est calculée à partir de la grille des précipitations.
- Considérant la faible variabilité des températures d'une année à l'autre, la grille des températures utilisée est celle mise au point dans l'étude de synthèse des E.T.P. de l'Algérie du Nord (A.N.R.H, 2003). La sommation des 12 grilles mensuelles permet d'obtenir une grille des températures annuelles moyennes à partir de laquelle nous avons extrait sous forme de courbes isothermes (Figure 40). La carte permet de faire ressortir des zones de fortes températures dans le bassin (supérieurs à 17°C au Nord Est). Les valeurs de température diminuent vers le sud-ouest du bassin (11 °C).

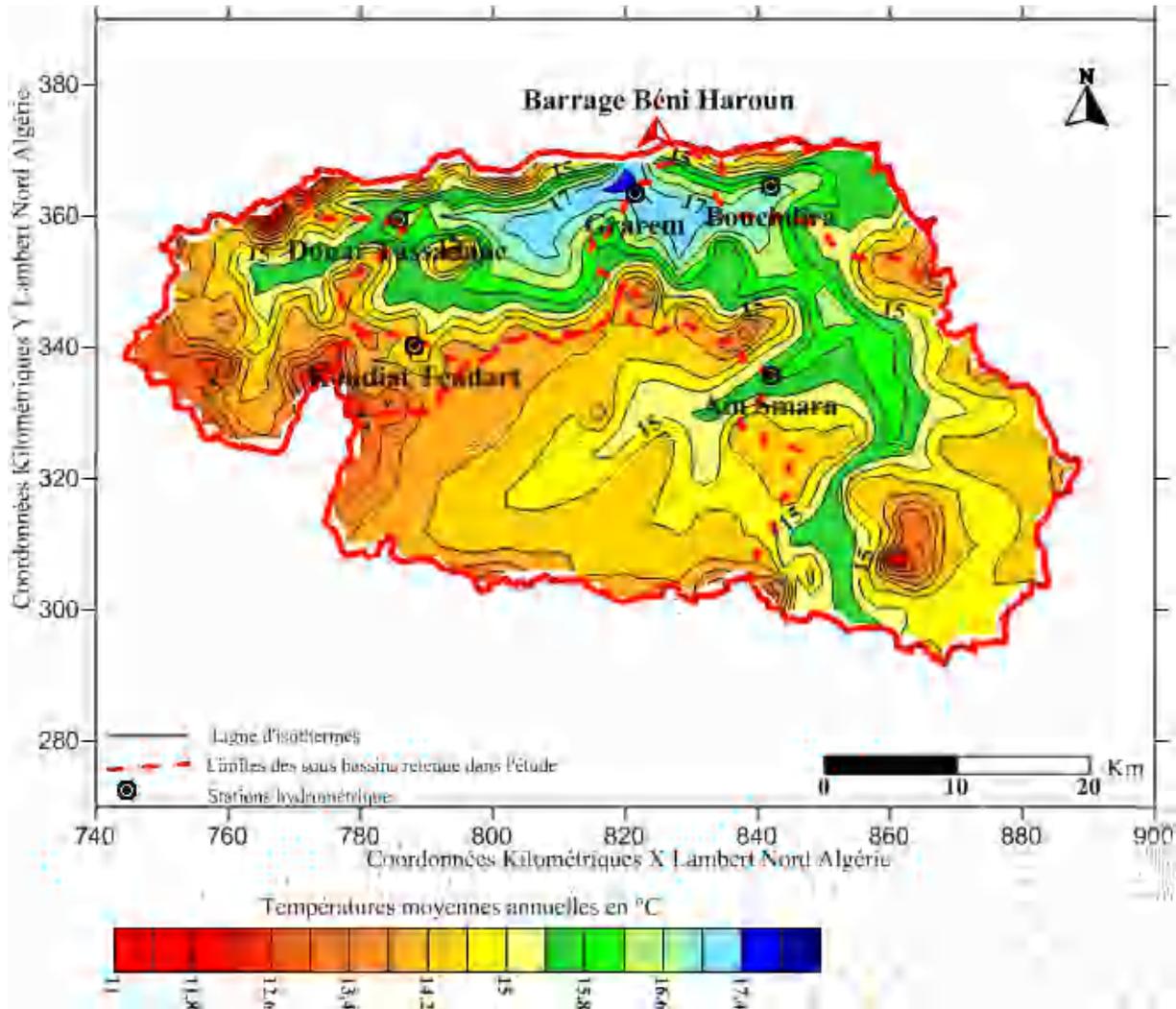


Figure 40: Températures moyennes annuelles (°C) du bassin Rhumel-Endja (1965/66-1994/95)

Il devient ainsi aisé, par application de la formule de Turc en chaque nœud du maillage, de construire la grille des évapotranspirations réelles annuelles moyennes couvrant le bassin.

La carte des zones d'égale valeur de déficit d'écoulement (de 230 mm à plus de 470 mm) illustre bien la dépendance de l'évaporation par rapport aux précipitations, ces dernières intervenant fortement sur l'E.T.R. par le biais de la réserve du sol (R.F.U.) qu'elles alimentent (Carrega, 1988) (Figure 41).

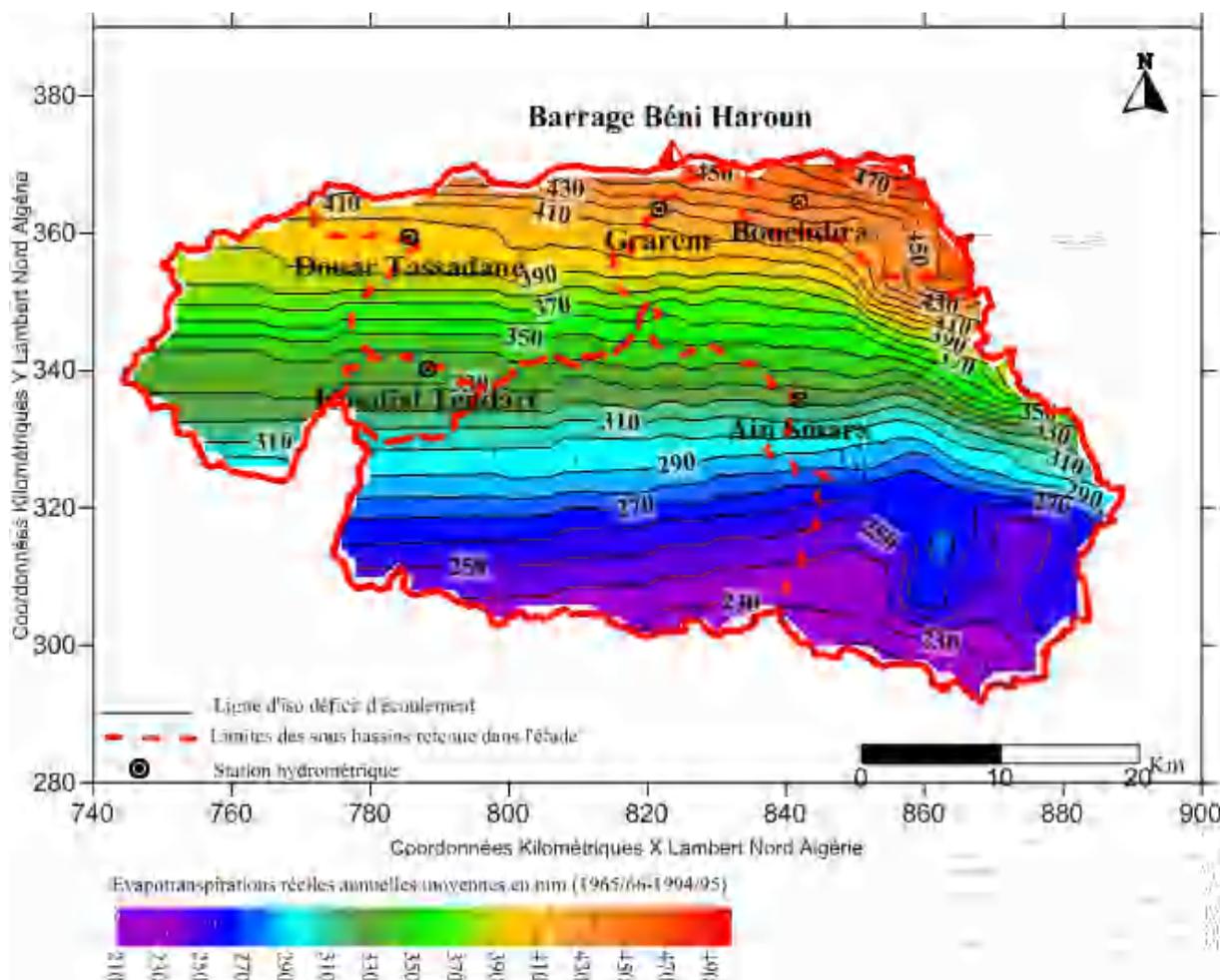


Figure 41: Carte des évapotranspirations réelles annuelles (E.T.R Turc) (1965/66-1995/96)

La carte de l'écoulement annuel moyen traduit bien les contrastes hydrologiques dans le bassin. Les lames écoulées annuelles oscillent entre 0 mm au Sud du bassin et 390 mm au Nord, les courbes d'iso-écoulement s'organisent comme suit (Figure 42) :

- les courbes de 30 mm-60 mm couvrent une bonne partie du bassin.
- les courbes de 210-390 mm sont légèrement représentées dans la partie Nord du bassin étudié.

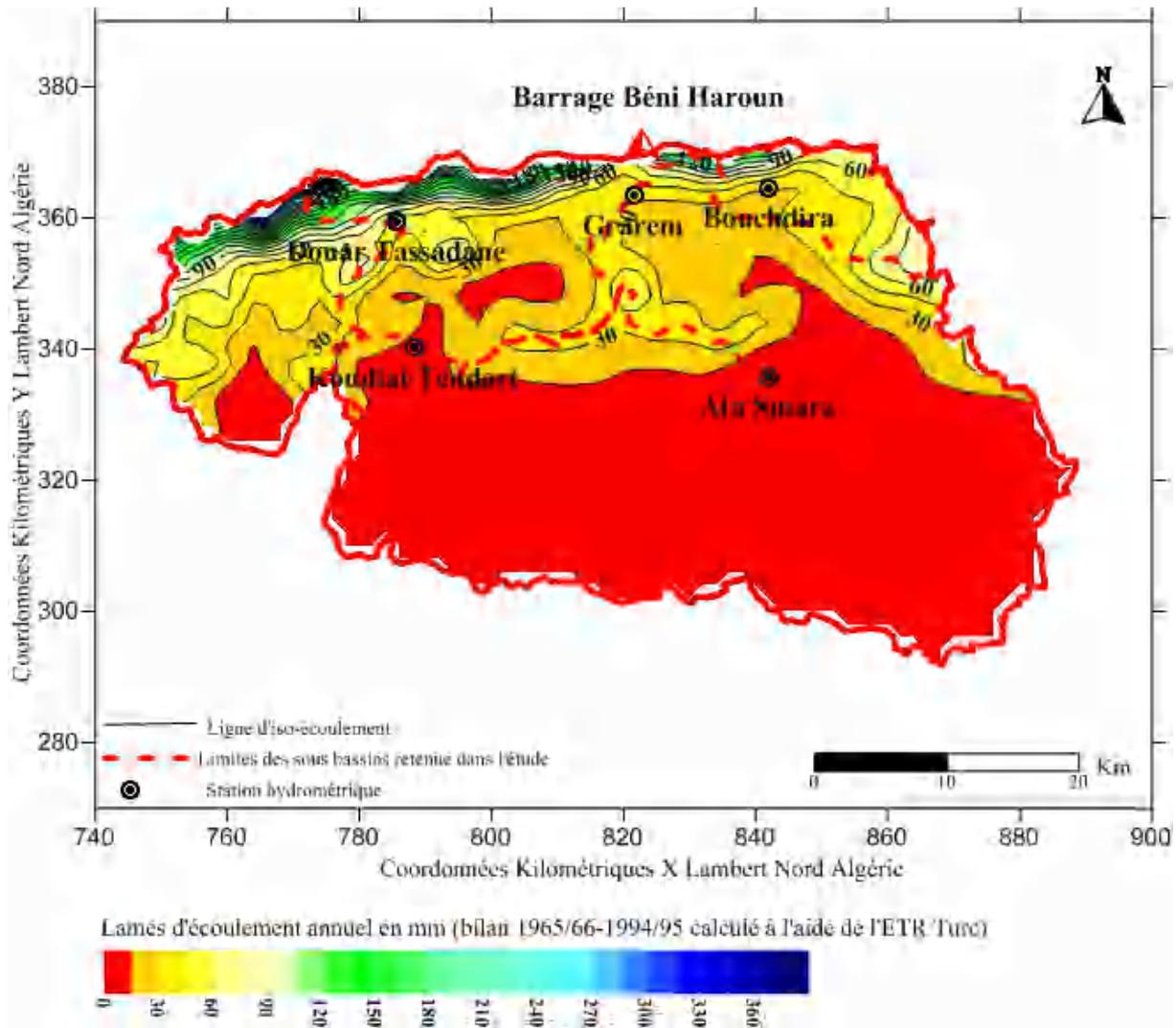


Figure 42: Lames écoulées annuelles du bassin en mm (période 1965/66-95/96)

#### 2.1.4.2. Cartographie de l'écoulement selon l'application du modèle LOIEAU

Le modèle **LOIEAU** est un modèle à réservoirs issu de GR<sub>2</sub>M du CEMAGREF (Makhlouf et Michel, 1994 ; Lavabre et al, 2010). Ce modèle a été adopté par l'A.N.R.H pour la simulation des écoulements mensuels aux nœuds d'un maillage kilométrique couvrant le Nord de l'Algérie, en alimentant le modèle de pluies et des ETP connues aux nœuds de ce même maillage. Deux paramètres de calage ont été utilisés pour optimiser les simulations sur les bassins algériens (A.N.R.H, 2003; Laborde et al, 2003; Assaba, 2004).

La carte des écoulements annuels moyens de la zone d'étude, traitée sous SURFER, est extraite de l'étude de synthèse de l'ANRH sur les ressources en eau de surface de l'Algérie du Nord (A.N.R.H, 2003). Elle montre que les courbes d'iso-écoulement oscillent entre 20 mm au Sud et 300 mm au Nord (Figure 43):

La courbe maximale de 300 mm est légèrement représentée dans le bassin d'oued Endja à Douar Tassadane (Oued Endja supérieur) ; Pour les Hautes Plaines, les valeurs des courbes oscillent entre 40 mm, à moins de 20 mm (bassin de l'oued Rhumel à Ain Smara).

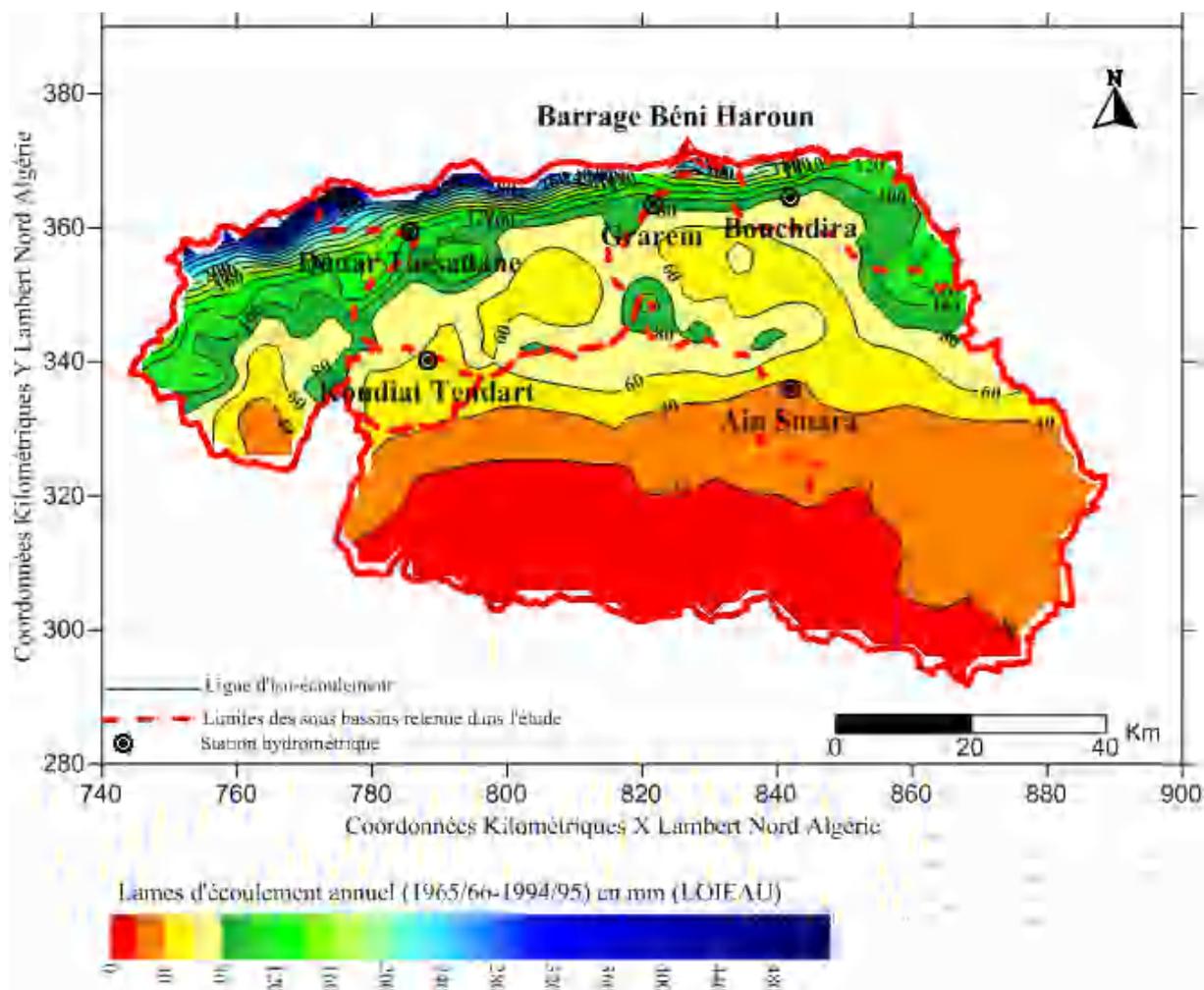


Figure 43: Carte des écoulements annuels moyens du bassin Rhumel-Endja (apports simulés à l'aide de LOIEAU, période: 1965/66-1994/95 « étude de Synthèse ANRH, 2003 »)

Pour réaliser la carte du déficit d'écoulement déduit du bilan d'écoulement établi à l'aide d'écoulement LOIEAU, on doit suivre les étapes suivantes:

- Enregistrer les cartes des précipitations et de l'écoulement sous format (.dat)
- Les valeurs de P et EC correspondant aux nœuds de la grille (x, y Lambert) sont reportées sur la table de Surfer (worksheet).
- On crée une nouvelle colonne de  $D=P-EC$
- La fonction « map », new « contours map » nous permet d'obtenir la carte des déficits d'écoulement annuels (Figure 44). La variabilité spatiale de déficit se traduit par des valeurs allant de 280 mm à plus de 520 mm, avec une décroissance de l'Ouest vers l'Est.

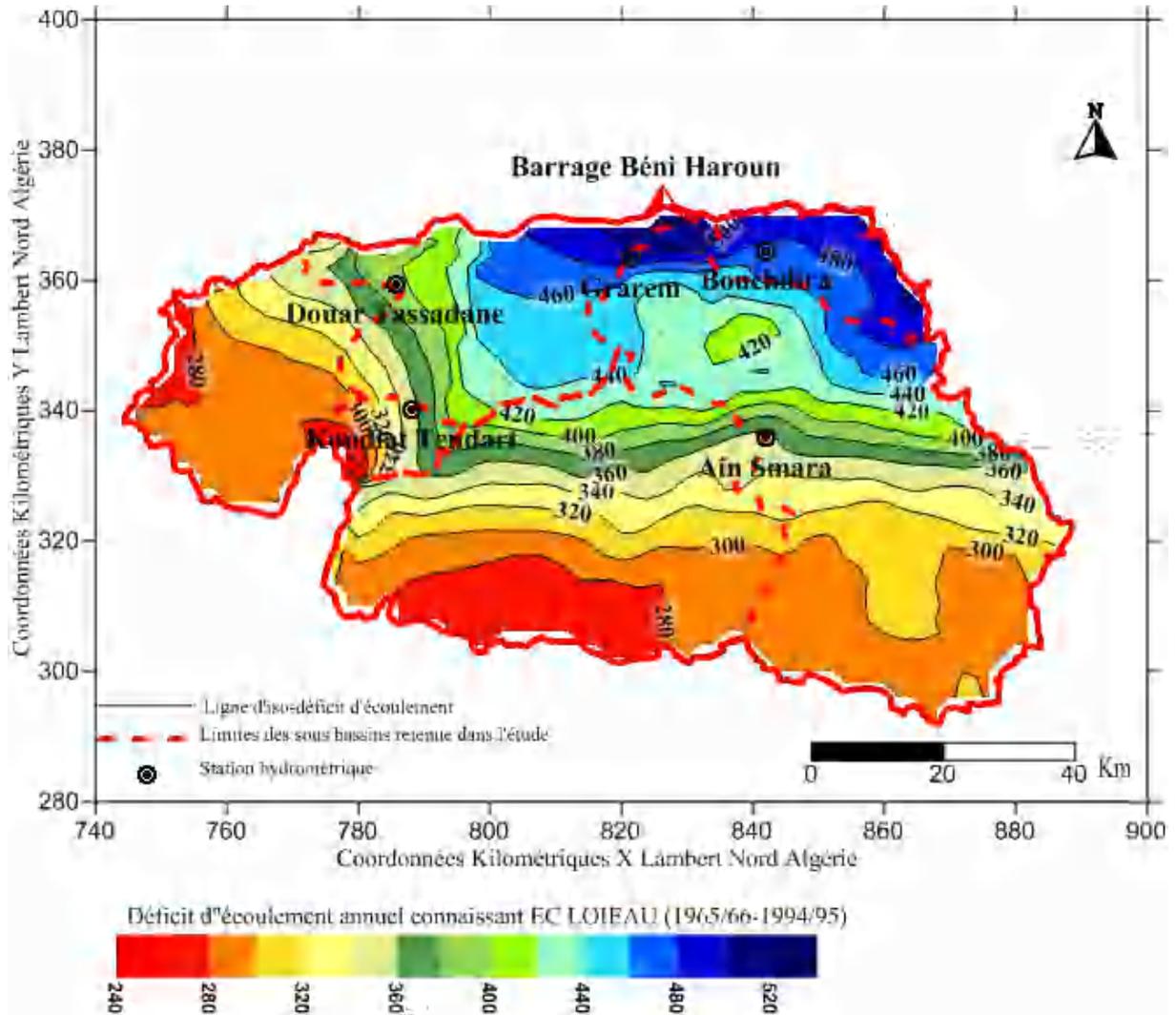


Figure 44: Carte du déficit d'écoulement annuel connaissant EC LOIEAU du bassin Rhumel-Endja (1965/66-1994/95)

### 2.1.4.3. Comparaison des résultats des bilans d'écoulement

L'estimation de la lame des précipitations, de l'écoulement moyen annuel écoulé et du déficit d'écoulement est établie dans les limites de chaque sous bassin jaugé étudié dans cette thèse (Tableau 18).

-Ce calcul de la lame d'eau moyenne annuelle (précipitée, écoulee et de déficit d'écoulement) est le résultat de calcul du volume obtenu à l'aide du logiciel SURFER (Grid: Blank----> limite bln du sous bassin ----> puis calcul du volume écoulé Grid : Volume) ----> il devient alors possible de convertir ce volume V en lame (précipitée, écoulee et déficit) en divisant le volume par la superficie du sous bassin considéré.

La comparaison des écoulements de surface calculés à l'aide du modèle **LOIEAU** avec ceux obtenus par Méthode de **MEBARKI** des sous bassins pendant la période (1965/66-1994/95), montre que des écarts importants sont constatés pour certains sous bassins. L'écart relatif

entre écoulement LOIEAU et écoulement MEBARKI varie de 12.51 mm pour l'oued Rhumel à Ain Smara à 32.11 mm pour l'oued Smendou à Bouchdira.

La comparaison des lames d'eau écoulées calculées à l'aide du modèle LOIEAU (1965/66-1994/95) avec celle déduite du bilan observé (1973/74-2004/05) montre une bonne concordance générale des valeurs dans les bassins telliens comme le barrage Béni Haroun et l'oued El Kébir amont à Douar Tassadane (Oued Endja supérieur). Par contre, la lame d'eau écoulée calculée à l'aide de modèle de Mebarki (14.44 mm durant la période 1964/65-1994/95) avec celle déduite du bilan observé (16.38 mm durant la période 1973/74-2004/05) sur le bassin O. Rhumel à Ain Smara montre une bonne concordance générale des valeurs. Cependant, l'écoulement calculé à l'aide du modèle LOIEAU (26.95 mm) est relativement surestimé pour cette zone des Hautes Plaines semi-aride (Mihoubi, 2009).

Tableau 18: Récapitulatif des résultats des différentes méthodes de calcul du bilan hydrologique

Station	Carte ANRH (1964/65-1994/95)	Méthode MEBARKI (1964/65-1994/95)		Modèle LOIEAU (1964/65-1994/95)		Bilan observé (1973/74-2004/05)		
	P (mm)	Ec (mm)	D (mm)	Ec (mm)	D (mm)	P (mm)	Ec (mm)	D (mm)
O, El Kébir à Douar Tassadane (Oued Endja supérieur)	538,17	93,63	444,54	121,34	416,83	537,14	106,40	430,74
O, Bouselah à Koudiat Tendart	440,88	36,39	404,49	55,73	385,15	420,92	88,43	332,49
O, Rhumel à Ain Smara	335,66	14,44	321,22	26,95	308,71	358,47	16,38	342,09
O, Rhumel à Grarem	378,55	24,09	354,46	41,46	337,10	405,70	31,17	374,53
O, Smendou à Bouchdira	774,98	111,63	663,35	143,74	631,24	794,11	189,22	604,90
O, Rhumel-Endja et El Kébir à Béni Haroun	417,11	40,90	376,22	61,86	355,26	434,20	67,36 (*)	366,84

(\*) Débit simulé par modèle LOIEAU

## 2.2. Les variations temporelles de l'écoulement

### 2.2.1. Les variations interannuelles

#### 2.2.1.1. Le coefficient d'hydraulicité

L'hydraulicité, rapport du débit de l'année ( $Q_i$ ) considérée au module ( $Q_{moy}$ ), permet d'exprimer l'irrégularité interannuelle de l'écoulement. L'évolution de l'hydraulicité pour les oueds étudiés (Figure 45), montre de fortes fluctuations des débits d'une année à l'autre, ce qui témoigne de l'irrégularité de l'écoulement qui est liée à l'alimentation essentiellement pluviale des oueds. En outre, la discordance entre les courbes d'hydraulicité pour les différents affluents, peut être attribuée à la variation de l'apport des réserves en eau souterraines, surtout s'il s'agit d'une période climatique sèche (Bouanani, 2004).

Au premier abord, entre 60 et 75 % des années hydrologiques sont déficitaires dans les différentes stations et pour une période de 32 ans (1973/74-2004/05). Ceci, confirme l'indigence quasi-générale de l'écoulement et la tendance climatique "sèche" pendant cette

période. On constate aussi que l'année 1984/85 apparaît la plus abondante avec un coefficient d'hydraulicité (Ch) le plus élevé dans les deux stations Douar Tassadane et Grarem, 2002/03 pour les stations de Koudiat Tendart et barrage de Béni Haroun, 1983/84 pour Ain Smara et 2004/05 pour la station de Bouchdira (Figure 45). Par ailleurs, Les plus faibles valeurs de l'hydraulicité traduisent nettement le fort déficit. Les années les plus sèches ont été atteintes en Douar Tassadane (1996/97), Koudiat Tendart (1975/76), Ain Smara (1975/76), Grarem (1989/90), Bouchdira (2001/02) et barrage Béni Haroun (1996/97).

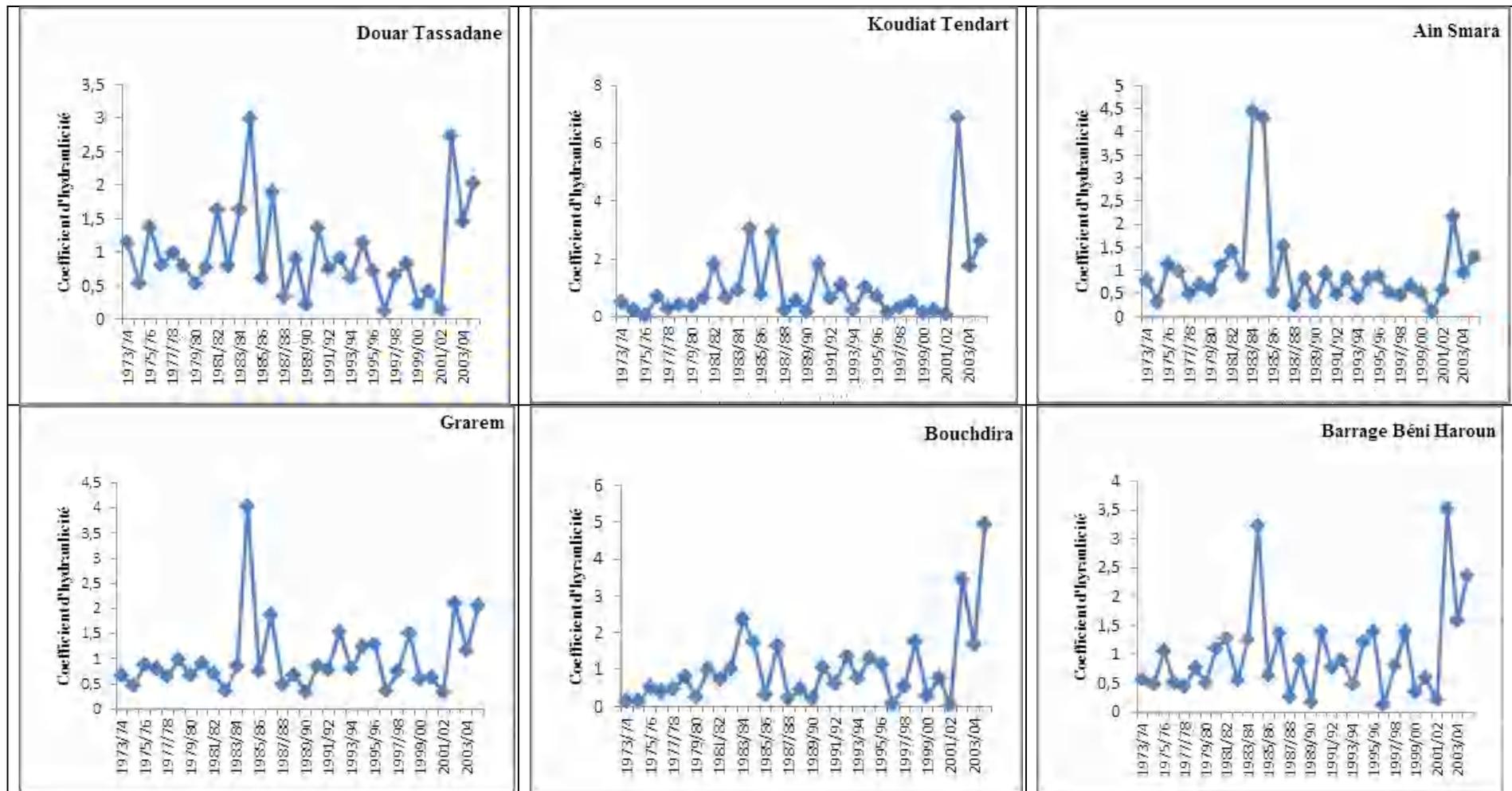


Figure 45: Variations annuelles de l'hydraulicité des stations hydrométriques (1973/74-2004/05)

2.2.1.2. Amplitude de la variabilité: valeurs moyennes et extrêmes

Les résultats des box plots (moyennes, minimums, maximums) illustrent bien la variabilité d'une année à l'autre, des débits des stations hydrométriques (Figure 46).

Les graphiques ont permis de constater que les débits les plus forts ont été marqués en 1984/85 pour les stations de Douar Tassadane et Grarem, en 1983/84 pour la station d'Ain Smara, 2004/05 pour la station de Bouchdira et 2002/03 pour la station de Koudiat Tendart et barrage Béni Haroun. Quant aux valeurs faibles des débits moyens annuels sont observés en 1996/97 pour la station de Douar Tassadane, 1975/76 pour Koudiat Tendart, 2000/01 pour la station d'Ain Smara, 2001/02 pour la station de Bouchdira et 1989/90 pour la station de Grarem.

Le paramètre du coefficient de variation a été utilisé ici, Le coefficient de variation est une mesure relative de la dispersion des données autour de la moyenne. Il permet de comparer le degré de variation d'un échantillon à un autre, même si les moyennes sont différentes. Il est à remarquer que les stations hydrométriques Koudiat Tendart et Bouchdira se caractérisent par une forte variabilité avec un coefficient de variation atteignant respectivement 1.35 et 1.03. Le coefficient de variation diminue jusqu'à 0.55 dans la station de Grarem (Figure 46).

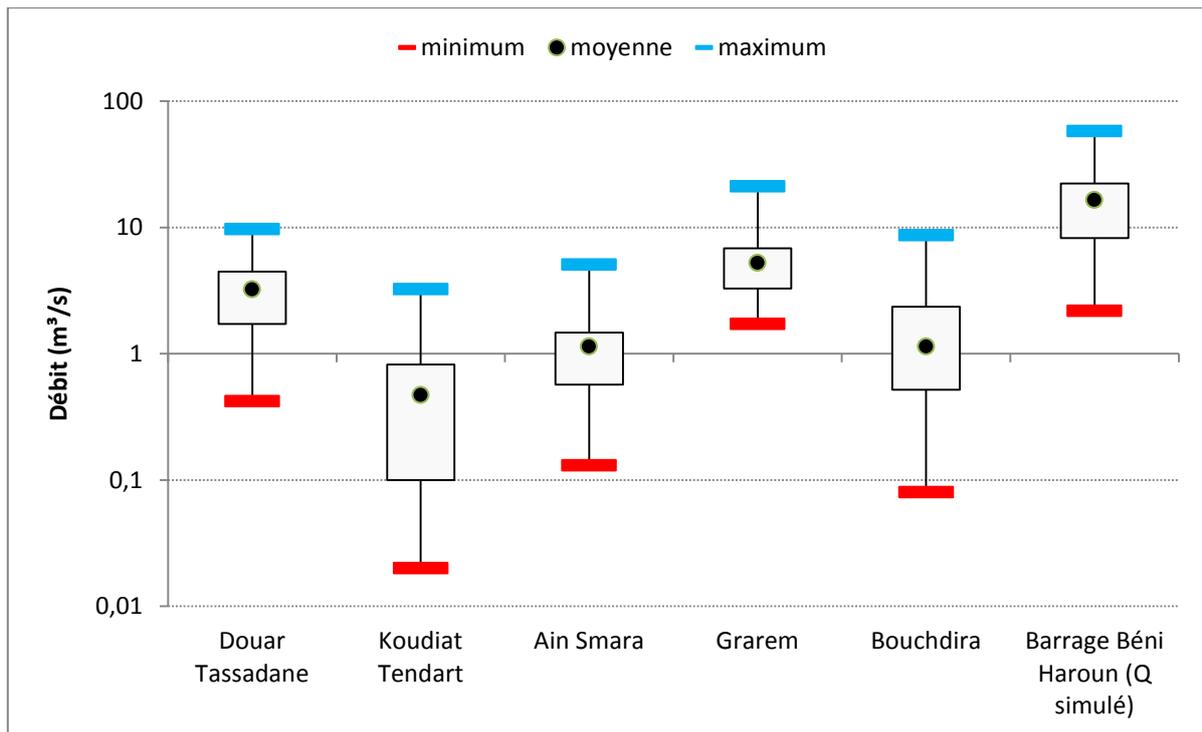


Figure 46: « Boîtes à moustaches » des débits de six stations (période: 1973/74-2004/05)

2.2.1.3. Analyse statistique des débits annuels

L'information hydrologique doit être complétée par l'estimation des débits dépassés plus fréquemment ou plus rarement. L'ajustement des débits moyens annuels permettant d'estimer les débits fréquentiels est réalisé grâce à la loi log-normale.

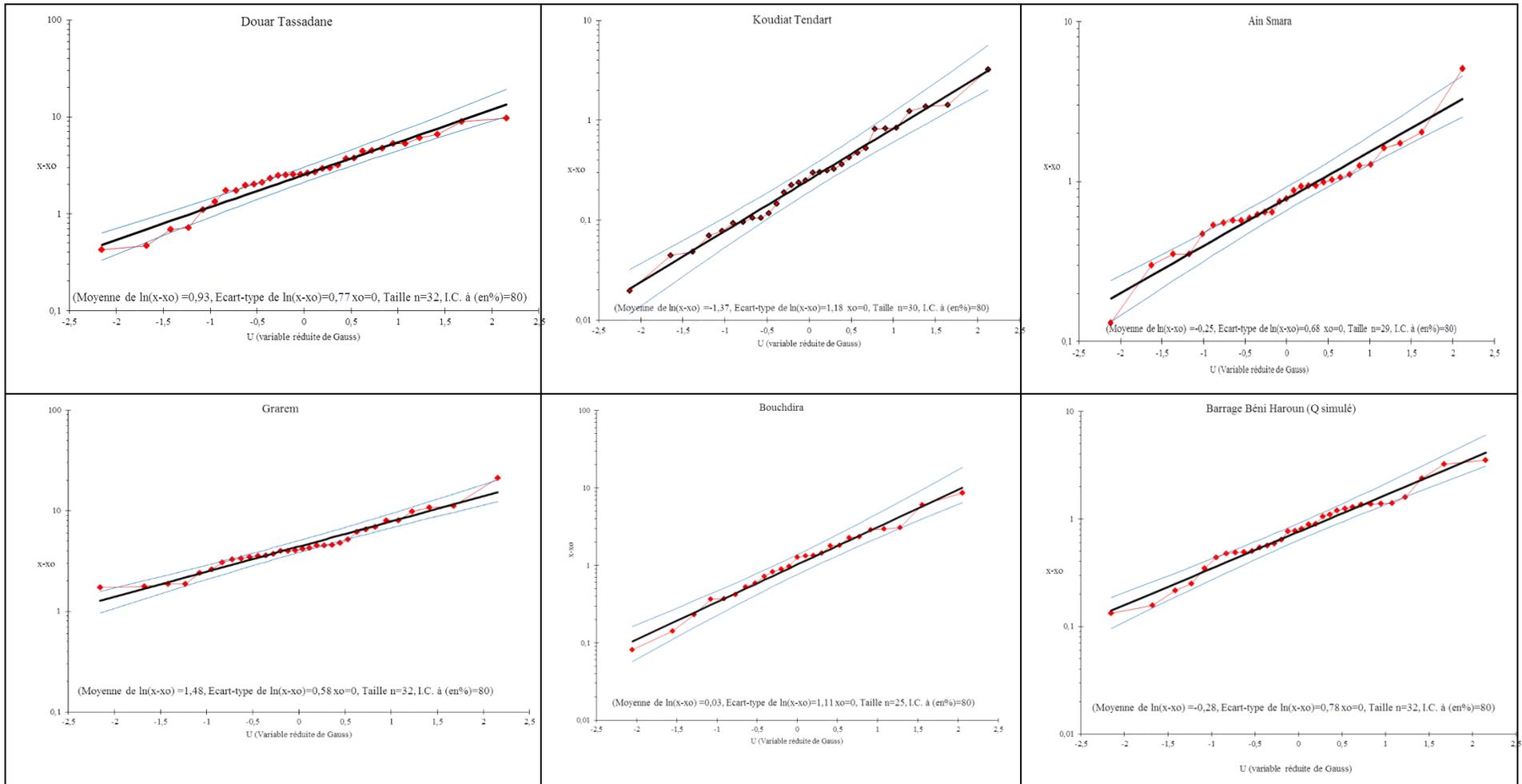


Figure 47: Ajustement des débits moyens annuels à une loi de probabilité (1973/74-2004/05)

La représentation de la loi log-normale est la suivante: La fonction de répartition est

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

L'équation de GALTON s'écrit alors :  $u = \text{alog}(Q - Q_0) + b$

a et b peuvent être représentée par :  $a = \frac{1.517}{\sqrt{\log(1 + \frac{\delta Q^2}{(\bar{Q} - Q_0)})}}$        $b = \frac{1.1513}{a} - \text{alog}(\bar{Q} - Q_0)$

$Q_0$ : Paramètre de position, estimé sur graphique.

Le graphique d'ajustement (Figure 47) confirme l'adaptation de cette loi à la distribution statistique des débits annuels dans notre région. Ainsi, on a calculé pour l'ensemble des stations, le module ayant une durée de récurrence de 2, 10, 50 et 100 ans, en année sèche et en année humide (Tableau 19 et Figure 48). Les stations Koudiat Tendart, Grarem et barrage Béni Haroun ont connu un débit de type centennal (année humide) pendant l'année hydrologique 2002/03. Par contre pour la station d'Ain Smara le débit centennale a été détecté pendant l'année hydrologique 1984/85. A noter que les deux stations Douar Tassadane et Bouchdira n'a enregistré un débit de type centennale.

Tableau 19: Débits moyens annuels ( $m^3/s$ ) et durée de récurrence (années) (Période 1973/74-2004/05)

T (an)	Année sèche			Module médian	Année humide		
	100	50	10		2	10	50
<b>F</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>
<b>U</b>	<b>-2,327</b>	<b>-2,054</b>	<b>-1,282</b>	<b>0</b>	<b>2,282</b>	<b>3,054</b>	<b>2,327</b>
<b>Douar Tassadane</b>	0,42	0,52	0,94	2,53	6,79	12,32	15,20
<b>Kouidiat Tendart</b>	0,017	0,023	0,056	0,254	1,090	2,650	3,620
<b>Ain Smara</b>	0,16	0,19	0,33	0,85	2,20	3,90	4,78
<b>Grarem</b>	1,14	1,33	2,09	4,39	9,21	14,37	16,81
<b>Bouchdira</b>	0,09	0,12	0,27	1,09	4,35	9,99	13,39
<b>Barrage Béni Haroun (Q simulé)</b>	2,01	2,49	4,57	12,50	34,19	62,67	77,62

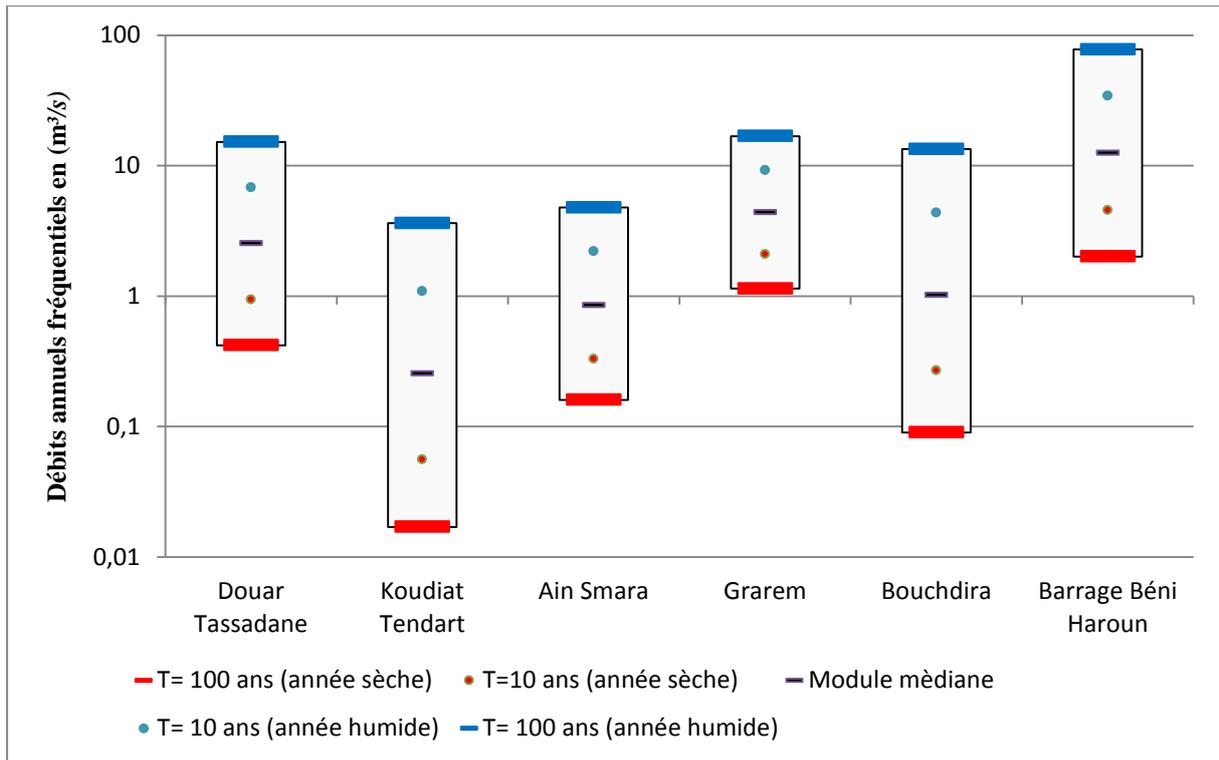


Figure 48: Répartition des débits annuels fréquentiels aux stations. Les boîtes à moustache représentent les quantiles en année humide et sèche

## 2.2.2. Les écoulements mensuels et les régimes saisonniers

### 2.2.2.1. Variations mensuelles des débits et leurs nuances spatiales

Le débit moyen mensuel se caractérise par un minimum correspond au mois d'aout, pour les stations suivantes: Douar Tassadane (0.40 m<sup>3</sup>/s), Grarem (0.94 m<sup>3</sup>/s) et Bouchdira (0.01 m<sup>3</sup>/s), les deux stations de Koudiat Tendart et Ain Smara enregistrent des débits minimums (0.10 et 0.23 m<sup>3</sup>/s) successivement au mois de juillet. Alors que les débits maximums correspondent au mois de février pour les stations de Douar Tassadane (8.16 m<sup>3</sup>/s), Ain Smara (3.05 m<sup>3</sup>/s), Grarem (10.63 m<sup>3</sup>/s), Bouchdira (5.75 m<sup>3</sup>/s) et le mois de janvier pour la station de Koudiat Tendart (1.32 m<sup>3</sup>/s) (Tableau 23 et Figure 55).

### 2.2.2.2. Méthode des CMD

Pour mieux comprendre les régimes hydrologiques, la méthode graphique qui est le coefficient mensuel de débits (CMD) a été réalisée. Cette méthode classique est basée sur les débits moyens mensuels que l'on transforme en coefficients mensuels des débits (CMD). Ces coefficients ont l'avantage de permettre la comparaison des variations saisonnières du régime des rivières de débit très différents, et aux bassins versants de tailles différents. Cette approche est à la base de classification des régimes hydrologiques dans le monde établie par (Parde, 1927).

Le coefficient mensuel des débits c'est le rapport des débits moyens mensuels au module de la période choisie, prie pour unité. Son but est la comparaison des variations des régimes de

débit de rivières, et également de permettre de différencier les périodes de hautes et de basses eaux ;

- Le CMD inférieur à l'unité correspond aux mois des basses eaux

- Le CMD supérieur à l'unité correspond aux mois des hautes eaux

En effet, le régime moyen de ce bassin à alimentation essentiellement pluviale, comporte des hautes eaux de saison humide de décembre à avril. Le maximum mensuel se situe en janvier, soit un C.M.D de 2.81 à Koudiat Tendart et 2.03 à Grarem, et le mois de février pour les autres stations; Douar Tassadane (2.52), Ain Smara (2.67), Bouchdira (3.25) et barrage Béni Haroun (2.27). Alors que le C.M.D de juillet et aout représentent le minimum mensuel d'écoulement (Figure 49 et Tableau 20).

Tableau 20: Variabilité en hautes eaux et basses eaux des débits mensuels

		Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
<b>Douar Tassadane</b>	<b>Moyenne</b>	0,85	1,02	1,52	4,23	7,08	8,16	7,08	4,97	2,08	0,98	0,50	0,40
	<b>Ecart type</b>	0,71	1,34	1,59	4,09	7,94	7,55	6,86	4,77	1,42	0,76	0,57	0,48
	<b>CV</b>	0,83	1,31	1,04	0,97	1,12	0,92	0,97	0,96	0,68	0,78	1,15	1,22
	<b>CMD</b>	0,26	0,32	0,47	1,31	2,19	2,52	2,18	1,54	0,64	0,30	0,15	0,12
<b>Kouidiat Tendart</b>	<b>Moyenne</b>	0,17	0,14	0,19	0,65	1,32	0,75	0,91	0,79	0,43	0,11	0,10	0,11
	<b>Ecart type</b>	0,19	0,20	0,38	1,46	3,60	0,99	1,60	1,19	0,58	0,09	0,14	0,19
	<b>CV</b>	1,14	1,41	2,03	2,24	2,73	1,33	1,77	1,51	1,36	0,80	1,42	1,79
	<b>CMD</b>	0,35	0,29	0,40	1,39	2,81	1,59	1,93	1,67	0,91	0,24	0,20	0,23
<b>Ain Smara</b>	<b>Moyenne</b>	0,97	0,52	0,71	1,73	1,91	3,05	1,73	1,22	0,73	0,51	0,23	0,41
	<b>Ecart type</b>	1,09	0,54	1,00	3,25	2,43	9,17	2,90	1,25	0,79	0,55	0,31	0,77
	<b>CV</b>	1,12	1,04	1,40	1,88	1,27	3,01	1,68	1,03	1,09	1,09	1,37	1,88
	<b>CMD</b>	0,85	0,45	0,63	1,52	1,68	2,67	1,51	1,07	0,64	0,45	0,20	0,36
<b>Grarem</b>	<b>Moyenne</b>	2,70	2,94	5,19	8,43	10,69	10,63	9,56	6,04	3,18	1,77	1,04	0,94
	<b>Ecart type</b>	2,34	2,33	9,49	12,61	14,17	10,40	12,17	5,85	1,89	0,98	0,80	0,75
	<b>CV</b>	0,87	0,79	1,83	1,50	1,33	0,98	1,27	0,97	0,59	0,56	0,77	0,80
	<b>CMD</b>	0,51	0,56	0,99	1,60	2,03	2,02	1,82	1,15	0,60	0,34	0,20	0,18
<b>Bouchdira</b>	<b>Moyenne</b>	0,05	0,21	1,03	3,54	4,60	5,75	2,90	2,47	0,52	0,10	0,05	0,01
	<b>Ecart type</b>	0,14	0,55	2,00	5,57	6,48	7,91	3,19	3,74	0,49	0,10	0,13	0,02
	<b>CV</b>	2,92	2,64	1,94	1,58	1,41	1,38	1,10	1,52	0,94	1,04	2,57	1,56
	<b>CMD</b>	0,03	0,12	0,58	2,00	2,60	3,25	1,64	1,40	0,29	0,05	0,03	0,01
<b>Barrage Béni Haroun (Q simulé)</b>	<b>Moyenne</b>	1,89	2,59	7,38	29,71	36,90	37,59	32,50	24,90	12,95	5,88	3,49	2,33
	<b>Ecart type</b>	1,23	4,30	10,27	41,11	49,08	34,07	30,30	21,16	9,50	4,27	2,51	1,68
	<b>CV</b>	0,65	1,66	1,39	1,38	1,33	0,91	0,93	0,85	0,73	0,73	0,72	0,72
	<b>CMD</b>	0,11	0,16	0,45	1,80	2,24	2,28	1,97	1,51	0,78	0,36	0,21	0,14

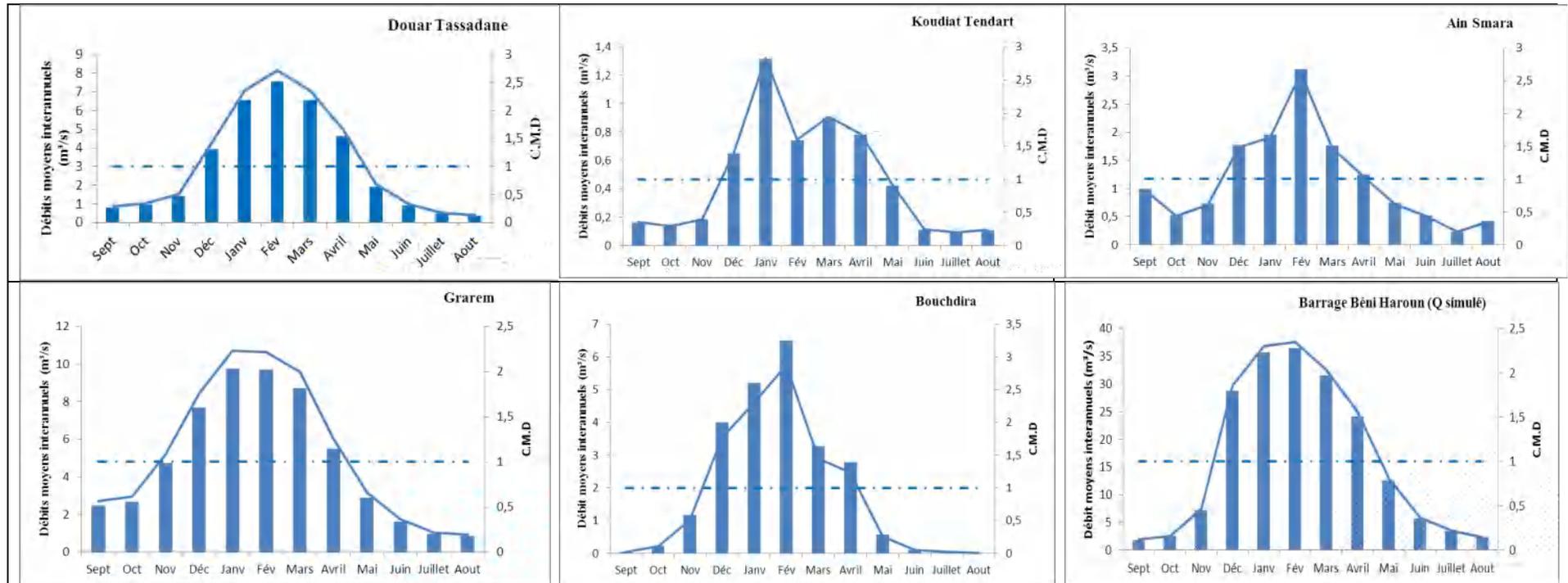


Figure 49: Variations des débits mensuels et des coefficients mensuels des débits (1973/74-2004/05)

### 3. CYCLICITE ET TENDANCE DES PLUIES ET DES DEBITS

#### 3.1. Recherche de tendance pluviométrique avec la méthode de la matrice (MGCTI)

Pour avoir une compréhension plus précise de la variabilité des données pluviométriques à l'échelle des stations pluviométriques, nous utilisons la méthode de la **matrice graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI)** qui permet de détecter les changements potentiels dans les enregistrements pluviométriques sur une période de 42 ans (1970/71-2011/12) sur les 9 stations choisies pour analyser l'évolution des pluies. Cette méthode permet d'analyser dans un premier temps la répartition spatio-temporelle puis de déterminer dans un deuxième temps les dates de changements de cycle, s'il ya des cyclicités manifestes grâce à l'analyse régionale (Nouaceur et al, 2013; Laignel et al, 2014). Cette application est dotée de deux étapes, la première consiste à classer les cumuls pluviométriques par rapport aux valeurs quintiles.

Tableau 21: Distribution et qualification des cumuls pluviométriques annuels (mm) selon les quintiles

Seuils	Q1 (mm)	Q2 (mm)	Médiane (mm)	Q3 (mm)	Q4 (mm)
<b>Distribution des valeurs en (%)</b>	<b>0-Q1 (0-20 %)</b>	<b>Q1-Q2 (20-40%)</b>	<b>Q2 à Médiane (40-50 %) Médiane à Q3 (50-60 %)</b>	<b>Q3-Q4 (60-80 %)</b>	<b>&gt; Q4 (80-100%)</b>
<b>Cumuls pluviométriques annuels</b>	Très sèches	Sèches	Normales	Humides	Très humides
<b>Tendance à la station</b>					
<b>El Kheneg</b>	441,64	538,9	584,4	721,42	955,3
<b>Hamma Bouziane</b>	415,69	483	554	596,39	932,9
<b>Chebabta</b>	286,64	386,7	420,7	485,34	603,52
<b>Boumalek</b>	374,1	473,3	520,34	610,4	1557,3
<b>Belaa</b>	263,7	306,6	404,2	503,4	653,1
<b>Tadjenamet</b>	254,8	310,3	355,7	381,8	597
<b>Mechtat El Melha</b>	208,67	250,29	286,6	346,51	549,77
<b>Ouled Naceur</b>	191,9	258,1	316,2	417,2	613,13
<b>Fourchi</b>	271,53	312,64	370,5	466,1	791,7

Un premier classement par année par rapport aux valeurs limites (Q1, Q2, Médiane, Q3 et Q4) est effectué pour toutes les stations et sur toute la série (Tableau 21). Les années dont les totaux pluviométriques sont inférieurs à la valeur limite du premier quintile (Q1) sont considérées très déficitaires (très sèches). Celles qui se placent entre le premier et le deuxième quintile (Q2) sont considérées comme déficitaires (sèches). Les années, dont la hauteur pluviométrique est comprise entre le deuxième quintile et la médiane, sont normales avec une tendance sèche. Entre l'intervalle médian et le troisième quintile (Q3), les années sont normales avec une tendance humide. Entre le troisième et le quatrième quintile (Q4) se

trouvent les années humides. Enfin, toutes les années dont les totaux pluviométriques sont supérieurs au quatrième quintile sont considérées très excédentaires (très humides).

Un deuxième traitement des valeurs (recodage) grâce à une gamme de couleurs est effectué (la couleur variant suivant la position du cumul pluviométrique annuel par rapport aux valeurs limites). Ce premier traitement est suivi d'une procédure de réordonnement (permutations de colonnes) afin d'obtenir un classement qui permet de visualiser une structure colorée homogène. Ce premier traitement permet de visualiser l'évolution du paramètre climatique selon deux dimensions (temps et espace). Pour déterminer les ruptures et les périodes caractéristiques, une deuxième procédure est entreprise. Elle consiste à affecter un nombre variant de 1 (année très sèche) à 5 (année très humide) suivant les caractères déjà déterminés et attribués à chaque année. La somme des nombres de toutes les stations pour chaque année est centrée réduite, ce qui permet d'obtenir ainsi un indice qui varie de + 1.80 pour une année très humide à - 1,80 pour une année très sèche. La projection du résultat sur un graphique permet de voir l'évolution du phénomène à une échelle régionale dans un premier temps et dans un deuxième temps, de déterminer les dates de ruptures et de changement de tendance.

La méthode de la matrice graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI) permet d'étudier la tendance des paramètres climatiques (Nouaceur et al, 2013-A, 2013-B, 2016). Elle a été appliquée aux données de précipitations du bassin Rhumel-Endja. Les résultats ont été projetés sous forme d'un tableau graphique (Figure 50). Ce dernier indique les années sèches et humides pour chaque station et pour chaque année. Le graphique de l'indice régional montre les périodes caractéristiques pour les bassins étudiés.

La variation interannuelle de la pluviométrie enregistrée aux stations pluviométriques, est caractérisée par une alternance d'années humides, normales et sèches (Figure 50). Les résultats montrent l'existence de trois périodes bien distinctes:

**La première période** débutant à partir des années 1970/71 et s'arrêtant en 1980/81, elle se démarque par une diminution assez importante de la pluviométrie annuelle, cette phase déficitaire regroupe 49 % d'années sèches très sèches, 33 % d'années humide et très humides et 18 % d'années normales.

**La deuxième période**, est caractérisée par une augmentation des années sèches et très sèches. Elle commence à partir de 1981/82 et se termine en 2001/02 (elle est marquée par une tendance sèche puisque l'indice régional est négatif sur près de 52.38 % de cette période contre 47.61 % pour les valeurs positives). La période (1997/98-2000/01) est caractérisée par des indices négatifs qui sont très élevés, elle marque une sécheresse sévère dans le bassin.

**La dernière période** de ces séries correspond au retour des pluies dans le bassin de Rhumel-Endja, elle se situe entre 2002/03 et 2011/12 (90 % des années ont un indice régional positif et très élevé). Sur l'ensemble de la série étudiée, neuf années sur dix ont un indice régional positive, le maximum de précipitations est observé dans l'année 2002/2003 puisque l'indice atteint sa plus haute valeur (1.80).

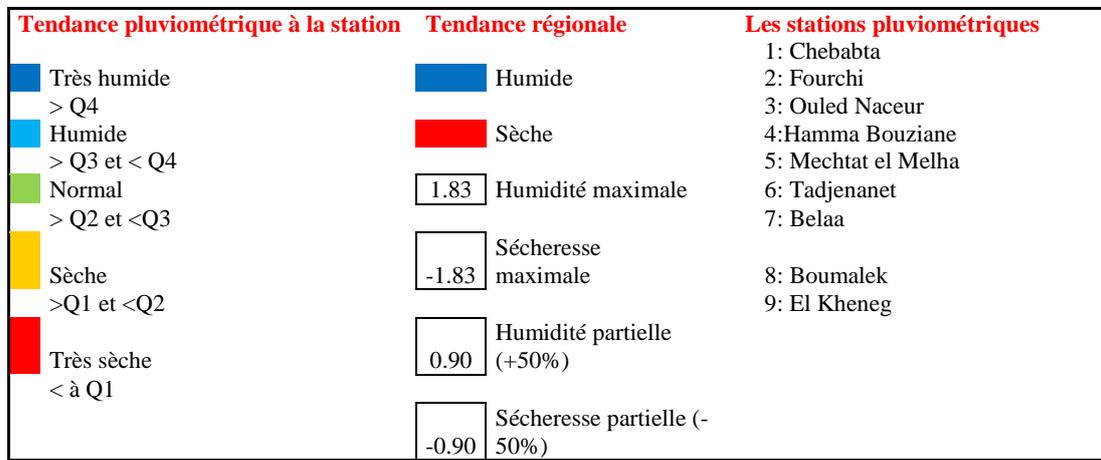
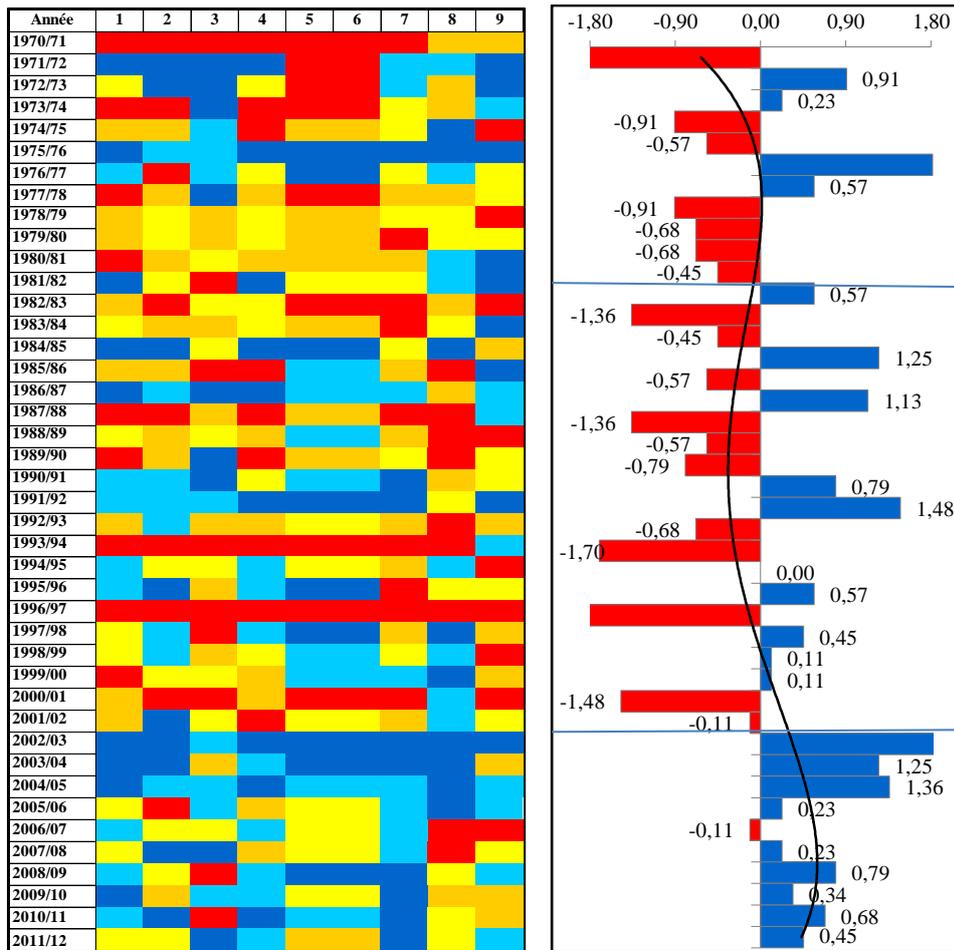


Figure 50: Matrice de Bertin appliquée aux pluies annuelles de bassins versant de Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun sur la période de 1970/71-2011/12

Les résultats produits grâce à cette méthode ont permis de déceler les différentes périodes humides et sèches. Le caractère sévère de la sécheresse apparaît entre 1987/88 à 2001/02 (caractère particulier au climat méditerranéen) et une phase humide survient à partir de l'année hydrologique 2002/03 avec une plus grande fréquence d'années humides et très humides, Les mêmes périodes ont été observées dans le Nord de l'Algérie d'après étude de

(Taibi et al, 2013; Madjereb, 2005), indique aussi une augmentation des précipitations à partir de 2002. Selon cet auteur deux périodes distinctes sont mises en évidence sur la période de référence étudiée (1936-2009) ; une période excédentaire (1936-1975) et une période déficitaire (1975-2009) et les décennies 80 et 90 étaient les plus déficitaires.

### **3.2. Recherche de tendance hydro-pluviométrique grâce à la méthode des ondelettes**

Pour mieux contraindre l'évolution temporelle de la variabilité hydro-pluviométrique dans les sous bassins d'études, la méthode des ondelettes est appliquée aux données, au pas de temps mensuel, des pluies et des débits au niveau des six sous bassins. La transformée en ondelettes continues a été utilisée en vue d'obtenir une vision plus approfondie du signal, ce qui permet d'identifier les modes de variabilité à différentes échelles (cyclicité annuelle à pluriannuelle), les éventuelles discontinuités, et les périodicités (la subdivision des périodes dépend de la date des discontinuités identifiées pour chaque sous bassin) (voir chapitre 1 pour une description détaillée de la méthode).

#### **3.2.1. Le sous bassin d'oued El Kébir-amont (Oued Endja supérieur)**

Les spectres obtenus pour le sous bassin d'oued El Kébir-amont (station de Douar Tassadane) (Figure 51) mettent en évidence des variabilités communes des paramètres climatiques pluie et débit. Ces fluctuations se traduisent par différents modes de variabilité à l'échelle annuelle à pluriannuelle (1an, 1-2 ans et 2-4 ans).

Les modes de variabilité (1 an, 1-2 ans, 2-4 ans) pour les débits concernent les années de 1981/82 à 1984/85. Nous retrouvons aussi ces modes de variabilités (forte énergie) au-delà de l'année 2002/03. La bande 2-4 ans se révèle sur le spectre après les années 2002/03 et entre 1981/82 à 1984/85. Dans le spectre en ondelettes des pluies, les modes (1 an et 1-2 ans) ont été observés entre les années 1981/82-1987/88 et après 2002/03 avec une forte énergie. La phase avant 1981/82 est caractérisée par une faible énergie qui correspond à la phase déficitaire (Lakache et al, 2019).

#### **3.2.2. Le sous bassin d'oued Bouselah**

Le spectre en ondelettes de la pluie pour le sous- bassin d'oued Bouselah (station de Koudiet Tendart) (Figure 52) montre trois bandes de variabilité. La bande de 1 an correspond au cycle hydrologique, elle est marquée avec d'une forte atténuation entre 1979/80 - 1987/88 et après 2002/03. Les bandes interannuelles (1-2 ans et 4-8 ans) se caractérisent par une forte puissance d'énergie qui apparait après la période 2002/03.

Dans le spectre en ondelettes des débits, les bandes d'énergies ne sont pas similaires à ceux présentés pour la série des pluies. On retrouve le cycle hydrologique (1an) et les fluctuations d'échelle interannuelle avec une forte puissance d'énergie (1-2, 2-4 et 4-8 ans) observées entre 1984/85-1985/86 et après 2002/03. La bande 8-10 ans est détectée selon une forte puissance seulement pour le bassin de l'oued Bouselah (station Koudiat Tendart), après les années 2002/03 (cette période correspond aux années humides) (Lakache et al, 2019) (Figure 52).

### **3.2.3. Le sous bassin d'oued Rhumel Seguin**

Le spectre en ondelette de la série pluie de la station d'Ain Smara (Figure 53), présente plusieurs bandes de fréquences. La bande annuelle (1an) qui est correspond au cycle hydrologique est bien présenté, elle est aussi bien structurée durant toute la période avec quelques discontinuités pendant les années sèches. La bande interannuelle (1-2 ans), se présente par une puissance forte d'énergie durant la période 2002/03- 2004/05, cette bande est quasiment absente durant la période sèche 1973/74-1983/84. La bande interannuelle (4-8 ans) se présente par une puissance forte durant les périodes humides 2002/03-2004/05.

Trois périodes principales sont mises en évidence par les spectres en ondelette pour les débits : la première est identifiée avant l'année 1982/83; elle se distingue par l'absence des bandes fréquentielles. La deuxième période est visible entre 1983/84-1984/85 ; elle est caractérisée par une forte énergie sur les fluctuations 1 an, 1-2 ans, 2-4 ans, 4-8 ans et 8-10 ans. Enfin, la période après 1984/85 se caractérise par l'absence de bandes fréquentielles (Figure 53).

### **3.2.4. Le sous bassin Rhumel aval**

Les spectres en ondelettes des pluies mettent en évidence trois phases principales. Une phase avant 1983/84 caractérisée par une faible énergie. Une deuxième phase est visible entre 1984/85 et 2000/01, elle se distingue par un forte d'énergie sur la fluctuation de périodes de 1 an et 1-2 ans. Une troisième phase concerne les années postérieures à 2002/03; elle est caractérisée par une forte énergie sur la fluctuation de la période de 1 an, 1-2 ans, et une faible énergie sur la fluctuation de 4- 8 ans (Figure 54).

Le spectre en ondelettes de débit de la station de Grarem présente cinq bandes (1an ; (cycle hydrologique) et les bandes interannuelles des périodes (1-2ans), (2-4ans), (4-8ns) et (8-10 ans). Ces bandes sont caractérisées par une forte puissance d'énergie dans les années 1983/84 à 1984/85 (Figure 54).

### **3.2.5. Le sous bassin d'oued Smendou**

Le spectre en ondelettes de débit pour le sous-bassin d'oued Smendou (station Bouchdira) (Figure 55) est caractérisé par trois périodes. La première concerne les années avant 1983/84 avec la perte totale d'énergie, cette période correspond à la période sèche. La seconde période concerne les années entre 1984/85-2001/02, elle est caractérisée par une faible énergie (fréquence 1 an). Une troisième période concerne les années après 2002/03, elle est caractérisée par une forte puissance d'énergie des fluctuations de périodes de 1an, 1-2 ans et 2- 4 ans.

Dans le spectre en ondelettes des pluies, les modes (1 an et 1-2 ans) ont été observés entre les années 1984/85-2001/02 et après 2002/03 avec une forte énergie. La phase avant 1984/85 est caractérisé par une faible énergie correspond à la phase déficitaire (Figure 55).

### **3.2.6. Barrage Béni Haroun**

Le spectre en ondelettes des pluies se caractérise par trois périodes distinctes: la première concerne les années avant 1983/84, caractérisée par une faible énergie sur la fluctuation de période 1 an, et une perte d'énergie avant 1975. La seconde période est visible entre 1984/85-1994/95 ; elle est caractérisée par une forte énergie sur la fluctuation de périodes de 1-2 ans. La troisième partie concerne les années après 2002/03, caractérisée par une faible énergie. (Figure 56).

Trois périodes caractéristiques ont été observées dans le spectre en ondelettes des débits : la première période, bien marquée avant l'année 1983/84, est caractérisée par une faible énergie sur la fluctuation 1 an. La deuxième période est identifiée entre 1984/85 et 2001/02, et se distingue par une forte énergie sur les fluctuations 1 an, 1-2 ans et 2-4 ans. La troisième période commence après l'année 2002/03, et est caractérisée par une perte totale d'énergie (Figure 56).

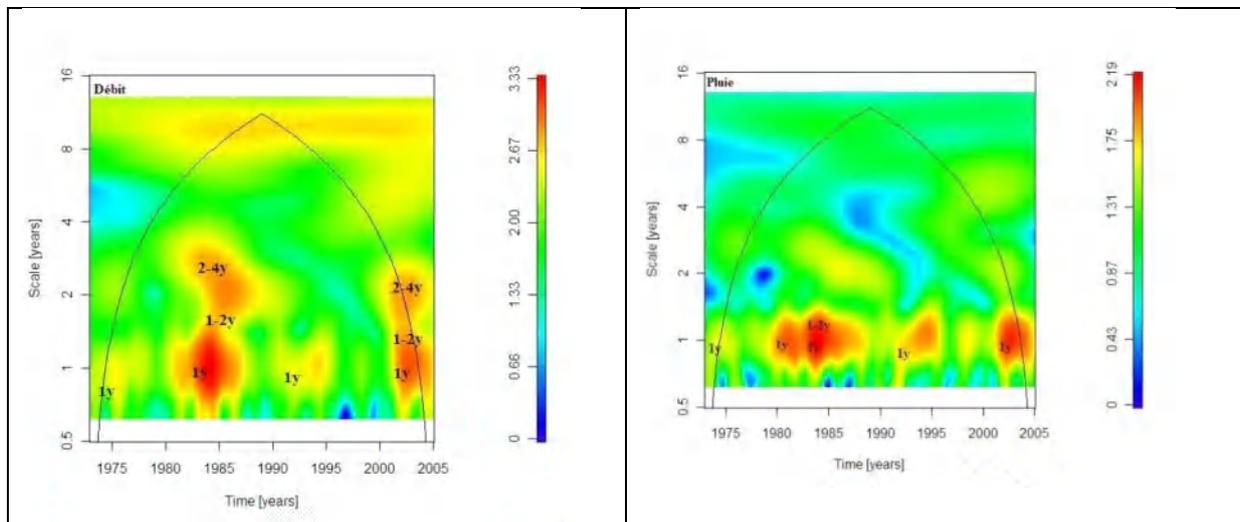


Figure 51: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin d'oued El Kébir amont à Douar Tassadane

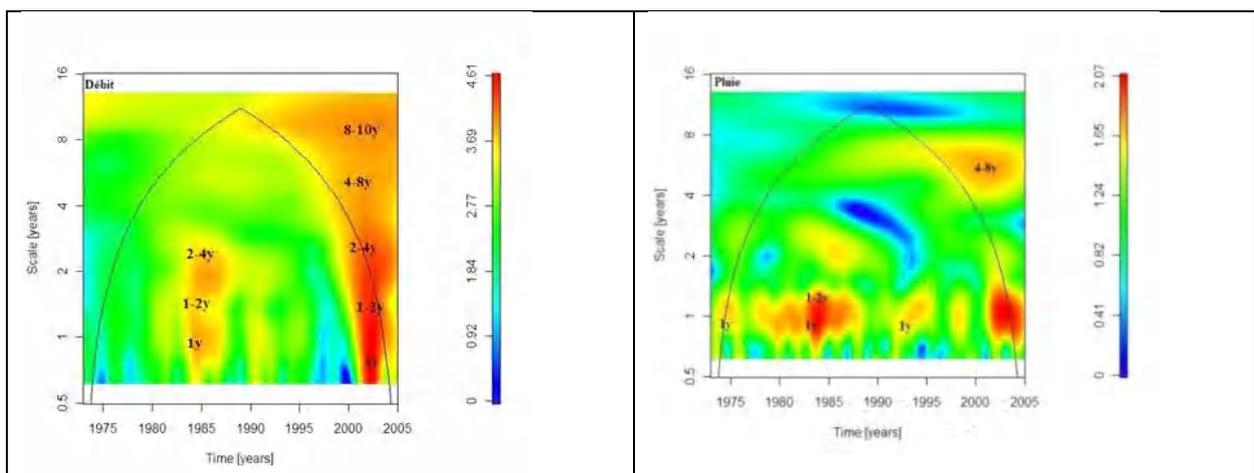


Figure 52: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin d'oued Bouselah à Koudiat Tendart

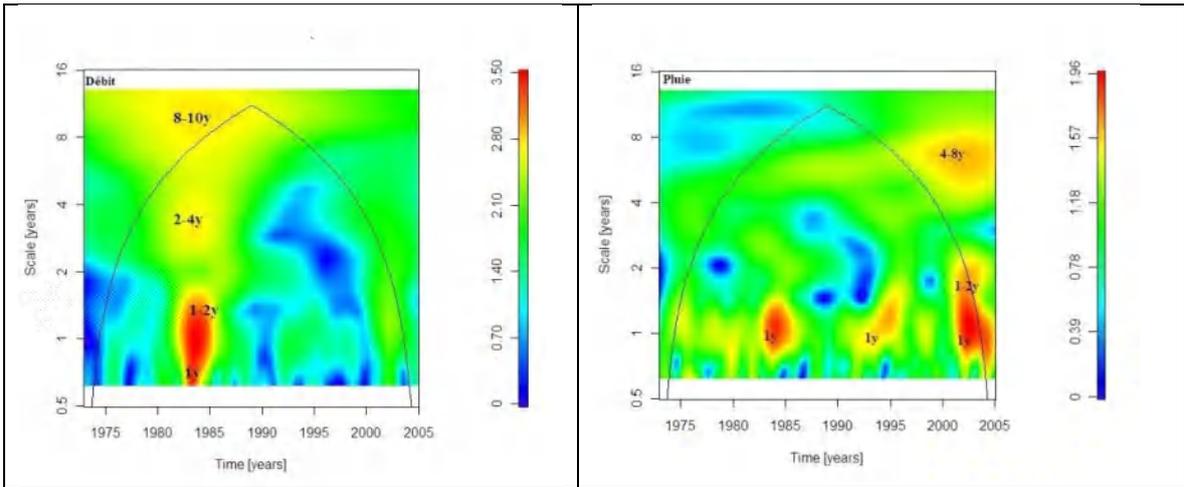


Figure 53: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin d'oued Rhumel Seguin à Ain Smara

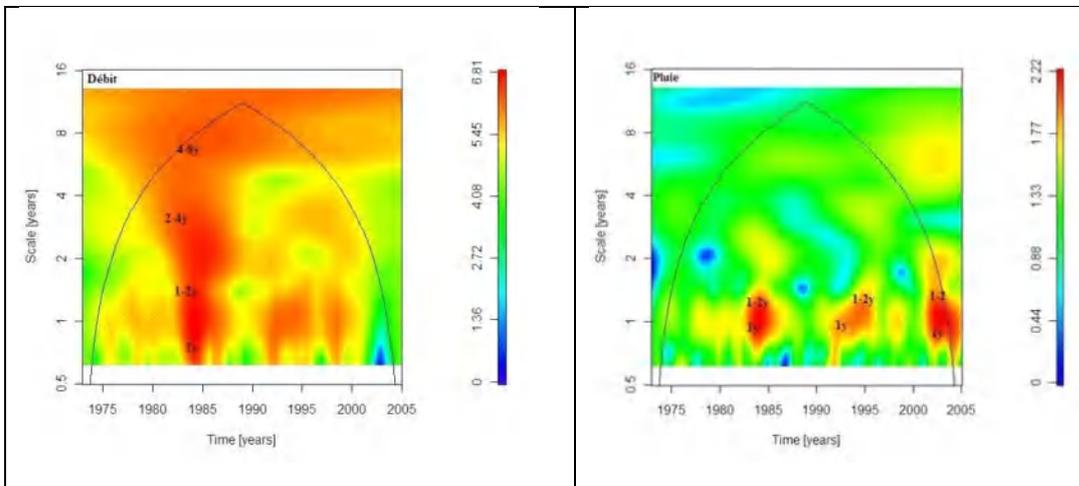


Figure 54: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin Rhumel aval à Grarem

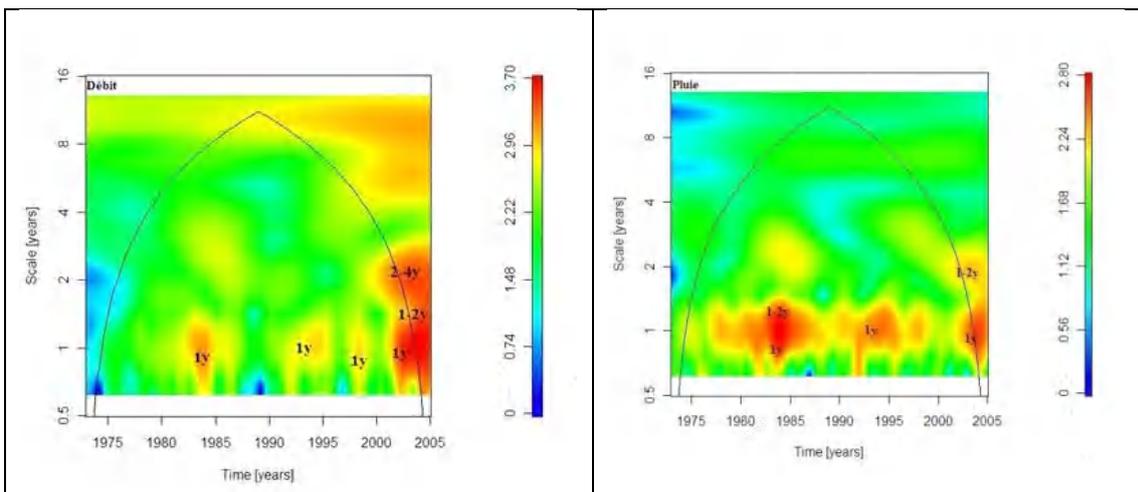


Figure 55: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin d'oued Smendou à Bouchdira

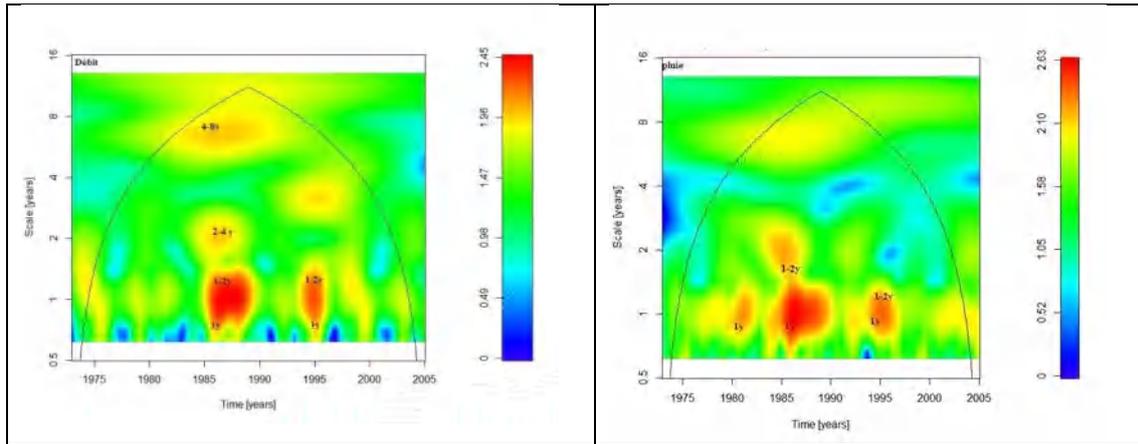


Figure 56: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du barrage Béni Haroun ( $Q$  simulé Loi Eau)

L'analyse de la transformée en ondelette a permis d'indiquer que l'évolution **des pluies** des sous bassins versants est structurée par plusieurs modes de variabilité, s'exprimant pour différentes échelles temporelles (Tableau 22).

Des fluctuations communes ont été enregistrées au niveau de tous les sous bassins versants : le cycle hydrologique annuel, et les fluctuations d'échelle interannuelle à 1-2 ans .

-La fluctuation d'échelle pluriannuelle à 4-8 ans ne s'observe pas dans le sous bassin d'Oued El Kébir amont à Douar Tassadane, Oued Smendou à Bouchdira et barrage Béni Haroun.

**Pour les débits**, des fluctuations communes ont été enregistrées à travers toutes les séries de débit, tandis que d'autres (comme la fréquence 8-10 ans) semblent être plus spécifiques à certains sous bassins versants; à savoir le sous bassin de Bouselah à la station de Koudiat Tendart, Oued Rhumel Seguin à Ain Smara et Rhumel aval à la station de Grarem, Ceci peut s'expliquer par des contraintes topographiques spécifiques à ces sous bassin.

Afin de comprendre l'origine de la structuration observée dans les débits des sous bassins versants des oueds El Kébir amont (Oued Endja supérieur), Bouselah, Rhumel Seguin, Rhumel aval , Smendou et la barrage de Béni Haroun, les modes de variabilité des débits ont été comparés à ceux obtenus pour les précipitations.

Le cycle annuels à pluriannuels (1 an, 1-2 ans) communs entre les sous bassins ont été marqués, par quelques différences, comme la présence de fluctuations qui ne sont pas ou peu observer dans les précipitations,

D'autres fois, on retrouve des fluctuations dans les pluies, et qui ne sont pas identifiées dans les débits. Par exemple, la fluctuation de période de 2-4 ans ne s'observe que dans les pluies de Douar Tassadane. Dans le bassin d'oued Bouselah à Koudiat Tendart et Oued Rhumel aval à Grarem, le mode de variabilité 8-10 ans s'observe seulement dans les débits. Ce qui pourrait être lié aux facteurs internes de ce bassin (géologie et l'occupation du sol).

Tableau 22: Synthèse de comparaison entre les pluies et les débits du bassin Rhumel-Endja

	Pluie			Débit		
	Mode de variabilité	Périodes de forte et faible énergie	Tendance (sèche ou humide)	Mode de variabilité	Périodes de forte et faible énergie	Tendance (sèche ou humide)
<b>Oued El Kébir amont (Oued Endja supérieur)</b>	1 an, 1-2 ans  1an	Forte énergie entre 1981/82-1987/88 et après 2002/03  Faible énergie Avant 1981/82 et entre 1995-2001/02	Tendance humide  Tendance sèche	1 an, 1-2 ans, 2-4 ans	1981/82-1984/85  Après de l'année 2002/03	Tendance humide
<b>Oued Bouselah</b>	1an, 1-2 ans et 4-8 ans	-Entre 1979/80-1987/88 et après 2002/03	Tendance humide	1an, 1-2 ans, 2-4 ans, 4-8 ans et 8-10 ans	Entre 1984/85-1985/86 et après 2002/03	Tendance humide
<b>Oued Rhumel Seguin</b>	1an, 1-2 ans, 4-8 ans	Entre les années 2002/03 et 2004/05  Faible énergie avant 1983/84 et entre 1985/86 et 2000/01	Tendance humide  Tendance sèche	1an, 1-2 ans, 2-4 ans, 4-8 ans et 8-10 ans	entre 1983/84-1984/85	Tendance humide
<b>Oued Rhumel aval</b>	1an, 1-2 ans et 4-8 ans	Forte énergie avant 1984/85 et après 2002/03	Tendance humide	1an ; 1-2 ans, 2-4 ans, 4-8 ans et 8-10 ans	Forte énergie entre les années 1983/84-1984/85	Tendance humide
<b>Oued Smendou</b>	1 an, 1-2 ans  1 an	Forte énergie entre les années 1984/85-2001/02 et après 2002/03  Avant les années 1984/85	Tendance humide  Tendance sèche	1an, 1-2 ans, 2-4 ans  1an	Forte énergie pendant l'année 1984/85 et après les années 2002/03  Faible énergie entre les années 1985/86-2001/02	Tendance humide  Tendance sèche
<b>Barrage Béni Haroun</b>	1an et 1-2 ans	Forte énergie entre les années 1984/85-1994/95	Tendance humide	1 an, 1-2 ans et 2-4 ans	Forte énergie entre les années 1984/85 et 2001/02	Tendance humide

### 3.3. Relation pluie-débit

#### 3.3.1. Relation pluie-débit selon la méthode des écarts centrés réduits

Afin d'étudier et de déterminer les différentes phases des cycles de déficit et d'excédent pour les pluies et les débits, nous avons calculé les indices centrés réduits pour les sous bassins : Oued El Kébir amont à Douar Tassadane (Figure 57), Oued Bouselah à Koudiat Tendart

(Figure 58), Oued Rhumel Seguin à Ain Smara (Figure 59), Oued Rhumel aval à Grarem (Figure 60), Oued Smendou à Bouchdira (Figure 61) et barrage Béni Haroun (Figure 62).

#### 3.3.1.1. *Le sous bassin d'oued El Kébir amont (Oued Endja supérieur)*

Le graphique établie pour sous bassin Oued El Kébir amont à Douar Tassadane montre une première phase sèche comprise entre 1973/74 et 1980/81 (seule l'année 1975/76 est humide). La deuxième phase concerne la décennie (1981/82 et 1991/92). Cette période montre une succession d'années excédentaires et déficitaires pour les deux paramètres étudiés. La troisième phase comprise entre les années 1992/93 et 2001/02 est plus marquée par la sécheresse. Enfin, une quatrième période qui montre un retour des pluies apparaît entre les années 2002/03 et 2004/05 (Lakache et al, 2019) (Figure 57).

#### 3.3.1.2. *Le sous bassin d'oued Bouselah*

Les courbes des débits et des pluies de la station Koudiat Tendart montrent les mêmes caractéristiques déjà observées pour la station de Douar Tassadane. Une première phase déficitaire est notée entre 1973/74 à 1983/84 (seules deux années sont humides 1975/76 et 1981/1982). Une deuxième phase qui commence en 1984/85 et se termine en 1991/92, montre une succession de cycles court d'années excédentaires et déficitaires. La troisième phase concerne les années comprises entre 1992/93 et 2001/02. Cette période est marquée par une importante sécheresse même si quelques années sont dotées d'une bonne pluviométrie et un d'écoulement important, comme ce fut le cas pour l'année 1990/1991. Sur la dernière période, 2002/03 et 2004/05, nous retrouvons les mêmes fluctuations déjà évoquées à la station Douar Tassadane (un retour de la période humide) (Lakache et al, 2019) (Figure 58).

#### 3.3.1.3. *Le sous bassin d'oued Rhumel Seguin*

Il se caractérise par une première phase sèche qui concerne les années entre 1973/74 et 1983/84 (l'année 1983/84 humide pour les débits et sèche pour les pluies). La deuxième phase qui concerne les années entre 1984/85 et 2001/02, montre une succession de cycles d'années excédentaires et déficitaires. Sur la dernière période, qui montre un retour des pluies apparaît entre les années 2002/03 et 2004/05 (Figure 59).

#### 3.3.1.4. *Le sous bassin de Rhumel aval*

Les moyennes annuelles des deux paramètres (pluie-débit) se caractérisent par une première phase déficitaire, qui s'étend de 1973/74 à 1983/84 avec la présence d'une année excédentaire (1975/76) pour les pluies. Une deuxième phase qui, commence en 1984/85 et se termine en 2001/02, indique une succession des années excédentaires et déficitaires. La troisième phase, qui concerne les années après 2002/03, est caractérisée par une phase humide (Figure 60).

#### 3.3.1.5. *Le sous bassin d'Oued Smendou*

Le sous bassin de l'oued Smendou se caractérise par trois périodes : la première concerne est caractérisée les années 1973/74/-1983/84 elle comporte des années déficitaires et une année excédentaire en 1975/76, La deuxième période est marquée par une succession des années

sèches et humides, de 1984/85 jusqu'à 2001/02. Sur la dernière période, on note un retour des pluies entre les années 2002/03 et 2004/05 (Figure 61). Ces fluctuations sont liées aux alternances 2 - 4 ans déjà observées lors des traitements déjà effectués (Analyse en ondelette).

### 3.3.1.6. Barrage Béni Haroun (Débit simulé par modèle LOIEAU)

Les moyennes annuelles de deux paramètres se caractérisent par une première phase excédentaire, qui s'étend de 1973/74 à 1983/84 avec la présence d'une année excédentaire 1975/76 pour les pluies et l'année 1981/82, Pour les débits. Une deuxième phase qui, commence en 1984/85 et se termine en 2001/02, indiquant une succession des années excédentaires et déficitaires pour les pluies et pour les débits. La troisième phase, qui concerne les années après 2002/03, elle est caractérisée par la phase humide pour les pluies et les débits simulés du barrage de Béni Haroun (Figure 62).

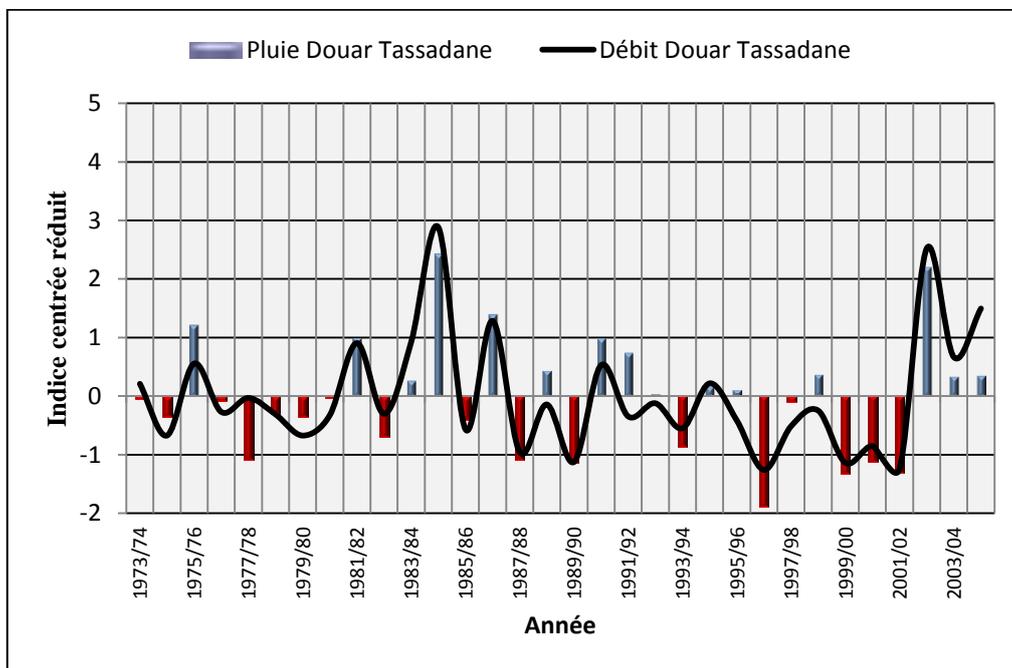


Figure 57: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin d'oued El Kébir amont (Oued Endja supérieur)

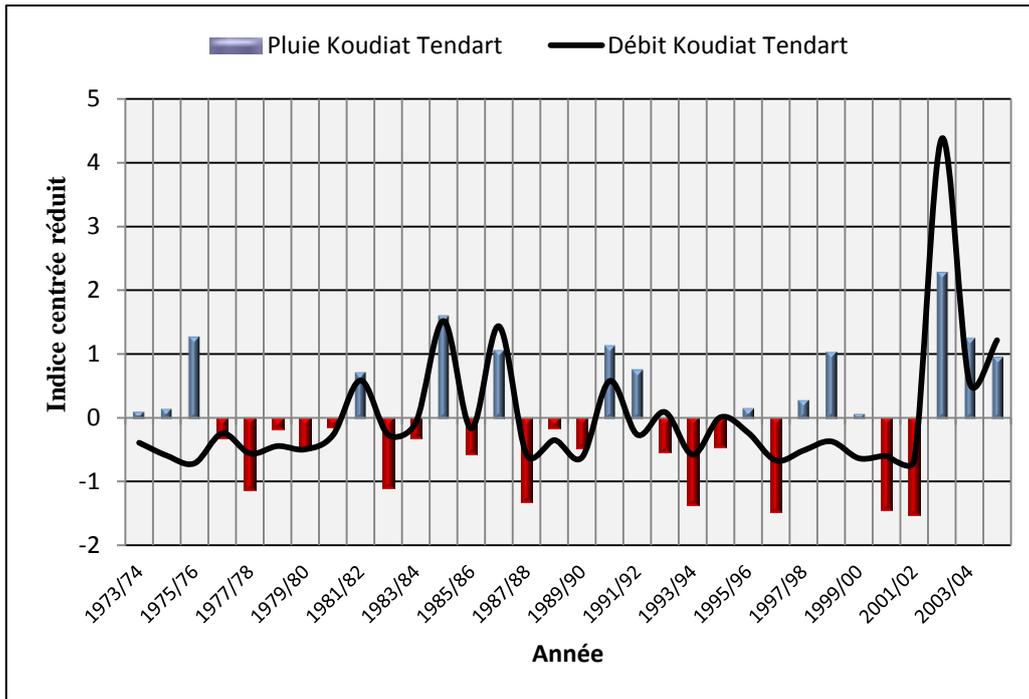


Figure 58: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin de Bouselah

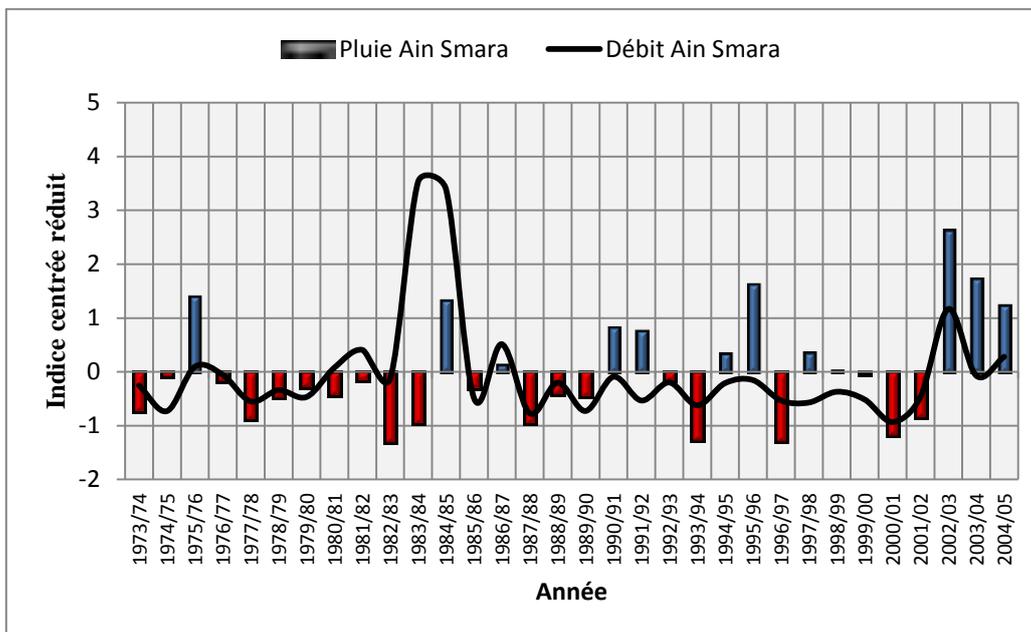


Figure 59: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin de Rhumel-Seguin

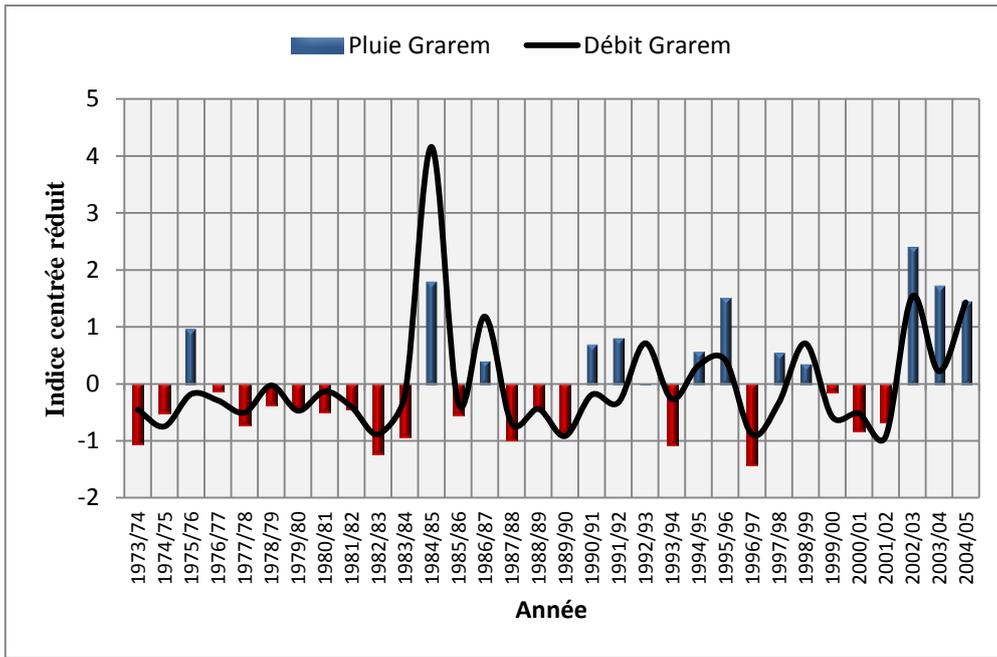


Figure 60: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin d'oued Rhumel aval

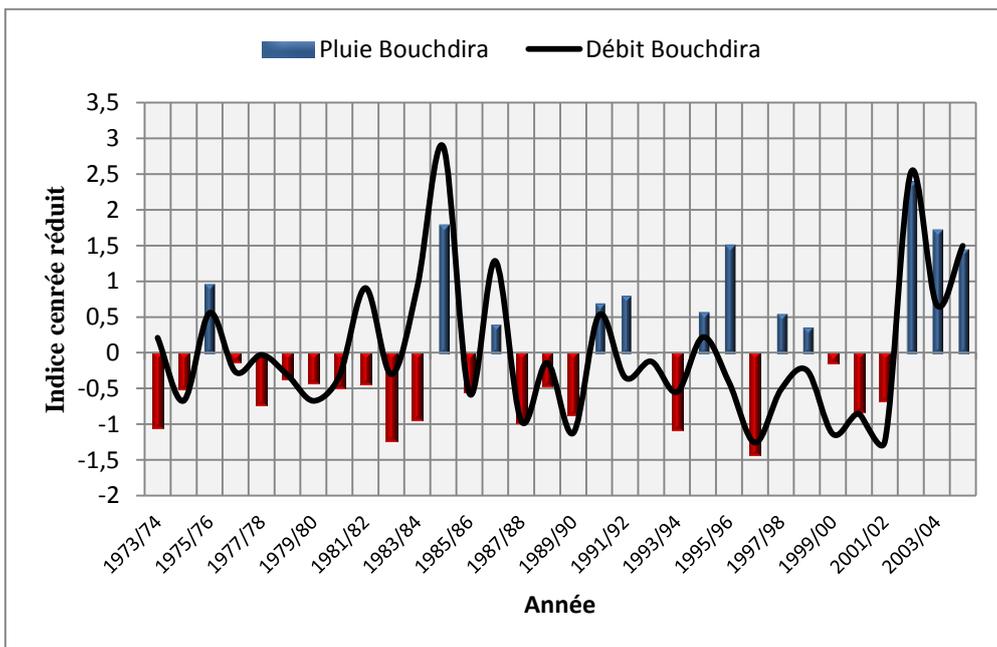


Figure 61: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin d'oued Smendou

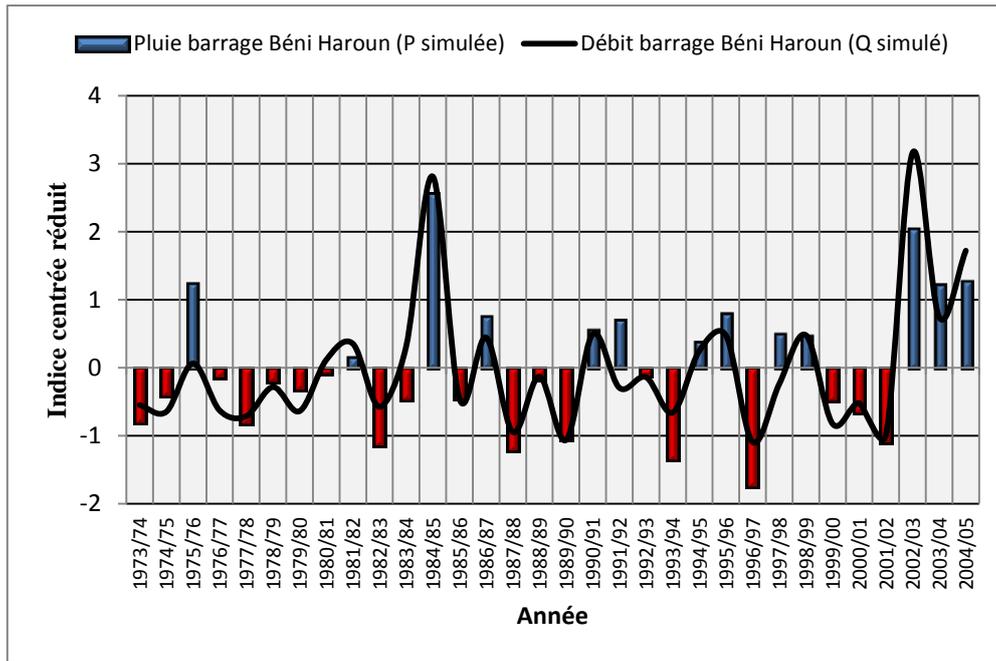


Figure 62: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau du barrage de Béni Haroun

Les résultats des centrés réduits annuels de la réponse « pluie-débit » montrent une relation très forte lors des différentes périodes extrêmes (années excédentaires et déficitaires). Cette relation s'atténue parfois lorsque l'intensité des pluies diminue (la réponse des débits paraît moins affirmée). Ces cycles correspondent bien à la présence ou l'absence de la réponse du signal « pluie-débit », donnée par l'analyse en ondelettes continues. Toutefois, quelques discordances sont notées lors d'année particulière.

À partir des variables centrées réduites, l'évolution de la variabilité des débits/précipitations pour l'ensemble des sous bassins versants s'inscrit dans un schéma presque identique avec quelques décalages des années; deux périodes ont été identifiées (Tableau 23):

- La première période de forts débits/ précipitations est correspond bien aux années 2002/03-2004/05 pour tous les sous bassins étudiées.

- La seconde période (1973/74 -1983/84) concerne toutes les stations, elle est marquée par un cycle sec sauf le sous bassin de l'oued El Kébir amont (la phase sèche comprise entre 1973/74-1980-81).

- La période située entre 1983/84 et 2001/02 est une alternance de périodes de faible/fort (débit et précipitation), Ces différences peuvent être expliquées par le différent contexte géomorphologique des sous bassins versants et aux caractéristiques météorologiques locales (Tableau 23).

Tableau 23: Synthèse de la variabilité des débits et des pluies du bassin Rhumel-Endja (période commune : 1973/74-2004/05)

Sous bassin	Période sèche	Succession des années humides Et sèches	Période humide
Oued El Kébir amont	1973/74-1980/81 1992/93-2001/02	1981/82-1991/92	Après 2002/03
Oued Bou Seleh	1973/74-1983/84 1992/93-2001/02	1984/84-1991/92	Après 2002/03
Oued Rhumel Seguin	1973/74-1983/84	1984/85-2001/02	Après 2002/03
Oued Rhumel aval	1973/74-1983/84	1984/85-2001/02	Après 2002/03
Oued Smendou	1973/74-1983/84	1984/85-2001/02	Après 2002/03
Barrage Béni Haroun (Q simulé par modèle LOIEAU)	1973/74-1983/84	1984/85-2001/02	Après 2002/03

### 3.3.2. Relation pluie-débit selon la méthode des cohérences en ondelettes

Pour caractériser la variabilité commune (ou différente) entre les deux signaux (pluie, débit) et estimer l'impact des modes de variabilité des précipitations sur la variabilité des débits et la quantification simple du degré de la corrélation, on a utilisé l'analyse de la cohérence par ondelettes. Cette méthode permet de caractériser le degré de linéarité entre deux processus à certaines échelles et pour certains intervalles de temps (Dieppoï et al, 2010). Une valeur comprise entre 0 et 1 est proposée suivant le degré de corrélation linéaire des variables comparées (voir chapitre 1 pour une description détaillée de la méthode).

Les résultats de la cohérence en ondelettes des débits et des pluies indiquent que la variabilité des débits a une forte relation avec les pluies, observées essentiellement dans les quatre sous bassins du Nord (Oued El Kébir amont, Oued Bouselah, Oued Rhumel aval et Oued Smendou). En revanche, la corrélation est moins forte pour les autres sous bassins (Oued Rhumel Seguin et Oued Bouselah) mais les pourcentages de cohérence restent à un niveau > 50 % (en vert sur les spectres). On notera aussi la présence de la perte des cohérences des débits avec les précipitations (signifie en bleu), sur les spectres aux différentes échelles du temps observé pour tous les sous bassins, sous bassin de l'oued El Kébir amont à Douar Tassadane (avant 1980), oued Bouselah à Koudiat Tendart sur la période d'avant 1980 et entre 1993/94-2001/02, oued Rhumel Seguin (Ain Smara) sur la période (après 1985) et oued Smendou à Bouchdira sur la période (1990/91-1991/92 et avant 1975) (Figure 63). Ces pertes de la cohérence, ou bien sa diminution sur quelques années peuvent être liée à la récurrence des sécheresses climatique, En effet, ces sous bassins sont situées dans des zones climatiques de type « semi-aride méditerranée » caractérisées par une forte variabilité pluviométrique. La

perte de cohérence enregistrée sur les graphiques des ondelettes semble correspondre à des périodes d'aridité comme nous retrouvons aussi ces périodes sèches sur les séries centrées réduites des pluies et des débits.

La forte cohérence observée entre la variabilité des débits et des pluies suggère une influence de la variabilité du climat sur la réponse hydrologique des sous bassins. Cette influence peut être estimée globalement en calculant la cohérence débits/pluies pour chacune des bandes de fréquence sur la période d'étude (Tableau 24). Nous pouvons remarquer que la cohérence totale entre la variabilité des débits et des pluies, pour les différentes échelles annuelles à pluriannuelles observées, est comprise entre 90.45 % au sous bassin El Kébir amont dans le Nord du bassin (Oued Endja supérieur) et 68.49 % au sous bassin Oued Rhumel Seguin dans les Hautes Plaines. Cette cohérence est importante dans toutes les bandes fréquentielles de l'échelle annuelle à l'échelle pluriannuelle. Par exemple, La bande fréquentielle de 1 an est caractérisée par une forte cohérence pour les sous bassin de l'oued El Kébir amont à la station de Douar Tassadane (95.96 %), O. Rhumel Seguin à Ain Smara (80.69%), O. Rhumel aval à Grarem (93.72 %), O. Smendou à Bouchdira (93.26 %) et barrage Béni Haroun (93.41%). La bande 2-4 ans indique une forte cohérence pour le sous bassin de l'oued Bouselah à la station de Koudiat Tendart (80.73 %).

Malgré les pertes de cohérence observées, il apparait que la variabilité des débits aux sous bassins est très fortement influencée par la variabilité des précipitations. Il reste une part de de la variabilité observée de ce paramètre hydrologique qui peut être attribuée aux autres facteurs cités précédemment.

Tableau 24: Les degrés de la linéarité entre les pluies et les débits (1973/74-2004/05)

Echelle du temps	O. Kebir amont à Douar Tassadane	O. Bouselah à Koudiat Tendart	O. Rhumel Seguin à Ain Smara	O. Rhumel aval à Grarem	O. Smendou à Bouchdira	Barrage Béni Haroun (Q simulé Loi Eau
Totale	<u>90.45%</u>	75.03%	<u>68.59%</u>	87.18 %	82.57 %	89.05%
1 an	<b>95.96%</b>	77.31%	<b>80.69%</b>	<b>93.72 %</b>	<b>93.26 %</b>	<b>93.41%</b>
1-2 ans	94.59 %	76.94%	77.56%	92.02 %	91.43 %	93.25%
2-4 ans	<b>90.26 %</b>	<b>80.73%</b>	66.39%	84.06 %	82.18 %	83.78%
4-8 ans	84.22 %	72.92%	<b>64.70%</b>	83.81 %	73.86 %	89.68%
8-10 ans	/	/	/	/	73.69 %	85.84

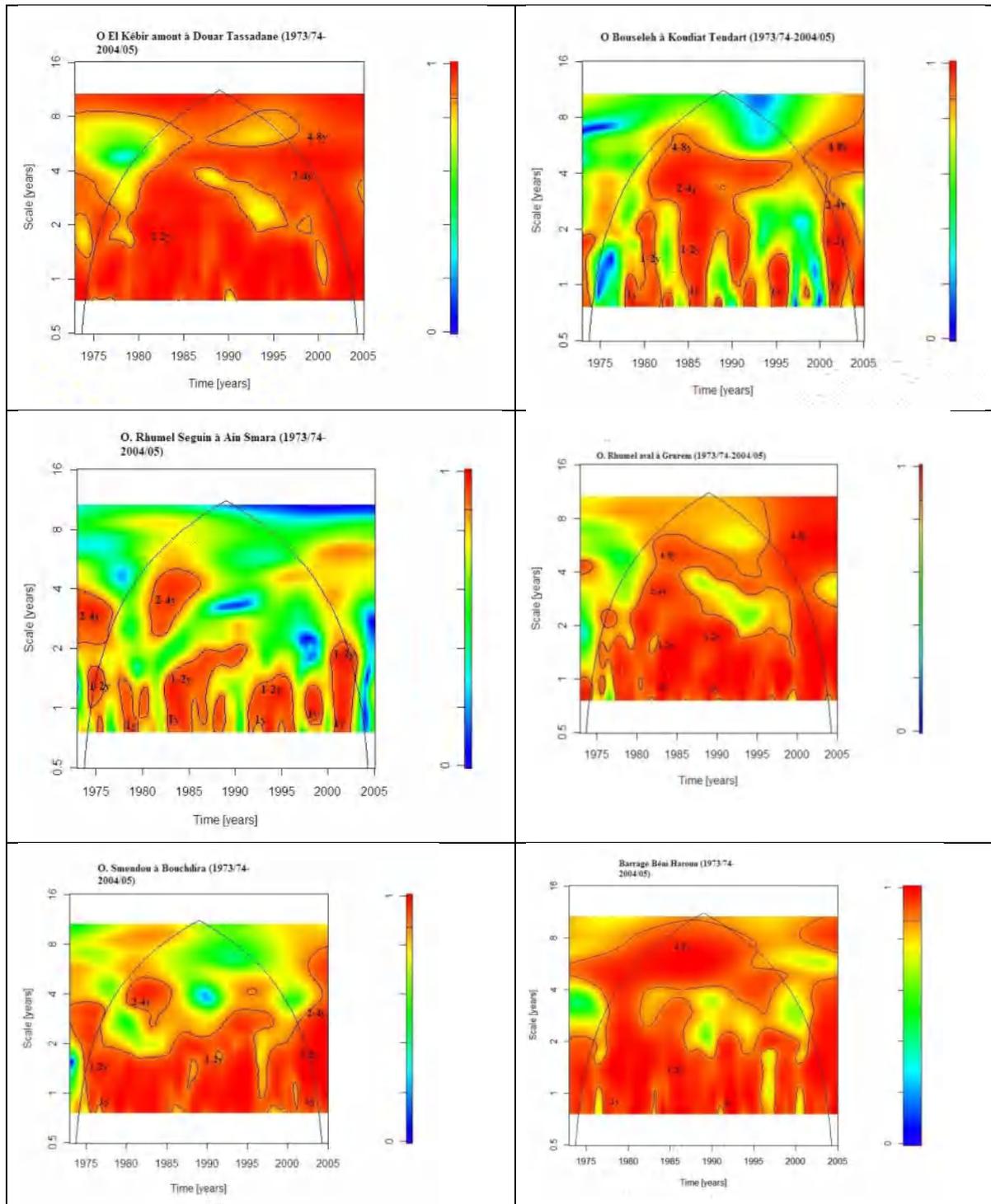


Figure 63: Les spectres de la cohérence pluies et débits du bassin versant

## CONCLUSION

La variabilité spatiale des précipitations est suffisamment appréhendée sur neuf stations pluviométriques du bassin, les précipitations sont fortes au Nord du bassin (plus de 550 mm), moyennes dans la zone médiane (comprises entre 500 et 400 mm) et faibles au Sud (moins de 300 mm). L'irrégularité interannuelle sur 42 années d'observation (1970/71-2011/12), a été bien mise en évidence en se fondant sur le coefficient de variation et l'écart à la normale. L'analyse de la variabilité des précipitations annuelles a été complétée par une étude

fréquentielle par la loi racine normale, afin d'estimer les quantiles de précipitations pour différentes périodes de retour.

Les apports hydrologiques de la période 1973/74-2004/05 sont quantifiés, au niveau des différents sous bassins jaugés, et les profils apports-surfaces, illustrent la variabilité spatiale de l'écoulement le long des cours principaux. L'apport spécifique est modeste ( $1.03 \text{ l/s/km}^2$ ) sur le haut Rhumel à Ain Smara, lié au caractère semi-aride du climat (moins de 400 mm de pluie par an). A la station de Grarem, l'écoulement interannuel s'accroît de façon notable pour atteindre  $2.71 \text{ l/s/km}^2$  en raison de changement de domaine climatique (600 mm de pluie par an). La faiblesse du coefficient d'écoulement, notamment dans la zone semi-aride ( $C < 5\%$  à Ain Smara) et sa forte valeur ( $C > 10$ ) dans la zone subhumide synthétisent bien les contrastes du milieu hydrologique.

Sur la période 1972/73-2004/05, les paramètres hydrologiques aussi bien annuels que mensuels ont connu une très grande variabilité, à mettre en relation directe avec la variabilité des précipitations.

L'approche statistique de la méthode « matrice Bertin » appliquée pour les pluies du bassin sur la période 1970/71 à 2011/12 ont permis de déceler les différentes périodes humides et sèches. Le caractère sévère de la sécheresse apparaît entre 1987/88 à 2001/2002 (caractère particulier au climat méditerranéen) et une phase humide survient à partir de l'année hydrologique 2002/2003 avec une plus grande fréquence d'années humides et très humides.

La variabilité temporelle annuelle à pluri-annuelle des pluies des sous bassins par la transformée en ondelettes (série commune 1973/74-2004/05) indique que cette évolution est structurée par plusieurs modes de variabilité, trois modes en particulier: 1 an, 1-2 ans et 4-8 ans. Pour les débits, la variabilité est marquée par des fluctuations différentes: le cycle hydrologique annuel et les fluctuations d'échelle interannuelle à 1-2 ans, 2-4 ans, 4-8 ans et 8-10 ans. Des changements dans la composition spectrale sont également observés: le changement majeur observé dans les débits dès l'année 1984/85 est également observé dans les pluies dès l'année 1980/81.

Les résultats selon la méthode en ondelettes pour identifier les modes de variabilité des pluies et des débits montrent différents modes de variabilité à différentes échelles fréquentielles annuelles à interannuelles (1 an, 1-2 ans, 2-4 ans, 4-8 ans, et la bande fréquentielle 8-10 ans. Ces modes de variabilité ont été comparés en première approche à ceux observés pour les précipitations, dans le but de déterminer l'origine de la structuration observée dans les débits du bassin de l'oued Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun. La structuration de la variabilité des précipitations est identique à celle observée dans les débits, selon chaque sous bassin avec quelques différences en termes de fréquence, d'amplitude et d'occurrence temporelle. Les fluctuations observées dans les débits sont rigoureusement observées dans les précipitations à l'exception de la bande 8-10 ans observée pour le débit mesuré à la station de Bouselah et qui n'est pas présent pour la pluie mais aussi la bande 2-4 ans, observée pour le débit de l'oued El Kébir (cette bande de fréquence est absente sur la série des pluies).

Les modes de variabilités identifiées dans les débits des sous bassins du Rhumel-Endja et les précipitations correspondent à des échelles de temps ont été observés dans les régions nord-africain par exemple au Maroc (bassin de K'sob) étudié par (Zamrane et al, 2016). Ces modes de variabilité ont été aussi bien observées dans les bassins européens (Mississippi) étudiés par (Rossi, 2010) et dans les états unis (Amérique du Nord) montrés par (Anctil et Coulibaly, 2004; Labat, 2006; Collins, 2009).

L'étude de la relation débit/pluie par les écarts centrés réduits a montré que l'évolution de la variabilité des débits/précipitations pour l'ensemble des sous bassins versants s'inscrit dans un schéma presque identique avec quelques décalages des années; trois périodes ont été identifiées; la première période de forts débits/ précipitations correspond bien aux années 2002/03-2004/05 pour tous les sous bassins étudiées. La seconde période correspondant aux années 1973/74 -1983/84, est sèche pour toutes les stations d'observations des pluies et des débits et enfin, la période située entre 1983/84 et 2001/02 est une alternance de périodes de faible/fort (débit et précipitation). Ces différences peuvent être expliquées par les différences de contexte géomorphologique des sous bassins et par les caractéristiques météorologiques locales.

Pour caractériser la variabilité commune (ou différente) entre les deux signaux (pluie, débit) et estimer l'impact des modes de variabilité des précipitations sur la variabilité des débits et la quantification simple du degré de la corrélation, l'analyse de la cohérence par ondelettes a permis de caractériser le degré de linéarité entre les pluies et les débits, suivant les différents niveaux d'échelles au cours du temps. La variabilité des débits aux sous bassins est fortement influencée par une variabilité d'origine pluviométrique (les pourcentages de cohérence restent à un niveau > 50 %) et seulement une part relativement réduite de cette variabilité est à expliquer par d'autres facteurs à caractère physiographique.

---

**CHAPITRE 3**  
**ECOULEMENTS EXTREMES ET RISQUES HYDROLOGIQUES**

---

## INTRODUCTION

Les changements climatiques bouleversent les facteurs régissant les régimes pluviométriques et thermiques. Ces bouleversements s'accompagnent d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes: sécheresses, inondations, canicules, pluies fortes et abondantes, tornades... Ces événements climatiques, souvent à l'origine de catastrophes, pourraient se produire plus fréquemment à l'avenir (Nature Québec 2011).

Au pays du Maghreb, une augmentation nette de la fréquence des sécheresses et inondations a été observée. Ainsi, on est passé d'une sécheresse tous les dix ans au début du siècle à cinq à six années de sécheresses en dix ans actuellement (IISD, 2003). Cette nouvelle situation est accentuée par la nature excessive des rares années humides avec une pluviométrie très forte et répartie sur une courte période de l'année: on voit ainsi des centaines de millimètres d'eau tomber dans des régions arides en quelques jours et rien pour le reste de l'année. Un sol aride, une érosion forte, un ruissellement excessif, sont des caractéristiques de cette région qui favorisent des catastrophes naturelles en relation avec ces fortes précipitations et ces inondations (IISD, 2003).

Les crues constituent avec l'étiage une situation extrême dans le comportement des cours d'eau. Les crues sont des gonflements fluviaux exceptionnels et irréguliers, tant en saison hivernale, ou période des hautes eaux, qu'en saison chaude, période des basses eaux. L'impact de cet écoulement extrême est important notamment pour la connaissance du potentiel hydrologique et de ses variations, mais aussi ses conséquences sur les phénomènes de turbidité, de salinité, et des dégâts qu'ils engendrent. Les étiages, traduisent la «sécheresse hydrologique» dépendant de facteurs, à la fois climatiques (rareté des pluies, évapotranspiration intense), hydrogéologiques (amenuisement de la réserve du sol) et hydrogéologiques (tarissement des réserves souterraines et donc faible soutien des débits des cours d'eau) (Beauregard, 1978).

Les phénomènes hydrologiques extrêmes font l'objet de nombreuses études permettant de les caractériser et donc, dans une certaine mesure, de les comprendre (Ketrouci, 2014; Galéa et al, 1999; Chopart et Sauquet, 2005; Lang et al, 2006; Lang et al, 2011; Mekhloufi, 2014 ; Abdeddaim, 2018 ; Mebarki, 1982 ; Guidoum, 2017....).

Ce chapitre discute les données observées des crues qui offrent une meilleure analyse du comportement hydrologique des oueds, et permettent de dresser un historique des événements extrêmes à travers quelques hydrogrammes de crues des stations hydrométriques gérées par l'Agence Nationale de Ressources Hydrauliques (ANRH). Cela sera abordé en mettant plus de lumière sur les valeurs extrêmes que se soient des pluies ou des débits, compte tenu de l'exceptionnalité du phénomène de crue. Ainsi, nous nous intéresserons à l'étude de la prédétermination des débits de crue (modélisation des quantiles pour différentes période de retour) et à l'application du modèle de simulation de l'hydrogramme de crue adopté par l'ANRH.

Pour les étiages, nous étudierons les courbes des débits classés aux stations hydrométriques et les indicateurs statistiques des débits d'étiage. L'analyse du tarissement a notamment pour

objectif la détermination des coefficients de tarissement (lois de tarissement de Maillet) qui traduisent les rythmes de vidange des aquifères, en relation avec les caractéristiques hydrogéologiques du bassin versant.

## 1. ETUDE DES CRUES

### 1.1. Etude des précipitations extrêmes

#### 1.1.1. Paramètres statistiques des pluies journalières maximales annuelles

Le terme "précipitations extrêmes" caractérise des événements pluviométriques de forte intensité se produisant sur un pas de temps court, et de faible occurrence à la fois dans le temps et dans l'espace. Ces événements exceptionnels sont généralement à l'origine de catastrophes naturelles telles que les crues, inondations et mouvements de terrain, dont l'impact sur les zones urbanisées s'avère souvent non négligeable tant sur le plan économique qu'humain (Berolo et Laborde, 2003 in Ketrouci, 2014).

Tableau 25: Statistiques des séries des précipitations journalières maximales annuelles (série hétérogène comprise entre 1970/71-2011/12)

Stations	Coordonnées			n (nombre d'années de la série disponible)	Pluie annuelle moyenne (mm)	Paramètres				
	X (km)	Y (km)	Z (m)			Moyenne des Pjmax (mm)	Maximum des Pjmax (mm)	Minimum des Pjmax (mm)	Ecart type (mm)	Coefficient de variation CV
<b>Mechtat Serradj</b>	800	360	350	30	388	45,3	165,5	8,7	31,2	0,69
<b>El Kheneg</b>	839	357	300	36	592	46,5	117,0	18,8	21,5	0,46
<b>Hamma Bouziane</b>	849	353	460	41	521	45,4	76,9	22,8	13,7	0,30
<b>Chebabta</b>	763	339	710	26	403	34,9	92,3	15,6	15,7	0,45
<b>Boumalek</b>	817	337	830	33	542	41,1	83,5	11,2	19,0	0,46
<b>Belaa</b>	784	327	990	40	390	40,3	84,4	11,3	16,4	0,41
<b>Tadjenanet</b>	796	318	845	36	339	33,6	59,0	6,3	11,2	0,33
<b>Mechtat El Melha</b>	819	316	830	26	280	32,9	143,9	8,0	29,3	0,89
<b>Fourchi</b>	850	307	775	41	374	37,9	125,0	16,2	21,5	0,57
<b>O Naceur</b>	877	321	839	28	312	23,5	62,8	10,0	14,1	0,60

Le choix s'est porté sur 10 stations (en incluant la station de Mechtat Serradj) pour lesquelles les données concernant les Pjmax sont disponibles sur la série hétérogène comprise entre 1970/71 et 2011/12. Ces données n'ont pas fait l'objet de comblement des lacunes et nous avons préféré travailler sur les séries observées variant entre 26 ans (série la plus courte: station de Chebabta) et 41 ans (série la plus longue: stations de Fourchi et Hamma Bouziane). Les paramètres statistiques de ces séries de données de pluies journalières maximales annuelles sont calculés et résumés dans le tableau 25.

Le maximum des Pjmax dépasse les 100 mm en quatre stations d'observations: Mechtat Serradj, Mechtat El Melha, Fourchi et El Kheneg.

La carte des pluies journalières maximales annuelles est établie par interpolation simple (logiciel SURFER), sans prise en compte du relief, tenant compte seulement de la latitude (Y) et la longitude des stations (X) (Figure 64). Schématiquement, la hauteur d'eau journalière maximale décroît en allant du secteur tellien vers les Hautes plaines (du Nord vers le Sud); A titre de comparaison, la station d'El Kheneg qui totalise en moyenne annuelle 591,6 mm, a reçu pour la même période de référence une lame d'eau journalière maximale moyenne de 46.46 mm. La station d'Oued Naceur dont le total annuel s'élève à 312.2 mm, a reçu une hauteur maximale moyenne de 23.47 mm. Ces pluies exceptionnelles alimentent largement les crues et les transports solides des oueds, notamment dans les terrains fortement dénudés qui occupent une partie importante de la zone d'étude.

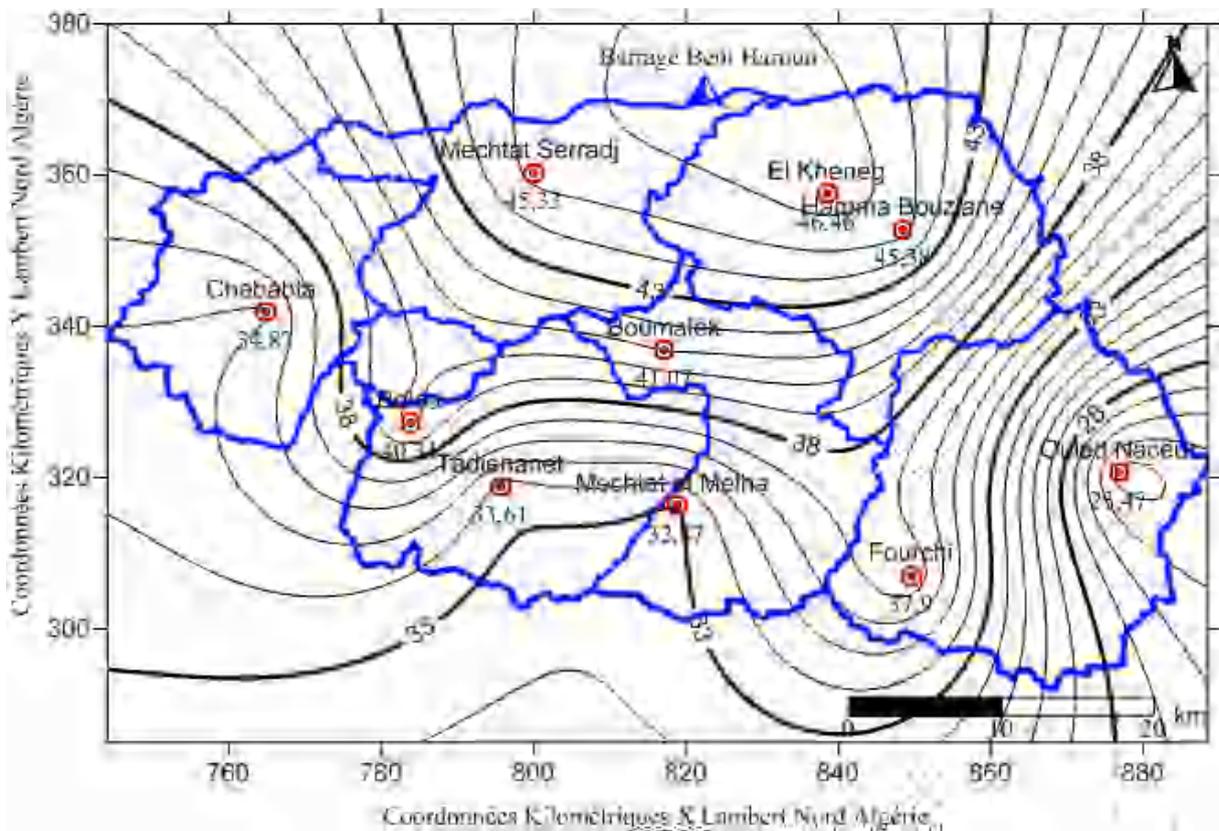


Figure 64: Répartition spatiale des pluies journalières maximales annuelles dans le bassin du Rhumel-Endja

Concernant la variabilité interannuelle des  $P_{jmax}$ , on constate que les plus forts coefficients de variations des précipitations journalières maximales dépassant 0.6 pour atteindre 0.89 (station de Mechtat El Melha), 0.69 (Mechtat Serradj) et 0.6 (Ouled Naceur). Les plus faibles coefficients de variations sont observés à Hamma Bouziane (0.30), Tadjenanet (0.33) et chebabta (0.45) (Tableau 25).

### 1.1.2. Variation intra-annuelle des précipitations journalières maximales annuelles

Le tableau 26 donne la répartition, à travers les mois de l'année, du nombre de  $P_{jmax}$  enregistré sur les séries disponibles des stations étudiées.

Tableau 26: Nombre de Pjmax observés selon les mois de l'année (séries hétérogènes de la période 1970/71-2011/12)

Les mois	Mecht at Serradj	El Kheneg	Hamma Bouziane	Chebabta	Boumal ek	Bela	Tadjenet	Mecht at el Melha	Fourhi	O Naceur	Total des stations
Septembre	1	2	6	3	4	4	5	4	5	2	36
Octobre	0	2	2	1	1	2	3	5	4	0	20
Novembre	7	5	6	3	1	1	2	1	3	3	32
Décembre	3	5	8	6	3	6	3	3	3	2	42
Janvier	9	5	7	1	9	8	0	0	2	8	49
Février	3	7	4	3	6	5	4	1	2	6	41
Mars	4	2	3	2	1	5	3	1	3	3	27
Avril	2	4	1	4	5	4	3	1	5	1	30
Mai	1	3	3	3	1	4	9	5	7	1	37
Juin	0	1	1	0	1	0	0	2	5	1	11
Juillet	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2
Aout	0	0	0	0	1	1	3	3	1	1	10
k (nombre d'année de la série disponible)	30	36	41	26	33	40	36	26	41	28	
n (série complète:43 ans)	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	

Les mois d'hiver (décembre janvier et février) enregistrent le plus grand nombre d'évènements, succédés par un mois printanier (mai) et un mois automnal (septembre) ; viennent ensuite les mois de novembre, avril et mars, puis octobre. Alors que seulement 7 % des pluies maximales annuelles dans cette région sont enregistrées en été, plus de 39 % des Pjmax apparaissent en saison d'hiver, 28 % des Pjmax se produisent au printemps, et enfin 26 % apparaissent en automne (Figure 65)

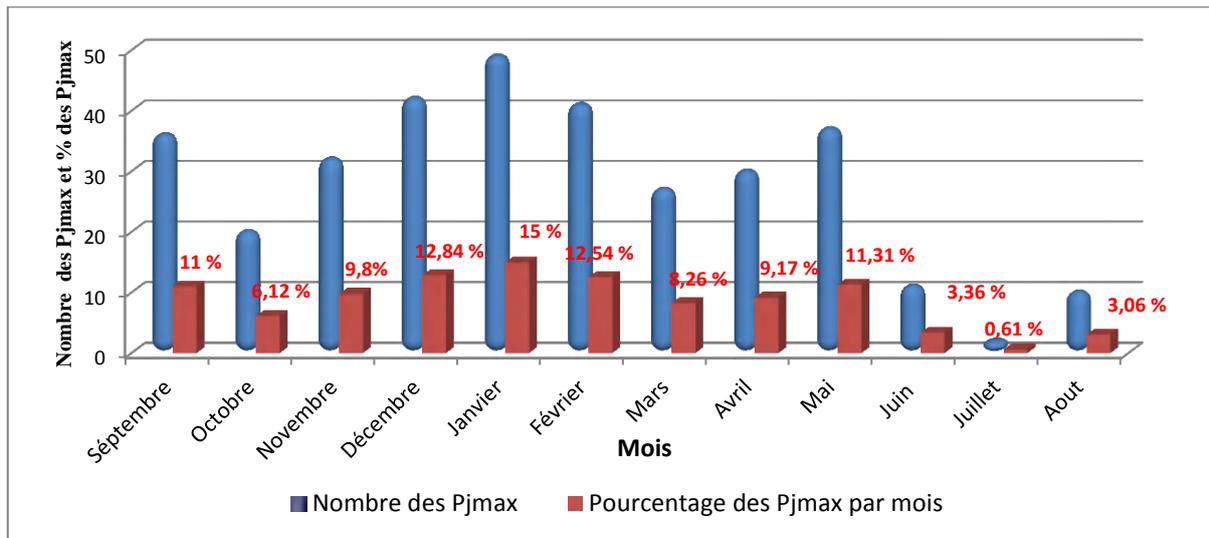
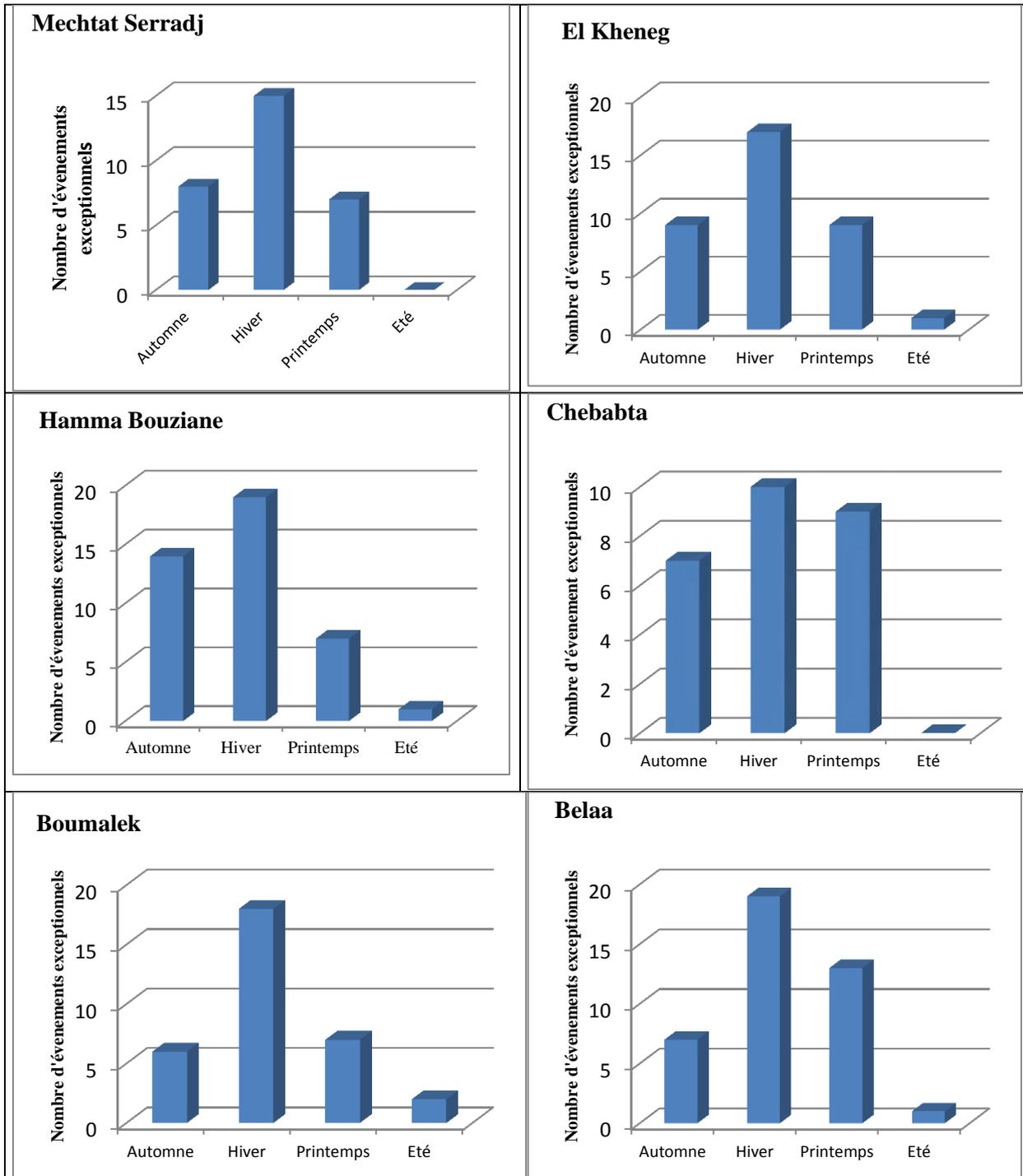


Figure 65: Répartition mensuelle des évènements pluviométriques extrêmes sur dix stations pluviométriques (série hétérogène comprises entre 1970/71-2011/12)

Sur le plan géographique, les graphiques de la figure 66 montre les variations saisonnières du nombre moyen des précipitations journalières maximales annuelles observé sur chacune des 10 stations pluviométriques. Il est permis de distinguer dans la zone tellienne du bassin un nombre prépondérant de pluies journalières maximales hivernales: stations El Kheneg, Hamma Bouziane, Mechtat Serradj, Chebabta et Boumalek. Dans la zone méridionale, les pluies journalières maximales sont plutôt printanières et automnales, régime qui s'identifie bien au secteur des Hautes plaines (Mechtat El Melha, Tadjenanet et Fourchi).



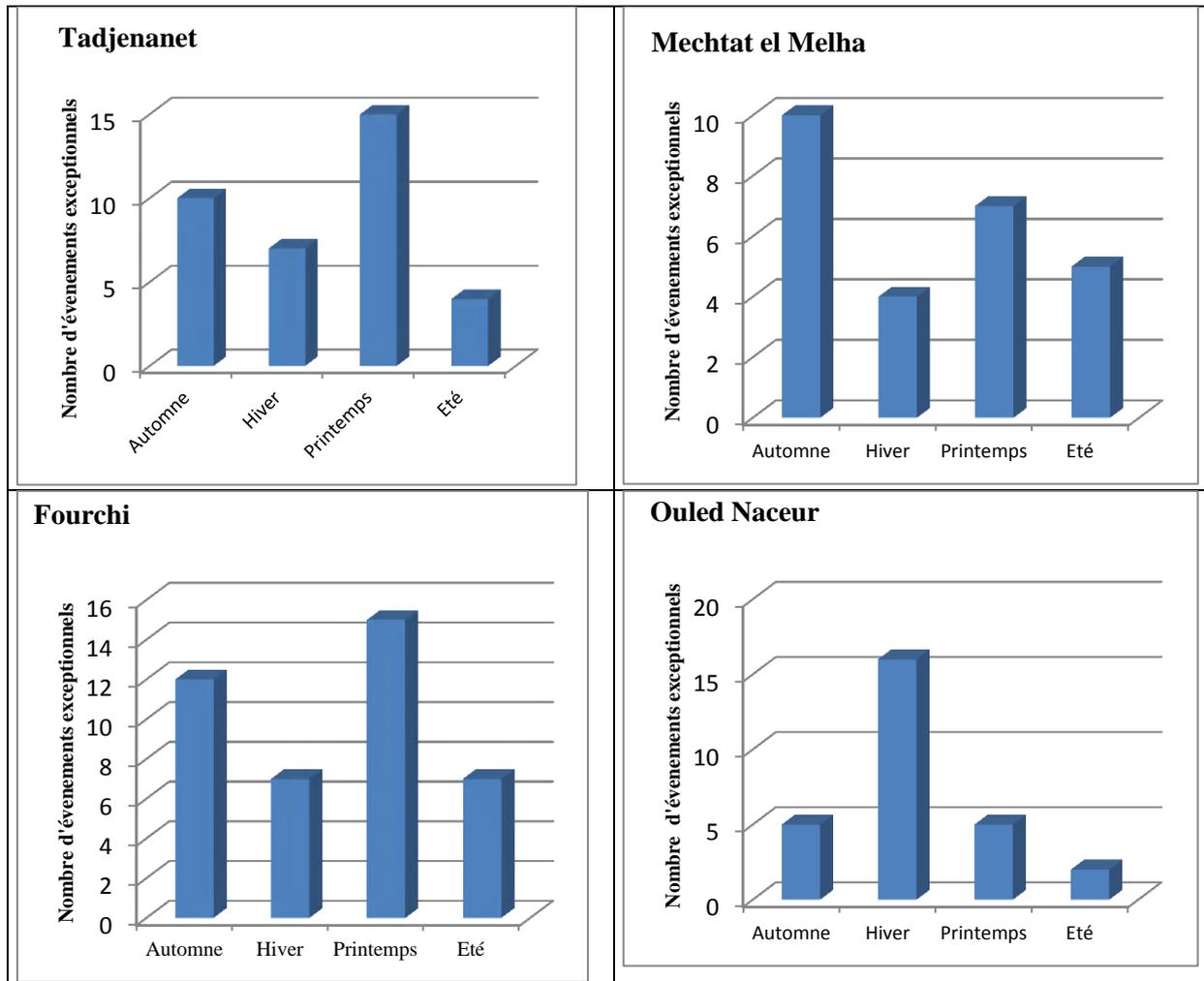


Figure 66: Répartition saisonnière du nombre des pluies extrêmes pour les stations du bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage du Béni Haroun

### 1.1.3. Etude fréquentielle des pluies journalières maximales ( $P_{jmax_F}$ )

Afin de faire ressortir l'irrégularité temporelle des pluies extrêmes, et de fournir des éléments indispensables pour les études de dimensionnement d'infrastructures telles que les digues; les déversoirs de barrages et les ouvrages d'assainissement, l'étude fréquentielle permet de caractériser et d'estimer les précipitations exceptionnelles, pour les différentes durées de récurrence.

C'est l'objet de l'approche statistique qui consiste à sélectionner une loi de probabilité s'ajustant au mieux aux valeurs observées de la variable aléatoire  $P_{jmax}$  à laquelle on s'intéresse. La sélection se fait après comparaison de différentes lois de probabilités théoriques et méthodes d'estimation à l'aide de tests d'adéquation (Mutua, 1994; Mkhandi et al, 2000 in Guidoum, 2017). Comme dans la plupart de nos régions, pour le bassin de Rhumel-Endja, les valeurs de pluies journalières maximales annuelles sont le plus souvent bien distribuées selon une loi de Gumbel (Figure 67).

La loi de Fréchet ne semble pas bien reproduire ces ajustements malgré l'anamorphose logarithmique apportée sur l'échelle des  $P_{jmax}$  (ordonnée Y).

Les échantillons de pluies journalières maximales des dix stations sont analysés statistiquement à l'aide du programme Hydrolab développé sous forme de macros sous Excel 2010 (Laborde et Mouhous, 2002).

La fonction de répartition de la loi de Gumbel est :  $F(x)=e^{-e^{-u}}$

Avec  $u = \frac{x-x_0}{g}$  (variable réduite de Gumbel)

Le terme u est la variable réduite de Gumbel calculé pour la fréquence considérée.

Fréquence :	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99
(u) :	<b>0,37</b>	<b>2,25</b>	<b>2,97</b>	<b>3,90</b>	<b>4,60</b>

$x_0$  est le paramètre de position (mode) :  $x_0 = x_{moy} - 0,577 s$

s est le paramètre d'échelle différent de zéro et positif :  $s = g = 0,78 \sigma_x$

Les résultats concernant les quantiles de pluies journalières maximales pour les périodes de retour 2, 10, 20, 50 et 100 ans sont résumés dans le tableau 27.

Tableau 27: Pluies journalières maximales fréquentielles (séries hétérogènes de la période 1970/71-2011/12)

Stations	k (nombre d'année de la série disponible)	Période de retour (ans) et Fréquence F				
		2 ans F 0,5	10 ans F 0,90	20 ans F 0,95	50 ans F 0,98	100 ans F 0,99
<b>Mechtat Serradj</b>	30	40,22	85,98	103,47	126,12	143,08
<b>El Kheneg</b>	36	42,94	74,44	86,49	102,08	113,78
<b>Hamma Bouziane</b>	41	43,12	63,29	71,00	81,01	88,49
<b>Chebabta</b>	36	32,28	55,39	64,22	75,66	84,22
<b>Boumalek</b>	33	37,96	65,84	76,51	90,31	100,65
<b>Belaa</b>	40	37,61	61,70	70,91	82,82	91,75
<b>Tadjenanet</b>	36	34,24	47,46	52,52	59,06	63,97
<b>Mechtat el Melha</b>	26	26,66	55,11	65,99	80,07	90,62
<b>Fourchi</b>	41	34,38	66,00	78,09	93,73	105,45
<b>Ouled Naceur</b>	28	19,98	37,97	44,84	53,74	60,41

Les valeurs des quantiles de 2 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans diminuent du Nord au Sud. Par exemple pour les valeurs centennales des stations situées dans la partie Nord, caractérisée par un climat subhumide, elles varient de 143.09 mm (Mechtat Serradj) à 113.75 mm (El Kheneg). Pour les stations de la partie Sud caractérisée par un climat semi-aride, elles varient de 105.45 mm (Fourchi) à 60.41 mm (Ouled Naceur).

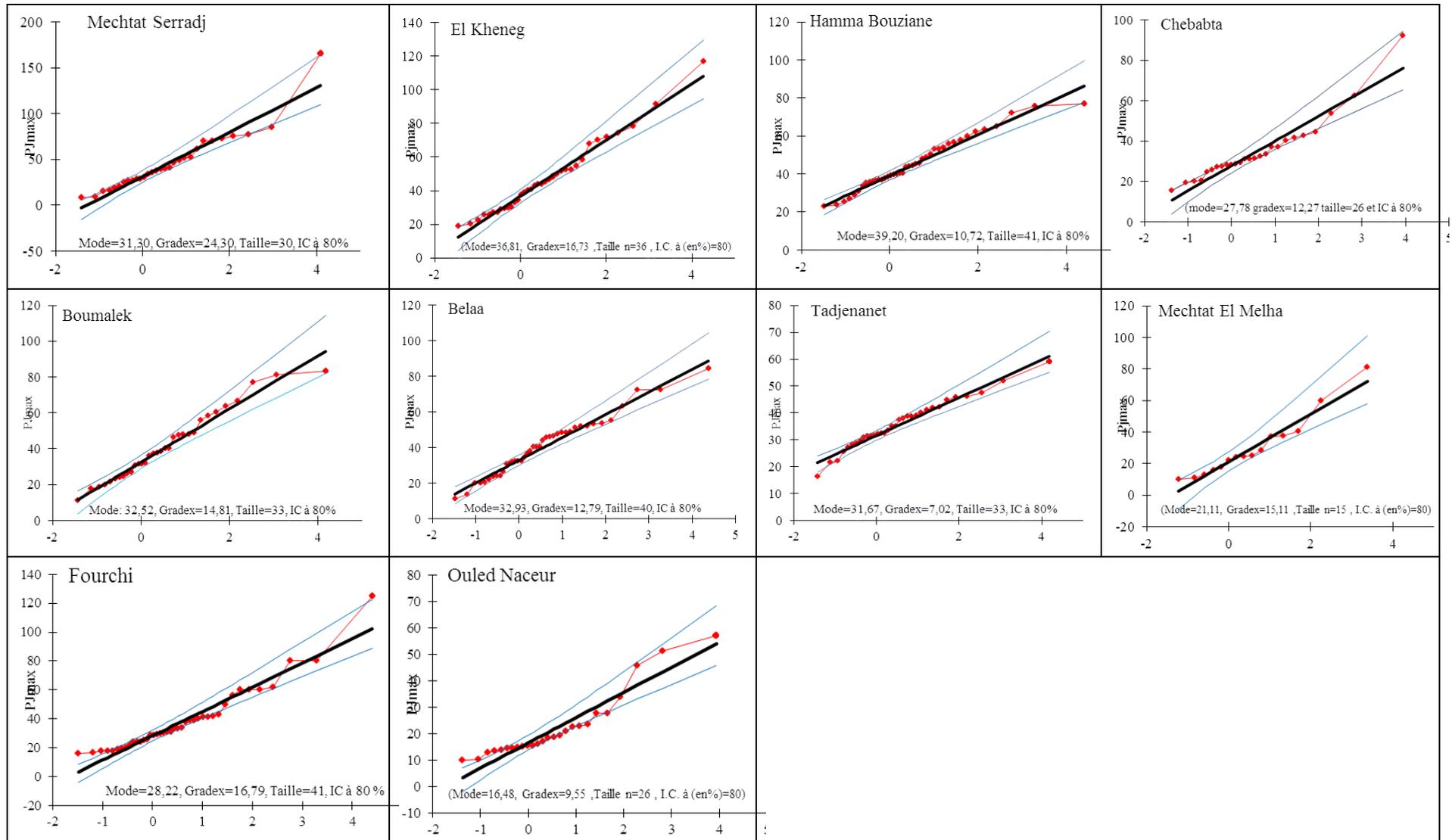


Figure 67: Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations maximales journalières

#### 1.1.4. Elaboration des cartes des gradex, $P_{jmax_{F0,90}}$ et $P_{jmax_{F0,98}}$

Les aspects spatiaux seront abordés à travers les esquisses des cartes établies pour les pluies maximales journalières de fréquence décennale et cinquantiennale.

Les résultats de l'analyse statistique des données de pluies maximales et l'ajustement à la loi de Gumbel permettent dans une première étape de cartographier le gradex  $g$  (gradient exponentiel des pluies). L'interpolation est réalisée par la fonction spline sous Surfer. Les courbes d'iso-valeurs de  $g$  présentent une structure spatiale Nord-Ouest à Sud-Est (Figure 68).

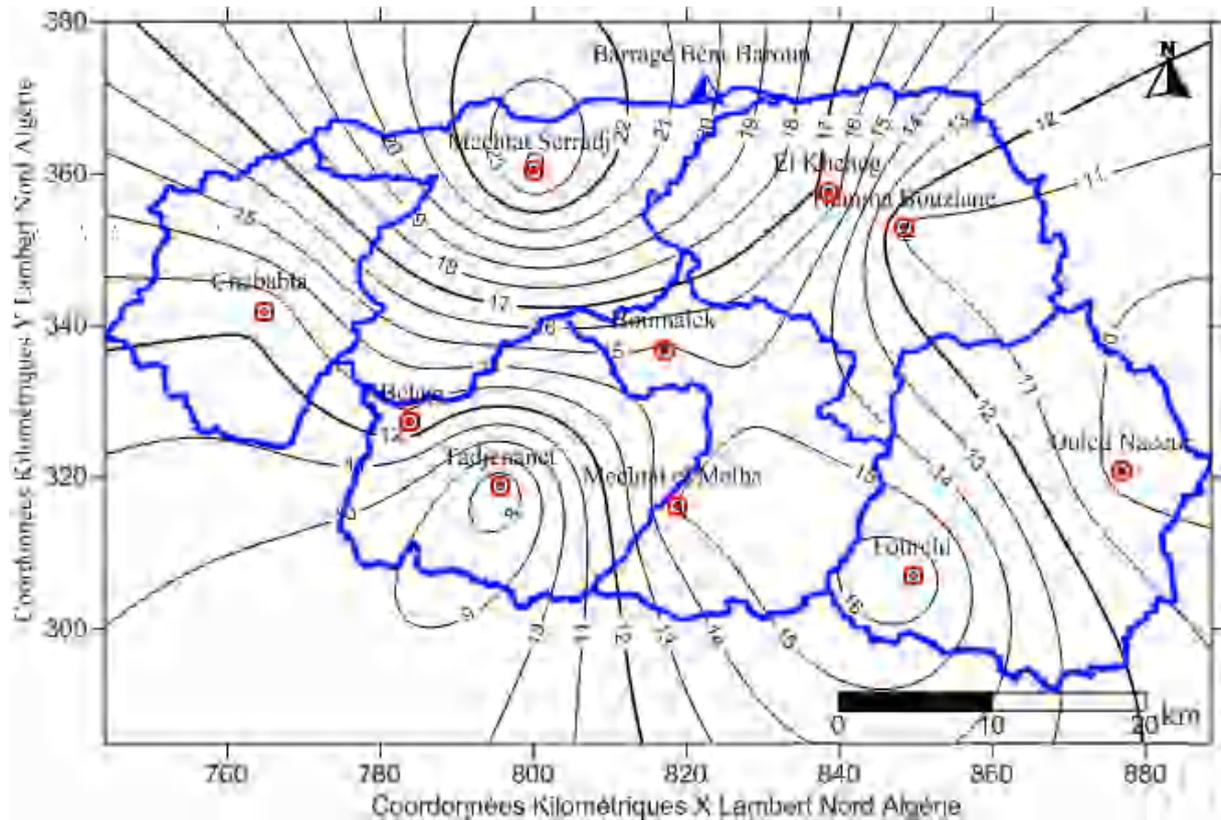


Figure 68: Cartographie du gradex des pluies journalières maximales annuelles du bassin-versant de l'oued Rhumel-Endja

On obtient en tout point de l'espace les valeurs de  $g$ ; il devient alors possible de cartographier les  $P_{jmax_{F0,90}}$  et  $P_{jmax_{F0,98}}$  en appliquant l'équation de la droite de Gumbel:  $P_{jmax_F} = u g + x_0$

Les paramètres  $P_{jmax}$  moy et  $g$  étant connus en tout nœud de la grille, il reste à calculer  $x_0 = x_{moy} - 0,577 g$ , en tout point de cette grille kilométrique couvrant le bassin. Au final, on calcul  $P_{jmax_F}$  en tout point de la grille avec  $u$  correspondant à la fréquence calculée ( $u = 2,25$  pour  $F_{0,9}$  et  $u = 3,90$  pour  $F_{0,98}$ ).

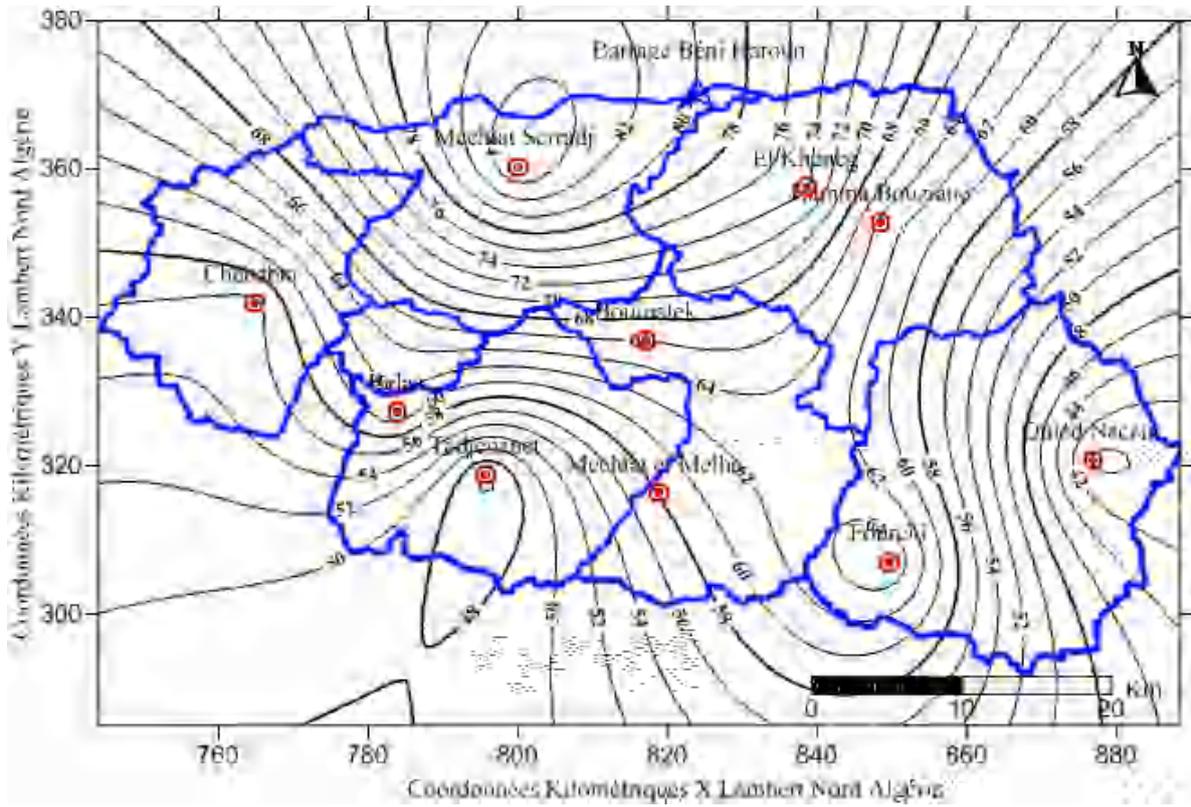


Figure 69: Pluies journalières maximales de fréquence décennale du bassin-versant Rhumel-Endja

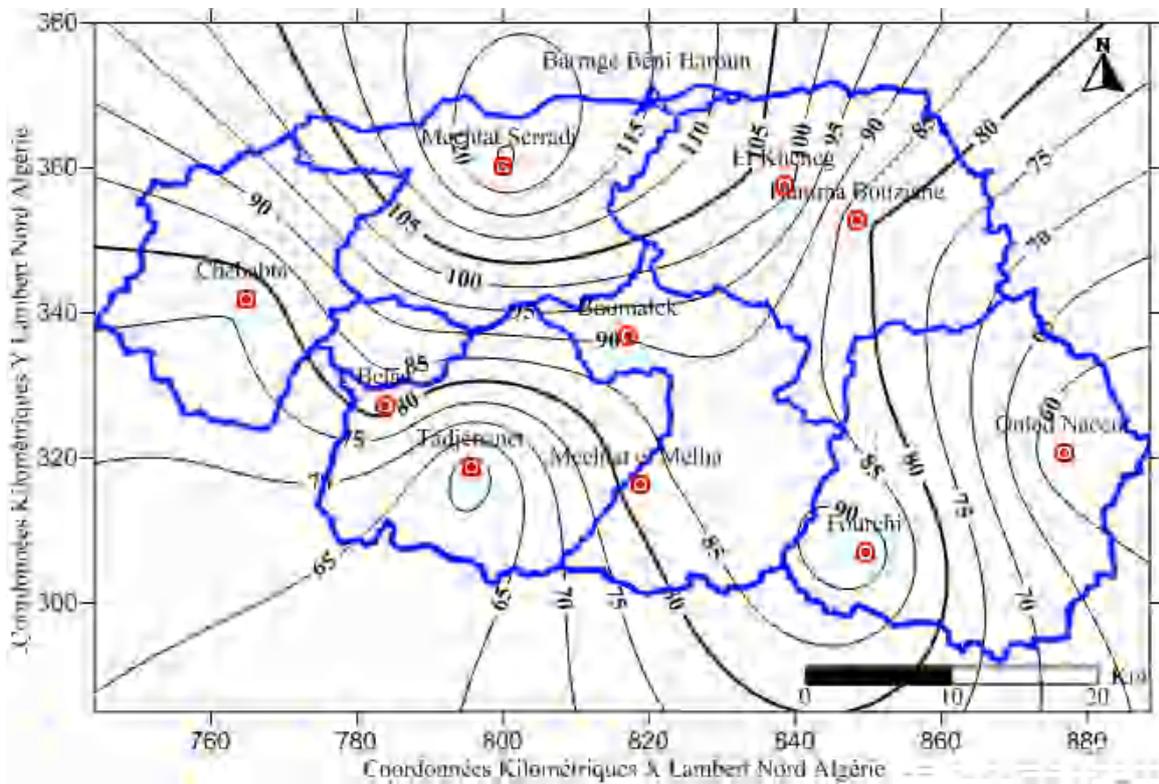


Figure 70: Pluies maximales journalières de fréquence cinquantiennale du bassin-versant Rhumel-Endja

La carte obtenue par cette démarche montre une diminution des pluies journalières de fréquences décennale ( $P_{j\max_{F0,90}}$ ) du Nord vers le Sud, de 84 mm à la station de Mechtat Serradj à 55 mm pour Tadjenanet. Les valeurs diminuent pour les stations des Hautes Plaines (Figure 69).

La carte des pluies journalières de fréquence cinquantennale ( $P_{jam_{F0,98}}$ ) fait ressortir le même gradient Nord - Sud avec des valeurs plus importantes passant de 120 mm (Mechta Serradj) à 60 mm (Ouled Naceur) (Figure 70).

## **1.2. Les débits extrêmes observés**

Après avoir analysé les pluies journalières maximales en tant que facteur générateur de crue, nous procédons dans ce qui suit à l'analyse détaillée des débits de crue observés aux stations hydrométriques du bassin.

### ***1.2.1. Les variations spatio-temporelles des débits maximums***

Les valeurs des débits instantanés et journaliers maximums ont une distribution annuelle variable d'un sous-bassin à l'autre (Tableau 28).

L'évolution des crues de l'amont à l'aval est fonction de la quantité de la pluie et de l'intensité de l'averse. La vitesse de propagation des écoulements de crue est largement influencée par les paramètres morphométriques (indice de compacité, densité de drainage, rapports des confluences et des longueurs etc...), par la pente des thalwegs et la forme du lit, la lithologie, le couvert végétal (Cosandey et Robinson, 2000 in Bouanani, 2005). Par opposition à la zone tellienne au milieu physique favorable à une vitesse de propagation élevée, dans les sous-bassins des Hautes Plaines la faiblesse des pentes et la concentration assez lâche du réseau hydrographique déterminent des vitesses de translation beaucoup plus atténuées (Mébarki, 1982).

Tableau 28: Débits maximaux moyens journaliers et instantanés annuels observés aux stations hydrométriques du bassin Rhumel-Endja

Station	Douar Tassadane					Koudiat Tendart					Ain Smara					Grarem					Bouchdira				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1973-74	25/9/73	196,8	31/3/74	108,3	1,8	25/9/73	34,6	31/3/74	6,4	5,4	25/9/73	281,2	25/9/73	79,8	3,5	26/9/73	270,8	26/9/73	56,8	4,8	-	-	-	-	-
1974-75	17/2/75	121,6	17/2/75	59,9	2,0	17/2/75	22,4	17/2/75	7,0	3,2	18/2/75	8,3	18/2/75	4,7	1,8	18/2/75	87,9	18/2/75	52,6	1,7	18/2/75	45,0	18/2/75	16,0	2,8
1975-76	6/2/76	136,0	17/3/76	51,3	2,7	23/9/75	36,4	23/9/75	1,2	29,9	23/9/75	113,3	2/7/76	17,1	6,6	17/3/76	137,2	17/3/76	74,5	1,8	14/3/76	59,5	14/3/76	27,5	2,2
1976-77	23/12/76	100,0	23/12/76	64,5	1,6	6/1/77	20,8	23/12/76	6,6	3,1	18/5/77	37,0	18/5/77	18,3	2,0	19/11/76	98,5	19/11/76	65,2	1,5	18/11/77	39,0	18/11/77	27,5	1,4
1977-78	3/4/78	151,6	3/4/78	77,1	2,0	3/4/78	30,6	3/4/78	7,6	4,0	18/8/78	27,1	18/8/78	10,6	2,6	5/2/78	98,5	5/2/78	43,0	2,3	7/2/78	34,8	7/2/78	22,6	1,5
1978-79	27/6/79	224,0	16/4/79	67,8	3,3	16/4/79	31,2	16/4/79	15,3	2,0	16/4/79	70,2	16/4/79	37,2	1,9	16/4/79	396,1	16/4/79	305,9	1,3	16/4/79	163,5	16/4/79	127,9	1,3
1979-80	13/3/80	115,4	6/3/80	45,4	2,5	6/9/79	57,0	6/9/79	2,3	24,6	2/9/79	74,5	2/9/79	25,6	2,9	6/3/80	93,2	6/3/80	56,5	1,6	6/3/80	97,4	6/3/80	47,4	2,1
1980-81	20/12/80	516,0	20/12/80	115,2	4,5	-	-	-	-	-	23/8/81	111,2	23/8/81	111,2	1,0	21/12/80	62,1	21/12/80	53,4	1,2	31/12/80	79,8	31/12/80	54,8	1,5
1981-82	2/9/81	141,2	29/1/82	83,7	1,7	17/9/81	36,4	29/1/82	17,2	2,1	25/9/81	180,4	25/9/81	53,0	3,4	-	-	-	-	-	6/3/82	40,2	6/3/82	31,8	1,3
1982-83	27/12/82	147,7	27/12/82	62,6	2,4	29/10/82	19,3	29/10/82	3,7	5,3	21/12/82	5,1	21/12/82	5,1	1,0	-	-	-	-	-	25/12/82	110,2	25/12/82	57,6	1,9
1983-84	3/2/84	366,2	3/2/84	152,4	2,4	3/2/84	21,5	3/2/84	9,7	2,2	4/2/84	94,0	4/2/84	94,0	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1984-85	7/3/85	254,4	8/3/85	123,6	2,1	8/3/85	89,4	8/3/85	36,4	2,5	30/12/84	481,0	30/12/84	255,8	1,9	30/12/84	1085	30/12/84	942,8	1,2	30/12/84	317,3	30/12/84	304,3	1,0
1985-86	7/3/86	58,7	7/3/86	30,4	1,9	20/3/86	50,8	20/3/86	7,8	6,5	21/3/86	4,8	21/3/86	4,2	1,1	7/3/86	33,5	7/3/86	23,2	1,4	10/1/86	7,9	9/3/86	5,3	1,5
1986-87	27/12/86	90,2	27/12/86	58,0	1,6	8/10/86	74,8	28/12/86	30,5	2,5	30/9/86	91,0	30/9/86	21,8	4,2	13/2/87	275,6	13/2/87	215,2	1,3	13/2/87	134,3	13/2/87	81,9	1,6
1987-88	8/3/88	44,5	8/3/88	30,3	1,5	8/3/88	11,5	8/3/88	6,7	1,7	28/6/88	11,0	28/6/88	6,2	1,8	9/3/88	34,3	9/3/88	28,1	1,2	9/3/88	17,8	9/3/88	12,8	1,4
1988-89	21/12/88	141,2	21/12/88	86,2	1,6	22/12/88	43,0	22/12/88	12,6	3,4	22/12/88	224,4	22/12/88	65,2	3,4	22/12/88	260,4	22/12/88	155,6	1,7	21/12/88	72,6	21/12/88	48,0	1,5
1989-90	30/4/90	127,6	11/5/90	14,9	8,5	5/8/90	21,5	5/8/90	1,1	18,8	22/9/89	217,0	22/9/89	40,3	5,4	6/1/90	26,1	6/1/90	17,2	1,5	6/1/90	9,0	6/1/90	9,0	1,0
1990-91	16/11/90	184,4	16/11/90	72,5	2,5	7/10/90	51,6	31/3/91	11,2	4,6	11/11/90	224,4	11/11/90	74,3	3,0	31/3/91	109,5	31/3/91	62,4	1,8	24/12/90	126,0	24/12/90	60,4	2,1
1991-92	18/4/92	107,7	18/4/92	68,2	1,6	24/5/92	46,2	10/4/92	10,0	4,6	3/10/91	115,4	3/10/91	19,3	6,0	19/4/92	133,0	19/4/92	91,3	1,5	10/4/92	49,2	10/4/92	49,2	1,0
1992-93	31/12/92	97,5	31/12/92	60,1	1,6	11/5/93	51,6	6/1/93	15,9	3,3	10/10/92	21,2	6/1/93	13,0	1,6	31/12/92	282,0	31/12/92	213,4	1,3	31/12/92	225,9	31/12/92	98,4	2,3
1993-94	19/2/94	82,9	19/2/94	42,3	2,0	4/12/93	12,8	4/12/93	3,7	3,5	9/2/94	6,4	9/2/94	4,1	1,5	19/2/94	168,0	19/2/94	116,2	1,4	19/2/94	113,4	19/2/94	66,9	1,7
1994-95	2/3/95	91,9	10/1/95	51,2	1,8	3/10/94	36,4	16/3/95	9,9	3,7	8/10/94	269,8	8/10/94	31,7	8,5	13/1/95	190,4	13/1/95	141,2	1,3	9/1/95	113,4	9/1/95	72,7	1,6
1995-96	8/2/96	197,2	8/2/96	86,6	2,3	22/9/95	180,2	8/2/96	19,6	9,2	22/9/95	256,0	22/9/95	35,5	7,2	29/2/96	291,2	29/2/96	185,7	1,6	28/2/96	291,0	28/2/96	162,0	1,8
1996-97	25/8/97	23,6	11/1/97	12,2	1,9	24/8/97	20,0	24/8/97	2,2	9,3	7/8/97	9,5	11/1/97	4,1	2,3	9/1/97	38,5	9/1/97	22,0	1,7	11/1/97	14,2	11/1/97	10,3	1,4
1997-98	23/11/97	167,6	23/11/97	42,3	4,0	16/9/97	46,2	3/5/98	8,5	5,4	21/9/97	113,2	21/9/97	23,3	4,9	26/2/98	123,3	26/2/98	85,6	1,4	26/2/98	73,0	26/2/98	58,7	1,2
1998-99	28/11/98	97,2	28/11/98	45,7	2,1	24/9/98	232	24/9/98	10,0	23,1	28/11/98	70,8	28/11/98	31,4	2,3	28/11/98	276,0	28/11/98	207,3	1,3	20/1/99	114,2	6/2/99	59,9	1,9
1999-00	20/12/99	38,0	20/12/99	22,7	1,7	12/5/00	73,6	12/5/00	6,2	11,8	9/9/99	146,0	9/9/99	30,2	4,8	10/9/99	200,2	10/9/99	100,5	2,0	20/12/99	103,0	20/12/99	77,6	1,3
2000-01	20/1/01	86,0	1/2/01	36,2	2,4	23/5/01	180,0	23/5/01	14,1	12,8	23/5/01	23,9	23/5/01	3,6	6,7	1/2/01	267,2	1/2/01	161,8	1,7	1/2/01	119,6	1/2/01	97,7	1,2
2001-02	30/9/01	136,0	30/9/01	16,8	8,1	30/9/01	210,6	30/9/01	8,9	23,6	30/9/01	394,0	30/9/01	52,2	7,6	-	-	-	-	-	8/2/02	7,2	8/2/02	1,8	3,9
2002-03	25/1/03	609,4	25/1/03	250,7	2,4	25/1/03	180,2	25/1/03	117,3	1,5	7/12/02	141,1	7/12/02	65,5	2,2	-	-	-	-	-	4/4/03	312,9	4/4/03	163,9	1,9
2003-04	3/1/04	285,2	3/1/04	106,3	2,7	14/5/04	180,2	14/5/04	35,1	5,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1/1/04	211,0	1/1/04	139,9	1,5
2004-05	30/12/04	274,1	30/12/04	147,9	1,9	31/12/04	18,6	14/11/04	11,7	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14/11/04	355,2	30/12/04	178,4	2,0

A : date du débit de pointe, B: débit instantané maximal (m³/s), C: date du débit moyen journalier maximal (m³/s), D: débit moyen journalier maximal (m³/s),

E=B/D,

- : absence des données

Les débits maximums annuels sont variables d'une année à l'autre selon les secteurs géographiques du bassin :

Pour la **station de Douar Tassadane** (Figure 71) : durant la période 1973/74-2004/05, l'année 2002/03 correspond à la valeur maximale de débit maximal instantané de 609.44 m<sup>3</sup>/s avec un débit moyen journalier de 250.71 m<sup>3</sup>/s, suivie par l'année 1980/81 avec un débit maximal instantané de 516 m<sup>3</sup>/s et un débit moyen journalier de 115.19 m<sup>3</sup>/s.

Pour la **station de Koudiat Tendart** durant la période 1973/74-2004/05, les années 1998/99 et 2002/03 correspondant aux années les plus pluvieuses avec des débits maximal instantanés de l'ordre de 232 m<sup>3</sup>/s et de 180 m<sup>3</sup>/s (Figure 72)

Pour la **station de Ain Smara** durant la période 1973/74-2001/02, l'année 1984/85 a enregistré la valeur maximale de débit maximal instantané de 481 m<sup>3</sup>/s avec un débit moyen journalier de 255.8 m<sup>3</sup>/s (Figure 73).

Pour la **station de Grarem** durant la période 1973/74-2000/01, l'année 1984/85 correspond à la valeur maximale de débit maximal instantané de 1085 m<sup>3</sup>/s avec un débit moyen journalier de 942.82 m<sup>3</sup>/s, suivie par l'année 1978/79 avec un débit maximal instantané de 396.08 m<sup>3</sup>/s et un débit moyen journalier de 305.89 m<sup>3</sup>/s (Figure 74).

La **station de Bouchdira** durant la période 1973/74-2004/05, l'année 2004/05 a enregistré un débit maximal journalier de 178.4 m<sup>3</sup>/s avec un débit maximal journalier de 355.2 m<sup>2</sup>/s (Figure 75).

Le bassin connaît quelques crues généralisées telle que celle du 16 avril 1979 qui sera étudiée plus loin. Cette crue a donné un débit journalier maximum de 305.98 m<sup>3</sup>/s à Grarem, 127.88 m<sup>3</sup>/s à Bouchdira, 67.82 m<sup>3</sup>/s au niveau de Douar Tassadane et 15.29 m<sup>3</sup>/s au Koudiat Tendart.

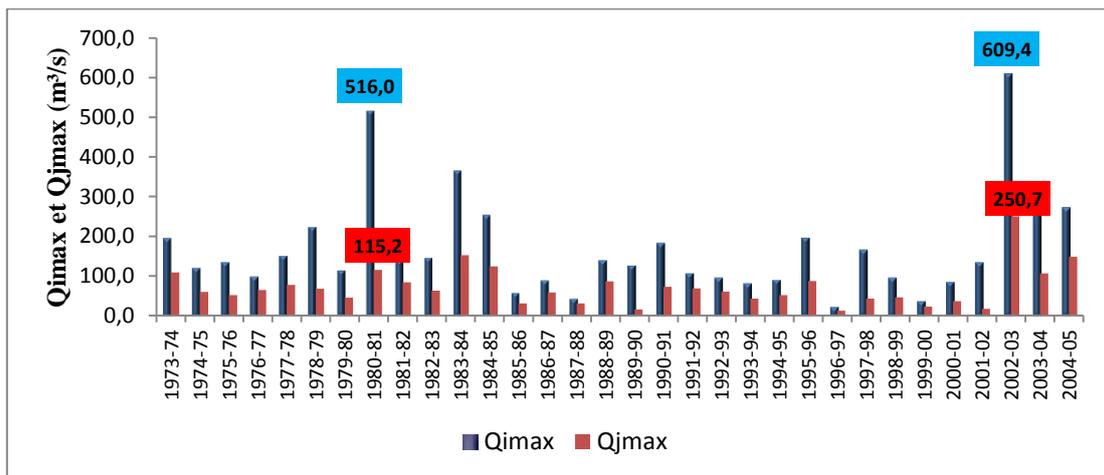


Figure 71: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de la station de Douar Tassadane en (m<sup>3</sup>/s)

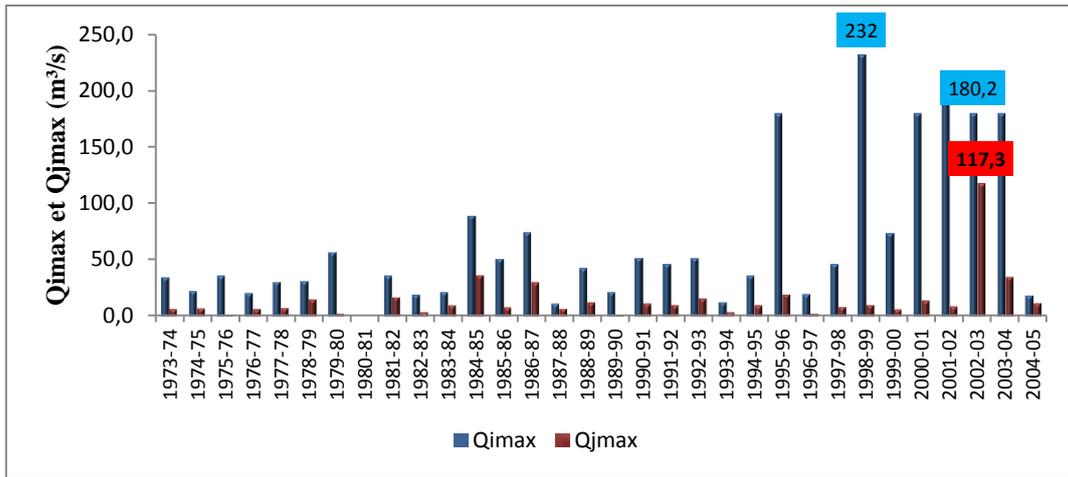


Figure 72: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de Koudiat Tendart en (m³/s)

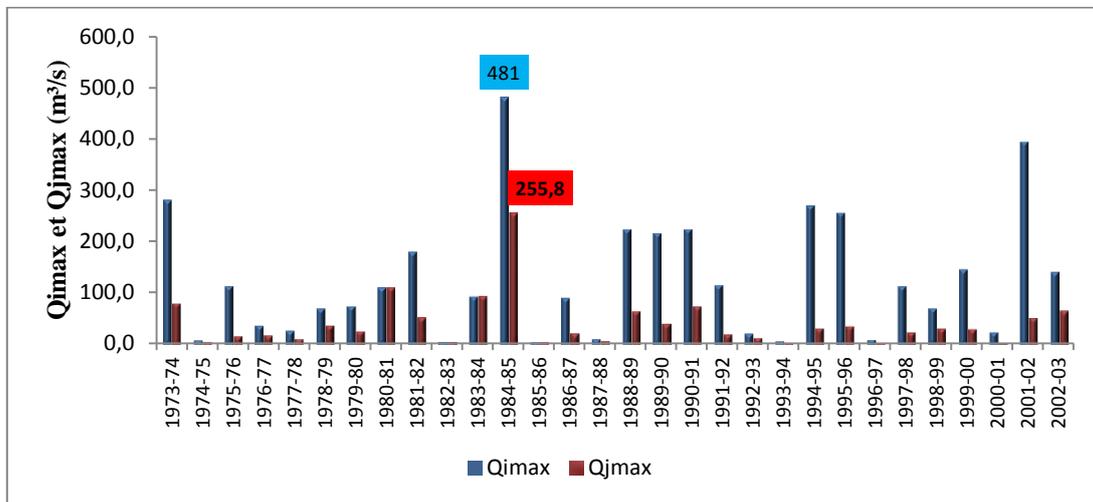


Figure 73: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de la station d'Ain Smara en (m³/s)

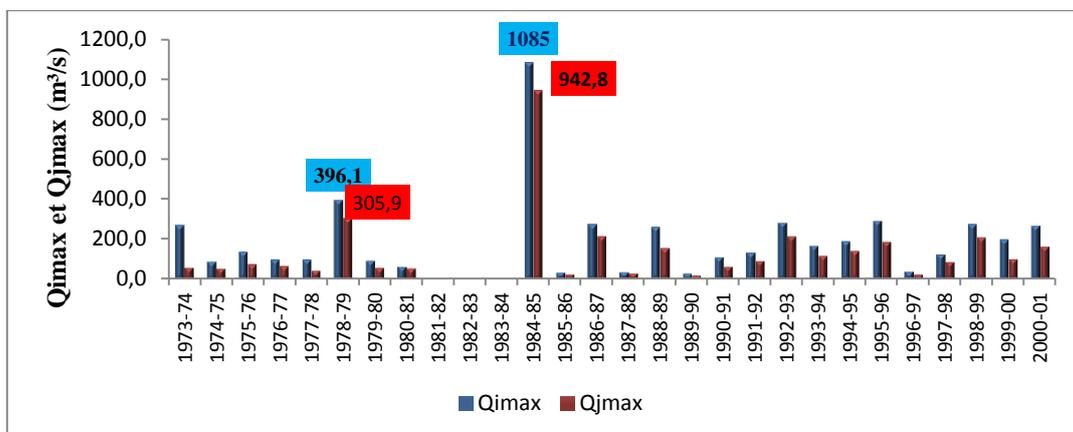


Figure 74: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de la station de Grarem en (m³/s)

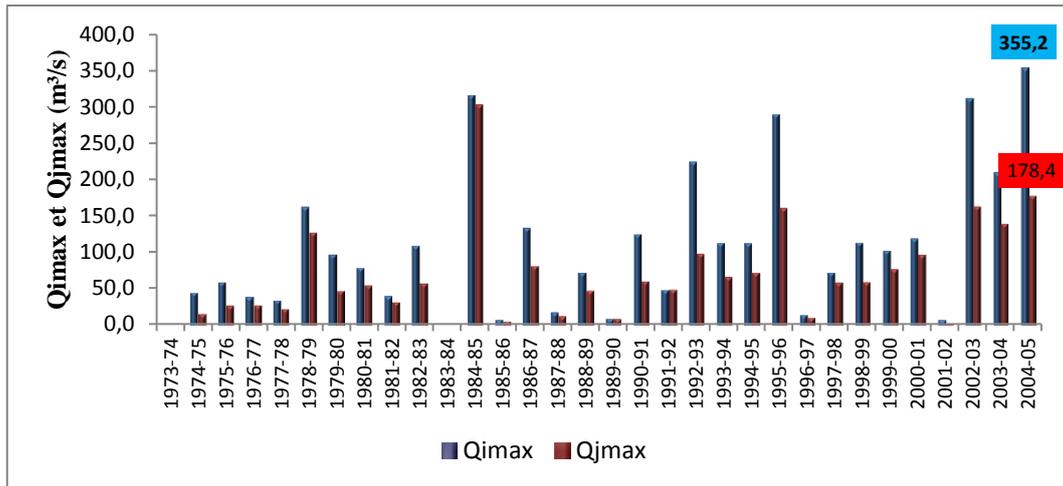


Figure 75: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de la station de Bouchdira en (m<sup>3</sup>/s)

### 1.2.2. La récurrence des débits de crue maximum annuels

L'étude fréquentielle des débits présente un intérêt indéniable dans le cadre des projets d'aménagements hydrauliques et permet de compléter la connaissance du phénomène d'irrégularité des écoulements extrêmes. En Algérie, les débits maximums annuels suivent plutôt une loi de Galton, Gumbel, Frechet ou Pearson III (Bernier, 1959; Hayane, 1983; Ghachi, 1986; Laborde, 2000; Bouanani, 2004).

Le choix de la période de retour du débit de projet dépend des considérations économiques déterminant l'aménagement. La précision de l'estimation des périodes de retour est subordonnée à la taille de l'échantillon hydrométrique (Mebarki, 1982).

L'utilisation du programme Hydrolab, développé par J.P. Laborde (2002), a facilité le calcul des débits fréquentiels de crue, obtenus par ajustement à la loi de Galton (Figures 76 et 77).

Les crues biennales (période de retour une année sur deux) exprimées en valeur spécifique (l/s/km<sup>2</sup>), montrent de nettes différences dans le comportement des sous bassins: la crue biennale de l'oued Rhumel Seguin a une valeur faible (Ain Smara qjmax = 10.65 l/s/km<sup>2</sup>, qimax=30.37 l/s/km<sup>2</sup>) qui serait due à la lithologie et à la faiblesse des pentes. L'accroissement du débit de crue biennal sur l'oued Rhumel aval (Grarem: qjmax=16.65 l/s/km<sup>2</sup>, qimax=26.33 l/s/km<sup>2</sup>) serait lié à l'augmentation des précipitations, à une relative augmentation des pentes et à l'accentuation de la vitesse de propagation des crues à la sortie des gorges de Constantine. Le bassin de l'oued Bouselah (Koudiat Tendart: qjmax=50.14 l/s/km<sup>2</sup>, qimax=260.68 l/s/km<sup>2</sup>) et l'oued El Kébir-amont (Douar Tassadane: qjmax=60.52 l/s/km<sup>2</sup>, qimax=140) réagissent de façon intense aux averses car les pentes sont relativement fortes, les précipitations assez abondantes et surtout de forte intensité, la végétation faible. L'oued Smendou à Bouchdira présente un débit spécifique journalier et instantané biennal élevé (qjmax= 154.85 l/s/km<sup>2</sup>, qimax= 249.65 l/s/km<sup>2</sup>). Ceci peut être expliqué par l'abondance des précipitations et la taille réduite de la surface (295 km<sup>2</sup>) (tableaux 29 et 30).

L'accroissement relatif des débits entre la crue biennale, décennale et centennale, est très variable sur tous les oueds: celui du maximum instantané varie considérablement de 2,43 à 5.81 fois pour le décennale et de 5.03 à 24.43 fois pour le débit centennal. Pour le maximum journalier, il varie de 2.40 à 4.31 fois pour le débit décennal et de 4,91 à 14.18 fois pour le débit centennal.

La puissance des crues est fonction de la taille du bassin et de son comportement hydrologique, notamment la lithologie, la déclivité, la couverture végétale. Ces facteurs jouent un rôle important sur le régime des oueds.

Tableau 29: Débits moyens journaliers maximaux fréquentiels ( $m^3/s$ )

Période de retour	2	5	10	20	50	100
Fréquence au non dépassement	0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Variable réduite de Gauss	0	0,84	1,28	1,645	2,05	2,33
<b>Qjmax (<math>m^3/s</math>)</b>						
Douar Tassadane	58,10	103,30	139,60	179,00	236,70	285,30
Koudiat Tendart	9,03	20,39	31,24	44,51	66,41	86,50
Ain Smara	23,40	61,10	100,90	152,60	243,30	332,00
Grarem	88,60	192,30	288,50	403,20	587,70	755,50
Bouchdira	45,6	118,1	194,4	293,2	465,7	634
<b>q max (<math>l/s/km^2</math>)</b>						
Douar Tassadane	60,52	107,60	145,42	186,46	246,56	297,19
Koudiat Tendart	50,14	113,25	173,54	247,26	368,94	480,53
Ain Smara	10,65	27,81	45,93	69,46	110,74	151,12
Grarem	16,65	36,15	54,23	75,79	110,47	142,01
Bouchdira	154,58	400,34	658,98	993,90	1578,64	2149,15

Tableau 30: Débits maximaux instantanés fréquentiels ( $m^3/s$ )

Période de retour	2	5	10	20	50	100
Fréquence au non dépassement	0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Variable réduite de Gauss	0	0,84	1,28	1,645	2,05	2,33
<b>Qi max (<math>m^3/s</math>)</b>						
Douar Tassadane	134,40	241,18	327,40	421,41	559,87	676,61
Koudiat Tendart	46,92	96,56	140,80	192,26	273,00	344,88
Ain Smara	66,72	212,03	388,07	639,26	1121,14	1630,48
Grarem	140,05	293,81	432,78	595,90	854,11	1085,77
Bouchdira	73,65	184,95	299,30	445,39	696,69	938,80
<b>q max (<math>l/s/km^2</math>)</b>						
Douar Tassadane	140,00	251,23	341,05	438,97	583,20	704,81
Koudiat Tendart	260,68	536,42	782,22	1068,12	1516,65	1916,01
Ain Smara	30,37	96,51	176,63	290,97	510,31	742,14
Grarem	26,33	55,23	81,35	112,01	160,55	204,09
Bouchdira	249,65	626,97	1014,59	1509,81	2361,68	3182,39

• *Q max moyens journaliers*

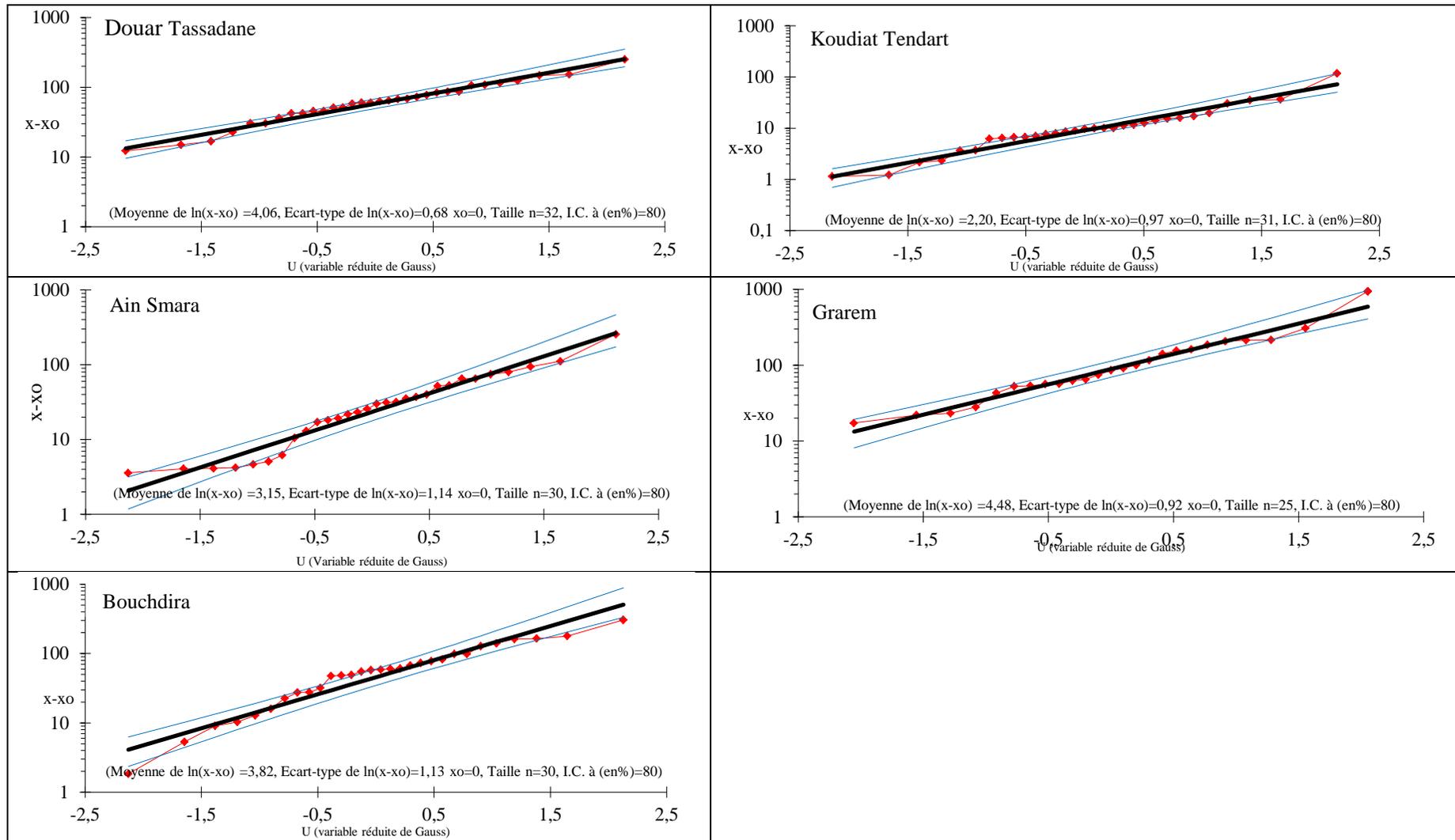


Figure 76: Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux journaliers annuels

• *Q max moyens instantanés*

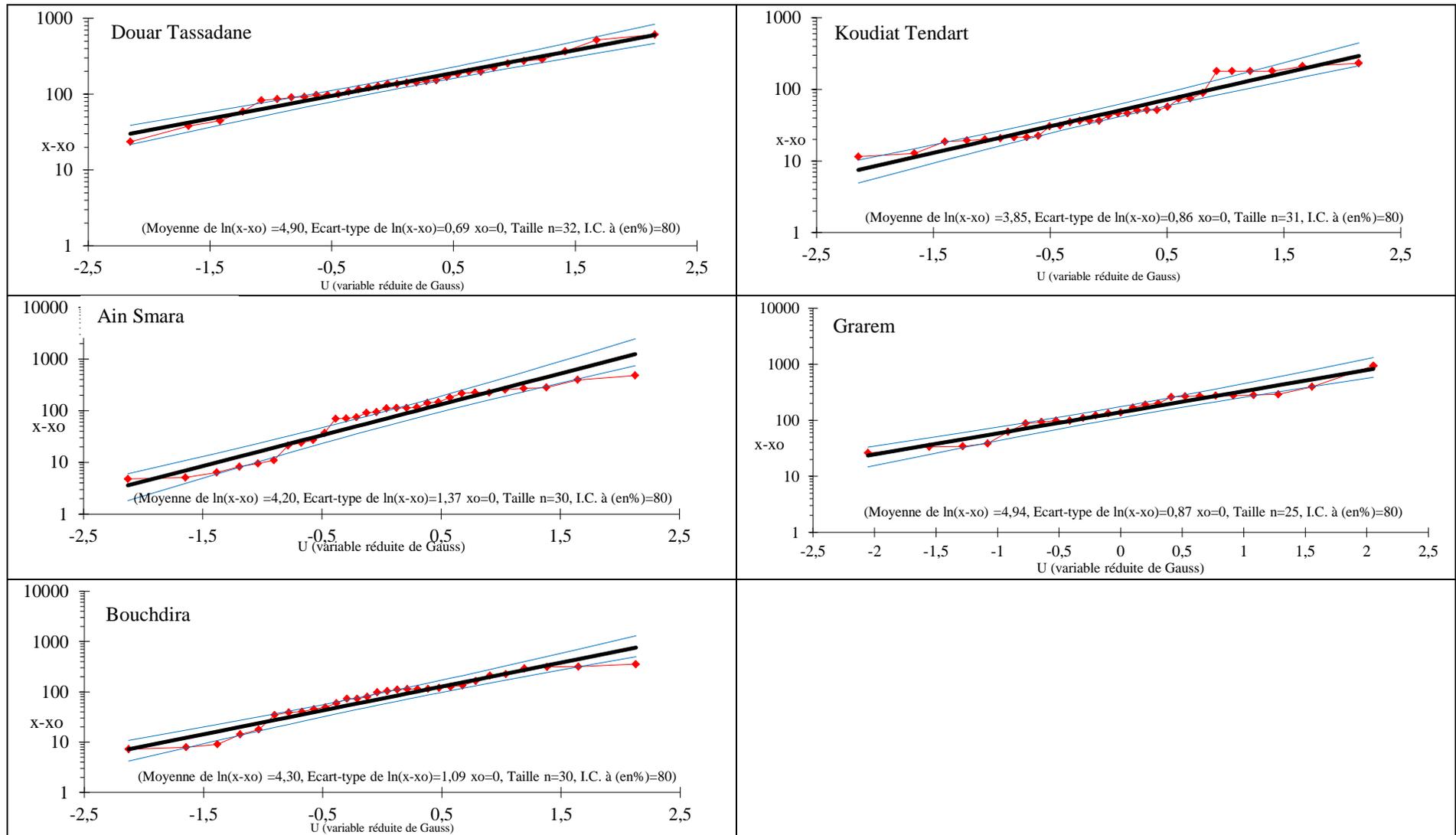


Figure 77: Ajustement à la loi log-normale des débits instantanés maximaux annuels

### **1.2.3. Fréquence d'apparition mensuelle des débits de crue**

Sur l'oued Rhumel Seguin à Ain Smara, plus de 73 % des débits instantanés et débits journaliers de l'année sont enregistrées durant les saisons d'automne et d'hiver, et de façon très marquée pour les mois de septembre (30 %) et décembre (13.3%) concernant les débits instantanés et pour les mois de septembre (33.3 %) et décembre (13.3) concernant les débits journaliers. L'oued Rhumel aval à Grarem génère des crues d'hiver et de printemps: 84 % des débits instantanés et journaliers sont observées pendant ces deux saisons. Les mois de février et mars sont les plus marqués par les crues exceptionnelles, car ils enregistrent plus de 84 % des crues qui se sont produites pendant l'hiver et le printemps. Pour l'oued Smendou à Bouchdira, les fréquences d'apparition les plus élevées correspondent aux mois de décembre et de février, et à un degré moindre, aux mois de janvier et mars (Figures 78 et 79).

Le bassin de l'oued Endja supérieur dans la partie Ouest du bassin Rhumel-Endja à Douar Tassadane, plus de 87.50 % des débits maximums instantanés et 75 % des débits journaliers maximum sont concentrés en printemps et, plus encore, au hiver. Les mois de décembre, avec 25 %, et le mois de février avec 15.62 % sont des cas les plus marqué par l'occurrence des évènements de crue (débits journaliers maximums et débits instantanés maximums). Les mois de septembre et mai sont donc les mois les plus riches en épisodes de crues à la station de l'oued Bouselah à Koudiat Tendart (Figures 78, 79).

Ces débits maximums ne coïncident pas nécessairement avec le mois le plus pluvieux de l'année car elle sont déterminées plus par la nature même des averses, notamment leur intensité en interaction avec les autres facteurs du ruissellement que par l'apport pluviométrique mensuel (Mébarki, 1982). Ces répartitions des crues dans le temps et dans les différents sous bassins, laissent penser que sur le bassin du Kébir- Rhumel à Beni Haroun, vaste de 7725 km<sup>2</sup>, l'ampleur de crues ne se manifestent pas partout au même mois ou à la même saison. Chaque sous bassins pouvant avoir sa période de prédilection directement liée à son climat, à la densité de son réseau hydrographique et à la répartition de ses précipitations.

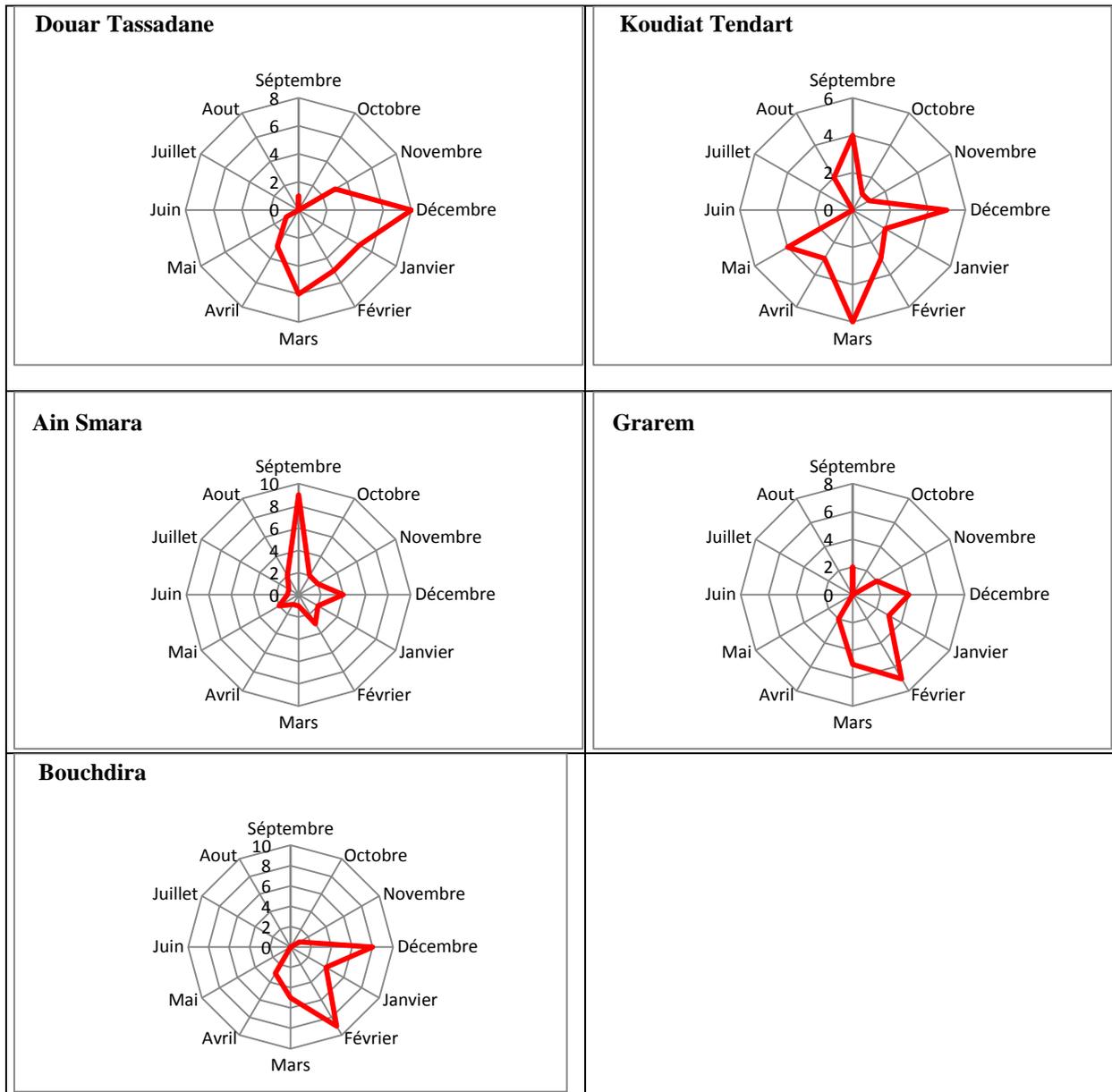
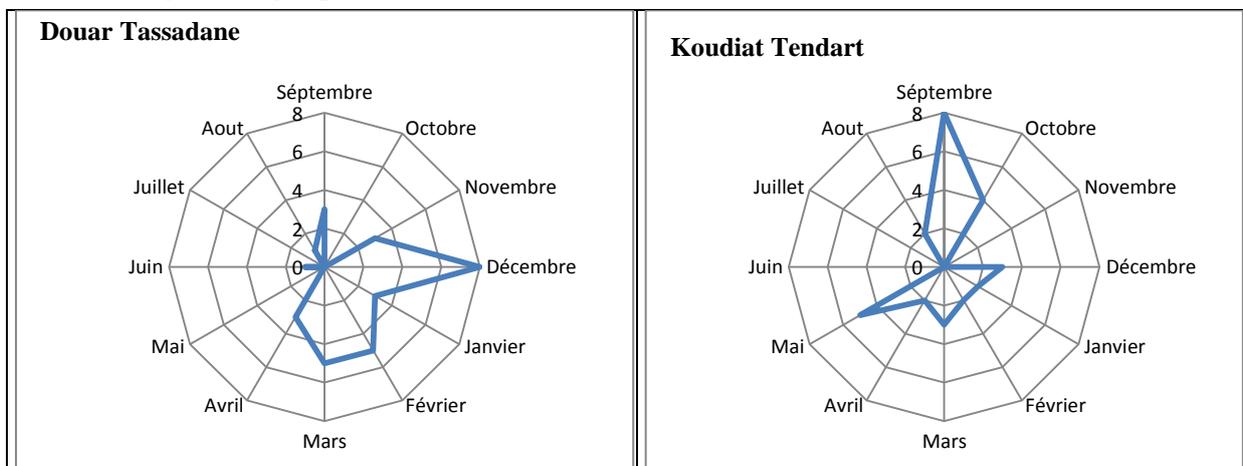


Figure 78: fréquence des débits maximums instantanés selon les mois de l'année



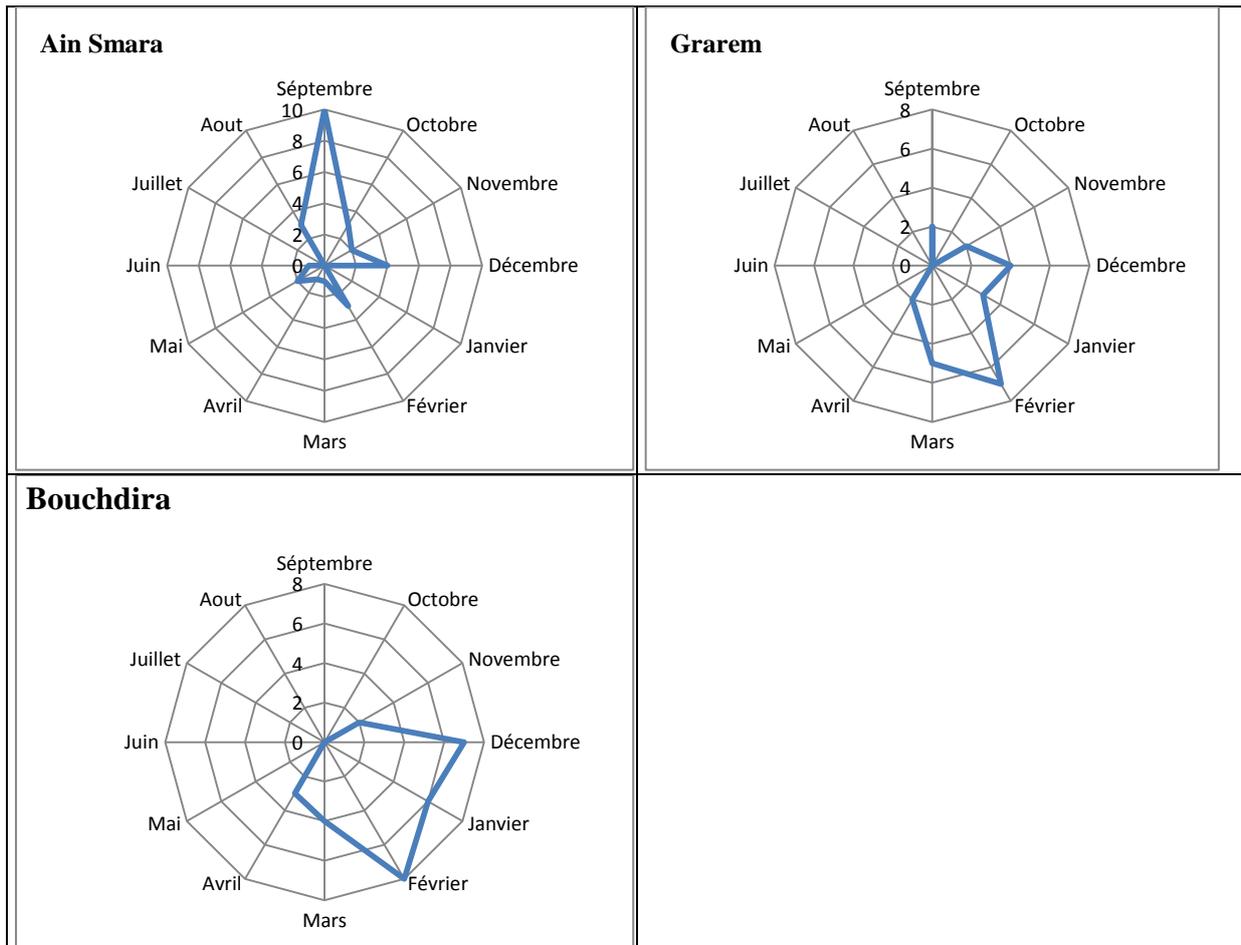


Figure 79: fréquence des débits maximums journaliers selon les mois de l'année

#### 1.2.4. Hydrogrammes journaliers et horaires des crues

L'analyse du comportement hydrologique du bassin versant s'effectue par le biais de l'étude de la réaction hydrologique du bassin face à une sollicitation, mesurée par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système. La représentation graphique de l'évolution du débit (Q) en fonction du temps (t) constitue un hydrogramme de crue (Abdeddaim, 2018).

Dans la plupart des cas, l'hydrogramme est une courbe reconstituée à partir de mesures pluviométriques ou des mesures de jaugeage. On distingue sur un hydrogramme :

- La partie montante (d'augmentation du débit), dite courbe de concentration. La durée correspondante est appelée temps de montée.
- La pointe, ou pic de l'hydrogramme.
- La partie à décroissance rapide, dite courbe de décrue. La durée totale couvrant la concentration et la décrue est appelée temps de base de l'hydrogramme.
- La branche finale, à décroissance plus lente, dite courbe de tarissement.

Le bassin Rhumel-Endja connaît des crues généralement entre novembre et avril. Ce sont les mois de décembre, janvier, février et mars qui comptent le plus de crues.

Les relevées horaires et journaliers des débits de crues aux stations hydrométriques, nous a permet d'avoir une idée sur l'évolution de ces crues, et sur la réaction de la structure hydrologique du bassin de l'oued Rhumel-Endja à ces dernières. Il faut noter que nous n'avons pas pu avoir des données détaillées sur les crues (les données horaires), pour la station de Bouchdira. Pour la station de Koudiat Tendart, les données horaires sont disponibles seulement à partir de l'année 1997.

#### 1.2.4.1. La crue de Septembre 1973

L'étude des hydrogrammes journaliers (Figure 80) permet de déceler la réaction des différents oueds à la suite des averses qui sont succédées du 24 au 26 septembre. Cette crue a provoqué des débits journaliers maximums importants: 79.80 m<sup>3</sup>/s à la station d'Ain Smara, 56.82 m<sup>3</sup>/s à la station de Grarem, 36.22 m<sup>3</sup>/s à la station de Douar Tassadane et 6.25 m<sup>3</sup>/s à la station de Koudiat Tendart. La diminution de l'onde de crue du Rhumel à Grarem par rapport à celle enregistrée à Ain Smara, plus en amont; peut s'expliquer par des débordements de l'oued dans les plaines alluviales assez vastes situées entre Constantine et Grarem (Mebarki, 1982).

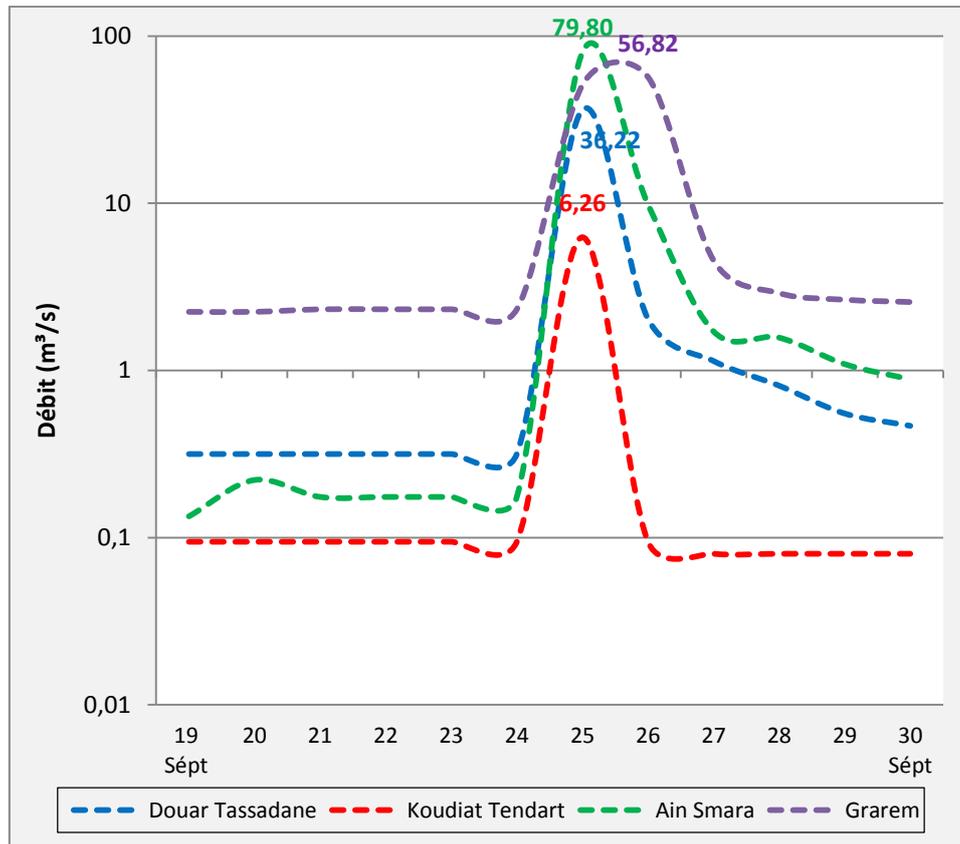


Figure 80: Hydrogrammes journaliers des crues de Septembre 1973 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara et Grarem

Les hydrogrammes horaires de crue des deux stations (Douar Tassadane et Ain Smara) sont dans l'ensemble simples, monogéniques, avec un temps de montée plus court que la durée de décrue; il est suivi par un tarissement prolongé. Pour la station de Douar Tassadane, le temps de base est de 35 heures et le débit de pointe de l'ordre de 196.8 m<sup>3</sup>/s, atteint après un temps

de montée de 9 heures. Pour la station d'Ain Smara, la crue se caractérise par un temps de montée court de 8 heures, et un temps de base de 25 heures. Le débit de pointe est de 281.2 m<sup>3</sup>/s (Figure 81).

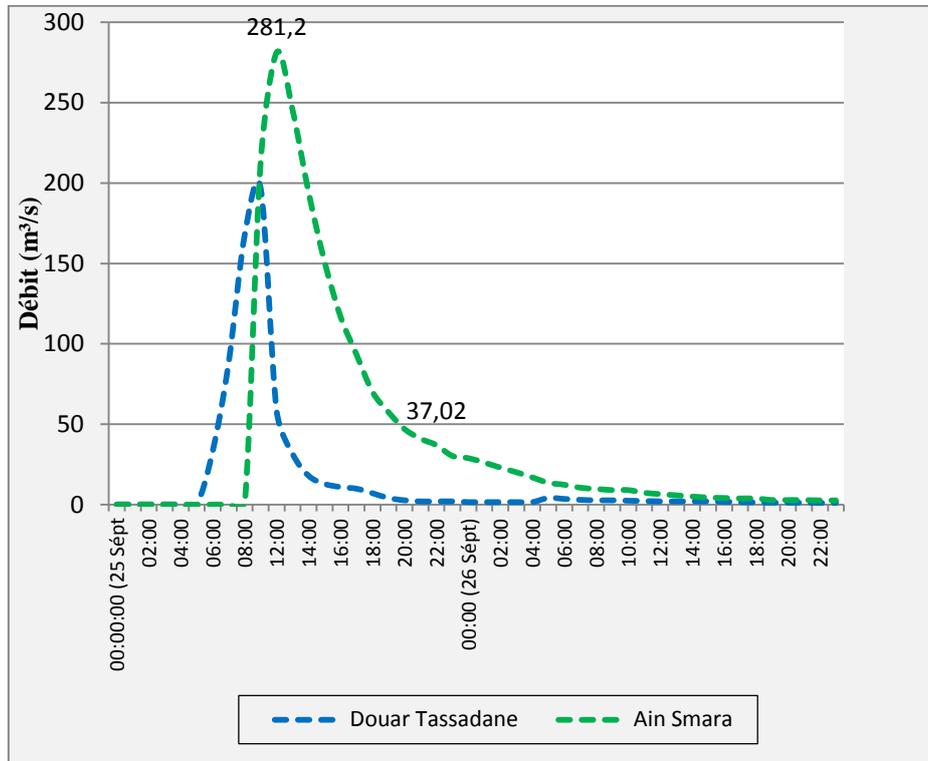


Figure 81: Hydrogrammes horaires des crues des 25-26 Septembre 1973 aux stations de Douar Tassadane et Ain Smara

#### 1.2.4.2. La crue de Février 1975

L'écart entre les débits instantanés ainsi qu'entre les maximums journaliers, pour les différentes stations du bassin, est très important et témoigne de la variété des réponses des sous bassins (la morphologie du lit, les caractéristiques physiques notamment, la lithologie, et les conditions météorologiques ayant engendré la crue). Ces valeurs sont faibles dans le bassin amont, le débit journalier maximum enregistré est de 4.65 m<sup>3</sup>/s à la station d'Ain Smara. Le débit maximum journalier s'accroît nettement et atteint à la station de Douar Tassadane 59.91 m<sup>3</sup>/s et 7 m<sup>3</sup>/s à la station de Koudiat Tendart. Bien que le bassin Rhumel-Endja soit soutenu à l'aval, le débit journalier maximum à la station de Grarem est de l'ordre de 52.60 m<sup>3</sup>/s (Figure 82).

Les hydrogrammes horaires sont intéressants dans la mesure où ils laissent apparaître plusieurs montées des niveaux d'eau, dues à des averses successives entre le 16 et 19 février 1975. Cependant le maximum instantané a été enregistré le 16 février à Douar Tassadane (121.6 m<sup>3</sup>/s), alors qu'il n'a été atteint à Grarem (98.6 m<sup>3</sup>/s) et Ain Smara (8.26 m<sup>3</sup>/s) que deux (2) jours plus tard, le 18 février 1975. L'allure des hydrogrammes relatives à ces crues, donne une image suggestive de la rapidité et brutalité caractérisant la montée et la descente des crues (Figure 83).

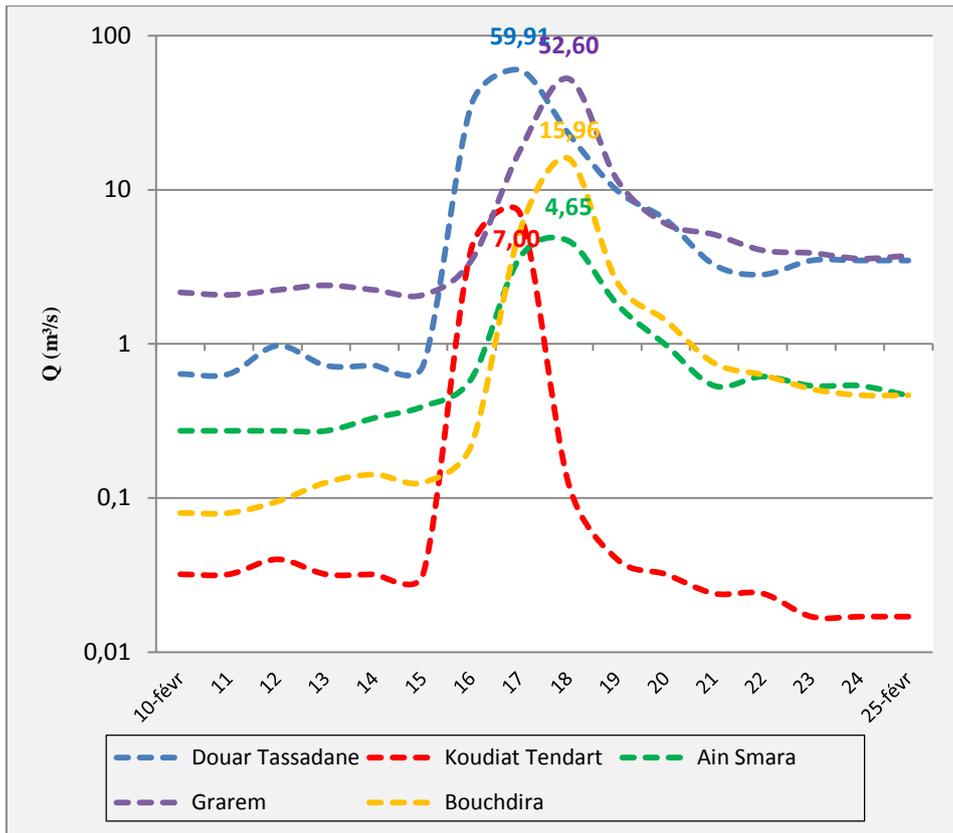


Figure 82: Hydrogramme journaliers des crues de Février 1975 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Grarem et Bouchdira

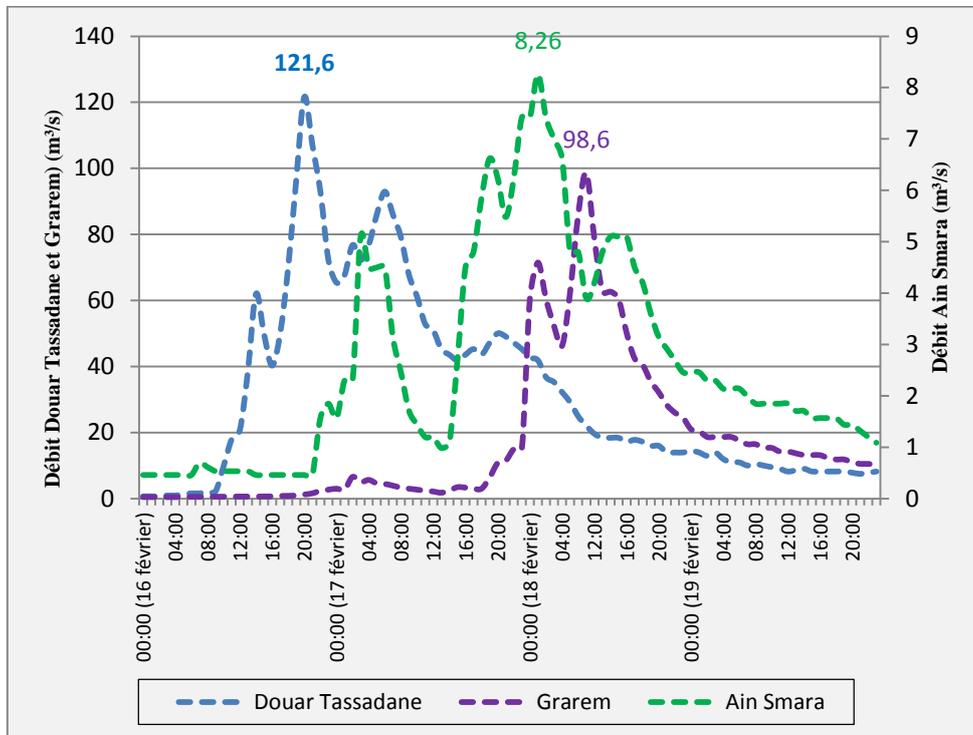


Figure 83: Hydrogrammes horaires des crues de 16-19 Février 1975 aux stations de Douar Tassadane, Grarem et Ain Smara

1.2.4.3. La crue d'Avril 1979

Au mois d'avril, une pluie torrentielle s'était abattue sur le bassin, le maximum a été enregistré ce même mois (141.04 mm) à Douar Tassadane, (133.58 mm) à Koudiat Tendart, (118.10 mm) à Ain Smara, 124.84 mm (Grarem) et à Bouchdira (254.92 mm).

L'hydrogramme journalier relatif à cette crue est intéressant dans la mesure où il laisse apparaître deux montées des niveaux d'eau, dues à une succession de deux phases (Figure 84): la première phase a eu lieu le 11 avril, et a engendré un débit maximum journalier à Douar Tassadane (19.82 m<sup>3</sup>/s), à Koudiat Tendart (3.36 m<sup>3</sup>/s) et à Ain Smara (12.8 m<sup>3</sup>/s) alors qu'il n'a été atteint que le 12 avril à Grarem (16.55 m<sup>3</sup>/s) et à Bouchdira (3.87 m<sup>3</sup>/s). La première décrue s'est étendue sur 4 jours. L'hydrogramme monte encore une fois, le 16 avril, à Ain Smara (37.18 m<sup>3</sup>/s), à Koudiat Tendart (15.29 m<sup>3</sup>/s), à Bouchdira (127.88 m<sup>3</sup>/s), à Douar Tassadane (67.82 m<sup>3</sup>/s) et à Grarem où a été enregistré le débit journalier le plus élevé de toutes les stations (305.89 m<sup>3</sup>/s).

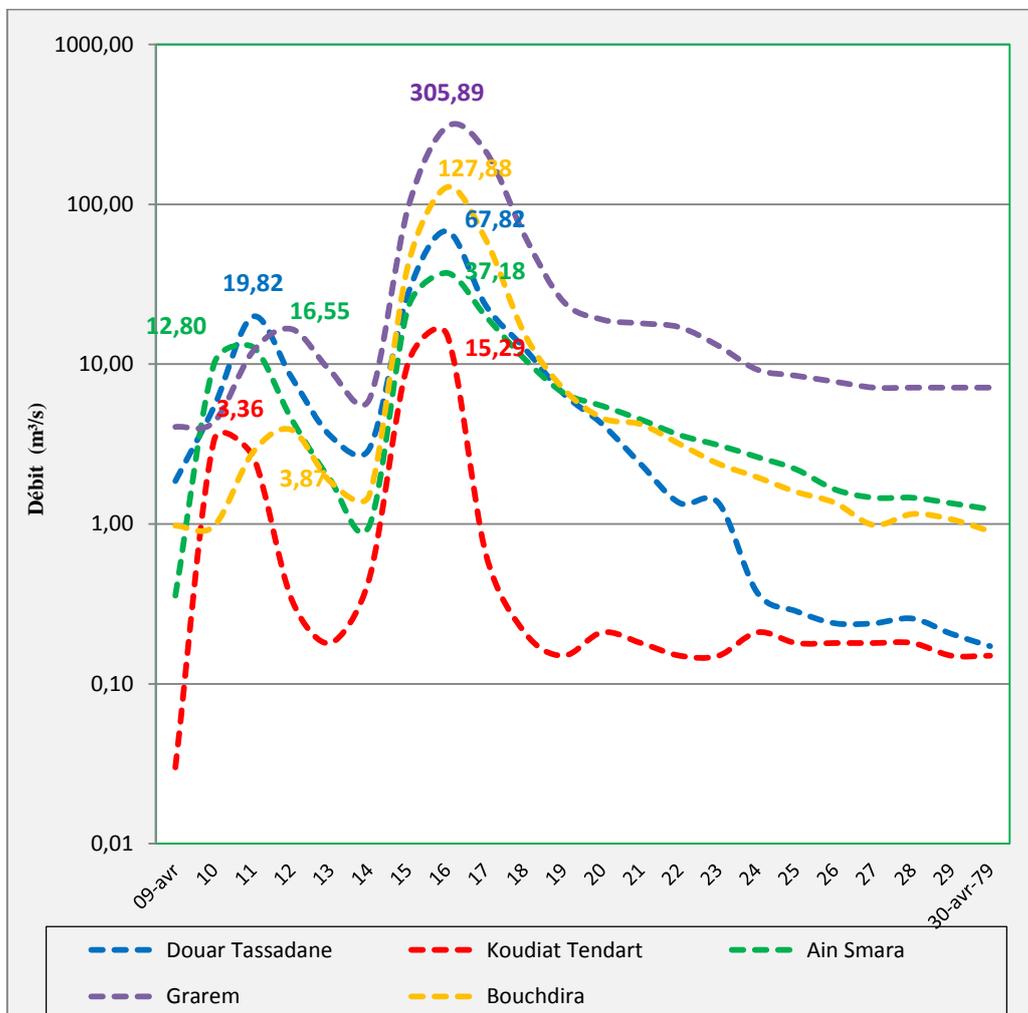


Figure 84: Hydrogrammes journaliers de crue Avril 1979 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Grarem et Bouchdira

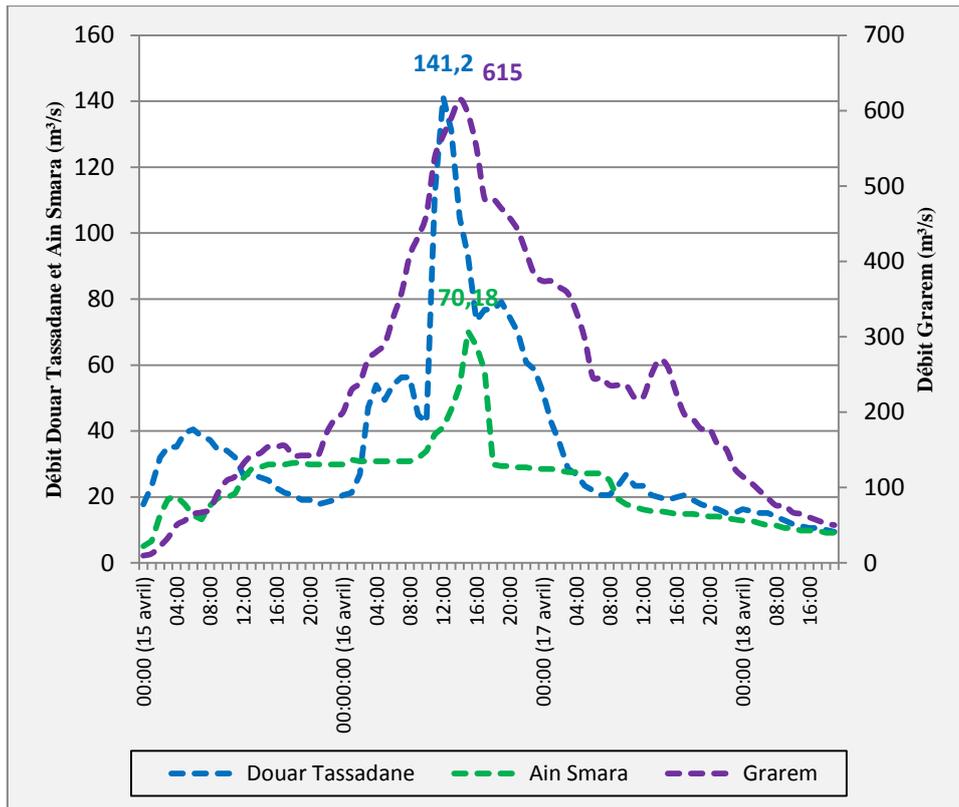


Figure 85: Hydrogrammes horaires des crues de 16-18 Avril 1979 aux stations de Douar Tassadane, Ain Smara et Grarem

Selon Mebarki (1982), cette crue engendra une montée brutale de l'écoulement déterminent le maximum principal du 16 Avril, la décrue s'est faite de façon beaucoup plus lente. En effet, le 16 avril à 14h00, l'oued Rhumel à Grarem a écoulé un débit de 615 m<sup>3</sup>/s, et l'oued El Kébir amont à Douar Tassadane, a écoulé, le même jour à 12h00, un débit de 141.2 m<sup>3</sup>/s ; à la station d'Ain Smara, un débit instantané de 70.80 m<sup>3</sup>/s a été atteint à 15h00 (Figure 85). La hauteur d'eau atteignit environ 4.46 m à Grarem, 2 m à Douar Tassadane et 1.64 m à Ain Smara.

#### 1.2.4.4. La crue de Décembre 1984

Les crues de décembre 1984 sont dues au phénomène de concentration pluviométrique, en particulier pendant l'épisode pluvieux, allant du 28 décembre 1984 au 01 janvier 1985. Cette crue s'est caractérisée par une nette concordance pour toutes les stations des débits maximaux journaliers, en date du 30 Décembre. Les hydrogrammes journaliers laissent apparaître deux montées de niveau d'eau, dues à deux averses successives. Le maximum de la première averse a été enregistré le 23 Décembre 1984 à l'exception, de la station d'Ain Smara où le maximum a été atteint le 24 Décembre 1984. Cependant, le maximum journalier a été enregistré le 30 Décembre pour toute les stations hydrométriques: 21.41 m<sup>3</sup>/s (Koudiat Tendart), 113.02 m<sup>3</sup>/s (Douar Tassadane), 255.77 m<sup>3</sup>/s (Ain Smara), 304.33 m<sup>3</sup>/s (Bouchdira) et 942.82 m<sup>3</sup>/s (Grarem) (Figure 86).

L'hydrogramme horaire observé sur la vallée inférieure de l'Oued Rhumel, à la station de Grarem, du 28 décembre 1984 au 1er janvier 1985, représente la plus grande crue observée, avec une durée de retour estimée à 45 ans. Cette crue a enregistré une hauteur de 8.25 m, le 30 décembre à 7 h00, correspondant à un débit instantané de 1886 m<sup>3</sup>/s, le plus élevé de toutes les crues de la série observée (Figure 87). La montée des eaux s'est produite en 16 heures et la décrue en 53 heures. Pour la station d'Ain Smara, on constate un étalement de la crue avec un premier maxima de 308 m<sup>3</sup>/s suivi d'une onde de crue plus importante de 410 m<sup>3</sup>/s; la décrue se déroule sur une durée de 52 heure pour descendre à un débit de 59.08 m<sup>3</sup>/s. L'étalement du débit s'explique sans doute par un retour important des pluies, qui, sur un sol déjà gorgé d'eau, crée un second débit de pointe assez rapidement.

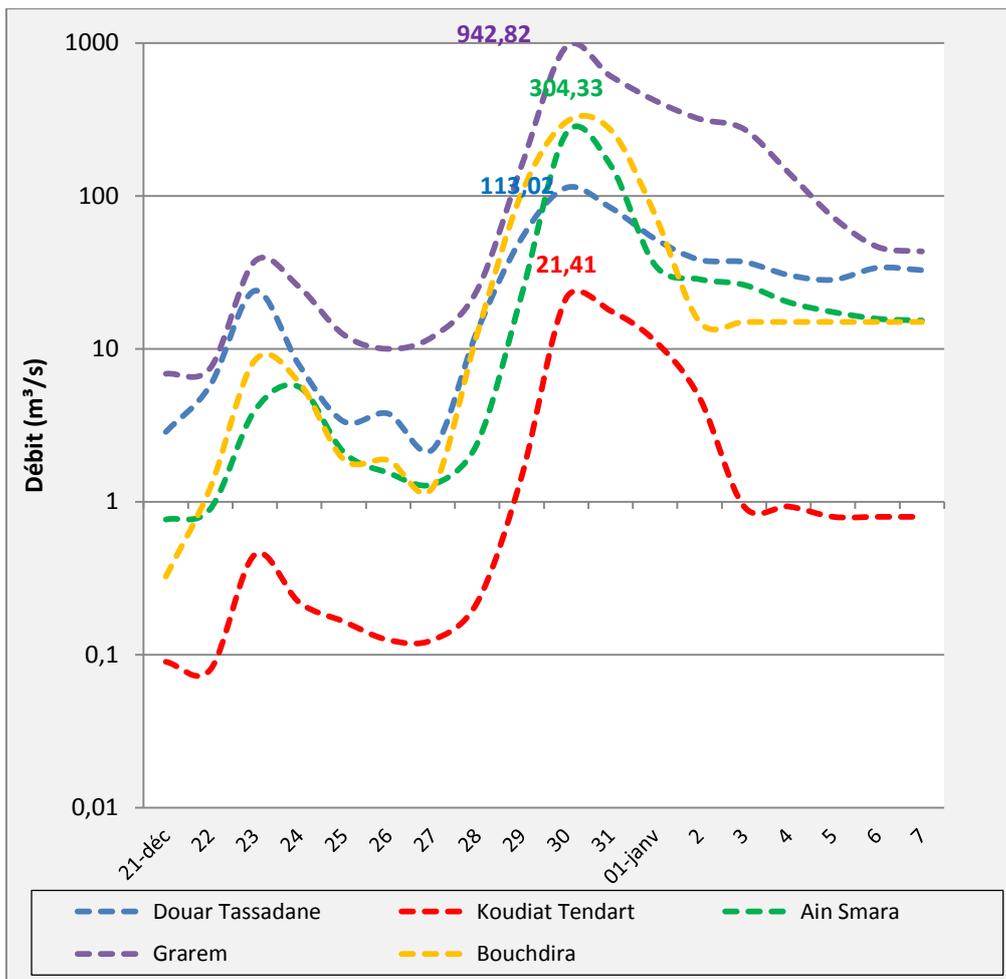


Figure 86: Hydrogrammes journaliers de crue- Décembre 1984-Janvier 1985 aux stations Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Grarem et Bouchdira

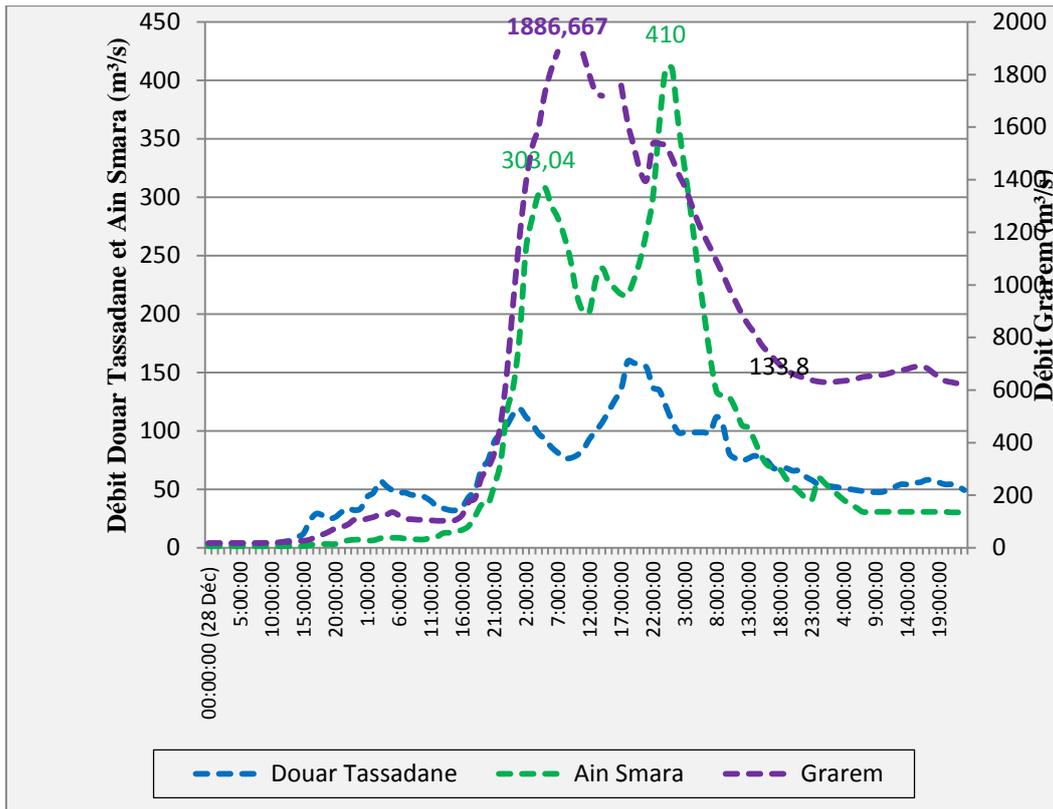


Figure 87: Hydrogrammes horaires des crues de 28 Décembre 1984-01 janvier 1985 aux stations Douar Tassadane, Ain Smara et Grarem

#### 1.2.4.5. La crue de mars 1985

Le maximum de l'onde de crue a été enregistré le 8 mars à Ain Smara (143 m<sup>3</sup>/s) (Figure 88). Plus en aval à la station de Grarem, le débit journalier maximum s'accroît de façon notable en raison de changement de domaine climatique (571.77 m<sup>3</sup>/s). Le débit journalier maximum mesuré à la station de Douar Tassadane est de 123.60 m<sup>3</sup>/s et 36.41 m<sup>3</sup>/s à la station de Koudiat Tendart. L'oued Smendou à Bouchdira présente un débit maximum de 52.33 m<sup>3</sup>/s le 7 mars.

L'écart entre les débits instantanés pour les différentes stations du bassin (Douar Tassadane, Grarem et Ain Smara), est très important et témoigne de la variété des réponses des sous bassins, en lien avec leurs caractéristiques physiques (la lithologie et les conditions météorologiques ayant engendré la crue) (Figure 89), Le maximum instantané (207 m<sup>3</sup>/s) a été enregistré, le 8 mars à 7h00, à Ain Smara. Son accroissement est marqué à la station de Grarem qui reçoit un flux très important (1196 m<sup>3</sup>/s le 08 mars à 8 h00), Le débit de pointe du Rhumel à Grarem est cinq fois plus élevé que celui observé à Ain Smara.

Il est à noter qu'il y a un intervalle de 15 heures entre les débits instantanés de Douar Tassadane et Ain Smara et 8 heures entre le débit instantané de Douar Tassadane et Grarem. Ceci est dû à plusieurs facteurs, notamment, la forme du sous bassin, la densité de drainage, la forme du réseau hydrographique, la couverture végétale et la répartition spatiale des averses.

Il importe de souligner la brutalité caractérisant la montée des hydrogrammes horaires et journaliers en mars 1985. Cependant, la phase de décrue est moins rapide en raison du prolongement des averses 2 jours après la pointe de crue.

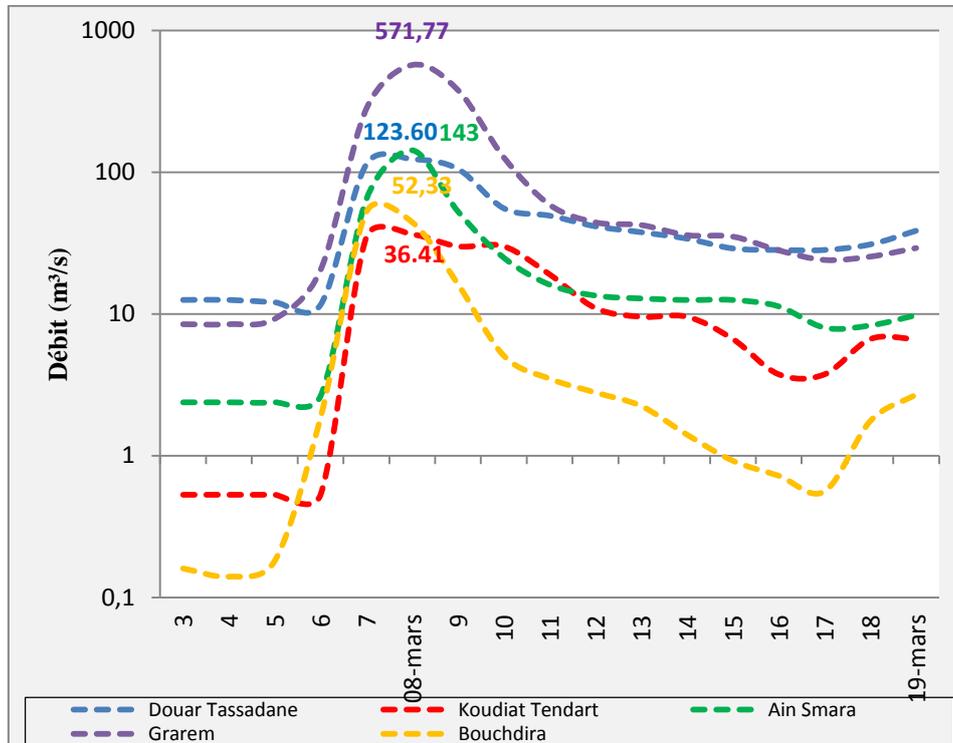


Figure 88: Hydrogrammes journaliers de crue mars 1985 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Grarem et Bouchdira

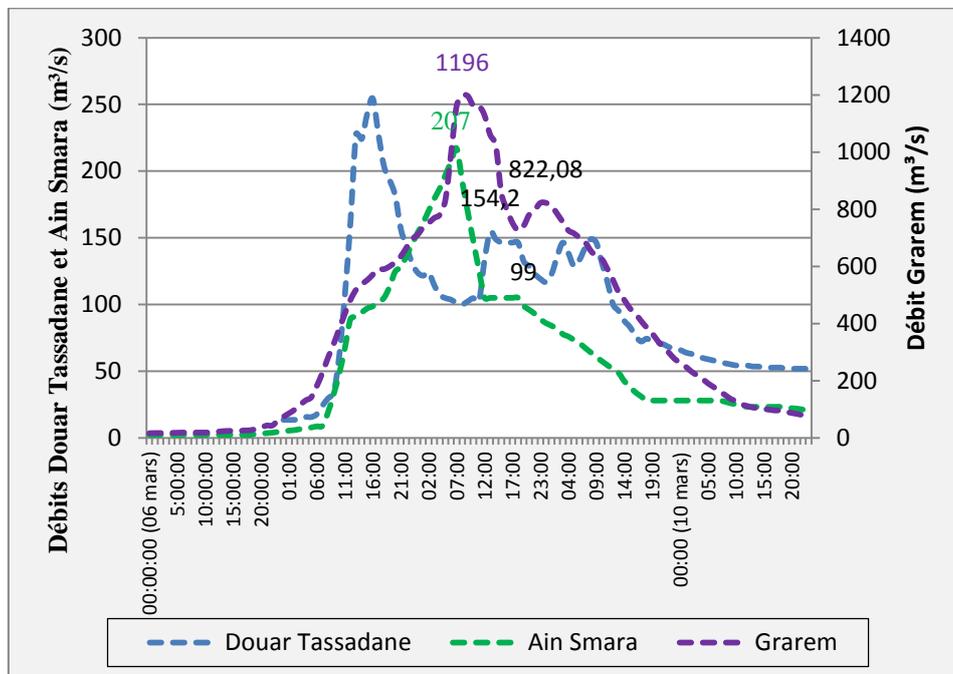


Figure 89: Hydrogrammes horaires des crues de 06-10 mars 1985 aux stations de Douar Tassadane, Ain Smara et Grarem

1.2.4.6. La crue de janvier 2003

Des précipitations importantes ont provoqué la crue du janvier 2003. La station hydrométrique de Douar Tassadane a enregistré un débit journalier maximum de 250.71 m<sup>3</sup>/s alors que la station de Koudiat Tendart, a vu transiter un débit journalier de 117.27 m<sup>3</sup>/s ; cette valeur est de 98.33 m<sup>3</sup>/s à la station de Bouchdira (Figure 90). L'hydrogramme journalier laisse apparaître trois montées d'eau suite à trois averses successives. Pour la première crue, le débit journalier est passé de 2.02 à 19.28 m<sup>3</sup>/s à Douar Tassadane, de 0.66 à 15.20 m<sup>3</sup>/s à Koudiat Tendart et de 0.60 à 48.85 m<sup>3</sup>/s à Bouchdira. Pour la seconde, il est passé de 4.82 à 64.43 m<sup>3</sup>/s (Douar Tassadane), de 2.25 à 49.58 m<sup>3</sup>/s (Koudiat Tendart) et de 7.64 à 80.12 m<sup>3</sup>/s (Bouchdira). Après ce maximum, et une baisse des eaux au cours des 4 ou 5 jours consécutifs, une autre crue beaucoup plus décisive a eu lieu du 24 au 28 janvier 2003, les débits sont passés de 22.91 à 250.71 m<sup>3</sup>/s à la station de Douar Tassadane, de 35.33 à 117.27 m<sup>3</sup>/s à la station Koudiat Tendart et de 21.01 à 98.33 m<sup>3</sup>/s à la station de Bouchdira.

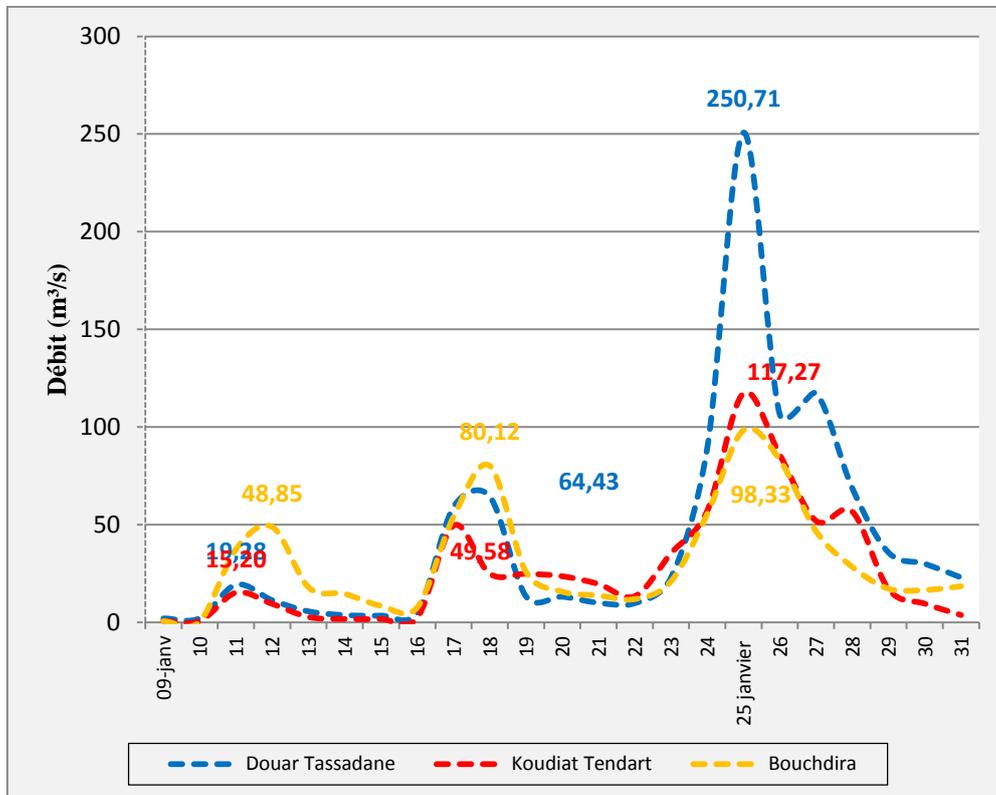


Figure 90: Hydrogrammes journaliers de crue janvier 2003 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart et Bouchdira

Les hydrogrammes de la première crue qui s'est écoulée du 11 au 13 janvier 2003 témoignent de la brièveté des événements: le temps de montée de cette crue pour les deux stations de Douar Tassadane et de Koudiat Tendart est particulièrement court (deux heures seulement), ensuite la décrue est assez rapidement (Figure 91).

La crue est plus marquée au bassin de l'oued El Kébir amont à Douar Tassadane dont le maximum instantané a atteint 609.4 m<sup>3</sup>/s le 25 janvier à 17h 00. L'oued El Kébir amont réagit de façon intense aux averses car les pentes relativement fortes, les précipitations abondantes

et la végétation faible. L'oued Bouselah à Koudiat Tendart a écoulé un maximum de 180 m<sup>3</sup>/s le 25 janvier à 15h 00 (Figure 92).

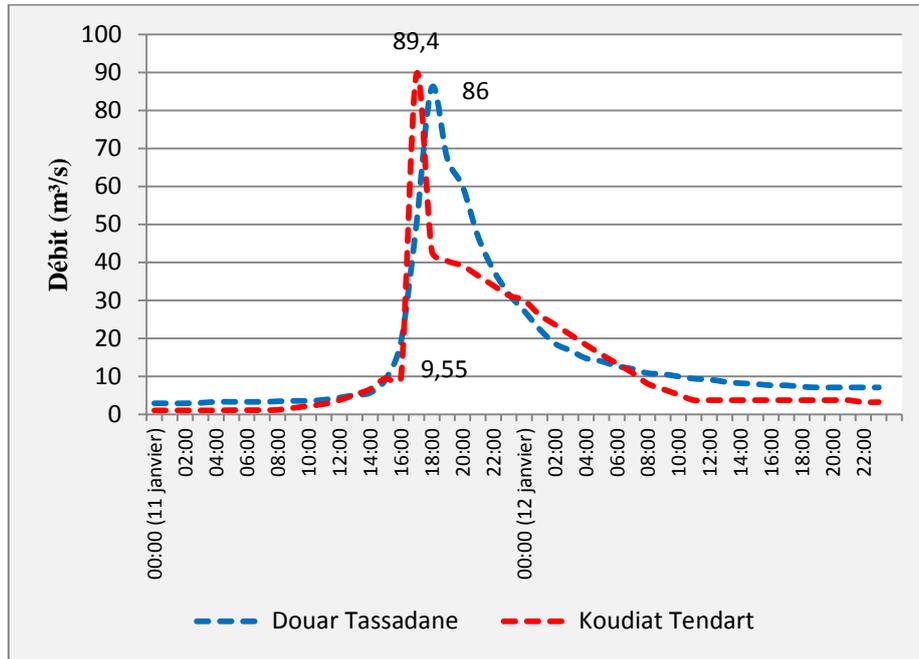


Figure 91: Hydrogrammes horaires des crues de 11-13 janvier 2003 aux stations de Douar Tassadane et Koudiat Tendart

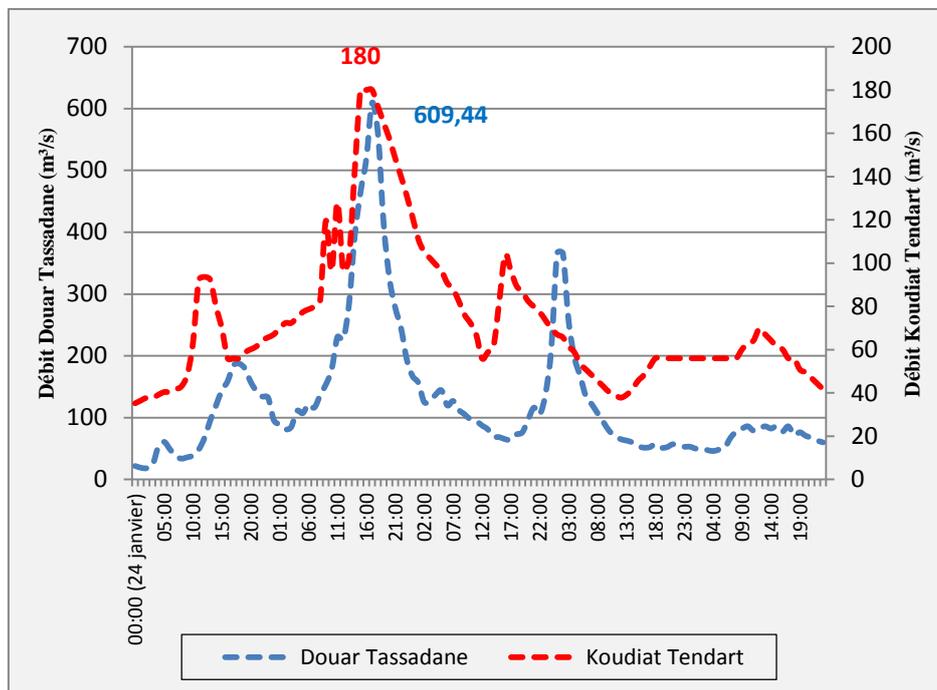


Figure 92: Hydrogrammes horaires des crues de 24-28 janvier 2003 aux stations de Douar Tassadane et Koudiat Tendart

### 1.2.5. La puissance et apports des crues des différents oueds

Les valeurs des débits absolus et spécifiques, regroupées dans le tableau 31, montrent que les crues n'affectent pas les sous bassins avec la même puissance comme le montrent les valeurs du coefficient de crue **A** défini par **Meyer-Coutagne-Pardé**, variant fortement d'un sous bassin à l'autre en lien avec les conditions physico-climatiques (répartition spatiale et temporelle de la pluie, intensité et durée de l'averse, morphologie du bassin, nature des sols, couverture végétale).

$A = Q_{\max} \cdot \sqrt{S}$      $Q_{\max}$  : débit maximum instantané ( $m^3/s$ ),  $S$  : la surface du bassin ( $km^2$ )

Pour l'oued Rhumel Aval à Grarem, le coefficient A s'échelonne de 1.35 à 25.87. Le coefficient le plus fort a été enregistré pendant la crue du 28 décembre 84 au 1<sup>er</sup> janvier 1985, où le débit de pointe a culminé à 1886.67  $m^3/s$ , engendrant des inondations dans la région. L'analyse des données pluviométriques révèle la forte pluviosité de cette année, la lame d'eau précipitée de décembre ayant atteint 199.49 mm à Grarem (32.81 % du total annuel). Pour cette même crue le coefficient A est également important pour l'oued Smendou à Bouchdira (18.48). Pour l'oued Rhumel Seguin à Ain Smara, cet événement le plus important enregistré dans le sous-bassin s'est traduit par un coefficient A de 8.74 et un débit maximum de pointe de 410  $m^3/s$ . Cette crue a généré un volume de 39.98  $hm^3$  à Ain Smara, de 70.08  $hm^3$  à Bouchdira et de 267.70  $hm^3$  à Grarem,

Sur l'oued El Kébir amont à Douar Tassadane, la crue des 24-28 janvier 2003 est considérée comme la plus forte, avec un coefficient A de 19.67. Pendant la journée du 25 janvier 2003, ce sous bassin a écoulé un apport de 54.74  $hm^3$  (19.70 % de l'apport moyen annuel). A la station de Koudiat Tendart, le coefficient A est de 13.81 et l'oued Bouselah a évacué 31.85  $hm^3$  (soit 31.09 % du total annuel).

Pendant la crue généralisée de la période du 6 au 10 mars 1985, l'Oued Rhumel à Grarem a charrié un apport de 172.04  $hm^3$  (25.51 % de l'apport annuel) pour un débit de pointe de 1196  $m^3/s$ , L'oued El Kébir amont à Douar Tassadane a évacué 33.96  $hm^3$  (11.14 % du total annuel) pour un débit de pointe de 254.44  $m^3/s$ . La même crue a généré un volume de 24.11  $hm^3$  à Ain Smara (Rhumel-Seguin), 10.66  $hm^3$  à Bouchdira (Oued Smendou) et 11.38  $hm^3$  à Koudiat Tendart (Oued Bouselah), soit respectivement 15.39 %, 12.5 % et 25.05 % du volume annuel.

En général, d'une crue à une autre et d'un sous bassin à l'autre, l'apport d'une seule crue oscille entre moins 1 et plus de 82 % de l'apport moyen annuel (Tableau 31).

Selon les coefficients A, les crues du bassin du Rhumel-Endja peuvent être qualifiés de faibles pour la partie amont du bassin et de forts dans la partie aval du bassin.

Signalons des coefficients A connus pour d'autres bassins algériens: 41.1 à Medjez Amar (oued Seybouse) pour la crue du 10 février 1971; 20.4 à Reboa (oued Chemora, Hauts plateaux constantinois) pour la crue du 27 septembre 1969 (Guidoum, 2017). Les valeurs de A calculées pour le bassin de Tafna: sont de 0.98 à la station d'Ain Youcef (Bassin Sikkak) pour la crue du 20 mars 1989, de 4.47 à Sidi Belkheir (Bassin Mouillah) pour la crue du 20 mars 1989 (Bouanani, 2004).

Tableau 31: Caractéristiques des principales crues et les apports des principales crues

Date du maximum	Durée (h)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Débit max instantané		Q j max (m <sup>3</sup> /s)	Q max/√S.	Volume total écoulé pendant la crue 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Apport total de l'année hydrologique 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	% du volume de la crue par rapport au volume annuel	Pluie moyenne mensuelle (mm)
			absolu Qi max (m <sup>3</sup> /s)	Spécifique (l/s/km <sup>2</sup> )						
<b>Douar Tassadane</b>										
25-26 Septembre 1973	45	960	196,80	205,00	36,22	<b>6,35</b>	<u>2,52</u>	115,24	2,18	62,31
16-19 Février 1975	91	960	121,60	126,67	59,90	<b>3,93</b>	<u>10,82</u>	53,64	20,17	115,07
15-18 Avril 1979	83	960	141,20	147,08	67,82	<b>4,56</b>	<u>11,39</u>	79,44	14,34	141,04
28 Déc 1984-01 jan 1985	119	960	159,40	166,04	113,02	<b>5,15</b>	<u>27,20</u>	304,82	8,92	291,55
06-10 Mars 1985	94	960	254,40	265,00	123,61	<b>8,21</b>	<u>33,96</u>	304,82	11,14	181,46
11-12 janvier 2003	47	960	86,00	89,58	19,28	<b>2,78</b>	<u>2,64</u>	277,88	0,95	229,98
24-28 janvier 2003	119	960	609,44	634,83	250,71	<b>19,67</b>	<u>54,74</u>	277,88	19,70	229,98
<b>Koudiat Tendart</b>										
15-18 Avril 1979	-	170	31,2	183,53	15,29	<b>2,39</b>	<u>2,27</u>	5,92	38,35	133,58
28 Déc 1984-01 jan 1985	-	170	35,2	207,06	21,41	<b>2,70</b>	<u>4,91</u>	45,45	10,81	200,41
06-10 Mars 1985	-	170	89,4	525,88	36,41	<b>6,86</b>	<u>11,38</u>	45,45	25,05	106,63
11-12 Janvier 2003	47	170	89,4	525,88	15,20	<b>6,86</b>	<u>2,13</u>	102,43	2,08	154,83
24-28 Janvier 2003	119	170	180	1058,82	117,28	<b>13,81</b>	<u>31,85</u>	102,43	31,09	154,83
<b>Ain Smara</b>										
25-26 Sép 1973	45	2200	281,2	127,82	79,80	<b>6,00</b>	<u>6,54</u>	27,63	23,66	39,10
16-19 Février 1975	91	2200	8,26	3,75	4,66	<b>0,18</b>	<u>0,88</u>	10,99	7,98	62,23
15-18 Avril 1979	83	2200	70,18	31,90	37,20	<b>1,50</b>	<u>7,35</u>	24,53	29,97	118,10
28 Déc 84-01 janvier 1985	119	2200	410	186,36	255,77	<b>8,74</b>	<u>39,98</u>	156,67	25,52	147,31
06-10 mars 1985	94	2200	217	98,64	143,03	<b>4,63</b>	<u>24,11</u>	156,67	15,39	109,12
<b>Grarem</b>										
16-19 Février 1975	91	5320	98,60	18,53	52,61	<b>1,35</b>	<u>5,71</u>	75,24	7,60	62,12
15-18 Avril 1979	83	5320	615,00	115,60	305,89	<b>8,43</b>	<u>69,95</u>	161,01	43,44	124,84
28 Déc 1984-01 jan 1985	119	5320	1886,67	354,64	942,83	<b>25,87</b>	<u>267,70</u>	674,31	39,70	199,49
06-10 Mars 1985	94	5320	1196,00	224,81	571,78	<b>16,40</b>	<u>172,04</u>	674,31	25,51	128,01
<b>Bouchdira</b>										
13-18 Avril 1979	-	295	163,53	554,35	127,88	<b>9,52</b>	<u>21,48</u>	44,47	48,30	254,93
28 Déc 1984-01 jan 1985	-	295	317,27	1075,48	304,33	<b>18,48</b>	<u>70,08</u>	85,25	82,21	451,78
06-10 Mars 1985	-	295	161,00	545,76	52,33	<b>9,38</b>	<u>10,66</u>	85,25	12,50	249,46
24-28 janvier 2003	-	295	160	542,37	98,34	<b>9,32</b>	<u>30,27</u>	187,45	16,15	228,39

- : absence des données

### 1.3. La méthode ANRH de simulation des $Q_{jmax}$ et $Q_{imax}$ et des hydrogrammes de crues

L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques a confié l'étude générale des crues du Nord de l'Algérie au groupement ENHYD – STUCKY Ingénieurs Conseils. Cette étude décrit le modèle pour la prédétermination des débits de crue sur les bassins versants du Nord de l'Algérie. Des relations empiriques entre les quantiles de crue (pour des périodes de retour biennale, décennale, vingtennale et cinquantennale), sont proposées en tenant compte des paramètres morphologiques des bassins contrôlés par les stations hydrométriques (surface, pente, altitude), des caractéristiques des pluies journalières maximales aux bassins (pluie journalière décennale, gradex des pluies journalières) (ANRH, 2008).

Par ailleurs, la construction de l'hydrogramme de crue implique au préalable la recherche d'une relation liant la durée caractéristique aux paramètres morphologiques du bassin versant

#### 1.3.1. Prédétermination des débits moyens

L'étude dispose d'un échantillon des quantiles des crues  $Q_j(T)$  et  $Q_i(T)$  pour différentes périodes de retour ( $T=2$  ans,  $T=5$  ans,  $T=10$  ans,  $T=20$  ans,  $T=50$  ans). A partir de ces différentes données, l'ANRH a cherché à expliquer les caractéristiques de crue à partir des paramètres morphométriques et pluviométriques des bassins versants contrôlés par les stations hydrométriques. Il s'agit de la surface, de la pente du thalweg le plus long et de la pluie journalière décennale sur les bassins (Tableau 32).

Tableau 32: Modèles de prédétermination des débits de crue (débits instantanés et journaliers maximums) pour les différents temps de retour

Temps de retour	Modèle de prédétermination du débit instantané maximum ( $m^3/s$ )	Modèle de prédétermination du débit journalier maximum ( $m^3/s$ )
T=2 ans	$Q_i(2) = 0,094.S^{0,76}.p^{0,29}.P_j(10)^{0,79}$	$Q_j(2) = 2,96.10^{-7}.S^{1,09}.p^{0,30}.P_j(10)^{3,01}$
T=5 ans	$Q_i(5) = 1,87.S^{0,70}.p^{0,38}.P_j(10)^{0,43}$	$Q_j(5) = 1,75.10^{-5}.S^{1,02}.p^{0,33}.P_j(10)^{2,35}$
T=10 ans	$Q_i(10) = 0,740 S^{0,678} P^{0,485} P_j(10)^{0,811}$	$Q_j(10) = 0,000215 S^{0,829} P^{0,272} P_j(10)^{2,03}$
T=20 ans	$Q_i(20) = 8,20.S^{0,67}.p^{0,38}.P_j(10)^{0,28}$	$Q_j(20) = 1,03.10^{-4}.S^{0,97}.p^{0,26}.P_j(10)^{2,10}$
T=50 ans	$Q_i(50) = 14,7.S^{0,66}.p^{0,38}.P_j(10)^{0,21}$	$Q_j(50) = 2,34.10^{-4}.S^{0,95}.p^{0,24}.P_j(10)^{1,97}$

$Q_i(10)$  est exprimé en  $m^3/s$ , Surf en  $km^2$ , Pente sans unité et  $P_j(10)$  en mm

L'intérêt de ces relations issues de l'analyse des crues vise une meilleure compréhension de la réponse hydrologique des sous bassins.

Dans notre zone d'étude, seules 3 stations de jaugeage (**Douar Tassadane, Koudiat Tendart et Ain Smara**) ont pu être retenues, en se basant sur les paramètres morphométriques (pente et surface) et les données pluviométriques disponibles (pluie journalière décennale moyenne). Sur les stations de Grarem et Bouchdira, nous n'avons pas d'informations détaillées.

Les résultats des débits obtenus par les formules empiriques ainsi que ceux observés sont présentés dans le tableau 33.

Tableau 33: Valeurs des débits des crues estimés et observés (Station Douar Tassadane, Koudiat Tendart et Ain Smara)

	Douar Tassadane			Koudiat Tendart			Ain Smara		
	Débit simulé	Débit observé ajusté à une loi de Galton (m <sup>3</sup> /s)	Ecart relatif entre les débits simulés et les débits calculés à l'aide de la loi de Galton (%)	Débit simulé (m <sup>3</sup> /s)	Débit observé ajusté à une loi de Galton (m <sup>3</sup> /s)	Ecart relatif entre les débits simulés et les débits calculés à l'aide de la loi de Galton (%)	Débit simulé (m <sup>3</sup> /s)	Débit observé ajusté à une loi de Galton (m <sup>3</sup> /s)	Ecart relatif entre les débits simulés et les débits calculés à l'aide de la loi de Galton (%)
<b>Débit journalier</b>									
2 ans	74,82	58,1	-28,8	5,87	9,03	35,01	54,02	23,4	-131
5 ans	132,9	103	-28,6	14,6	20,39	28,39	110,9	61,1	-81,5
10 ans	139,8	140	-0,15	22,45	31,24	28,12	115,6	100,9	-14,6
20 ans	252,8	179	-41,2	31,14	44,51	30,04	231,2	152,6	-51,5
50 ans	309,4	237	-30,7	40,47	65,92	38,61	295	243,3	-21,2
Moyenne des écarts			25,9			32,03			-59,9
<b>Débit instantané</b>									
2 ans	153,5	134	-14,2	40,83	46,92	12,98	180,2	66,72	-170
5 ans	280,5	241	-16,3	97,6	96,56	-1,08	303	212	-42,9
10 ans	318,4	327	2,74	109,6	140,8	22,14	332,5	388,1	14,31
20 ans	518,7	421	-23,1	198,7	192,3	-3,34	631,2	639,3	1,26
50 ans	769,2	560	-37,4	254,2	273	6,89	789,5	1121	29,58
Moyenne des écarts			-17,6			7,518			-33,6

L'ANRH a cherché à expliquer les caractéristiques de crue à partir des paramètres morphométriques et pluviométriques des bassins versants contrôlés par les stations hydrométriques. La comparaison des débits fréquentielles prédéterminées par les formules A.N.R.H. avec ceux obtenus par l'ajustement gaussien-logarithmique, appliquée directement sur les débits de crue observés des stations étudiées, montre que des écarts importants sont constatés pour les trois stations, pouvant aller du simple au double ou triple au niveau des trois stations. La moyenne des écarts relatifs entre débits simulés et débit observés variés entre -25,9 m<sup>3</sup>/s pour Douar Tassadane à 32 m<sup>3</sup>/s pour la station de Koudiat Tendart pour les débits journaliers et la moyenne des écarts relatifs entre les débits simulés et observés instantanés variés entre -17,6 m<sup>3</sup>/s pour Douar Tassadane et 7,52 m<sup>3</sup>/s pour Koudiat Tendart (Tableau 33). Cette différence s'explique que dans l'étude A.N.R.H. les ajustements sur les débits journaliers et instantanés sont réalisés grâce à des paramètres morphologiques et des caractéristiques des pluies journalières maximales sur les bassins versants contrôlés par les stations hydrométriques.

### 1.3.2. Le modèle d'hydrogramme de crue

Dans de nombreuses études hydrologiques, le débit moyen journalier et le débit de pointe de crue ne suffisent pas pour le dimensionnement d'ouvrages où la forme de l'hydrogramme de crue joue un rôle important. C'est par exemple le cas pour l'évaluation du laminage d'une crue à la traversée d'un barrage (ANRH, 2008). La méthode de simulation de l'hydrogramme de crue proposée par l'ANRH pour les crues décennale, cinquantennale et centennale est appliquée sur trois stations hydrométriques du bassin Rhumel-Endja (Douar Tassadane, Koudiat Tendart et Ain Smara).

La première étape consiste à évaluer la surface et la pente des bassins aux stations, ensuite on reporte les informations pluviométriques journalières (les pluies journalières décennales, cinquantennales et centennales moyennes) et le gradex de ces pluies (Figure 93). Sur cette feuille Excel, les cellules colorées en jaune sont destinées à recevoir les données et les instructions. Dès que les quatre premières informations ont été introduites, la feuille calcule les premiers éléments possibles.

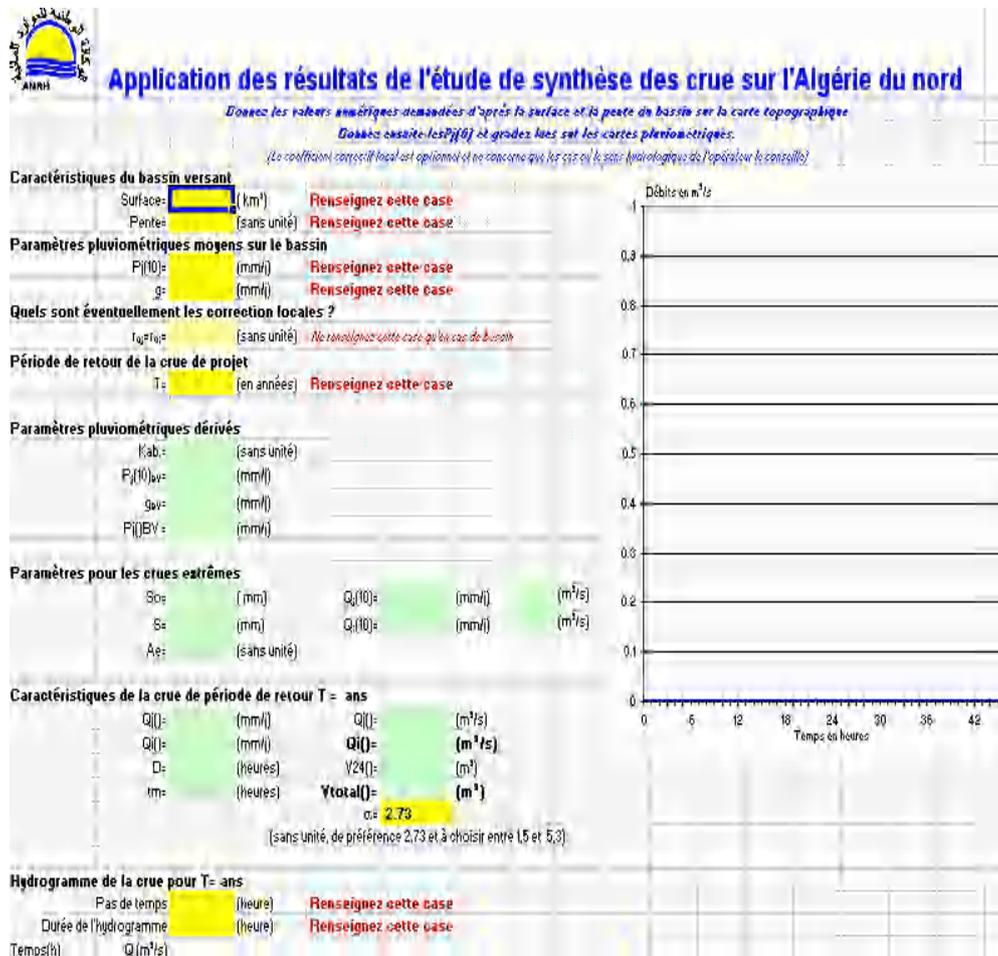


Figure 93: Feuille de calcul à la première ouverture (paramètres de simulation de l'hydrogramme de crue) (ANRH, 2008)

Une fois la feuille d'Excel renseignée, les tracés des hydrogrammes sont obtenues automatiquement sur la feuille de travail comme le montre l'exemple du bassin de Douar Tassadane pour lequel la crue est estimée pour une période de retour de 100 ans (Figure 94). Pour ce bassin de l'oued El Kébir amont (S= 960 km<sup>2</sup>, pente =0,012), le coefficient d'abattement (Kab) est de 0.78 et la pluie décennale (Pj 10) est de 62 mm avec un gradex des pluies (g) de 13 mm.

L'application des formules empiriques de Qi(10) et Qj (10) donnent respectivement des débits décennaux de 269 m<sup>3</sup>/s pour la pointe de crue et de 140 m<sup>3</sup>/s pour le débit moyen journalier (13 mm par jour de ruissellement). Le coefficient Ae est donc de 269/140=1.9. Le seuil S<sub>o</sub> est calculé à partir des Pj10 et gradex du bassin et on trouve une interception initiale de 19 mm. Enfin, une pluie de 62 mm, avec un abattement de 19 mm donne un ruissellement en 24h de 13 mm, on déduit que le coefficient S est de 107 mm (Figure 94).

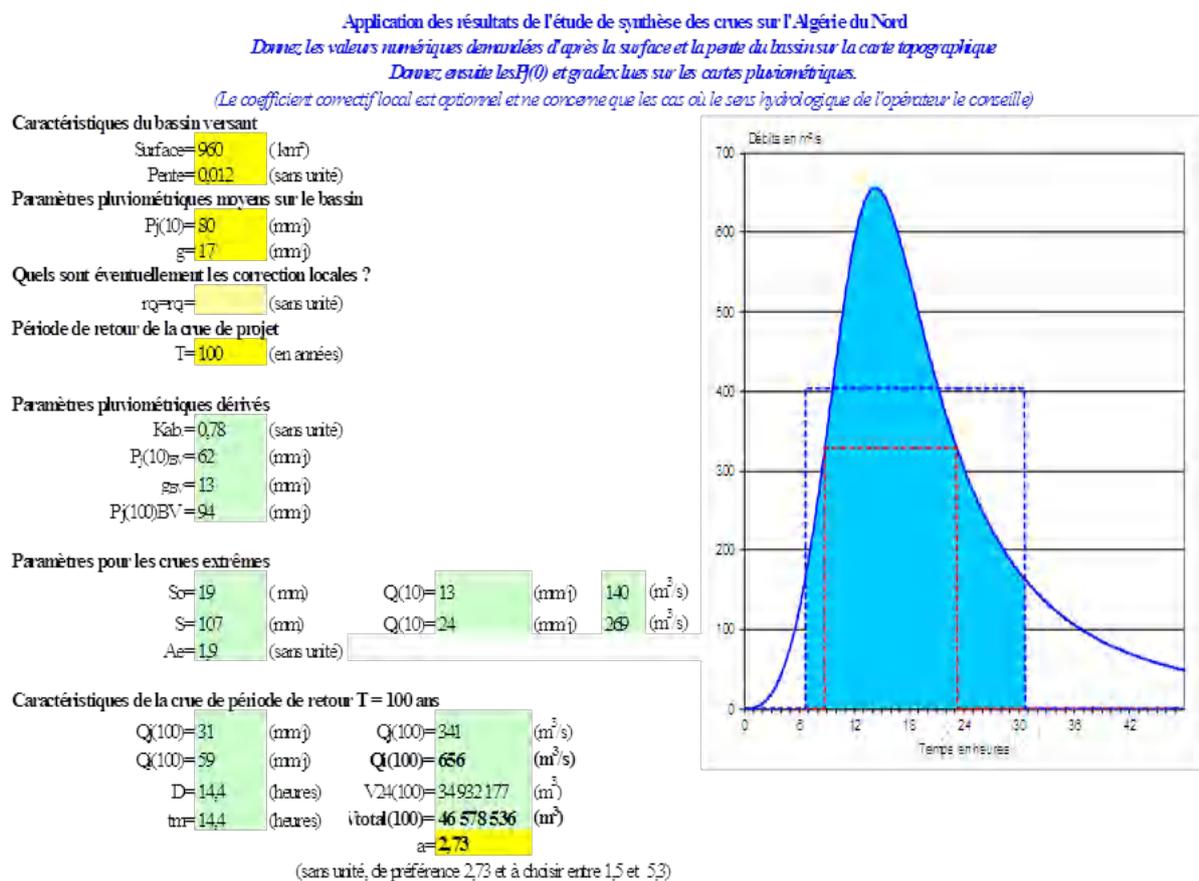


Figure 94: Résultats du calcul de la crue de projet à la station de Douar Tassadane

Pour évaluer la crue centennale, on sait maintenant que P<sub>j</sub>(100)=94 mm et que l'on peut en déduire la lame ruisselée Q<sub>j</sub>(100) par la relation:

$$Q_j(100) = \frac{(94 - 19)^2}{94 + 107 - 19} = 31 \text{ mm} / j$$

Soit encore  $Q_j(100) = 341 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le débit centennal instantané est alors :  $Q_i(100) = 341 * 1.9 = 656 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Quelques itérations permettent alors de montrer qu'une crue donnant en pointe  $656 \text{ m}^3/\text{s}$ , avec un volume écoulé en 24h de  $34\,932\,177 \text{ m}^3$  et  $\alpha = 2.73$  est une crue de temps de montée  $T_m = 14.4$  heures et de durée caractéristique  $D$  de 14.4 heures. Le volume total écoulé durant la crue est de  $46\,578\,536 \text{ m}^3$  (Figure 94).

Ayant obtenu ces premiers résultats, il est possible de reconstituer l'hydrogramme de cette crue de projet dans un format adapté à nos besoins. Supposons que nous souhaitions avoir l'hydrogramme sur les 60 premières heures au pas de temps de 2 heures, il suffit de renseigner ainsi les deux dernières cases jaunes. On obtient alors un tableau récapitulatif des données et des résultats comme indiqué à la figure 95.

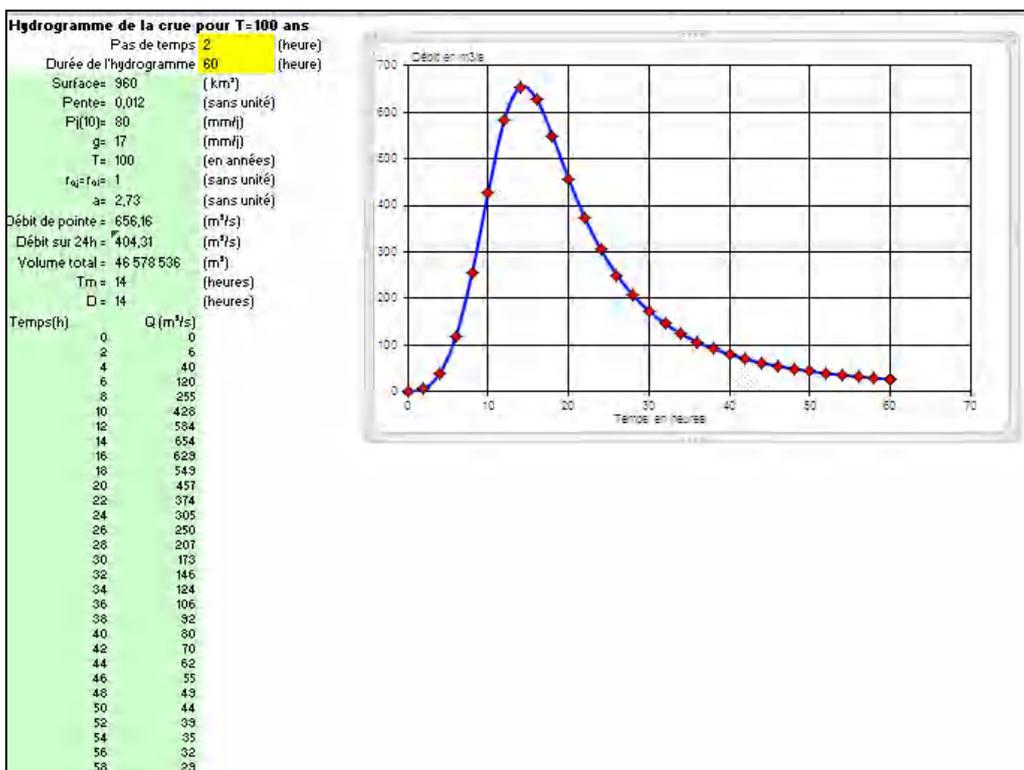


Figure 95: Hydrogramme de la crue de projet au pas de temps de 2 heures à la station de Douar Tassadane

Les hydrogrammes des crues décennale, cinquantennale et centennale du bassin de l'oued El Kébir amont à Douar Tassadane (Oued Endja supérieure) sont illustrés par la figure 96.

Pour le bassin d'oued Bouselah à la station Koudiat Tendart, le coefficient d'abattement est de 0.91 et la pluie décennale est de 54 mm avec un gradex de bassin de 10 mm. Les calculs de  $Q_i(10)$  et  $Q_j(10)$  donnent un débit de pointe de crue de  $92 \text{ m}^3/\text{s}$  et un débit moyen journalier maximum de  $22 \text{ m}^3/\text{s}$  (11 mm par jour de ruissellement). Le coefficient  $A_e$  est donc de  $92/22 = 4.28$ . Le volume écoulé en 24 h de  $4\,111\,270 \text{ m}^3$  pour une fréquence cinquantennale et  $\alpha = 2.73$ , le temps de montée  $T_m$  est de 5 heures et de durée caractéristique  $D$  de 5 heures.

Les hydrogrammes des crues décennale, cinquantennale et centennale du bassin de l'oued Bouselah à Koudiat Tendart sont représentés dans la figure 97.

Pour le bassin d'oued Rhumel Seguin à Ain Smara le coefficient d'abattement est de 0.67 et la pluie décennale est de 38 mm avec un gradex de 8 mm. Les hydrogrammes simulés du bassin de l'oued Rhumel Seguin à Ain Smara sont reportés sur la figure 98.

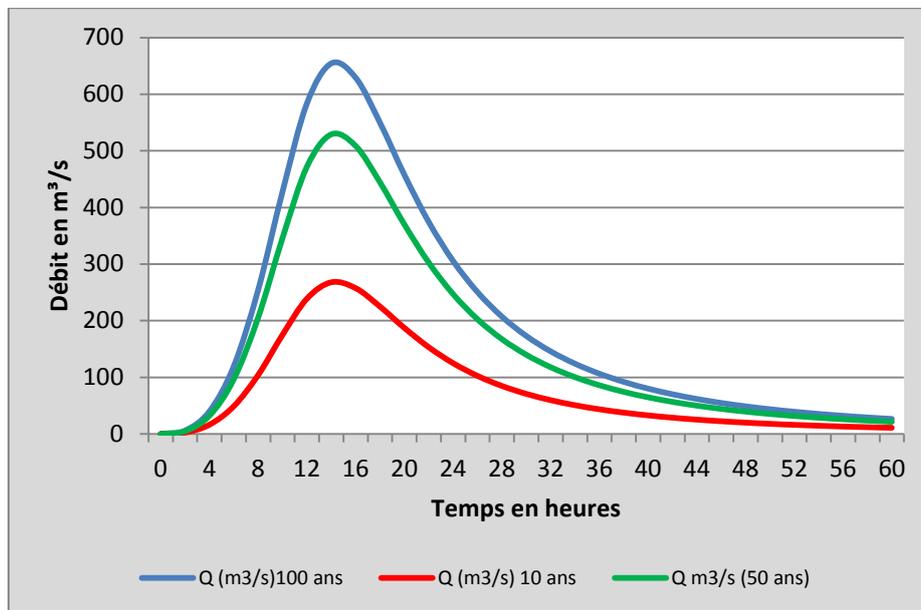


Figure 96: Simulation des hydrogrammes de crue décennale, cinquantennale et centennale à la station de Douar Tassadane

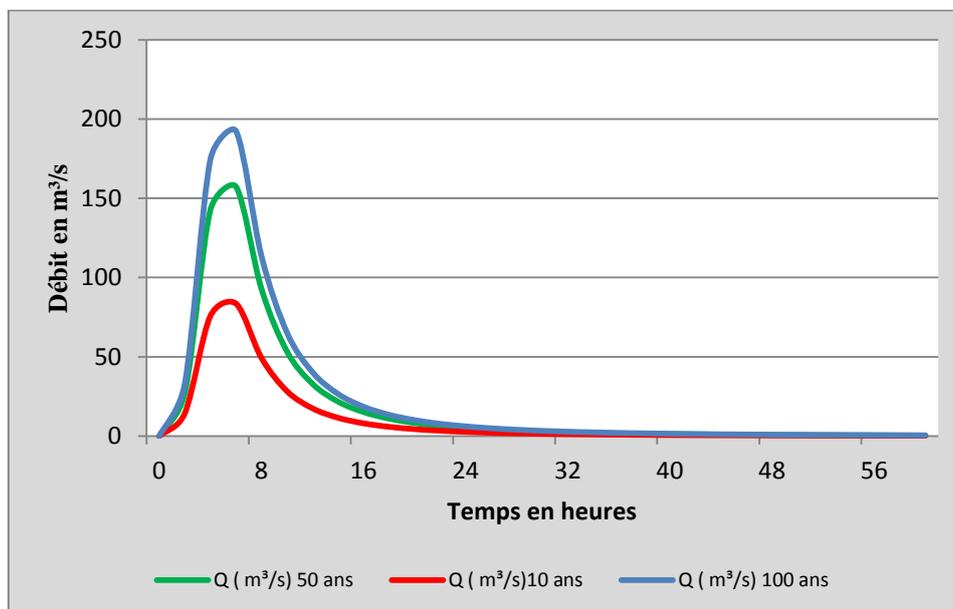


Figure 97: Simulation des hydrogrammes de crue décennale, cinquantennale et centennale à la station Koudiat Tendart

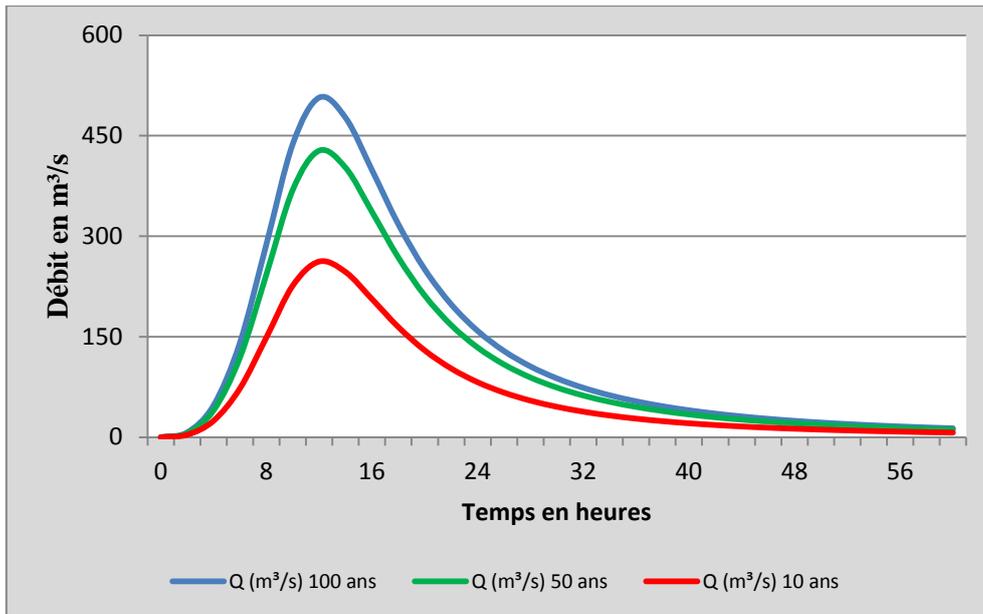


Figure 98: Simulation des hydrogrammes de crue décennale, cinquantiennale et centennale à la station Ain Smara

Les résultats des trois stations sont récapitulés dans le tableau 34. Les hydrogrammes des crues établis permettent de voir l'évolution des crues dans le temps et de fixer les valeurs qui permettront de faire le dimensionnement et le calcul hydraulique de l'ouvrage de protection contre les risques des inondations.

Tableau 34: Caractéristiques potentielles de la crue de projet

	Douar Tassadane			Koudiat Tendart			Ain Smara		
Surface (km <sup>2</sup> )	960	960	960	180	180	180	2197	2197	2197
Pente (sans unité)	0.012	0.012	0.012	0.023	0.023	0.023	0.006	0.006	0.006
Pj(10) (mm)	80	80	80	59	59	59	57	57	57
g (mm)	17	17	17	11	11	11	8	8	8
T (en année)	10	50	100	10	50	100	10	50	100
rQj=rQi (sans unité)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
α (sans unité)	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73
Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	268.5	530.45	656.16	92.43	174.02	212.84	262.71	425.95	507.99
Débit sur 24 h (m <sup>3</sup> /s)	165,44	326.84	404.31	25.28	47.58	58.20	146.40	227.42	271.22
Volume total (m <sup>3</sup> )	19 059780	37 654371	46 578536	2317316	4362604	5335912	15920200	24234712	28902725
Tm (heures)	14	14	14	5	5	5	12	12	12
D (heures)	14	14	14	5	5	5	12	12	12
Temps (h)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q (m <sup>3</sup> /s)				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	5	0	14	27	33	4	7	9
4	16	32	6	76	143	175	28	47	56
6	49	97	40	84	157	192	84	140	166
8	104	206	120	49	93	114	166	277	330
10	175	346	255	28	53	65	237	396	472
12	239	472	428	18	33	40	254	423	505
14	268	529	584	12	22	27	223	372	444
16	257	509	654	8	15	19	179	298	355
18	225	444	629	6	11	13	139	232	276
20	187	370	549	4	8	10	108	180	215
22	153	302	457	3	6	8	85	142	169
24	125	247	374	3	5	6	68	113	135
26	102	202	305	2	4	5	55	91	109
28	85	168	250	2	3	4	45	75	74
30	71	140	207	1	3	3	37	62	62
32	60	118	173	1	2	3	31	52	53
34	51	100	146	1	2	2	27	44	45
36	44	86	124	1	2	2	23	38	39
38	38	74	106	1	1	2	20	33	34
40	33	65	92	1	1	2	17	28	30
42	29	57	80	1	1	1	15	25	26
44	25	50	70	1	1	1	13	22	31
46	22	44	62	0	1	1	12	19	23
48	20	39	55	0	1	1	10	17	21
50	18	35	49	0	1	1	9	15	18
52	16	32	44	0	1	1	8	14	17
54	14	29	39	0	1	1	8	13	15
56	13	26	35	0	0	1	7	11	14
58	12	24	32	0	0	1	6	10	12
60	11	21	29	0	0	1	6	9	11

## 1.4. Evènements de crue extrêmes connus en Algérie et dans le bassin de l'oued Rhumel Endja

### 1.4.1. Les inondations en Algérie

Selon l'ONA (Office National d'Assainissement), les inondations sont responsables de 40 % des victimes de l'ensemble des catastrophes naturelles à travers le monde. Les inondations enregistrées suite aux accumulations des cours d'eau, entraînant des débordements des rivières et oueds notamment dans les zones urbaines, constituent un grand obstacle pour le développement, et mettent en péril les populations et leurs biens (maisons, équipements, ponts et chaussée, chemins ferroviaires...). L'impact de ces inondations a même touché les infrastructures souterraines vitales, à savoir les canalisations d'eau potable, d'assainissement, télécommunication..., ce qui entrave l'approvisionnement des populations de ces éléments. Aussi ce phénomène est à l'origine d'autres problèmes tels que les épidémies, les maladies liées à l'insalubrité de l'eau...

Sur le plan pédologique et géomorphologique, les conséquences sur la qualité des terres sont flagrantes, caractérisées par une dégradation des terrains de production agricole, suite au phénomène de «lessivage des sols»; et le rétrécissement des terrains agricoles suite à l'érosion des sols.

Des actions de prévention peuvent limiter les dégâts et prévenir ou éviter les inondations, entre autres.

- \* limitation des constructions en zones inondables, qui empêchent l'écoulement naturel des eaux ;
- \* construction de barrages pour retenir et maîtriser les volumes d'eau des rivières ;
- \* augmentation de la capacité d'évacuation des eaux ;
- \* aménagements divers pour maîtriser le ruissellement de l'eau: bassins de rétention, drainage des terres, recalibrage des oueds... ;
- \* prévision des crues des cours d'eau; système d'alerte des crues pour l'information et l'évacuation de la population ;
- \* sensibilisation contre les risques des crues et l'établissement d'un plan d'urgence d'évacuation des populations riveraines.

L'Algérie a connu plusieurs évènements de crue catastrophiques et la plus terrible inondation de son histoire est celle du 10 au 14 novembre 2001, frappant principalement la capitale Alger (Tableau 35) (Yahiaoui, 2012). Cet évènement hydrométéorologique extrême a laissé 751 victimes dont plus de 700 à Alger. Le nombre de personnes déplacées sont de 24 000 et plus de 2 700 habitations sévèrement endommagées. Entre 40 000 et 50 000 personnes ont perdu leurs habitations et près de 109 routes endommagées. Seize autres départements seront affectés à un degré moindre par ce phénomène d'une rare violence durant lequel Alger enregistrera en quelques heures l'équivalent de la pluie totale mensuelle. Le phénomène avait fait l'objet d'une prévision des services météorologiques algériens et étrangers, mais l'ampleur des dégâts humains et matériels est certainement en relation avec la violence d'un

phénomène classé comme l'un des plus sévères de ces 40 dernières années (IISD2003). (Tableau 35)

Tableau 35: Les inondations en Algérie (Yahiaoui, 2012)

Lieu	Date	Bilan des dégâts
12 octobre 1971	Azzazga	40 morts et des centaines d'habitations détruites
27 au 29 mars 1973	Annaba	
28 au 31 mars 1974	Alger et Tizi Ouzou	52 morts et 4570 maisons détruites, 130 villages isolés et plus de 18000 sinistrés, 13 ponts détruits des dizaines kilomètres de routes emportés, dégâts matériels des divers services techniques.
01 Septembre 1980	Ville d'El Eulma	44 morts, 50 blessés et 365 familles sinistrées
11 novembre 1982	Annaba	
22 Aout 1983	Djelfa (la commune de Birrine 60 %)	10 morts, 10 blessés, 200 habitations détruites et 1200 de bétail emportées par les eaux.
03 Février 1984	L'Est Algérien	Jijel : 20 morts, 500 têtes de bétail emportées Constantine : 1140 familles sinistrées et 200 ha de cultures détruites Skikda : 8000 habitations envahies par les eaux Guelma : 03 disparus, 157 familles sinistrées, 02 ponts détruits et canalisations d'AEP détruites à 100%. Khenchla : 777 familles sinistrées. Oum El Bouaghi : 144 maisons détruites et 429 familles sinistrées.
05 juillet 1987	Batna	02 morts et des dizaines de familles sinistrées, dégâts évalués à 175 millions de centimes
01 septembre 1989	Biskra	Deux morts et 35 blessés et la destruction de 400 palmiers.
03 juin 1991	Ghardaia	Neuf morts et des pertes importantes en cheptel et en palmeraies
26 et 27 janvier 1992	La région du centre (Alger, Blida, Tipaza, Chelef, Ain Defla et Média)	637 familles sont sinistrées : 361 (Alger), 106 (Tipaza), 87 (Média), 36 (Ain Defla) et 23 (Chelef)
29 septembre au 02 octobre 1994	Ghardaia, Laghouat, Biskra, Mascara, Tissemsilt et Sidi Bel Abbès	Ghardaia : dégâts matériels évalués à 270 millions de dinars. Laghouat : dégâts matériels évalués à 5 millions de dinars dans le secteur de l'hydraulique. Mascara : deux morts et importants dégâts matériels. Tissemsilt : neuf morts. Sidi Bel Abbès : deux morts.
4 avril 1996	El-Taref	Cinq morts et dix blessés à Annaba et quatre ouvrages d'art endommagés à El-Taref.
14 janvier 1999	Adrar	deux morts et plusieurs et plusieurs disparus.
28 septembre 2000	Boussaâda	un mort, un disparu, treize habitations détruites, trente-huit familles évacuées et 193 têtes de bétail emportées par les eaux
24 octobre 2000	Sidi Bel Abbès (oued Mekerra), Tissemsilt Theniet El Had (oued Mesloub), Chlef et Ain Defla	la disparition de deux personnes emportées par l'oued Mekerra et d'importants matériels à Theniet El Had
9 et 10 Novembre 2001	Alger à Bab El Oued (Bassin versant de l'oued Koriche)	750 morts, 115 disparus et 30 millions de dinars de pertes matériels
1 et 2	Ghardaia	Plus de 34 décès et 50 blessés, maisons effondrées sur leurs

octobre 2008	habitants, des dizaines de véhicules emportés par les eaux, arbres arrachés, poteaux électriques ensevelis, dégâts aux surfaces agricoles et au cheptel ovin, plus de 1000 maisons inondées dont 600 sont endommagées.
--------------	--

#### 1.4.2. Historique des crues et inondations dans la région de Constantine

Selon Nouri (2016), Constantine se distingue fortement parmi les différentes localités algériennes touchées par les crues et inondations ; elle accumule 15,6 % des cas sur l'ensemble des données recensées, suivie par Tizi Ouzou avec 8,9 %, Ain Defla avec 5,6 %, puis Alger, Ghardaïa et Bouira avec 4,4 % (Figure 99). La ville de Constantine a connu des catastrophes fréquentes parmi lesquelles les inondations du 21 au 24 février 1852, du 6 novembre 1854 (archives d'outre-mer, 1845-1858), du 23 novembre 1957 (Caroff, Sinthe, 1958), du 19 janvier 1958, de novembre-décembre 1967, de septembre 1973, du 16 avril 1979, de fin décembre 1984 et du début du mois de janvier 1985, l'inondation du 3 octobre 1994.

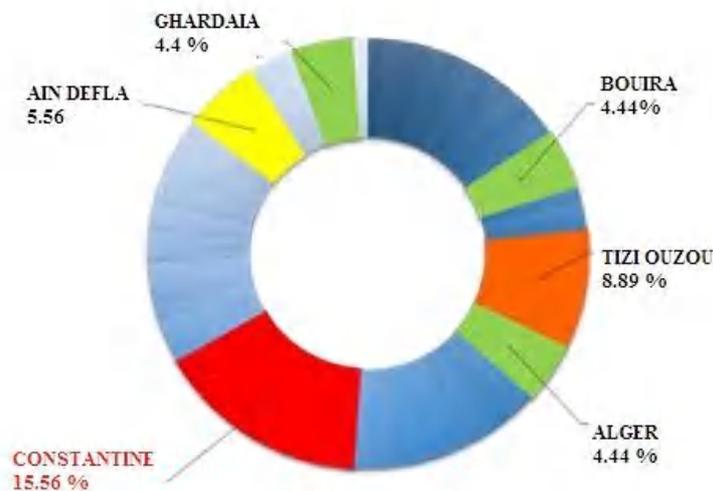


Figure 99: Les villes d'Algérie au plus haut pourcentage d'évènements de crues et inondations recensés (Nouri, 2016)

Les dégâts causés par les inondations du XIXe siècle n'ont pas été recensés avec détail. Les informations recueillies concernent les inondations à partir de 1958 (Zebiri, 1994) :

- la crue subite du Rhumel, en amont des gorges de Constantine (quartier du Bardo), du 19 janvier 1958 ; elle a entraîné la destruction du pont d'Arcole, la mort de 7 personnes, 1 disparu et 1500 familles déplacées.

- les crues de l'hiver 1967 ont pris un caractère de réelle gravité dans la mesure où le débit de pointe de l'oued Rhumel enregistré le 29 novembre 1967, a atteint 1236 m<sup>3</sup>/s, la hauteur d'eau s'élevait à 8,3 mètres au niveau de la station d'oued Athmania (Mebarki, 1982), ce qui a provoqué des débordements considérables dans le lit majeur.

- L'amont de l'oued Rhumel, à l'entrée de Constantine, connu surtout par sa zone industrielle Palma, a enregistré ses premiers dégâts causés par des inondations. Ces dégâts ont affecté des dépôts de sociétés nationales et de petites unités industrielles.
- la crue de septembre 1973 est le résultat d'averses exceptionnelles qui se sont succédé du 24 au 26 septembre. Les eaux ont atteint 5 mètres à la station d'oued Athmania et 3,6 mètres à la station d'Ain Smara. Sur toute la section amont de l'oued Rhumel jusqu'au village d'Ain Smara, l'inondation a engendré des dégâts surtout en milieu rural, les eaux ont débordé sur des parcelles de jardins et quelques maisons, récemment construites à proximité de l'oued, ont été détruites (Mebarki, 1982).
- les inondations du 13 au 16 avril 1979 ont affecté aussi bien l'oued Rhumel que l'oued Boumerzoug. Les dégâts enregistrés sont localisés sur la section Chaabet Erssas et le quartier du Bardo à l'entrée des gorges de Constantine.
- du 28 au 30 décembre 1984 (254,2 mm), provoquèrent la montée rapide de l'oued Bou Merzoug et de l'oued Rhumel, endommageant sérieusement les installations de la zone industrielle Palma et provoquant l'évacuation de 250 familles du quartier du Bardo. (Zebiri, 1994).
- L'inondation du 3 octobre 1994, qui a eu lieu entre 7 h 45 et 8 h 00, dans la vallée du Rhumel juste avant la confluence avec l'oued Boumerzoug, a emporté des constructions très récentes (été 1994) constituant un quartier spontané. Le nombre de familles évacuées s'élève à 57 d'après les sapeurs-pompiers. (Zebiri, 1994) ;
- La crue et inondation de février-mars 2003, et les violentes averse du 13 novembre 2004 (89 mm en 24 heures, record inégale depuis des années), et des précipitations qui se sont poursuivies jusqu'au 15 novembre, ont causés des dégâts humains et matériels considérables (Zebiri, 1994)
- Les inondations du 20 au 24 août 2015 à la nouvelle ville Ali Mendjeli sur le versant d'oued Boumerzoug, ont engendré la mort de 2 personnes et plusieurs dégâts matériels, la hauteur de l'eau a dépassé les 100 cm (pompiers, Constantine) ;
- L'oued Boumerzoug a connu une crue le 29 mai 2017 dans la commune d'Ouled Rahmoun ; cette montée des eaux a engendré l'inondation de plusieurs quartiers, et le niveau de l'eau ayant atteint les 70 cm. L'eau a alors envahi la quasi-totalité des maisons proches de l'oued, soit plus d'une douzaine, causant des dégâts importants aux habitants concernés (journal : Le Quotidien d'Oran, 7 juin 2017).
- Très récemment la crue du 19 septembre 2018 affectant le quartier Djebli Ahmed (Kantoli commune de Hamma Bouziane) (Photo 1). Deux personnes ont trouvé la mort et cinq autres ont été secourues suite aux pluies torrentielles sur la ville de Constantine. Des personnes ont été coincé dans leur véhicule dans la cité Djebli Ahmed (Kantoli), située sur la RN79, entre El Ménia et la commune de Hamma Bouziane.



*Photo 1: Crue du 19 septembre 2018 à Djebli Ahmed (près de Constantine) Source : <http://www.aps.dz>*

## **2. ETUDE DES ETIAGES**

### **2.1. Les définitions**

Il existe plusieurs définitions du terme «étiage». Selon le Glossaire Internationale d'Hydrologie, l'étiage est défini comme étant le débit d'une rivière après une période sèche prolongée. Roche (1986) donne une autre définition et prend en compte la notion de temporalité. Il définit l'étiage comme le « niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné » (Garcia, 2016).

Ainsi, l'étiage est défini comme un phénomène naturel, saisonnier, résultant généralement d'un déficit de pluie plus ou moins long et plus ou moins sévère, susceptible de varier dans le temps et dans l'espace et entraînant une diminution du débit dans les cours d'eau (Garcia, 2016). L'étude des étiages et la connaissance de leur évolution constitue un enjeu majeur pour une gestion cohérente de la ressource en eau (Lang, 2011).

L'étiage, phénomène extrême, traduit la « sécheresse hydrologique » dépendant de facteurs, à la fois climatique (rareté des pluies, évapotranspiration intense), hydro-pédologique (amenuisement de la réserve du sol) et hydrogéologique (tarissement des réserves souterraines et donc faible soutien des débits des cours d'eau) (Mebarki, 2005).

### **2.2. Critères de détermination statistique des débits d'étiage. Application au bassin du Rhumel-Endja**

#### **2.2.1. Les débits d'étiage issus de la courbe des débits classés**

Les valeurs issues de la courbe des débits classés sont appelées débits caractéristiques (ou débits fréquentiels). Ces valeurs permettent d'aborder les étiages de manière simple, sans traitement statistique élaboré, et de représenter les débits les plus indigents. Différents débits caractéristiques d'étiage sont déduits de cette courbe qui donne en ordonnée la valeur du débit journalier, atteinte ou dépassée pendant le nombre  $n$  de jours correspondant à l'axe des abscisses :

- L'étiage absolu (ou minimum absolu) ne nécessite pas l'élaboration de la courbe des débits classés, mais il se fonde sur tous les débits moyens journaliers disponibles: il représente le plus bas débit connu d'un cours d'eau (Lang, 2011).
- DCE: Débit Caractéristique d'Etiage. Il correspond au débit égal ou non dépassé 10 jours de l'année, soit environ le quantile 97 %.
- Q90: débit classé de quantile 90 %, correspondant à un dépassement environ 329 jours par an.
- Q75: débit classé de quantile 75 %, correspondant à un dépassement environ 274 jours par an.
- Q50: débit classé médian de quantile 50%, correspondant à un dépassement environ 183 jours par an. Il indique la séparation entre les conditions de basses eaux et de hautes eaux de l'écoulement du cours d'eau (Smakhtin, 2001; Garcia, 2016).

Les figures 100 et 101 donnent un exemple (station de Douar Tassadane) de la construction d'une courbe des débits classés et du calcul les quantiles associée, en année humide et en année sèche.

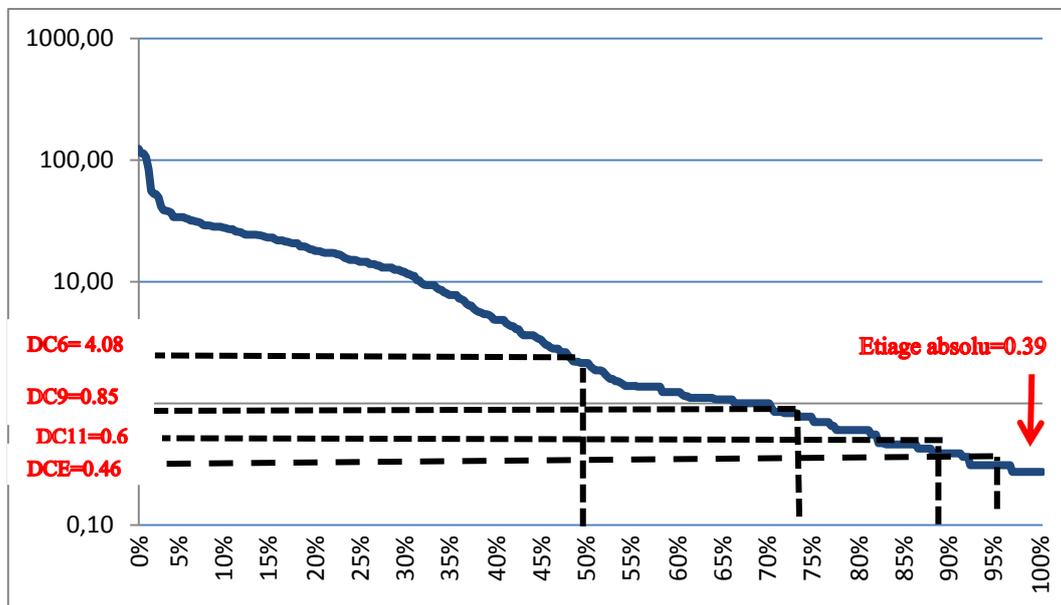


Figure 100: Courbe des débits classés et débits caractéristiques associés de la station de Douar Tassadane en année humide (1984/85)

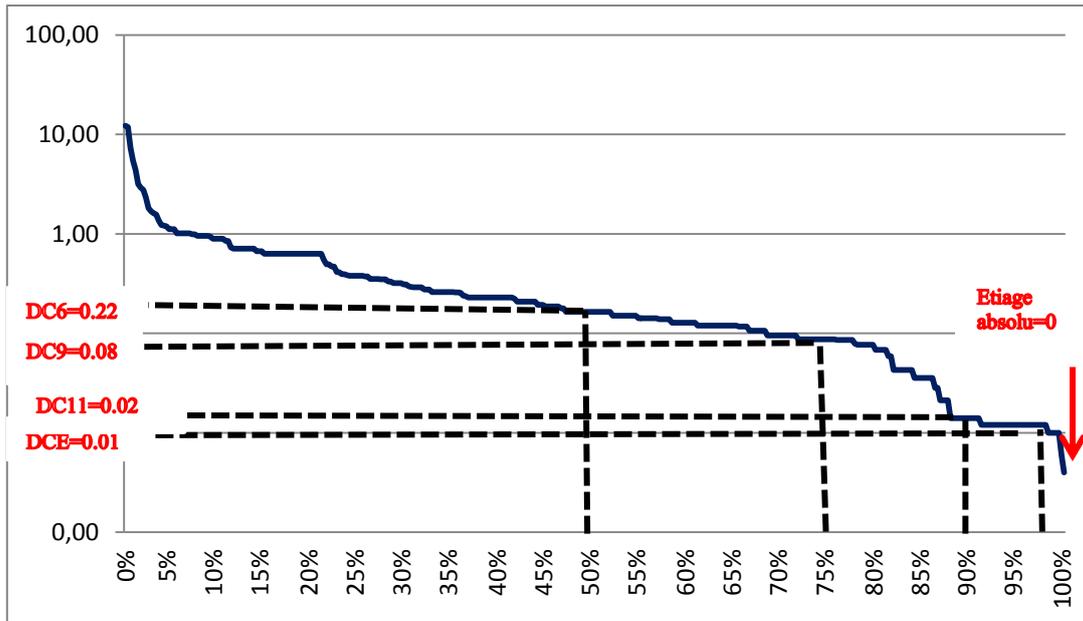


Figure 101: Courbe des débits classés et débits caractéristiques associés de la station de Douar Tassadane en année sèche (1996/97)

Nous avons établi les courbes des débits classés des cinq stations du Rhumel-Endja. Et nous avons déduit leurs débits caractéristiques (Tableau 36).

Tableau 36: Débits caractéristiques en année humide et en année sèche des stations hydrométriques du bassin Rhumel-Endja

Oued et station	Année	Étiage absolu (m³/s)	DC6 (m³/s)	DC9 (m³/s)	DC11 (m³/s)	DCE (m³/s)
Oued El Kébir amont à Douar Tassadane	Humide (1984/85)	0,39	4,08	0,85	0,6	0,46
	Sèche (1996/97)	0	0,22	0,08	0,02	0,01
Oued Bouselah à Koudiat Tendart	Humide (2002/03)	0	0,75	0,08	0	0
	Sèche (1975/76)	0	0	0	0	0
Oued Rhumel Seguin à Ain Smara	Humide (1983/84)	0,3	0,63	0,3	0,3	0,3
	Sèche (2001/02)	0	0,02	0	0	0
Oued Rhumel aval à Grarem	Humide (1984/85)	0,12	7,13	6,5	5,13	0,9
	Sèche (1989/90)	0,12	3,04	1,22	0,84	0,49
Oued Smendou à Bouchdira	Humide (2004/05)	0	0,89	0,23	0,08	0
	Sèche (2001/02)	0	0,04	0	0	0

Pour l'année sèche de l'oued **Rhumel Seguin à Ain Smara**, le débit s'annule dès le 8ème mois, par contre, pour l'année humide l'oued reste pérenne. Ceci est lié à l'alimentation de l'oued par des circulations d'eau souterraine qui soutiennent l'écoulement (Mebarki, 1982). Pour l'oued **Rhumel aval à Grarem**, le DC6 passe de 7.13 en année humide à 3.04 m³/s en année sèche. Le DC11 est passé de 5.13 à 0.84 m³/s, alors que le DC9 est passé de 6.5 à 1.22 m³/s. Pour l'oued **El Kébir amont (Oued Endja supérieur) à Douar Tassadane**, le débit caractéristique (DC6) est passé de 4.08 en 1984/85 (année humide) à 0.22 m³/s en 1996/97 (année sèche), alors que le DCE est passé de 0.46 à 0.01 m³/s. Le débit caractéristique d'étiage est très faible aux stations de **Bouchdira (oued Smendou)** et **Kouidiat Tendart (oued Bouselah)** en raison du faible soutien des écoulements par les eaux souterraines.

**2.2.2. Indicateurs statistiques des débits d'étiage: QMNA et VCNd**

Les indicateurs d'étiages sont basés sur l'intensité et la période de retour (Roche et al, 2012). Il s'agit des débits minimums annuels qui interviennent généralement lors des périodes les plus sèches, en particulier, le QMNA (le débit moyen mensuel minimum de l'année qui peut également se calculer avec une période de retour de 5 ans ou QMNA5 et le VCNd, débit minimum sur  $d$  jours consécutifs de l'année.

**2.2.2.1. Au pas de temps mensuel : le QMNA**

QMNA est dérivé de « **Q**uantité **M**ensuelle **mi**Nimale **A**nnuelle» qui prend les valeurs les plus faibles car traduisant la moyenne interannuelle du débit mensuel minimal enregistré chaque année. Ce débit, en fonction de la pluviosité, ne conserve pas forcément le mois du même nom pendant toutes les années d'observation (Mebarki, 2000 et 2005) (Tableau 37).

*Tableau 37: Débits mensuels d'étiage et modules annuels observés aux stations hydrométriques*

Oued et station	Oued El Kébir amont à Douar Tassadane	Oued Bouselah à Koudiat Tendart	Oued Rhumel Seguin à Ain Smara	Oued Rhumel aval à Grarem	Oued Smendou à Bouchdira
S (km <sup>2</sup> )	960	180	2197	5320	295
Module annuel absolu Q(m <sup>3</sup> /s)	3,24	0.48	1.14	5.26	1.77
Module annuel spécifique q (l/s/km <sup>2</sup> )	3,37	2,80	0,52	0,99	6,00
Moyenne interannuelle du Débit absolu mensuel minimal annuel QMNA (m <sup>3</sup> /s)	0.19	0.04	0.10	0.81	0.11
Moyenne interannuelle du Débit spécifique mensuel minimal annuel qMNA (l/s/km <sup>2</sup> )	0.19	0.20	0.05	0.15	0.36

D'après le tableau 37, la moyenne interannuelle du débit moyen mensuel d'étiage le plus faible est observé sur l'oued Rhumel-Seguin à la station d'Ain Smara (0.05 l/s/km<sup>2</sup>). Ce bassin correspond à une zone de faibles précipitations et qui connaît des prélèvements au fil de l'eau pour les besoins d'irrigation. Sur l'oued Rhumel aval à Grarem, le débit moyen mensuel d'étiage est de 0.15 l/s/km<sup>2</sup>. Ce sous bassin est caractérisé par une émergence d'un bon nombre de sources dont le rendement global est élevé, notamment dans le secteur de Hamma (carte hydrogéologique du chapitre 1, page 30). L'oued El Kébir amont à Douar Tassadane maintient un débit d'étiage soutenu car il draine une nappe alluviale (alluvions sableuses) assez importante, profitant d'une forte alimentation pluviale (la moyenne pluviométrique annuelle étant trois fois plus élevée que dans le secteur amont du Rhumel). Cet oued enregistre à Douar Tassadane un débit moyen mensuel d'étiage de 0.19 m<sup>3</sup>/s, soit 0.19 l/s/km<sup>2</sup> contre un module annuel de 3.24 m<sup>3</sup>/s (3.37 l/s/km<sup>2</sup>). Le débit spécifique d'étiage est plus élevé sur l'oued Smendou (0.36 l/s/km<sup>2</sup>) dont le bassin est de taille plus réduite et où

dominant des formations perméables (calcaires) permettant un déstockage plus rapide au profit de l'écoulement superficiel (Tableau 37).

Les quantiles des débits d'étiage (périodes de retour: T = 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans et 50 ans) sont évalués à partir de la loi de Galton (log normale) (Tableau 38 et Figure 102). Ces quantiles diminuent au fur et à mesure que les périodes de retour augmentent sur les cinq stations du bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun. Les QMNA de fréquence biennale (T=2 ans) varient entre 0.02 à Bouchdira et 0.69 m<sup>3</sup>/s à Grarem, avec une moyenne de 0.192 m<sup>3</sup>/s. Les QMNA de fréquence quinquennale (5 ans) fluctuent entre 0.01 (Bouchdira) et 0.42 (Grarem) avec une moyenne de 0.11 m<sup>3</sup>/s. Les QMNA fréquence décennale (10 ans) oscillent entre 0 (Bouchdira) et 0,32 m<sup>3</sup>/s (Grarem) avec une moyenne de 0.08 m<sup>3</sup>/s.

Pour une période de retour donnée, les quantiles les plus faibles sont enregistrés aux stations de Bouchdira et Koudiat Tendart. Les quantiles les plus élevés sont enregistrés aux stations de Grarem et Douar Tassadane. La station de Grarem donc la station la plus en aval de ce bassin possède des quantiles supérieurs à ceux des autres stations et cela quelle que soit la période de retour choisie.

Tableau 38: Débit mensuels d'étiage et durée de récurrence (période 1973/74-2004/05)

Station	Période de retour	QMNA m <sup>3</sup> /s	qMNA l/s/km <sup>2</sup>
<b>Douar Tassadane</b>	T=2 ans	0,13	0,14
	T=5 ans	0,06	0,06
	T=10 ans	0,04	0,04
	T=20 ans	0,02	0,02
	T=50 ans	0,01	0,00
<b>Koudiat Tendart</b>	T=2 ans	0,03	0,18
	T=5 ans	0,02	0,12
	T=10 ans	0,01	0,06
	T=20 ans	0	0,00
	T=50 ans	0	0,00
<b>Ain Smara</b>	T=2 ans	0,09	0,04
	T=5 ans	0,039	0,02
	T=10 ans	0,025	0,01
	T=20 ans	0,017	0,01
	T=50 ans	0,011	0,01
<b>Grarem</b>	T=2 ans	0,69	0,13
	T=5 ans	0,42	0,08
	T=10 ans	0,32	0,06
	T=20 ans	0,25	0,05
	T=50 ans	0,2	0,04
<b>Bouchdira</b>	T=2 ans	0,02	0,07
	T=5 ans	0,01	0,03
	T=10 ans	0	0,00
	T=20 ans	0	0,00
	T=50 ans	0	0,00

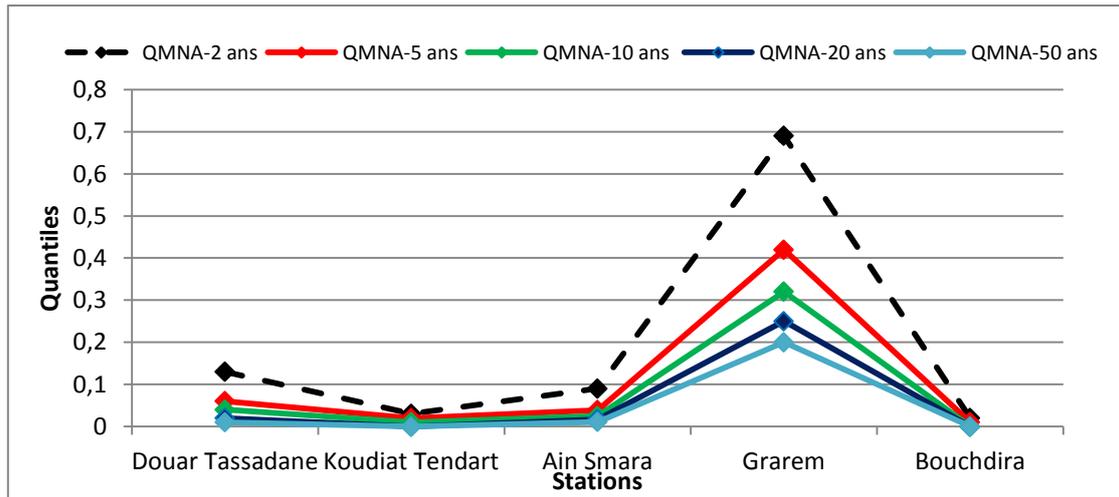


Figure 102: Quantiles des débits d'étiage (QMNA) du bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun

#### 2.2.2.2. Au pas de temps journalier : les VCNd

Les  $VCN_d$  sont des valeurs extraites annuellement en fonction d'une durée fixée  $d$ . Il s'agit d'une « moyenne mobile », calculée à partir des débits moyens journaliers sur plusieurs jours consécutifs (Lang, 2011). Elle permet de caractériser la sévérité d'un étiage qui se déroule sur une période donnée. On extrait de la chronique des débits de l'année la valeur du débit minimal moyen d'un cours d'eau enregistré pendant  $n$  jours consécutifs. Les plus courants sont les débits de 1,3, 7, 10 ou 30 jours consécutifs, néanmoins des durées plus longues sont appropriées pour l'étude des périodes d'étiage longues et sévères.

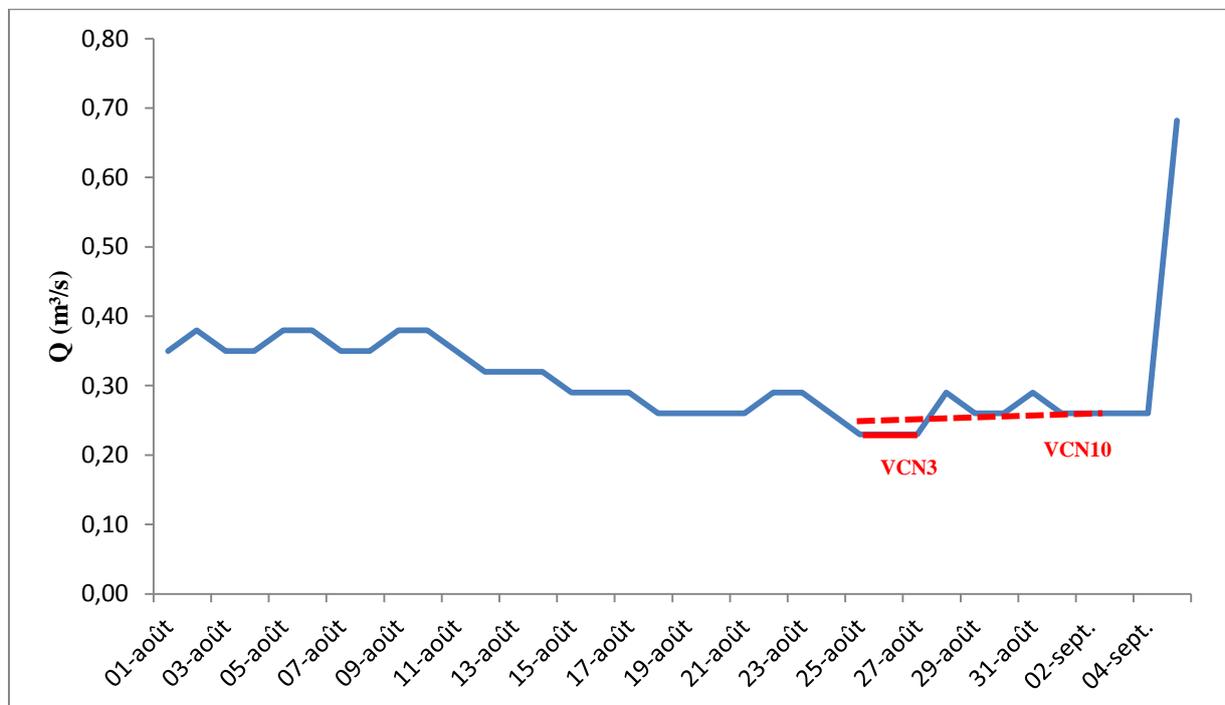


Figure 103: Exemple de  $VCN_d$  de durées 3 et 10 jours de la station de Douar Tassadane (étiage de août-septembre 2005)

Un exemple du calcul des VCN10 et VCN3 est donné par la figure 103 sur la station de Douar Tassadane.

Nous choisissons pour notre étude les VCN de durée de 3 jours. On peut calculer le VCN3 sur la station de Douar Tassadane qui va du 26 au 28 août 2005 pour chaque année durant la période de 1973/74-2004/05, on obtient 32 valeurs sur lesquelles on fait le traitement statistique.

Dans la littérature mais aussi dans la législation, les séries annuelles des débits minimaux annuels sont le plus souvent intégrées dans une analyse fréquentielle pour estimer un quantile de période de retour souhaité à partir d'une loi statistique ajustée sur les observations (Garcia, 2016).

En étiage, contrairement aux crues, les périodes de retour choisies sont relativement faibles, entre 2, 10 et 20 ans. Le choix de la loi statistique a donc peu d'impacts sur le calcul des quantiles associés. La distribution usuellement utilisée pour le calcul des quantiles correspondant aux VCN est la loi log-normale (loi de Galton) (Meigh et al, 2002; Garcia, 2016 ; Vogel et Kroll, 1991). Pour certains bassins versants, le cours d'eau est entièrement à sec sur plusieurs mois et années. Nous nous intéressons aux périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans.

Les résultats de l'analyse fréquentielle des VCN3 (durée 3 jours consécutifs) concernant les étiages les plus bas sont présentés dans le tableau 39. Ils permettent de constater que les débits d'étiage sont faibles et l'écoulement s'annule au moins une fois tous les 10 ans à la station de Bouchdira, une fois tous les 20 ans à Koudiat Tendart et Ain Smara et une fois tous les 50 ans à Douar Tassadane. A Grarem, l'écoulement d'étiage atteint un niveau sévère ( $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ ) une fois tous les 20 ans.

Les sous bassins du Nord du bassin Rhumel-Endja ont valeurs de VCN3 assez soutenues comme l'oued Rhumel aval à Grarem et Oued El Kébir amont à Douar Tassadane. D'autres sous bassins ont des valeurs de VCN3 extrêmement faibles voir nulles. C'est le cas d'oued Smendou à Bouchdira, Oued Bouselah à Koudiat Tendart et oued Rhumel Seguin à Ain Smara (Figure 104).

Les valeurs de VCN3 les plus sévères enregistrées sont observés durant la période 1997/98 à 2000/01 pour toutes les stations hydrométriques, Cette période est caractérisée par une sécheresse sévère dans le bassin (voir les résultats sur la cyclicité et la tendance chapitre 2). Ainsi, les valeurs des débits (VCN3) varient entre  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Douar Tassadane, pour les années 2000/01 et 1997/98, respectivement. La période de retour du VCN3 de 2000/01 est de près de 31 ans, alors que celle du VCN3 de 1997/98 est de 2.8 ans. Les valeurs de VCN3 variant entre  $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Grarem, pour les années 1997/98 et 2000/01, respectivement. Les stations de Koudiat Tendart, Ain Smara et Bouchdira enregistrent des valeurs nulles de VCN3 surtout pendant l'année 2000/01.

Tableau 39: Résultats de l'analyse fréquentielle de la variable VCN3 des années sèches

Fréquence	VCN3 (m <sup>3</sup> /s) aux stations hydrométriques				
	Douar Tassadane	Koudiat Tendart	Ain Smara	Grarem	Bouchdira
Biennale	0,12	0,06	0,07	0,4	0,02
Quinquennale	0,04	0,03	0,02	0,17	0,01
Décennale	0,02	0,02	0,01	0,11	0
Vingtennale	0,01	0	0	0,07	0



Figure 104: Evolution interannuelle des VCN3, et débits associés pour différentes périodes de retour (a. Douar Tassadane; b : Koudiat Tendart; c : Ain Smara; d : Grarem ; e : Bouchdira)

### 2.2.3. Détermination des seuils d'étiages

Le plan sécheresse fixe un cadre national de gestion de la ressource en eau (Lang, 2011). Il doit permettre de prévenir les déséquilibres entre prélèvements et ressources disponibles, en imposant des limitations temporaires de certains usages de l'eau. Ce plan définit notamment le débit seuil d'alerte (DSA), qui correspond au seuil en dessous duquel les premières restrictions doivent être prises. L'objectif est d'éviter d'atteindre le débit de crise (DCR), valeur de débit en dessous de laquelle l'alimentation en eau potable ainsi que la survie des espèces aquatiques sont menacées.

Selon Lang (2011), ce Plan Sécheresse définit différents stades relatifs à la gravité de la situation :

- Le seuil de vigilance : à ce stade, des mesures de communication et de sensibilisation à l'économie d'eau sont mises en place auprès des différents usagers, sans pour autant que des mesures de limitations soient prises ;
- Le niveau d'alerte : ce niveau doit être garanti statistiquement au moins 8 années sur 10. En cas de franchissement de ce niveau, les premières mesures de limitation des usages de l'eau doivent être prises ;
- Le niveau de crise : des limitations progressives de prélèvements, voire des suppressions de certains usages sont mises en place. A ce stade, l'objectif est de ne pas atteindre le niveau de crise renforcé ;
- Le niveau de crise renforcé : en dessous de ce seuil, l'alimentation en eau potable et la survie des espèces aquatiques sont menacées.

Dans cette étude, l'indicateur pour les étiages est fondé sur le QMNA-5 qui se définit comme le débit moyen mensuel minimal annuel sec de récurrence 5 ans ou encore le débit mensuel minimal de fréquence quinquennale sèche (ayant une probabilité 1/5 chaque année de ne pas être dépassé)

Dans notre étude, les indicateurs pour les étiages sont fondés sur les 2 paramètres QMNA-5 et VCN3-20:

-**QMNA-5**, exprimé en  $m^3/s$ , est le débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassée une année donnée, c'est donc la valeur du QMNA telle qu'elle ne se produit, en moyenne, qu'une année sur cinq. C'est un débit statistique qui donne une information sur la sévérité de l'étiage. Il est communément appelé « débit d'étiage quinquennal » (Kouassi, 2018; Lang, 2007 ; Garcia, 2016 ; Lang, 2011 ; Catalogne, 2006). Selon Mebarki (2005), les valeurs de QMNA-5 donnent une information sur la sévérité de l'étiage et présentent beaucoup d'intérêt du fait qu'elles sont généralement utilisées comme seuil pour la détermination des objectifs de qualité et son maintien. Ce type de contrainte doit être appliqué en priorité à l'oued Rhumel à proximité de Constantine en raison des importants rejets d'eaux usées.

-  $VCN_3$  correspond au débit moyen minimal annuel calculé sur trois jours consécutifs (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2015). Cette variable est utilisée pour l'étude des basses eaux (Renard et al, 2015; Cailleux, 2016)

La détermination des débits-seuils repose également sur les recommandations du plan sécheresse (Tableau 40). On recense ainsi :

- Le seuil de vigilance qui correspond à 110 % du QMNA de période de retour 5 ans ;
- Le seuil de crise qui correspond à 90 % du QMNA de période de retour 5 ans ;
- Le seuil de crise renforcé qui correspond au  $VCN_3$  de période de retour 20 ans.

Tableau 40: Exemples de débits-seuils dans le bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun

Oueds	Station hydrométrique	Seuil de vigilance $m^3/s$	Seuil de crise $m^3/s$	Seuil de crise renforcée ( $m^3/s$ )
El Kébir amont	Douar Tassadane	0,066	0,054	0,01
Bouselah	Koudiat Tendart	0,022	0,018	0,01
Rhumel Seguin	Ain Smara	0,0429	0,0351	0
Rhumel aval	Grarem	0,462	0,378	0,07
Smendou	Bouchdira	0,011	0.01	0

Dans la figure 105, les différents seuils sont présentés dans les plages de couleurs: jaune pour les débits sans dommages mais dangereux (Seuil de vigilance), orange pour les étiages importants (QMNA5), rouge pour des étiages majeurs (Seuil de crise) et violet pour étiage très rare (Seuil de crise renforcée).

Les seuils de vigilance, de crise et de crise renforcée qui correspondent respectivement à un niveau de prévention des problèmes de pénurie et à un niveau de préparation d'une éventuelle crise (Kouassi, 2018), évoluent de façon croissante en partant de l'amont (Ain Smara) vers l'aval (Grarem). Les seuils de vigilance varient entre 0.011  $m^3/s$  (Bouchdira) et 0,46  $m^3/s$  (Grarem) avec une moyenne de 0.12  $m^3/s$  et un écart-type de 0.16  $m^3/s$ . Quant aux seuils de crise, ils fluctuent entre 0.01  $m^3/s$  (Bouchdira) et 0,37  $m^3/s$  (Grarem) avec une moyenne de 0.1  $m^3/s$  et un écart-type de 0.17  $m^3/s$ . Les seuils de crise renforcée varient entre 0.018  $m^3/s$  (Bouchdira) et 0.19  $m^3/s$  (Grarem).

Les débits de seuils de crise, crise renforcée et de vigilance montrent que les oueds aux stations de Bouchdira et Ain Smara nécessitent un suivi hydrologique beaucoup plus accentué en période d'étiage prononcé. Ceci peut s'expliquer par le contexte climatique dans le cas de la station d'Ain Smara, située dans les hautes plaines semi-arides (avec moins de 400 mm de pluies par an et par le contexte hydrographique et géologique. dans le cas de l'oued Smendou à Bouchdira (affluent drainant un bassin de 295  $km^2$ , sans soutien notable des apports souterrains).

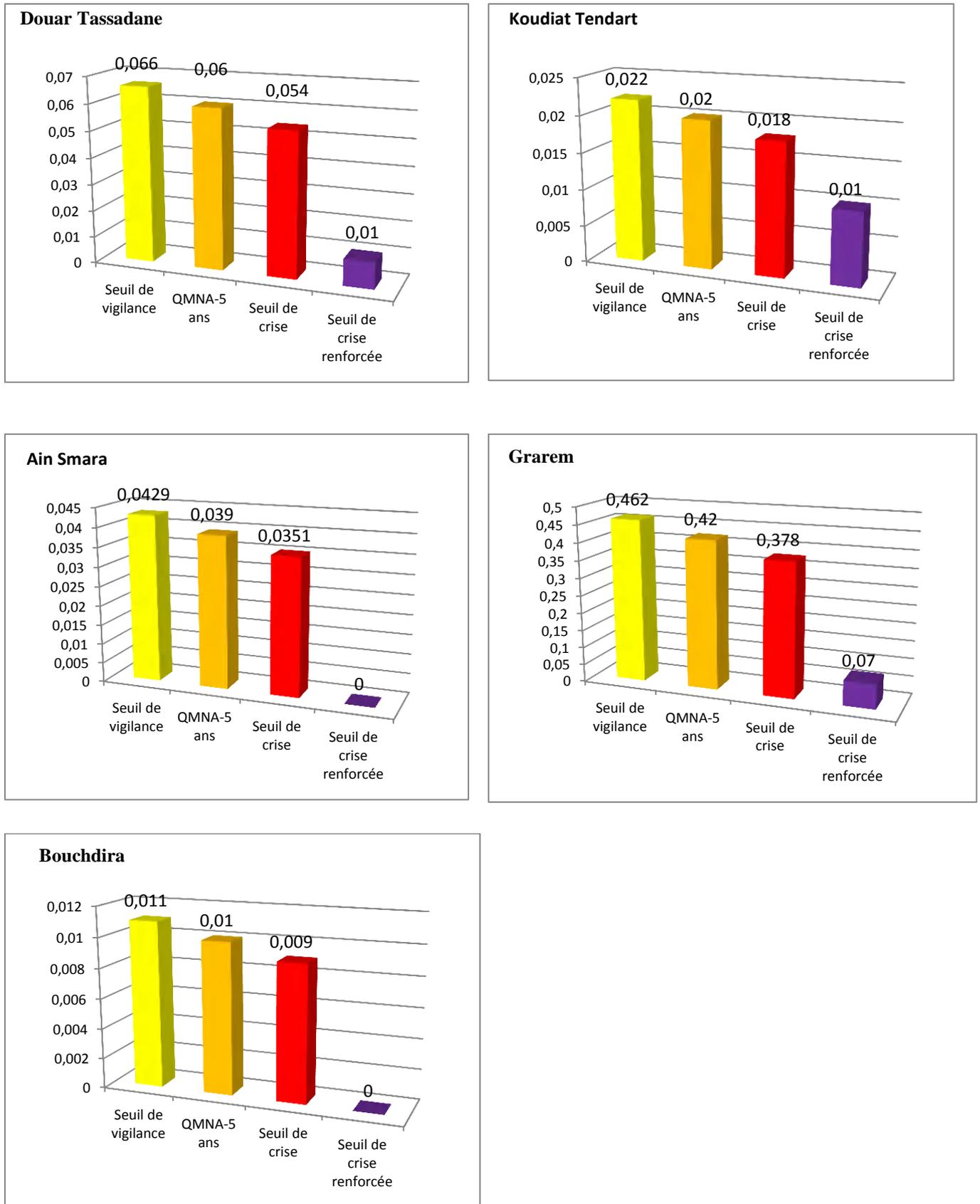


Figure 105: Seuils d'étiage des stations hydrométriques du bassin Rhumel-Endja

## 2.3. Analyse des liaisons entre écoulements superficiels et souterrains: les courbes de tarissement et volume d'eau mobilisé

### 2.3.1. Les courbes de tarissement

L'analyse des épisodes de tarissement permet d'appréhender l'apport provenant des nappes, et le rythme de vidange des réservoirs souterrains (Lang et Gille, 2006). Cette vidange des aquifères est appréciée à partir des observations journalières des débits des oueds pendant la période des basses eaux (de mai à septembre) et ce, par l'analyse des droites de tarissement, obtenues graphiquement : on porte sur un papier semi-logarithmique, en abscisse les valeurs de débits observés et en ordonnées le temps,

Une des formules les plus couramment utilisées est celle qui admet la décroissance exponentielle du débit en fonction du temps. La formule utilisée est celle de Maillet, déjà été utilisé par d'autres auteurs (El-Ouafi, 1993; Mahé et al, 1997 ; Savané et al, 2001; Mebarki et Thomas, 1988 ; Mebarki, 2005; Savané et al ,2003; Saley, 2003; Vissin, 2007; Amoussou, 2010; Kouassi et al, 2013 : Lang et Gille, 2006 etc.).

$$: \quad Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

où :  $Q_t$ : débit (en m<sup>3</sup>/s ou l/s) au temps  $t$  (en jours) ;  
 $Q_0$  débit au temps 0, pris comme origine du tarissement ;  
 $t$  le temps écoulé depuis l'origine du tarissement  
 $\alpha$  le coefficient de tarissement (exprimé en j<sup>-1</sup>)

Sachant qu'il existe une relation directe entre l'état des réserves souterraines et le débit de base, la pente de la courbe de vidange de la nappe ( $\alpha$  de Maillet ou pente de tarissement) est spécifique à chaque cours d'eau (Cosandey et Robinson, 2000). Le coefficient de tarissement traduit donc le pouvoir régulateur de l'aquifère: la valeur de  $\alpha$  est d'autant plus faible que la décroissance du débit de la vidange est lente (Mebarki et Thomas, 1988; Mebarki, 2005).

Les hydrogrammes de tarissement des années manquantes n'ont pas été prises en compte du fait qu'il n'a pas été possible de tracer les droites de tarissement, en raison de la non fiabilité des données de mesures d'étiage ou en raison de la perturbation du régime hydrologique par des apports pluviométriques pendant la période d'étiage retenue (mai à septembre)

La courbe de tarissement est la fin de la partie décroissante de l'hydrogramme. Elle est d'autant plus caractéristique que la période d'absence de précipitations est plus longue. Nous représentons sur la figure 106 l'hydrogramme de Douar Tassadane, dont le coefficient de tarissement obtenu est de 0.013.

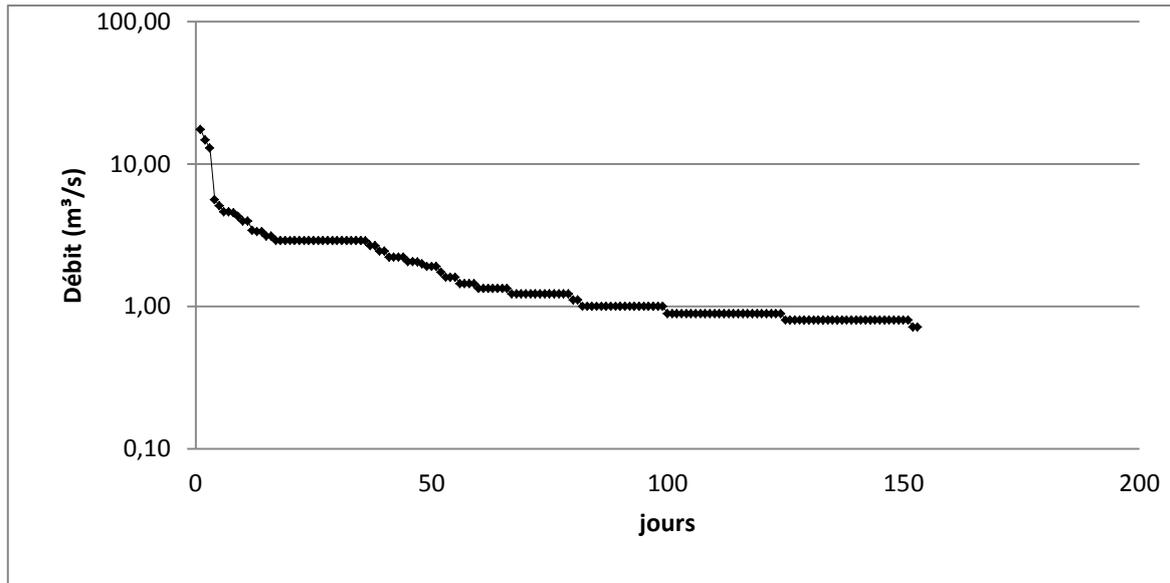


Figure 106: Droite de tarissement aux débits journaliers d'étiage de la station de de Douar Tassadane (année 1982/83)

Les valeurs de coefficient de tarissement les plus faibles obtenues signifient que l'on a un soutien à l'étiage par les nappes plus important que pour les stations de mesures dont le coefficient de tarissement est élevé.

Les résultats sont présentés sous forme chiffrée dans le tableau 41 sont illustrés graphiquement à la figure 107 sous forme de «boîte à moustache » montrant la moyenne, le maximum, le minimum et les 1er (25%) et 3eme quartiles (75 %).

Tableau 41: Coefficients de tarissement des oueds (1973/74-2000/01)

Oued et station	Coefficient de tarissement ( $jour^{-1}$ )			
	Minimum	Moyen	Maximum	Ecart-type
Oued El Kébir amont à Douar Tassadane	0,009	0,023	0,048	0,009
Oued Bouselah à Koudiat Tendart	0,002	0,017	0,06	0,013
Oued Rhumel Seguin à Ain Smara	0,004	0,034	0,195	8,04
Oued Rhumel aval à Grarem	0,009	0,014	0,025	0,003
Oued Smendou à Bouchdira	0,013	0,0405	0,1	0,024

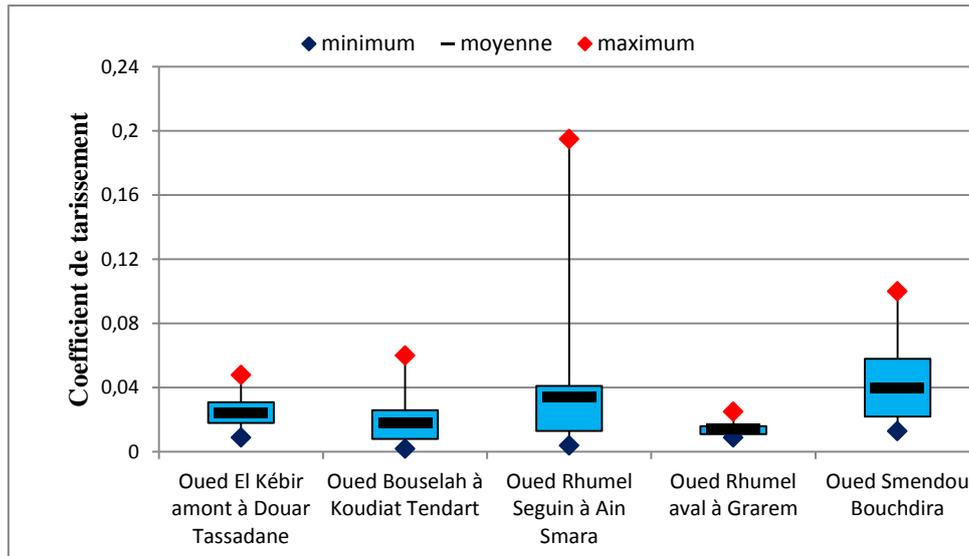


Figure 107: Statistiques descriptives (« boîte à moustache ») des coefficients de tarissement des stations du Rhumel-Endja

Les rythmes de tarissement les plus élevés sont observés dans le bassin de l’oued Rhumel Seguin à Ain Smara et oued Smendou à Bouchdira, A l’inverse, les rythmes de tarissement les plus lents s’observent surtout dans le bassin de l’oued Bouselah à la station de Koudiat Tendart et l’oued Rhumel aval à Grarem. La variabilité spatiale du coefficient de tarissement s’explique par les différences hydrogéologiques des milieux dans lesquels les sous bassins sont inscrits (Figure 107). Dans le sous bassin de l’oued Rhumel aval à la station de Grarem, le coefficient de tarissement d’une valeur de  $14.10^{-3} j^{-1}$ , est une valeur faible par rapport aux autres stations (Tableau 41 et Figure 107).

- Si le coefficient de tarissement moyen interannuel est de  $0.023 j^{-1}$  à la station de **Douar Tassadane**, la valeur maximale annuelle a atteint  $0.048j^{-1}$  (2001/02) et la valeur minimale  $0.013j^{-1}$  (C’est la même valeur pendant 1973/74 et 1981/82) (Figure 108). L’augmentation du coefficient de tarissement pour l’année 2001/02 est l’effet de la faible lame d’eau précipitée pour cette année (345.70 mm), comparée à la lame d’eau moyenne interannuelle de 37 mm (période 1973/74-2000/01). Le tarissement de l’oued El Kébir amont à Douar Tassadane (Oued Endja supérieur) est lié à la vidange assez rapide, Ce sous bassin est constitué par des formations calcaires de la nappe néritique constantinoise.
- L’oued Bouselah à la station de **Koudiat Tendart** présente un coefficient de tarissement faible de  $0,017j^{-1}$ , lié à la perméabilité notable des aquifères qui caractérisent le sous bassin versant. Les valeurs extrêmes sont  $0.06 j^{-1}$  (1996/97) et  $0.002 j^{-1}$  (1982/83) (Figure 109).
- Le coefficient de tarissement moyen interannuel est assez élevé sur le bassin d’oued Rhumel Seguin à **Ain Smara**:  $0,034j^{-1}$ , oscillant entre  $0.005 j^{-1}$  en 1987/88 et  $0.195 j^{-1}$  en 1989/90 (Figure 110). Sur l’ensemble de ces plaines des plaines quaternaires cloisonnées par les djebels calcaires, les nappes phréatiques sont activement exploitées à des fins de l’irrigation des cultures maraîchères (Mebarki et Thomas, 1988 ; Mebarki, 1982 ; Mebarki, 2005).

- La faiblesse du tarissement sur l’oued Rhumel aval à la station de **Grarem** est attribuée à l’apport des émergences d’un bon nombre de sources thermales notamment dans le secteur de Hamma Bouziane (chapitre 1 page 29). Les années 1997/98 et 2000/01 ont connu un tarissement rapide à cause de l’exploitation de l’aquifère de Hamma pour AEP de Constantine pendant l’année 1997/98 et de la pluviométrie relativement faible survenue au cours de l’année 2000/01 (année sèche) (Figure 111).
- Sur l’oued Smendou à la station de **Bouchdira**, les coefficients de tarissement varient fortement entre 0.1 et 0.013  $\text{j}^{-1}$ . Ces derniers mettent en évidence une vidange rapide, à rattacher aux caractères lithologiques particuliers (prédominance des faciès marno-calcaire) (Figure 112).

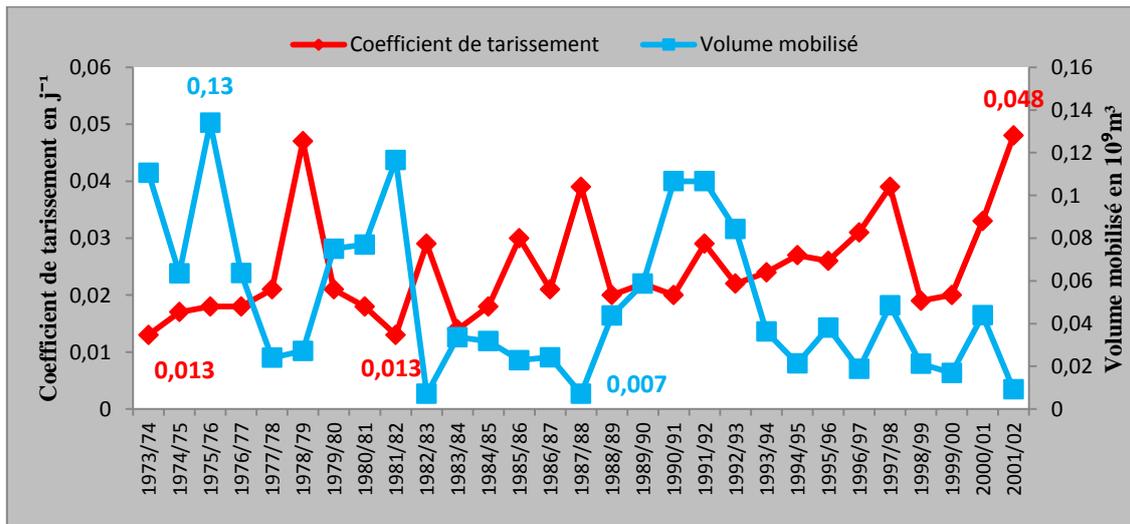


Figure 108: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station de Douar Tassadane

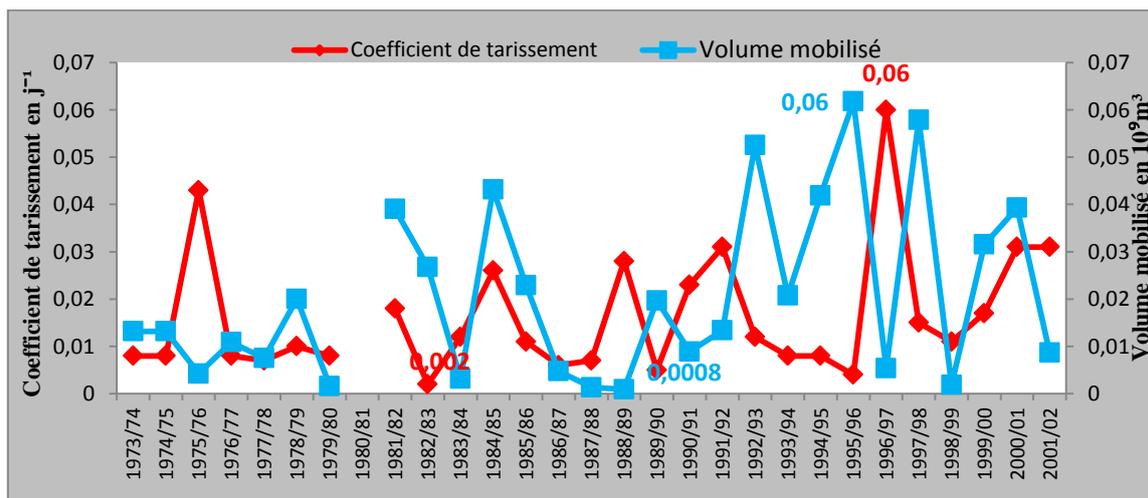


Figure 109: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station de Koudiat Tendart

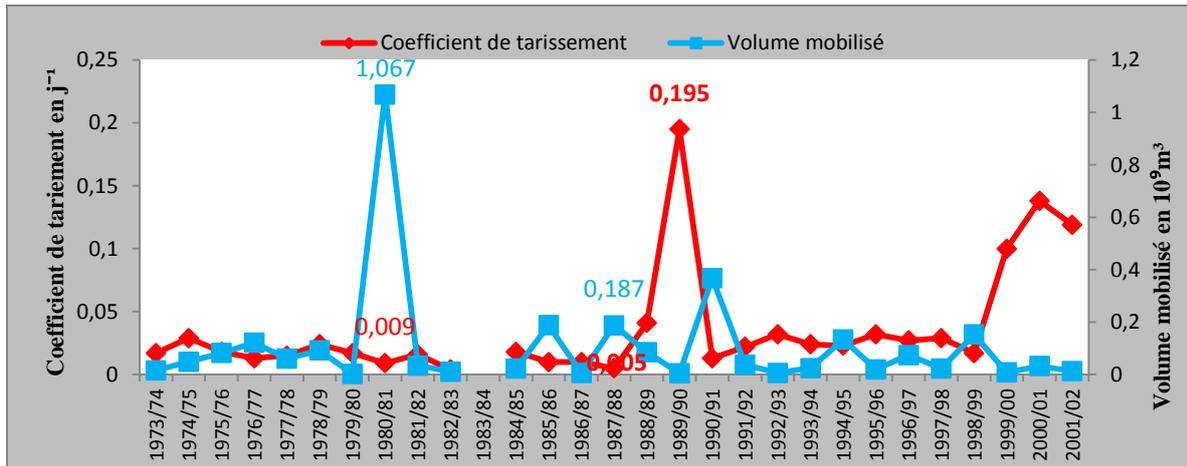


Figure 110: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station d'Ain Smara

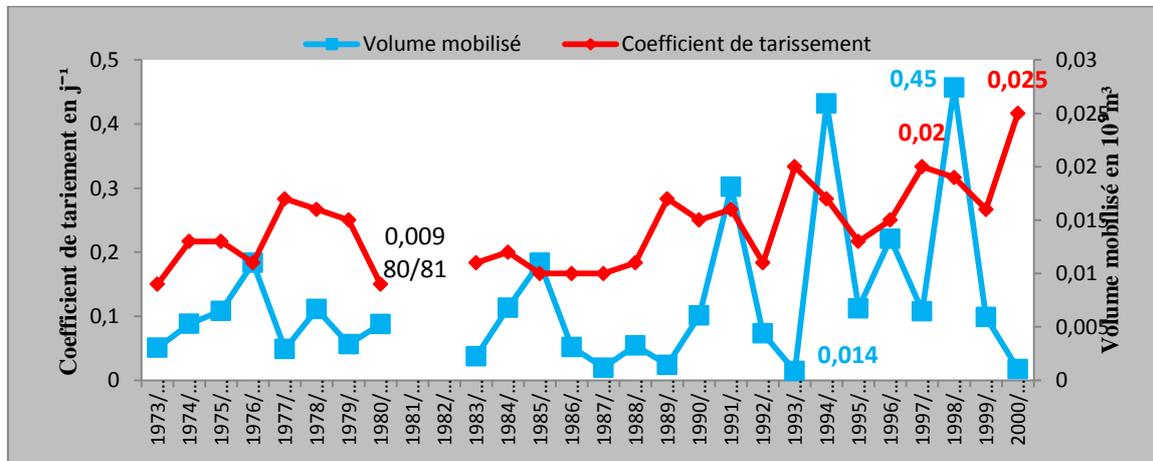


Figure 111: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station de Grarem

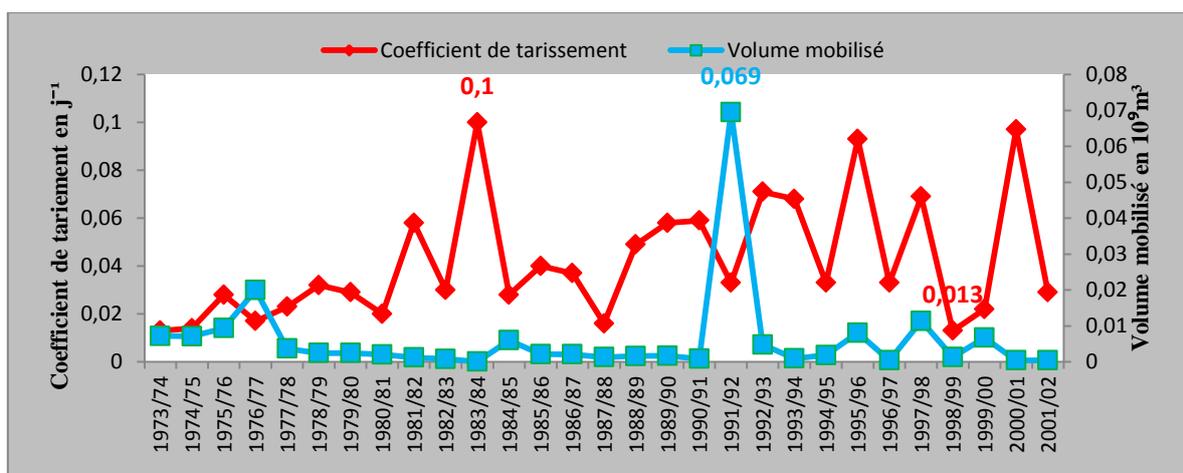


Figure 112: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station de Bouchdira

### 2.3.2. Calcul du volume d'eau mobilisé

Le volume d'eau mobilisé en étiage par l'ensemble des aquifères du bassin versant est donné par l'équation :

L'équation du coefficient de Maillet est la suivante

$$\frac{e^{-kt}}{k} + \frac{V}{Q_0} - \frac{1}{\alpha} = 0$$

L'intégration de cette équation sur l'intervalle  $[0, +\infty)$  donne le volume annuel mobilisé par l'ensemble des aquifères du bassin versant, dont l'expression mathématique est définie par l'équation suivante :

$$V \text{ mobilisé} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{+\alpha t} dt = \frac{Q_0}{\alpha}$$

$Q_0$  est exprimé en  $m^3/s$  et  $\alpha$  étant calculé en  $\text{jours}^{-1}$ ,  $Q_0$  est multiplié par 86400 pour la compatibilité des unités

Cette approche a été utilisée dans plusieurs recherches (Savané et al, 2001; Savané et al, 2003 ; Assemian et al, 2013 ; Kouassi, 2013 ; Kouassi, 2007 ; Goula, 2009 ; Bricquet et al., 1997 ; Nguimalet et al , 2015; Olivry et al, 1993 ; Anzoumanan, 2019 )

Les coefficients de tarissements ont été couplés aux volumes mobilisés pour permettre une analyse comparée de leur évolution. Ces paramètres sont présentés aux figures 108 à 112.

- Sur la période 1973/74-2001/02, le coefficient de tarissement moyen interannuel de l'oued El Kébir amont à la station de **Douar Tassadane** est de  $0,024 \text{ jour}^{-1}$ , avec un maximum de  $0,048 \text{ jour}^{-1}$  (2001/02) et un minimum de  $0,013 \text{ jour}^{-1}$  (1973-1974). Alors que le volume moyen mobilisé par l'aquifère du bassin est de l'ordre de  $0.05 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ , le maximum s'observant en 1975/76 avec  $0.13 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  et le minimum en 1987/88 avec  $0.007 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  (Figure 108).
- Le coefficient de tarissement moyen de l'oued Bouselah à la station de **Koudiat Tendart** est de  $0.016 \text{ jour}^{-1}$ , les coefficients de tarissement extrêmes apparaissent en 1996/97 ( $0.06 \cdot \text{jour}^{-1}$ ) et en 1982-1983 ( $0.002 \cdot \text{jour}^{-1}$ ), et les volumes mobilisés extrêmes en 1995/96 ( $0.06 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ ) et en 1988/89 ( $0.0008 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ ) (Figure 109). On remarque que le coefficient de tarissement et le volume mobilisé varient en sens inverse pour les deux stations (Douar Tassadane et Koudiat Tendart). Autrement dit, lorsque le coefficient de tarissement augmente, le volume mobilisé diminue et vice-versa.
- Au niveau de l'oued Rhumel Seguin à **Ain Smara**, l'année 1980/81 connaissent une faible valeur du coefficient de tarissement ( $0.009 \text{ j}^{-1}$ ) et un volume mobilisé important ( $1.06 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ ). Sur l'oued Rhumel Seguin à Ain Smara une bonne recharge des nappes souterraines est observée uniquement en 1987/88, avec un coefficient de tarissement faible ( $0.005$ ) et un volume d'eau mobilisé assez élevé ( $0.18 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ ). Ces résultats

montrent que les perturbations pluviométriques qui ont affecté la région pendant ces dernières décennies sont ressenties sur les écoulements et les réserves en eau souterraine. Le volume moyen mobilisé pour cette période au niveau de cette station est estimé à  $1.04.10^8 \text{m}^3$  (Figure 110).

- Dans le cas d'oued Rhumel aval à **Grarem**, les réserves d'eau souterraine apparaissent relativement faibles de 1973/74 à 1983/84, alors que la recharge des nappes se révèle plus efficace de 1984/85 à 2000/01. Les coefficients de tarissement moyens pour ces deux périodes s'établissent respectivement à 0.012 et 0.014. Les volumes d'eau mobilisés sont faibles pendant la période sèche ( $0.091.10^9 \text{m}^3$  en moyenne) et plus élevés sur la période 1984/85-2000/01 ( $0.13.10^9 \text{m}^3$  en moyenne pour une superficie totale de  $5320 \text{Km}^2$ ). Les coefficients de tarissement annuels de l'oued Rhumel aval à la station de Grarem varient de 0.009 à  $0.025 \text{j}^{-1}$ , pour des volumes d'eau mobilisés par les aquifères entre  $0.014$  et  $0.45 \cdot 10^9 \text{m}^3$  (Figure 111).
- Les coefficients de tarissement annuels de l'oued Smendou à la station de **Bouchdira** varient de 0.013 à  $0.1 \text{j}^{-1}$ , pour des volumes d'eau mobilisés par les aquifères entre 0.00005 et  $0.069.10^9 \text{m}^3$ . On note une forte valeur du coefficient de tarissement en 1983/84 ( $0.1 \text{j}^{-1}$ ) correspondant à un volume mobilisé de  $0.05.10^6 \text{m}^3$ . Le volume moyen annuel mobilisé au niveau de la station de Bouchdira est de  $0.104.10^9 \text{m}^3$ . Le volume mobilisé le plus élevé est observé uniquement en 1991/92 ( $0.069.10^9 \text{m}^3$ ) avec un coefficient de tarissement faible ( $0.033 \text{j}^{-1}$ ). Cette période observé est caractérisé par une faible réserve souterraine (Figure 112).

Les coefficients de tarissement et les volumes mobilisés par les aquifères montrent que les réserves en eaux souterraines sont sensibles aux fluctuations de la pluviométrie. En effet, dans la majorité des stations hydrométriques, les coefficients de tarissement diminuent pendant les années humides et augmentent pendant les années sèches (voir chapitre 2).

#### 2.4. Sévérité des étiages

La sécheresse est un phénomène naturel, à caractère régional, qui touche le monde entier. Ses caractéristiques varient d'un régime climatique à un autre ; elle se produit aussi bien dans des zones à forte précipitations que dans celles à faibles précipitations. C'est un événement climatique extrême, souvent difficile de savoir quand il commence et d'établir quand il se termine.

Toutes les régions du monde ont été touchées entre 2001 et 2010 par des sécheresses persistantes et particulièrement dévastatrices, comme celles qui ont affecté l'Australie (notamment en 2002) et le bassin de l'Amazone (en 2010) (OMM, 2013). L'Algérie a connu durant les 25 dernières années, une période de sécheresse intense et persistante, caractérisée par un déficit pluviométrique important, évalué à près de 30 %, sur l'ensemble du pays ; cette sécheresse a eu un impact négatif sur la ressource superficielle et souterraine (Bahlouli, 2004 ; Medejerab et Henia, 2011).

Plusieurs études ont porté sur la sécheresse, sous différents types, qu'a connue l'Algérie. Nouaceur *et al* (2013) ont utilisé la méthode de la matrice pour déterminer les périodes caractéristiques de changement climatique au Maghreb. Cette méthode a permis de distinguer les périodes caractéristiques des cycles pluviométriques ou hydrologiques. (Taibi et al, 2013, 2015 ; Hirsch et al, 2007 ; Meddi et al, 2009), Des études ayant appliqué différentes méthodes d'analyses statistiques de tendances, ont démontré qu'au cours du dernier siècle, l'Algérie du Nord a connu une alternance de périodes sèches et humides. Zeroual et al (2013) ont montré une diminution remarquable des débits moyens mensuels au Nord de l'Algérie, ce qui est une conséquence directe de la baisse des précipitations. Achite et Touaibia (2007) ont examiné les crues et les déficits pluviométriques au niveau du bassin versant de l'oued Mina, par la méthode de l'analyse en composantes principale (A.C.P) sur une période allant 1970/71 à 1999/2000.

## CONCLUSION

L'analyse des crues et des étiages au sein des différents sous bassins de Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun a fait appel à de nombreux outils statistiques pour caractériser et modéliser ces événements extrêmes.

L'analyse des pluies journalières maximales annuelles a mis en évidence une variation nette d'occurrence des précipitations d'une saison à l'autre et d'un mois à l'autre. En effet, l'hiver enregistre plus de 39 % des événements pluviométriques exceptionnels, vient ensuite le printemps avec 28 % des cas, et enfin l'automne avec 26 %. Les mois de janvier (13 %) et février (15 %) sont les plus touchés. La même analyse a montré l'existence d'une saison à plus fort risque s'étendant de novembre à mai, et une saison à plus faible risque, de juin à août.

Les fluctuations des apports des crues sont directement liées aux hauteurs de précipitations, leur intensité et leur répartition à travers les sous-bassins. A la station de Douar Tassadane, les épisodes pluvieux exceptionnels en 2002/03 ont engendré des crues conséquentes atteignant un pic de 609.4 m<sup>3</sup>/s, le 25 jan 2003; le volume total écoulé pendant la crue est de l'ordre de 54.74 hm<sup>3</sup>. A la station de Koudiat Tendart, l'oued Bouselah a évacué 31.85 hm<sup>3</sup> pour un débit de pointe de 180 m<sup>3</sup>/s, soit 31.09 % du total annuel. On peut citer aussi la crue du Rhumel Seguin à Ain Smara qui a écoulé, les 28 décembre 84 au 1<sup>er</sup> janvier 1985, 39.98 hm<sup>3</sup>. La crue du Rhumel à Grarem a charrié les 6 au 10 mars 1985 un volume de 172.04 hm<sup>3</sup>.

L'analyse graphique des hydrogrammes de crues observées a permis de tirer des conclusions sur les types d'hydrogrammes se produisant dans le bassin du Rhumel-Endja. Des hydrogrammes assez classiques et monogéniques (à l'exemple de la crue de septembre 1973) ; on y retrouve toutes les caractéristiques d'un hydrogramme type unitaire, avec un temps de montée plus court que la durée de décrue; il est suivi par un tarissement prolongé. Le deuxième type concerne des crues complexes, à plusieurs pointes (comme celles observées en janvier 2003 et entre le 28 décembre 1984 et le 1<sup>er</sup> janvier 1985). Contrairement à la montée, la décrue se fait généralement de façon lente, en s'étalant sur plusieurs jours avant le rétablissement du débit de base.

Les débits de crue (Q journaliers et instantanés maximaux) ont fait l'objet d'une étude fréquentielle à l'aide de la loi de Galton. L'accroissement relatif des débits entre la crue biennale, décennale et centennale, est très variable sur tous les oueds: celui du maximum instantané varie considérablement de 2,43 à 5.81 fois pour le décennale et de 5.03 à 24.43 fois pour le débit centennal. Pour le maximum journalier, il varie de 2.40 à 4.31 fois pour le débit décennal et de 4,91 à 14.18 fois pour le débit centennal. Par ailleurs, L'ANRH a cherché à expliquer les caractéristiques de crue à partir des paramètres morphométriques et pluviométriques des bassins versants contrôlés par les stations hydrométriques. La comparaison des débits fréquentiels prédéterminés par les formules A.N.R.H. avec ceux obtenus par l'ajustement gaussien-logarithmique, appliquée directement sur les débits de crue observés des stations étudiées, montre que des écarts importants sont constatés pour les trois stations, pouvant aller du simple au double ou triple au niveau des trois stations.

Le modèle de simulation de l'hydrogramme de crue (crue décennale, cinquantennale et centennale) proposé par l'ANRH a permis d'obtenir des résultats intéressants sur le bassin du Rhumel-Endja. Ils sont indispensables pour le dimensionnement d'ouvrages où la forme de l'hydrogramme de crue joue un rôle important (comme le laminage d'une crue à la traversée d'un barrage).

Concernant les écoulements d'étiage, nous avons établi les courbes des débits classés de cinq stations du Rhumel-Endja. Et nous avons déduit leurs débits caractéristiques (Etiage absolu, DCE, DC6, DC9, DC11, DCE) en année humide et en année sèche. Par ailleurs, deux indices principaux, QMNA « Quantité Mensuelle minimale Annuelle » et VCNd (débit minimum sur  $d$  jours consécutifs de l'année), ont été définis pour caractériser l'étiage.

Les QMNA prennent les valeurs les plus faibles car elles traduisent la moyenne interannuelle du débit mensuel minimal enregistré chaque année. Pour une période de retour donnée, les quantiles les plus élevés sont enregistrés aux stations de Grarem et Douar Tassadane. Quant aux quantiles les plus faibles, ils sont enregistrés à la station de Bouchdira et Koudiat Tendart. Ces quantiles diminuent au fur et à mesure que les périodes de retour augmentent sur les cinq stations du bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun. La station de Grarem, station la plus en aval du Rhumel, maintient des quantiles d'étiage bien supérieurs à ceux des autres stations. Les débits caractéristiques d'étiage ont donc été déterminés au moyen des quantiles évalués à partir des différentes stations.

Les valeurs de VCN3 les plus sévères enregistrées sont observées durant la période 1997/98 à 2000/01 pour toutes les stations hydrométriques, Cette période est caractérisée par une sécheresse sévère dans le bassin. Ainsi, les valeurs des débits (VCN3) varient entre 0.01 m<sup>3</sup>/s et 0.07 m<sup>3</sup>/s à la station de Douar Tassadane, pour les années 2000/01 et 1997/98, respectivement. La période de retour du VCN3 de 2000/01 est de près de 31 ans, alors que celle du VCN3 de 1997/98 est de 2.8 ans. Les valeurs de VCN3 varient entre 0.13 m<sup>3</sup>/s et 0.37 m<sup>3</sup>/s à la station de Grarem, pour les années 1997/98 et 2000/01, respectivement. Les stations de Koudiat Tendart, Ain Smara et Bouchdira enregistrent des valeurs nulles de VCN3 surtout pendant l'année 2000/01.

Les coefficients de tarissement et les volumes mobilisés par les aquifères montrent que les réserves en eaux souterraines sont sensibles aux fluctuations de la pluviométrie. En effet, dans la majorité des stations hydrométriques, les coefficients de tarissement diminuent pendant les années humides et augmentent pendant les années sèches. Les coefficients de tarissement en période de basses eaux oscillent entre  $0.048j^{-1}$  (2001/02) et la valeur minimale  $0.013j^{-1}$  (1973/74 et 1981/82) à la station de Douar Tassadane, pour la station de Koudiat Tendart, Les valeurs extrêmes sont  $0.06 j^{-1}$  (1996/97) et  $0.002 j^{-1}$  (1982/83). Le bassin d'oued Rhumel- Seguin à Ain Smara, les coefficients oscillant entre  $0.005 j^{-1}$  en 1987/88 et  $0.195 j^{-1}$  en 1989/90. Pour la station de Grarem, Les années 1997/98 et 2000/01 ont connu un tarissement rapide à cause de l'exploitation de l'aquifère de Hamma pour AEP de Constantine pendant l'année 1997/98 et de la pluviométrie relativement faible survenue au cours de l'année 2000/01 (année sèche) et la station de Bouchdira, les coefficients de tarissement varient fortement entre 0.1 et  $0.013 j^{-1}$ .

Les volumes mobilisés, d'origine souterraine, sont évalués à  $0.05.10^9 m^3$  au niveau de la station de Douar Tassadane, le maximum s'observant en 1975/76 avec  $0.13.10^9 m^3$  et le minimum en 1987/88 avec  $0.007.10^9 m^3$ . Pour la station de Koudiat Tendart, les volumes mobilisés extrêmes en 1995/96 ( $0.06.10^9 m^3$ ) et en 1988/89 ( $0.0008.10^9 m^3$ ). Sur l'oued Rhumel Seguin à Ain Smara une bonne recharge des nappes souterraines est observée uniquement en 1987/88, avec un coefficient de tarissement faible (0.005) et un volume d'eau mobilisé assez élevé ( $0.18 .10^9 m^3$ ). Les coefficients de tarissement annuels de l'oued Rhumel aval à la station de Grarem varient de 0.009 à  $0.025 j^{-1}$ , pour des volumes d'eau mobilisés par les aquifères entre 0.014 et  $0.45 10^9 m^3$ . Le volume moyen annuel mobilisé au niveau de la station de Bouchdira est de  $0.104.10^9 m^3$ . Le volume mobilisé le plus élevé est observé uniquement en 1991/92 ( $0.069.10^9 m^3$ ) avec un coefficient de tarissement faible ( $0.033 j^{-1}$ ), Cette période observé est caractérisé par une faible réserve souterraine

Le fonctionnement du barrage « Béni Haroun » dépend donc du comportement hydrologique des oueds Rhumel- Endja, lui-même de plus en plus influencé par les évènements extrêmes comme les crues qui favorisent le phénomène de transport solide, objet du cinquième chapitre de notre étude.

---

**CHAPITRE 4**

**GESTION ET REGULARISATION DES ECOULEMENTS DE  
SURFACE: ROLE DU BARRAGE DE BENI HAROUN**

---

## **INTRODUCTION**

La construction des barrages est une solution adoptée par l'homme pour stocker l'eau de surface pendant les périodes des hautes eaux pour pouvoir l'utiliser le long de l'année. Chaque année, plus de 250 nouveaux barrages réservoirs sont construits dans le monde (Nandalal et al, 2007). Ces ouvrages ont plusieurs impacts: socio-économiques, environnementaux, hydroclimatiques et aussi morphologiques.

En Algérie, avec les besoins grandissants liés à l'essor démographique et le développement accéléré des activités économiques, un nombre important de barrages réservoirs a été mis en œuvre: 85 barrages en exploitation sont répartis dans des bassins septentrionaux, à écoulement de type exoréique des bassins méridionaux, à écoulement endoréique.

Le barrage de Béni Haroun, objet de cette étude, se situe à 4 km en aval de la confluence des oueds Rhumel et Endja et à environ 40 km au Nord-Ouest de la ville de Constantine (Figure 113). Il constitue le plus important projet national du secteur hydraulique depuis l'indépendance, destiné à l'alimentation en eau potable de plusieurs wilayas de l'Est algérien (Mila, Constantine, Jijel, Oum El Bouaghi, Khenchela et Batna), en plus de l'irrigation de 30 000 hectares de terres agricoles dans les hautes plaines Sud-constantinoises.

Après avoir présenté les principales caractéristiques hydrotechniques caractérisant le barrage, nous nous intéressons à l'étude et l'analyse de l'évolution interannuelle et mensuelle du bilan de régularisation des apports, sur la base des données de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) relatives à 15 années d'exploitation de cet ouvrage (2003/04-2017/18).

Il s'agit aussi d'étudier les pertes d'eau du barrage et la variation des volumes évacués par le déversoir et par la vidange de fond. Les volumes d'eau déversés au cours des crues exceptionnelles (crues de janvier 2004, décembre 2004-janvier 2005, janvier 2009, janvier - mars 2012, janvier 2015 et mars 2016) ont manifestement marqué la vie du barrage Beni Haroun, de même qu'elles ont contribué à accélérer l'envasement de la retenue.

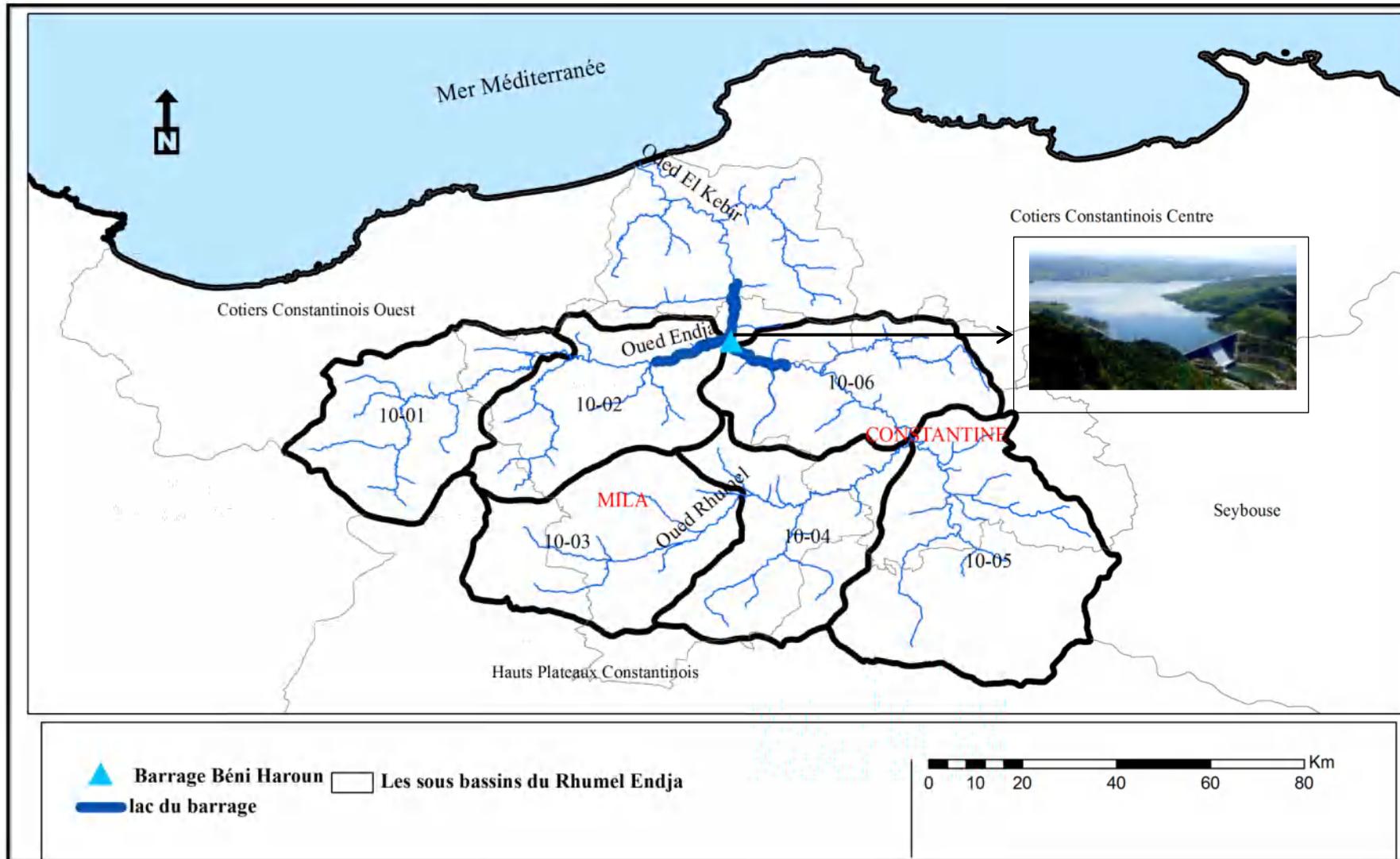


Figure 113: Localisation du barrage de Béni Haroun dans le bassin versant du Kébir-Rhumel

## 1. LA STRATEGIE DES BARRAGES EN ALGERIE

### 1.1. Historique des barrages en Algérie

Quatre périodes marquent la mutation hydraulique en Algérie, en termes de nombre et de capacité installée des barrages.

#### 1.1.1. La période coloniale

La première génération des barrages-réservoirs (**1850-1894**) est marquée par la réalisation de quelques barrages de petite taille dans les parties occidentale et centrale du pays. Ces réalisations n'ont pas du tout concerné l'Est algérien, 5 ouvrages furent construits en Oranie (Cheurfas, Djidiouia, Tlelat, Fergoug, Magoum) et 2 autres tout près d'Alger (Hamiz, Meurad), totalisant un volume de 65 hm<sup>3</sup> (Mebarki, 2005).

Entre **1932-1948**, neuf (9) barrages de grande et moyenne capacité (sauf Foum El Gueiss de petite taille) ont été édifiés: Oued Fodda (1932), Boughzoul (1934), Bakhadda (1936), Ghrib (1939), Foum El Gueiss (1939), K'sob (1940), Zardezas (1945), Beni Bahbel (1946) et Bouhanifia (1948).

En 1950, le barrage de Foum El Gherza sur l'oued El Abiod, a été mis en service. Il a connu des problèmes d'envasement rapide, en plus des phénomènes de fuites. Par ailleurs, deux importants barrages hydro-électriques, Ighil Emda et Erraguene (mis en eau respectivement en 1954 et en 1963), furent lancés. Les travaux du barrage Cheffia furent engagés en 1959.

L'effort est resté soutenu à l'Ouest du pays qui a vu la construction des barrages de Sarno, Bakhadda, Meffrouch. Durant la même période, on procède à la surélévation de deux barrages de première génération: Hamiz et Cheurfas (Mebarki, 2005 et 2010).

#### 1.1.2. La période de l'Indépendance

Entre **1962-1980**, les trois barrages mis en eau (Cheffia, Djorf Torba et Sidi Mohamed Ben Aouda) ont porté la capacité de stockage de 910 à 1.660 hm<sup>3</sup> (Touati, 2010). A cause de leur envasement rapide, ont été surélevés respectivement les barrages de Foum El Gueiss (en 1969) et de Zardezas et K'sob (en 1977).

**Dès le début des années 1980**, l'Algérie s'est engagée dans un ambitieux programme pour rattraper son retard hydraulique. Dix (10) barrages d'une capacité cumulée de 1585 hm<sup>3</sup> furent mis en eau entre 1981 et 2000, leur capacité variant de 40 à 200 hm<sup>3</sup> (Boutouatou et al, 2019).

Entre **2000 et 2006**, la poursuite du rythme des réalisations s'est traduite par la mise en service chaque année, de 1 à 2 barrages. En 2005, le nombre de barrages achevés était de 66 avec une capacité de 7,65 milliards de m<sup>3</sup> (Kalli, 2002; Remini, 2010).

Les barrages algériens sont, donc, de moyenne capacité, à l'exception des ouvrages réalisés dans le cadre des systèmes de transfert (le barrage de Gargar à Relizane : 450 hm<sup>3</sup>; le barrage de Koudiat Acerdoune à Bouira: 640 hm<sup>3</sup>; le barrage de Béni Haroun : 963 hm<sup>3</sup>).

### 1.2. Régularisation des eaux superficielles et transferts inter- bassins

L'Algérie avec sa centaine de barrages ne mobilise que  $4.5 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  alors que le Maroc avec 33 barrages mobilise  $10 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ , tandis que la Tunisie avec ses 28 barrages totalise  $2.4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Pour l'ensemble des barrages algériens les sédiments déposés sont évalués à  $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  en 5 ans soit  $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$  de volume perdu (Kettab, 2002).

Selon Mebarki (2005), le taux de régularisation des apports de barrages de l'Est Algérien est très variable d'un bassin à l'autre. Pour la décennie, 2020-2030, dans la région à écoulement exoréique, le bassin de Boussellam connaîtra le taux de régularisation le plus élevé (95,2 %), suivi par le bassin du Kébir-Rhumel, doté du système de Béni Haroun (66 %). Dans les zones méridionales à écoulement endoréique, c'est le bassin du Chott Melrhir, aux ressources déjà modestes, qui verra un accroissement notable du taux de régularisation (il atteindrait 60,5 %), à l'opposé du Hodna (23,5 %) où les projets restent limités.

En complément aux barrages de régularisation des apports des oueds, les systèmes de transfert inter-bassins (dotés de conduites et de stations de pompes et de traitement) permettent d'assurer un transfert de ces ressources d'eau stockées dans les retenues pour alimenter les zones déficitaires en eau. Nous présentons ci-après quelques grands transferts hydrauliques en Algérie, réalisés sur la base de connexion de barrages:

**Le système de transfert des eaux régularisées par le barrage de Béni Haroun:** Ce système qui sera présenté en détail plus loin, repose sur l'interconnexion de 5 barrages: Béni Haroun ( $960 \text{ hm}^3$ ), Boussiaba ( $35 \text{ hm}^3$ ), Oued El Athmania ( $33 \text{ hm}^3$ ), Ourkis ( $65 \text{ hm}^3$ ) et Koudiat Medouar ( $62 \text{ hm}^3$ ) (Mébarki, 2005 et 2010).

**Le système de transfert MAO pour l'Oranie.** La région de l'Oranie, ayant le plus souffert du manque d'eau, s'est dotée d'un système qui connecte les barrages intérieurs, le Chélif et les unités de dessalement (Hamlat, 2014). Le transfert du barrage Cheliff-Kerrada (Mostaganem-Arzew-Oran « MAO ») correspond à un réseau multifonctionnel qui est utilisé non seulement pour le transfert des eaux d'oued Cheliff mais aussi pour transporter les eaux de la grande station de dessalement d'El Mecta et des barrages situés à l'Est de la wilaya d'Oran.

**Le système Zardezas-Guénitra** Le barrage de Zardezas a été relié à celui de Guénitra pour répondre aux besoins des utilisateurs de Skikda. De plus, depuis 2002 et suite à la grande pénurie, une autre liaison avec le barrage de Zit Emba a été opérée (Touati, 2010). Ce système s'appuie sur la station de traitement de Zardezas, mise en service en 1993 (capacité de 200 l/s) et la station de traitement de Guénitra, mise en service en 2002 (capacité de 100 l/s).

**Le système de transfert Teksebt - Alger-Tizi Ouzou ;** il s'agit du grand système de transfert doté d'une double conduite de transfert de 90 km de longueur, pour relier le barrage de Taksebt (wilaya de Tizi Ouzou) au réservoir de Boudouaou (wilaya d'Alger) (Akli, 2015).

**Le système Mexa - Bougous et Cheffia:** face à la demande en eau de plus en plus croissante et la grave pénurie d'eau ayant touché la ville de Annaba au cours de l'année hydrologique 2001/02, le barrage Cheffia, a été renforcé par deux projets de barrages, Mexa et Bougous (Mebarki, 2010).

## 2. LE BARRAGE DE BENI HAROUN ET SON SYSTEME DE TRANSFERT

### 2.1. Historique: études et réalisation

L'idée de réalisation d'un tel complexe a suscité l'intérêt des responsables de l'état algérien quelques années seulement après le recouvrement de l'indépendance nationale, les études y afférentes avaient, en effet commencé en 1969 avec le lancement par Sonatrach de l'étude générale sur les Ressources Superficielles Nationales. Les études et travaux réalisés avant la mise en eau du barrage Béni Haroun sont résumées dans les tableaux 42 et 43.

*Tableau 42: Les principales études concernant le projet du barrage Béni Haroun (d'après ANBT, 2014)*

Date	Les études
1969	Lancement par SONATRACH de l'étude générale Nationale sur les ressources superficielles confiée au BET HYDROTECHNIC CORPORATION (Américain): 1 <sup>é</sup> phase 1969: Inventaire des ressources en eau de surface. 2 <sup>é</sup> phase 1972: Projets de développement des ressources hydrauliques. 3 <sup>é</sup> phase 1975: Développement des ressources hydrauliques pour l'autosuffisance alimentaire.
1976	Etude d'avant-projet sommaire du barrage Béni-Haroun par le bureau d'études HARZA International (Américain)
1983-1986	Etude d'avant-projet détaillé du barrage Béni-Haroun par le bureau d'étude HARZA International. Etudes d'aménagement général du transfert Béni-Haroun.
1996	Lancement des études d'avant-projet détaillé du transfert Béni-Haroun avec BET TRACTEBEL ( Belgique) Lancement des études d'avant-projet détaillé du transfert Béni-Haroun avec BET TRACTEBEL ( Belgique)

*Tableau 43: Les principaux travaux réalisés du projet du barrage Béni Haroun (d'après ANBT, 2014)*

Date	Les travaux
1985	Avis d'appel d'offre international pour la préqualification des entreprises (sur 52 soumissionnaires, 22 entreprises préqualifiées)
1986	Choix de l'entreprise anglaise BALFOUR BEATY, (visa des organes de contrôle)
1988	Le comité des grands équilibres a confié le contrat à l'entreprise Chinoise CWE.
1991	Constat faible avancement des travaux (16%).
1992	Résiliation à l'amiable avec CWE (faible avancement des travaux)
1993	Choix de l'entreprise espagnole DRAGADOS.
1996	Installation du chantier et début des travaux
1999	Démarrage du barrage à l'aval du batardeau/ Achèvement du niveau 158 en Rive Gauche.
2002	Travaux de finition
2003	Mise en eau

Une forte crue a été observée le 04 janvier 2004 : avec un niveau du plan 162.5 m, l'alimentation dans le réservoir a atteint pratiquement 2000 m<sup>3</sup>/s. Cette situation a conduit à une première mission d'évaluation du bureau d'étude concepteur (Tractebel Engineering) (Tableau 44).

Tableau 44: Les principaux travaux réalisés après la crue de 2004 au barrage Béni Haroun (ANBT, 2014)

Date	Les travaux
janvier 2004	Trois (03) auréoles de drainage dans la galerie de dérivation provisoire
mars 2004	Réalisation de trois forages drainants
juin 2004	Définition des travaux d'injections
novembre 2004	Extension du voile d'injection
novembre 2005	Mise en place d'un dispositif de mesure de débit à la sortie de la dérivation provisoire 2
octobre 2004 à mars 2005	Huit (08) drains profonds dans la galerie (rive gauche)
septembre 2005	Quatre (04) puits de drainage
mai 2006	Achèvement des travaux d'injections
septembre 2007	Localisation des zones d'infiltration
octobre 2010	L'exécution des quatorze (14) drains complémentaires au pied aval de l'évacuateur de crues
septembre 2011-novembre 2012	Réhabilitation, rénovation et maintenance du système d'auscultation (l'entreprise Espagnol OFITECO)

## 2.2. La digue, la retenue et les ouvrages annexes

### 2.2.1. La digue

Le barrage de Béni Haroun, s'appuyant sur une fondation rocheuse calcaire, est un barrage poids et fait partie des barrages rigides, comme le montre le schéma de la figure 114. Un barrage poids est un barrage dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages de formes généralement simples, dont la section s'apparente bien souvent à un triangle rectangle. Ils sont généralement assez épais et utilisent beaucoup de béton.

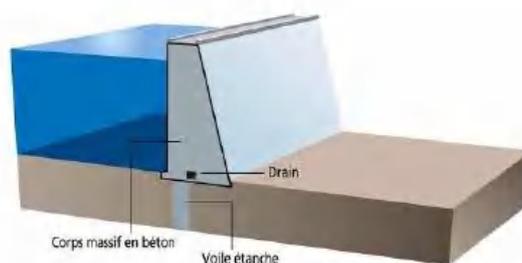


Figure 114: Exemple de barrage rigide (barrage poids) (extrait de Chetatha, 2016)

La digue de Béni Haroun est de type poids rectiligne, en béton compacté au rouleau (ou BCR); son profil type est triangulaire avec un parement amont vertical et un parement aval incliné à  $V/H= 1.25/1$  (Figure 115). La hauteur au-dessus de la fondation est de 118 m et la longueur en crête est de 710 m. La crête du barrage est calée à la côte de 216,30 m soit 1,5 m au-dessus des plus hautes eaux.

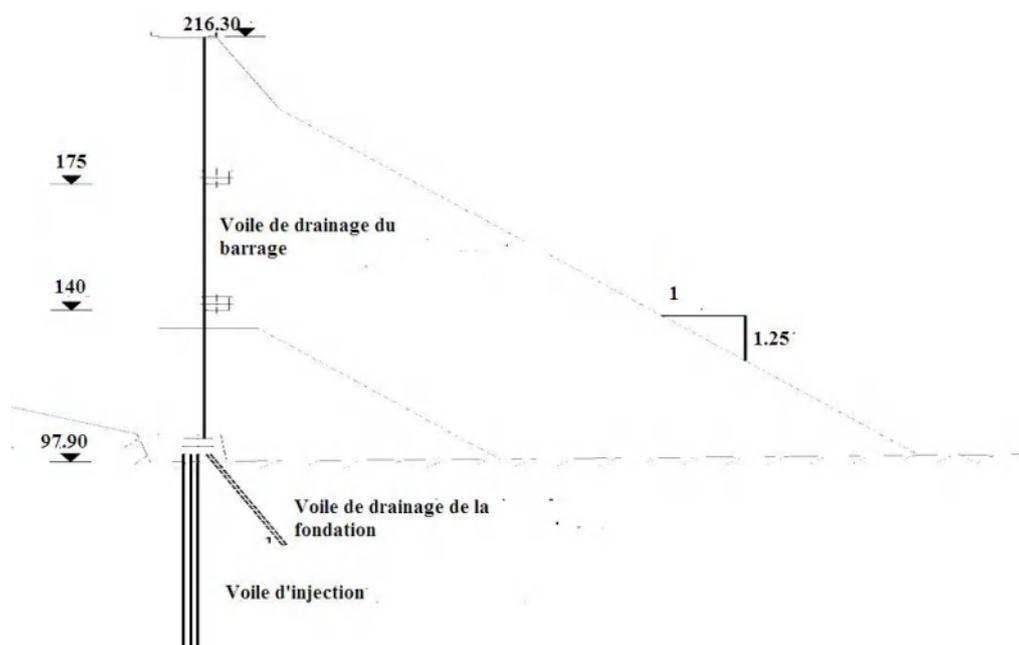


Figure 115: Coupe en travers du barrage de Béni Haroun (d'après ANBT)

A la côte normale de 200 m, le lac de retenue épouse l'oued Kébir et les deux vallées du Rhumel et de Endja sur une surface de 39,29 km<sup>2</sup>, soit près de 4000 ha (Figure 116). Les terres susceptibles d'être inondées lors des crues exceptionnelles (cotes 205 à 217 m) représentant une superficie totale de 819 ha (Mebarki, 2005). La retenue permet d'emmagasiner 963 hm<sup>3</sup> d'eau. D'un volume utile de 732 hm<sup>3</sup>, entre les cotes 172 et 200 m, elle permet de régulariser un apport annuel de 435 hm<sup>3</sup>.

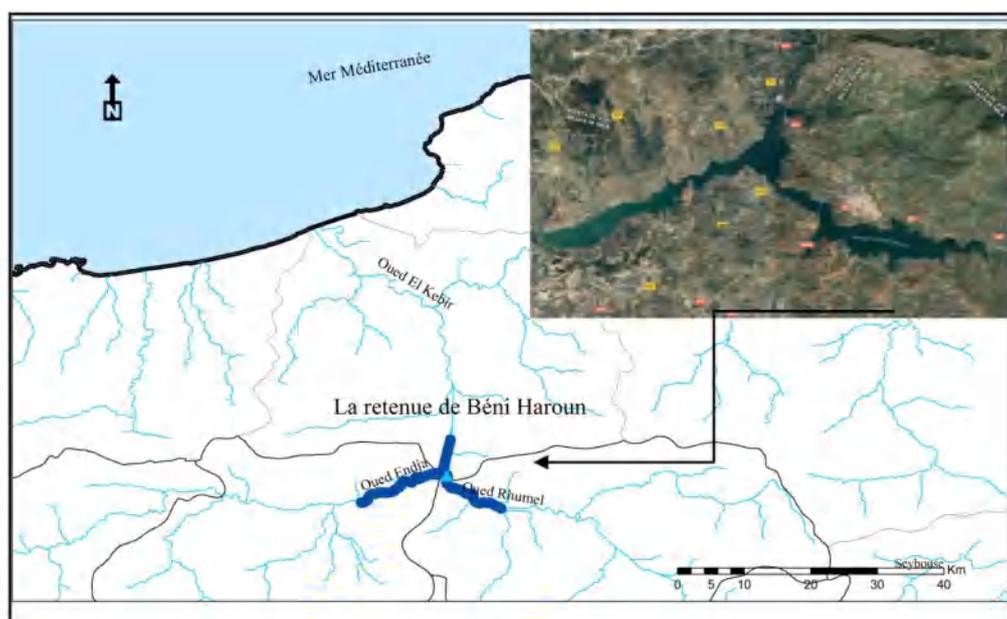


Figure 116: La retenue du Béni Haroun (image satellitaire Google Earth 2016)

### 2.2.2. Les ouvrages annexes

- **Évacuateur de crues**

C'est un évacuateur de surface de type (à seuil libre) intégré au barrage dans la partie centrale de celui-ci. La crête de l'évacuateur est située à la cote 200. Il est composé de six passes d'une largeur de 19 m chacune séparées par des piles de deux mètres de large (Photo 2).

La largeur du front déversant est de 10 m ; la longueur du coursier est de 73 m. Le coursier se termine par un saut de ski incliné de façon à diriger le jet vers la droite.

Le débit de laminage de la crue maximum probable (C.M.P) est de 16.640 m<sup>3</sup>/s.

- **Vidange de demi-fond**

La vidange de demi-fond est constituée de deux pertuis calés à la cote 140 en rive droite, présentant une section de 3,0 x 4,10 m. (Photo 3). Les vidanges sont dimensionnées pour évacuer 700 m<sup>3</sup>/s sous la crête de retenue normale.



Photo 2: Evacuateur de crue du barrage de Beni Haroun: vue amont et vue aval (ANBT, 2014)



Photo 3: Vidange de demi-fond du barrage de Beni Haroun (ANBT, 2014)

- **Galeries de dérivation**

Le système de galeries (trois galeries réparties sur 3 niveaux : 100, 140 et 175,1 m), permet de collecter les eaux de drainage provenant du corps du barrage, de la fondation et des versants (Photo 4). Il permet le contrôle du comportement de l'ouvrage.



Photo 4: Galerie de dérivation du barrage de Beni Haroun (ANBT, 2014)

### 2.3. Le système de transfert de Beni Haroun

Le barrage de Béni Haroun ouvrage clé du transfert a été terminé en 2001. Selon les estimations, 435 hm<sup>3</sup>/an seront régularisés et un complément prévu initialement de 69 hm<sup>3</sup>/an (volume revu à la baisse aujourd'hui) pourra être mobilisé et transféré à Béni Haroun par le barrage de Bou Siaba (région d'El Milia).

Le transfert des eaux du barrage de Béni Haroun est conçu pour alimenter les grands centres urbains et les périmètres d'irrigation d'une superficie globale de 42 000 hectares (Teleghma, Chemora, Batna-Ain Touta et Touffana-Remila) (Figure 117).

Sa mise en œuvre s'est confrontée à des contraintes techniques caractérisées par la distance que ce transfert devra parcourir, mais aussi l'altitude qui se traduit par d'importantes hauteurs de refoulement (Mebarki et al, 2008).

Le système de transfert repose sur l'interconnexion de cinq barrages (le barrage pivot de Béni Haroun et son complément Boussiaba) et les trois barrages de compensation (Oued Athmenia, Koudiat Medouar et Ourkiss). La station de pompage principale est celle de Béni Haroun, d'une puissance de 180 mégawatts refoulant 23 m<sup>3</sup>/s sur une hauteur de 800 m.

Plus de 600 km de conduites de transfert et d'adduction, six couloirs d'alimentation en eau potable et trois stations de traitement (production totale de 598 000 m<sup>3</sup> par jour) s'intègrent dans le schéma de transfert de Beni Haroun.

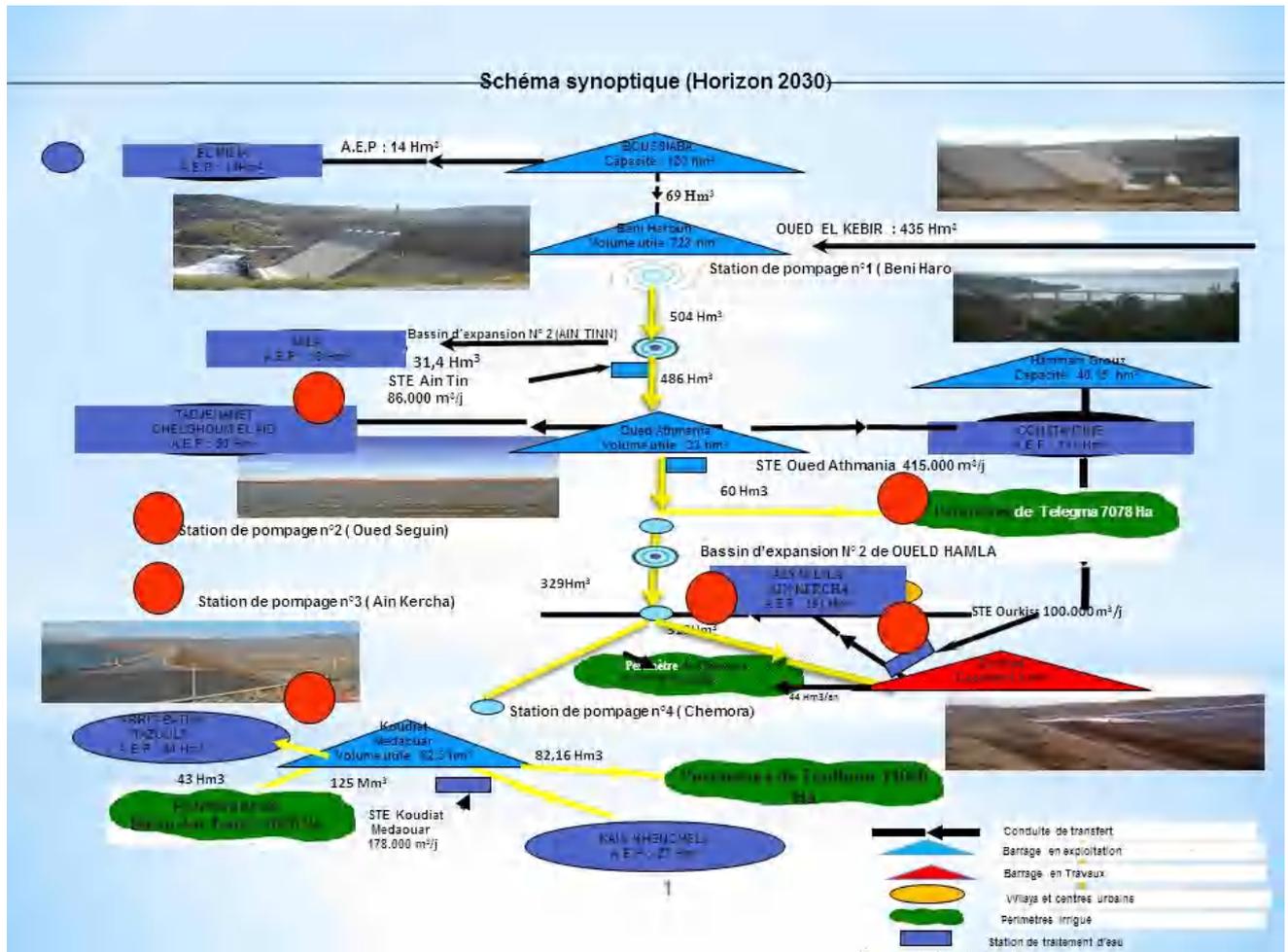


Figure 117: Schéma synoptique du transfert général du barrage Béni Haroun vers les 6 wilayas (Mila, Jijel, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna, Khenchela) (ANBT)

Le tracé d'ensemble de ce système se décompose en deux principales destinations (Mebarki, 2005 et 2010) :

**Le transfert Nord** : l'eau du barrage Béni Haroun est relevée par pompage vers le bassin de compensation d'Aïn Tinn (20 000 m<sup>3</sup> de capacité), en passant par le tunnel de djebel Lakehel, vers le barrage-réservoir d'Oued Athmenia (Ouled El Kaim) d'une capacité totale de 33.6 hm<sup>3</sup> (Figure 118).

Cette partie du transfert alimente les agglomérations du Nord (couloir 1) et du Sud (couloir 2) de la wilaya de Mila et les grands centres urbains de la wiliaya de Constantine (couloir 3). Au total, quinze agglomérations dans la wilaya de Mila (Ferdjioua, Oued Endja, Rouached, Zeghaïa, Sidi Merouane, Grarem Gouga, Tiberguent, Ahmed Rachedi, Yahya Benguecha, Chelghoum el Aïd, Oued Athmania, Teleghma, Oued Seguin, et Tadjenanet) et trois agglomérations dans la wilaya de Constantine (Ain Smara, el Khroub, et Constantine).

**Le transfert Sud (Hautes Plaines)** est divisé en deux branches, l'une vers la wilaya d'Oum Bouaghi en transitant par le barrage Ourkiss, et l'autre vers les deux wilayas de Batna et Khenchela en transitant par le barrage Koudiat Medouar. Les conduites qui formeront la ligne

dite Ourkiss, assurent l'alimentation en eau potable des villes d'Ain Fakroun, Ain Beida, Oum El Bouaghi, Ain Kercha, Ain M' lila et l'irrigation de la première tranche du périmètre de Chemora (7287 ha).

Le prélèvement d'eau au profit de l'alimentation en eau potable des agglomérations de Batna, Tazoult, Arris, Ain Touta, et Barika dans la wilaya de Batna, et celle de Kaïs, Khenchela, El Mahmel, Rechach dans la wilaya de Khenchela et l'irrigation des périmètres de Chemora, Touffana (2000 ha) et Batna-Ain Touta (6000 ha) s'effectuera à partir du barrage de compensation de Koudiat Medouar (Figure 119).

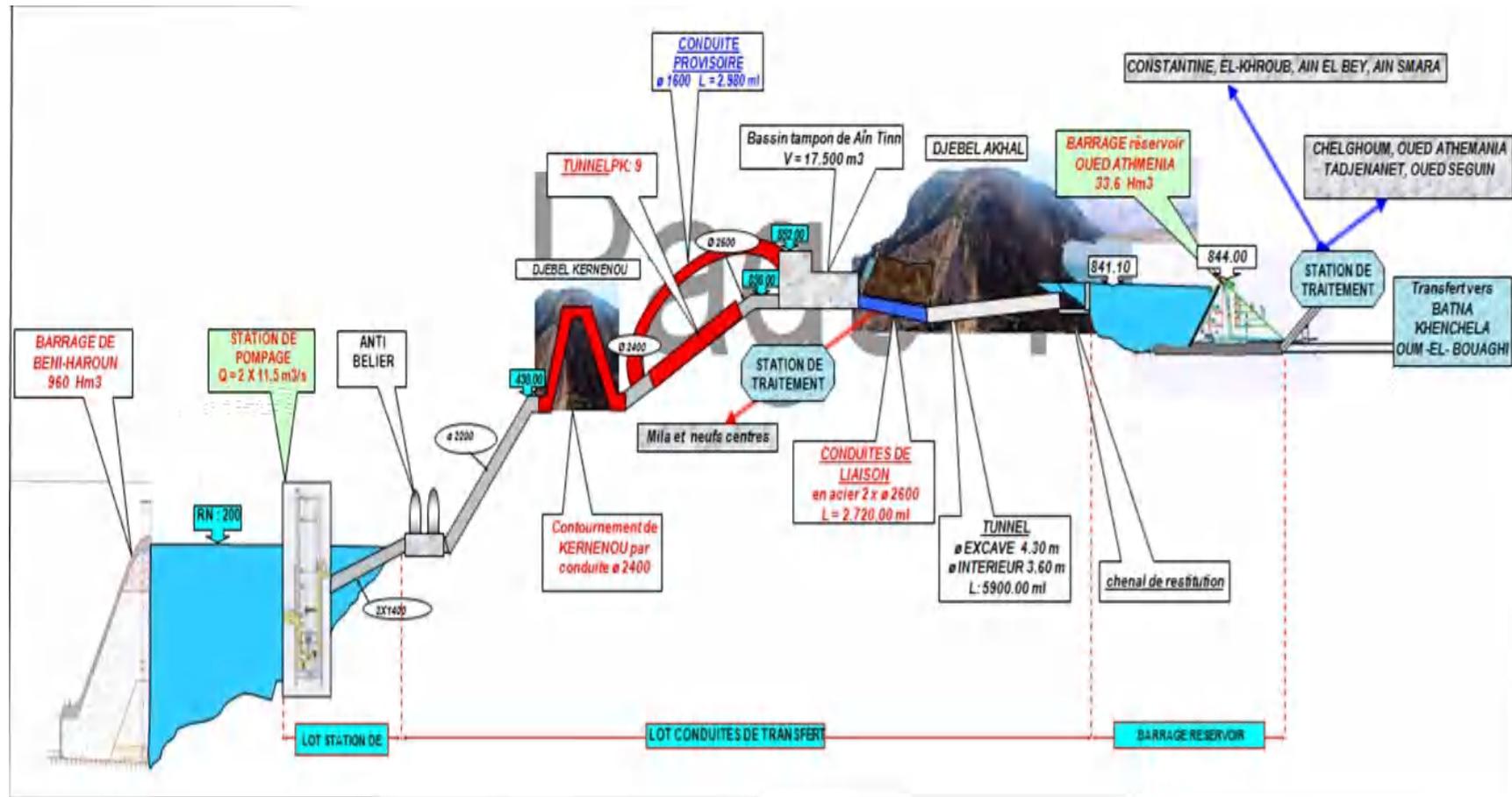


Figure 118: Schéma synoptique de transfert nord (source ANBT)

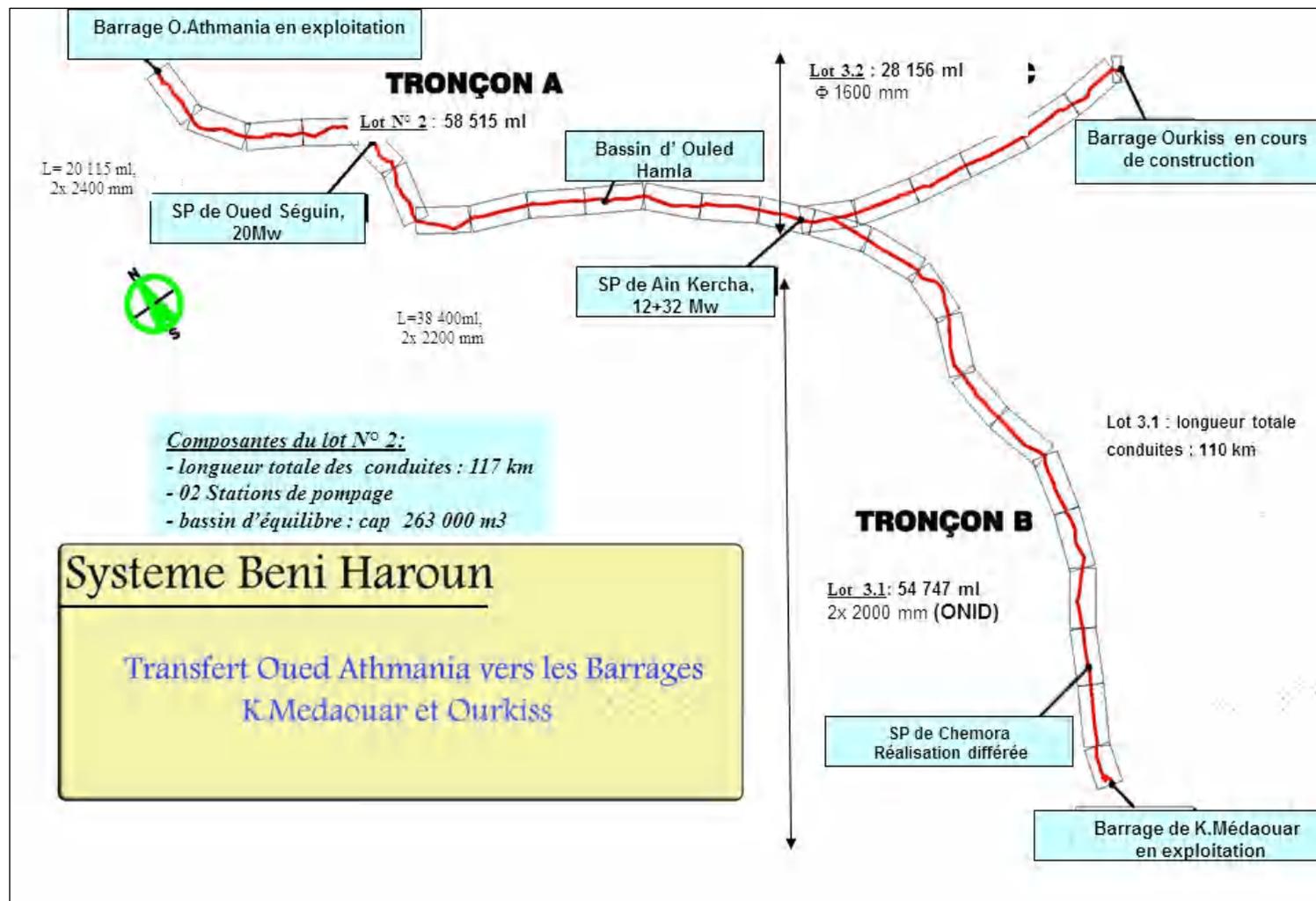


Figure 119: Transfert Oued Athmènia vers les barrages Koudiat Médouar et Ourkiss

### 3. REGULARISATION DES APPORTS AU BARRAGE DE BENI HAROUN

#### 3.1. Bilan d'eau du réservoir et courbe de remplissage

Le bilan de régularisation des eaux du barrage est l'expression analytique de contrôle et de suivi de l'état de fonctionnement hydrologique de l'ouvrage; elle se base sur les entrées, les sorties et la variation du stock d'eau emmagasiné (Mihoubi, 2009; Mebarki, 2005; Nazoumou, 2002). Le schéma théorique du bilan d'eau illustré par la figure 120 permet de suivre l'évolution du gain et perte de capacité d'une retenue.

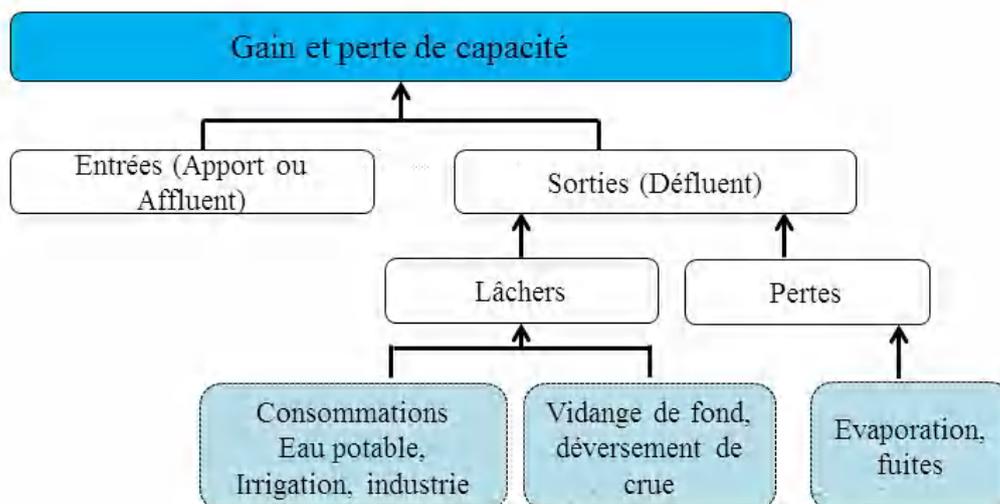


Figure 120: Schéma théorique du bilan d'eau d'un barrage

Les données de mesures journalières ont été obtenues auprès de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (A.N.B.T): les apports, les réserves (ou le volume de remplissage), les pluies, les pertes (évaporation et fuites), les volumes évacués (déversements de crue et vidanges de fond), et enfin les volumes régularisés pour les besoins de consommation (AEP, Irrigation).

La détermination des termes de bilan d'eau d'un barrage se base sur la courbe de remplissage (Hauteur-Surface-Volume d'eau), permettant de suivre l'évolution de la capacité et de la surface d'eau de la retenue.

Les courbes cote-capacité  $H = f(V)$  et cote-surface  $H = f(S)$  du barrage Beni Haroun ont été mises à jour suite à la campagne bathymétrique réalisée par l'A.N.B.T en 2013 (Figures 121 et 122). Le volume de sédimentation ayant atteint  $83 \text{ hm}^3$ , le volume à la cote normale s'est réduit à  $880 \text{ hm}^3$  (pour une surface à la cote normale de  $3846 \text{ ha}$ ), alors que sa capacité initiale était de  $963 \text{ hm}^3$ . Ce qui correspond à une perte de capacité annuelle moyenne (d'août 2003 à septembre 2013) de  $8,3 \text{ hm}^3$  (voir plus de détails au chapitre 5).

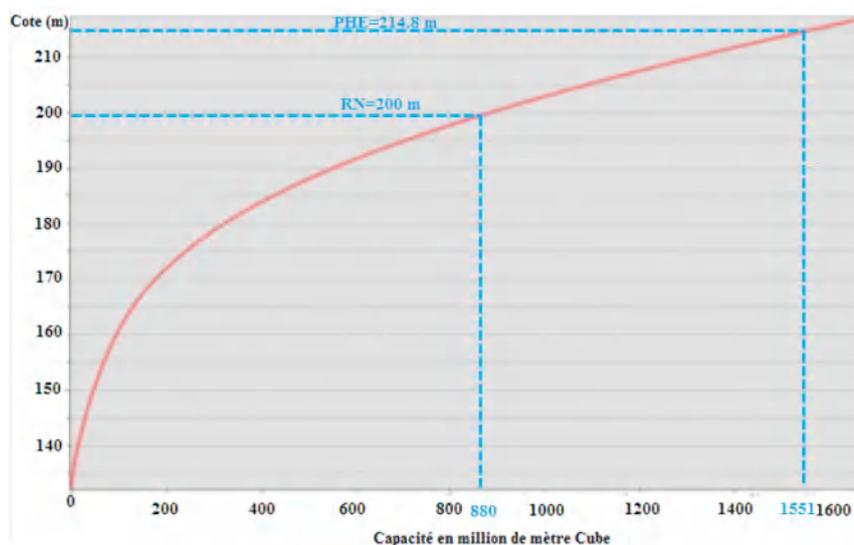


Figure 121: Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de Béni Haroun (2013)

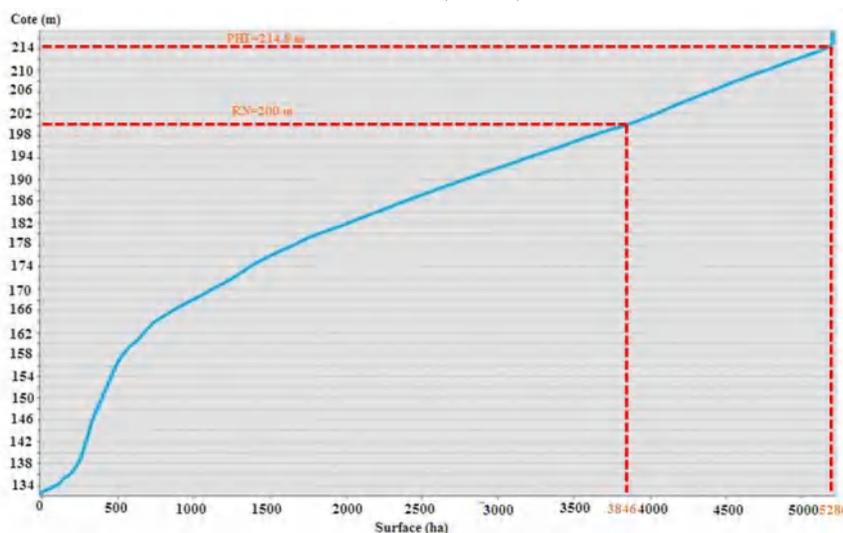


Figure 122: Evolution de la courbe Surface- Hauteur du barrage de Béni Haroun (2013)

### 3.2. Apports et réserves: variations interannuelles et mensuelles

#### 3.2.1. Variation interannuelle des apports, précipitations et réserves

Depuis la mise en exploitation du barrage en 2003/04, le volume de remplissage n'a pas atteint le volume normal de retenue (VNR) jusqu'en 2011/12, année pendant laquelle l'évacuateur de crue a été mis en fonction pour la première fois avec un volume évacué total annuel de 877.09 hm<sup>3</sup>.

Il faut noter cependant que les deux premières années de mise en eau du barrage ont coïncidé avec des apports hydrologiques très importants (1125,798 en 2003/04 et 2261,036 en 2004/05) mais pour des raisons de sécurité de l'ouvrage, ces volumes ont été régulièrement évacués par la vidange de fond.

Tableau 45: Bilan de régularisation interannuel du barrage de Béni Haroun (2003/04-2017/18)

Année	Début de l'année	Durant l'année					Déffluent (hm <sup>3</sup> ) (7) =(2+3+4+5+6)	Affluent (hm <sup>3</sup> ) (8) =(9-1)+7	Fin de l'année		Pluie mesurée au site du barrage Béni haroun (mm) (11)
	Capacité (hm <sup>3</sup> ) (1)	lâchers			Pertes				Capacité (hm <sup>3</sup> ) (9)	Gain/perte de capacité (hm <sup>3</sup> ) (10) =9-1	
		AEP (hm <sup>3</sup> ) (2)	Vidange de Fond (hm <sup>3</sup> ) (3)	Evacuateur de crue (hm <sup>3</sup> ) (4)	Evaporation (hm <sup>3</sup> ) (5)	Fuites (hm <sup>3</sup> ) (6)					
2003/04	11,21	0,00	1080,560	0,000	4,599	0,000	1085,158	1125,798	51,850	40,64	661,9
2004/05	51,850	0,00	2110,372	0,000	14,701	0,000	2125,073	2261,036	187,813	135,96	924,6
2005/06	187,813	0,00	251,372	0,000	28,114	0,000	279,486	487,814	396,141	208,33	479,6
2006/07	396,141	10,88	373,473	0,000	32,290	0,000	416,638	435,187	414,690	18,55	577,9
2007/08	414,690	60,42	233,750	0,000	35,172	0,000	329,345	423,815	509,160	94,47	573,9
2008/09	509,160	88,34	640,976	0,000	39,695	0,000	769,009	822,539	562,690	53,53	670,8
2009/10	562,690	96,98	479,849	0,000	40,665	0,000	617,490	653,102	598,302	35,61	701,2
2010/11	598,302	105,85	263,070	0,000	46,18	0,000	415,097	649,936	833,141	234,84	612,9
2011/12	833,141	111,2	194,959	877,097	52,535	0,000	1235,811	1302,416	899,746	66,61	677
2012/13	899,746	122,00	0,000	613,966	51,215	0,000	787,178	856,937	969,505	69,76	610,5
2013/14	969,505	140,02	0,000	1165,024	50,578	0,000	1355,626	1351,770	965,649	-3,86	832,5
2014/15	965,649	140,80	8,266	2271,007	58,893	0,000	2478,967	2505,960	992,642	26,99	830,1
2015/16	992,642	152,44	0,000	925,879	55,358	0,000	1133,677	1104,581	963,546	-29,10	603,8
2016/17	963,546	189,68	0,000	183,366	64,670	31,025	468,741	442,450	937,255	-26,29	454,0
2017/18	937,255	187,65	0,000	476,379	61,190	31,025	756,244	785,690	966,701	29,45	604,7
<b>Moyenne</b>	<b>619,56</b>	<b>93,75</b>	<b>375,78</b>	<b>434,18</b>	<b>42,39</b>	<b>4,14</b>	<b>950,24</b>	<b>1013,94</b>	<b>683,26</b>	<b>63,70</b>	<b>654,36</b>

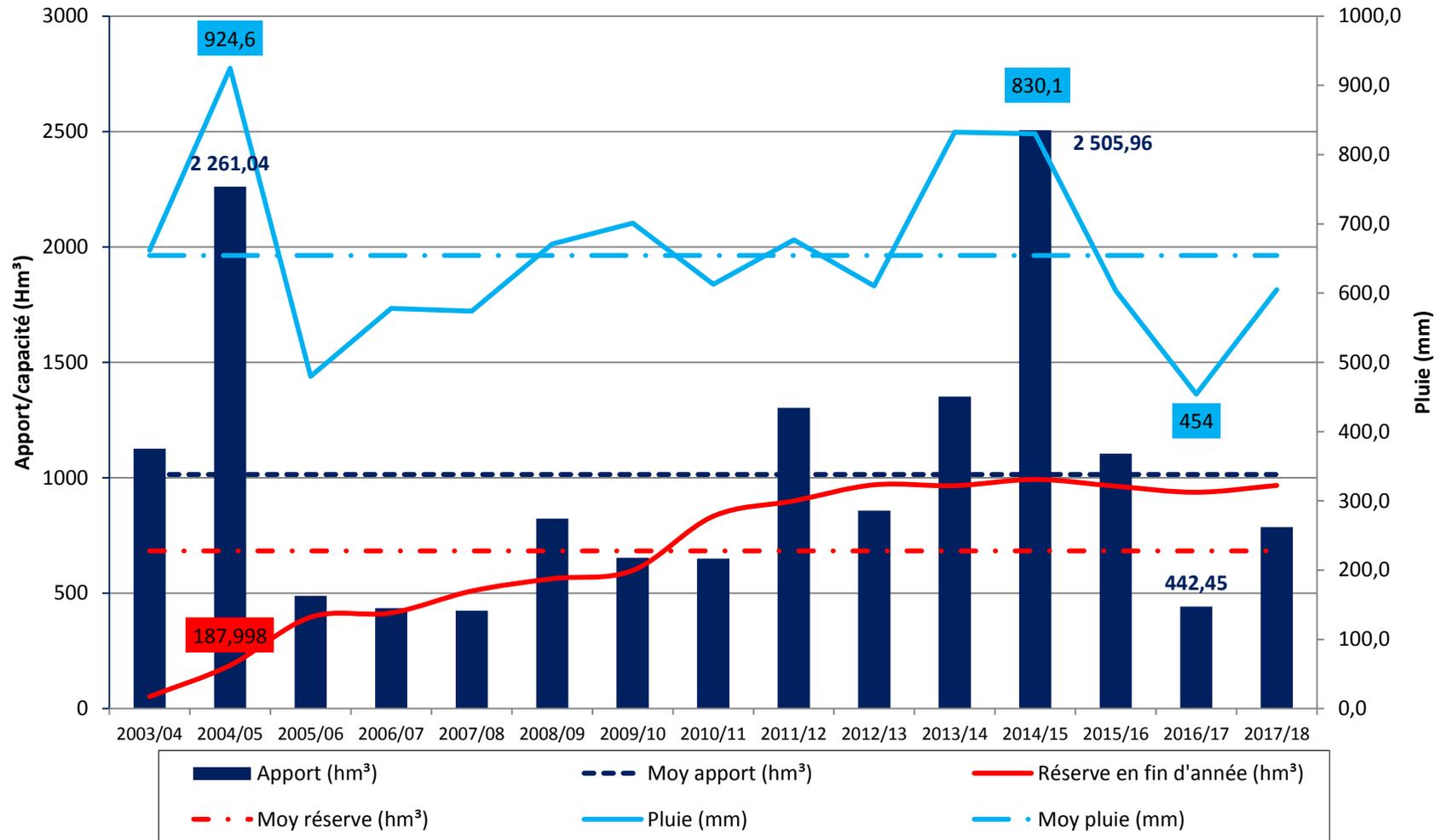


Figure 123: Variations annuelles Apports, réserves et précipitations du barrage Béni Haroun (2003/04-2017/18)

Sur une période d'exploitation de 15 ans (de 2003/04 à 2017/18), les apports annuels du barrage Béni Haroun ont fluctué dans une fourchette comprise entre 442.45 hm<sup>3</sup> (2016/17) et 2505.96 hm<sup>3</sup> (2014/15) et la moyenne a été de 1013.94 hm<sup>3</sup> soit plus de double du volume régularisé théorique (435 hm<sup>3</sup>/an) et l'écart-type est de l'ordre de 635.95 hm<sup>3</sup>.

L'irrégularité de remplissage de la retenue est liée directement aux précipitations, les valeurs les plus importantes des apports et des réserves correspondent aux années les plus pluvieuses. Deux années ont enregistré des apports annuels très remarquables: 2261.03 hm<sup>3</sup> en 2004/05 et 2505.96 hm<sup>3</sup> en 2014/15. En revanche, cinq années ont présenté des apports annuels inférieur à 500 hm<sup>3</sup> (487.81 hm<sup>3</sup> en 2005/06 ; 435.18 hm<sup>3</sup> en 2006/07; 423.815 hm<sup>3</sup> en 2007/08 et 442.45 hm<sup>3</sup> en 2016/17) (Tableau 45 et Figure 123).

### 3.2.2. Variations mensuelles en année humide et en année sèche

Pour analyser le caractère variable du bilan mensuel d'eau du barrage, nous présentons l'étude de ce bilan sur deux années extrêmes, humide (2014/15) et sèche (2016/17) (Figures 124 et 125).

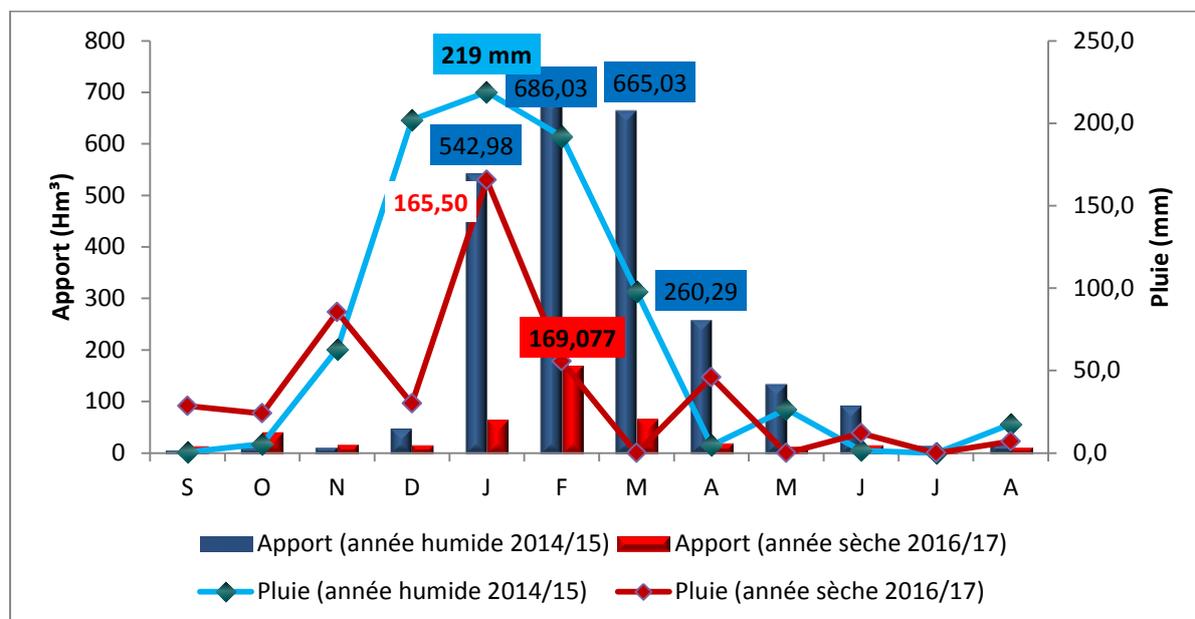


Figure 124: Régime mensuel des apports et pluies en année humide et sèche du barrage de Béni Haroun

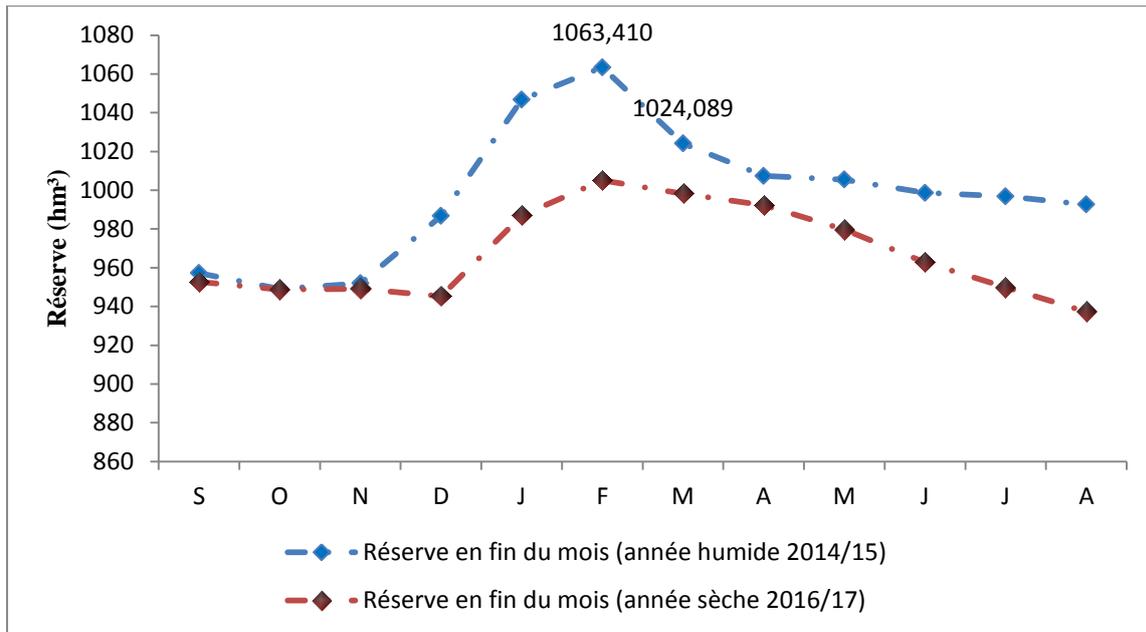


Figure 125: Régime mensuel des réserves en année humide et sèche du barrage de Béni Haroun

L'année la plus marquée par l'abondance hydrologique (2505.96 hm<sup>3</sup>) est 2014/15; elle se caractérise par une pluviosité de 830.1 mm (mesurée au site du barrage Beni Haroun), variant entre un maximum de 219 mm en janvier et un minimum de 0 mm en juin. L'importance de cette pluviométrie engendre de fortes valeurs des apports mensuels: 542.98 hm<sup>3</sup> en janvier, 686.03 hm<sup>3</sup> en février, 665.032 hm<sup>3</sup> en mars et 260.3 hm<sup>3</sup> en avril. Le volume de remplissage montre également une augmentation importante de l'ordre de 1063.41 hm<sup>3</sup> au mois février.

L'année sèche 2016/17 se distingue par un affluent relativement faible de 442.45 hm<sup>3</sup>. Pour cette année, on remarque une quasi absence des pluies au printemps et en été. Il y a un seul pic pluviométrique, au mois de janvier (165.5 mm), suivi par une augmentation significative du volume de l'apport de février (169.07 hm<sup>3</sup>). Les apports ont été très faibles pendant les mois de septembre, octobre, mai, juin, juillet et août, d'où l'importance des pertes de réserve.

### 3.3. Volumes régularisés au profit de l'AEP

On peut définir comme volume régularisable, les besoins en eau que l'on peut satisfaire à partir d'un barrage réservoir sous des contraintes de répartition dans le temps de la demande et de fréquence de défaillance (Assaba et al, 2013).

Le volume régularisé des barrages représente le débit fourni à différents usages, en particulier l'irrigation, l'alimentation en eau potable et l'industrie ; il dépend de plusieurs paramètres, principalement l'apport hydrologique et la réserve en eau dans le barrage

Le barrage Béni Haroun a commencé à fournir de l'eau pour l'alimentation en eau potable de la wilaya de Mila (à travers les couloirs 1 et 2) et de Constantine (couloir 3) en 2006/07.

Les volumes destinés à l'AEP connaissent une augmentation, passant de 11 hm<sup>3</sup> en 2006/07 à 189.68 hm<sup>3</sup> en 2016/17, année du début de livraison de l'eau pour l'AEP des agglomérations des wilayas d'Oum El Bouaghi et des deux wilayas de Batna et Khenchela. Les consommations durant l'année sèche 2017/18 sont restées autour de 187 hm<sup>3</sup> (Figure 126). Pour un volume régularisé théorique de 435 hm<sup>3</sup> par an, le volume régularisé moyen observé durant la période 2003/04-2017/18 représente 93.75 hm<sup>3</sup> (9.24 % de l'apport interannuel), soit un taux de sous-utilisation considérable de la ressource mobilisée.

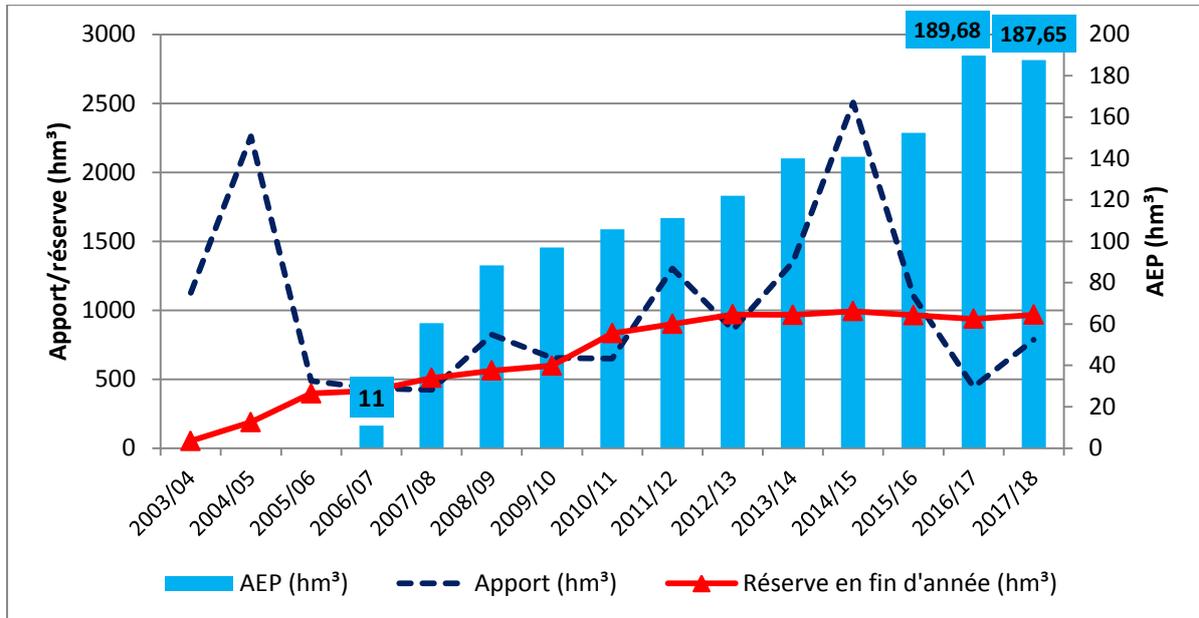


Figure 126: Volumens régularisés (A.E.P) par le barrage de Béni Haroun

### 3.4. Les pertes: évaporation et fuites

Le volume des pertes se compose des volumes d'eau évaporés sur la retenue, des volumes infiltrés à travers la digue ou sous ses assises, des volumes infiltrés dans les couches profondes de la retenue et des volumes perdus occasionnellement (fuites de vannes, défektivité de construction, etc.. ) (Girard, 1966).

#### 3.4.1. Variations annuelles et mensuelles des évaporations

Les mesures de l'évaporation au niveau des barrages algériens se font à l'aide d'un bac COLORADO ou d'un bac de type classe A comme celui installé à proximité de la retenue du barrage de Beni Haroun (Toumi et Rémini, 2018).

Une forte irrégularité interannuelle caractérise l'évaporation annuelle du lac de retenue: pour une moyenne de 42.39 hm<sup>3</sup>/an, l'écart type est de 17.14 hm<sup>3</sup> (coefficient de variation supérieur à 40 %). Durant l'année hydrologique 2003/2004, le barrage avait perdu 4,6 millions de m<sup>3</sup> d'eau ; ce volume a atteint 14,70 en 2004/2005, 28.11 en 2005/2006 et 64.67 millions m<sup>3</sup> en 2016/2017, année hydrologique qui a enregistré le plus important volume perdu par évaporation au barrage de Béni Haroun (Figure 127).

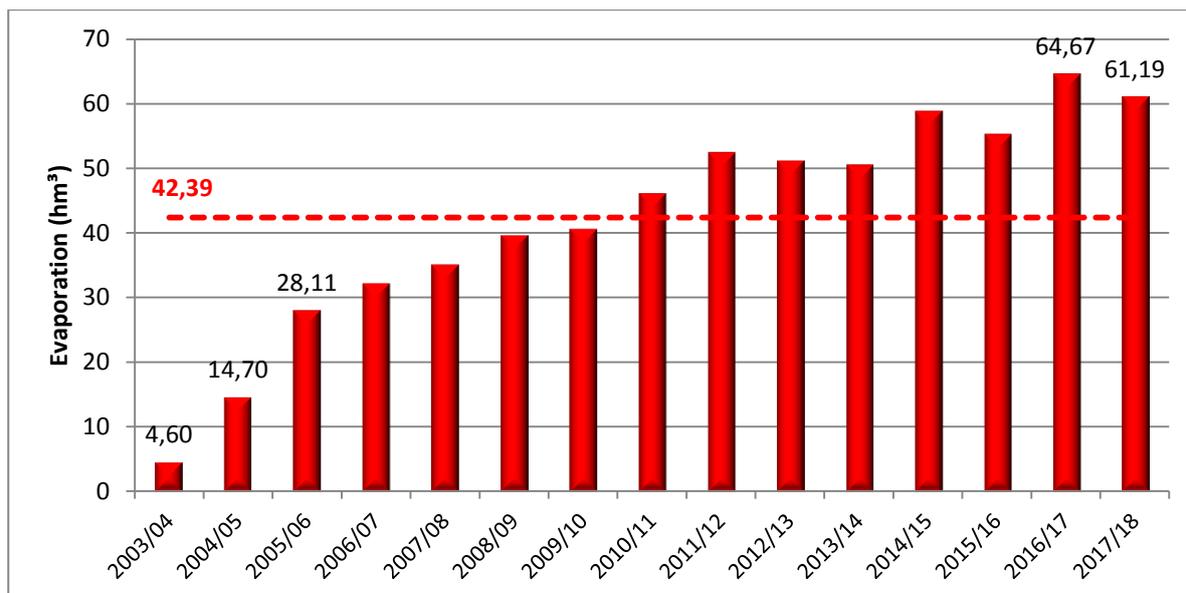


Figure 127: Pertes annuelles par évaporation de la retenue du barrage de Béni Haroun

Comme le montre l’histogramme des variations mensuelles de l’évaporation, les volumes maximums des pertes du barrage de Béni Haroun se situent en été (juin, juillet et aout) où le total saisonnier atteint 21.93 hm<sup>3</sup> (soit 50,5 % du total annuel). Les volumes les plus faibles sont enregistrés durant la saison d’hiver (décembre, janvier et février) où le total saisonnier ne dépasse pas 2.86 hm<sup>3</sup> (Figure 128). A titre de comparaison, au barrage de Hammam Grouz (capacité : 45 hm<sup>3</sup>), situé sur le haut Rhumel, le volume des pertes par évaporation s’élève en moyenne à 2.12 hm<sup>3</sup>/an (période de 1987/88 à 2002/03) dont la moitié s’effectue pendant les trois mois d’été (Mebarki, 2005).

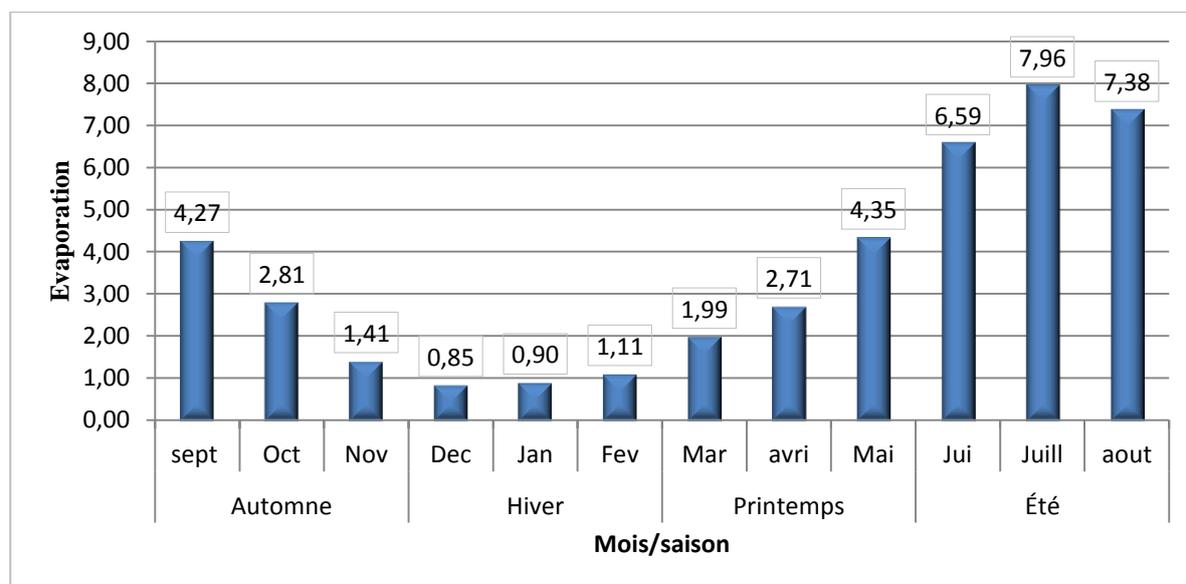


Figure 128: Variations des évaporations mensuelles et saisonnières du barrage de Béni Haroun

### **3.4.2. Fuites d'eau**

L'étude des fuites d'eau, élément non négligeable du bilan, s'avère prioritaire, car ce phénomène peut mettre en danger la stabilité du barrage et réduire sa capacité utile (Benfetta et al, 2016).

A l'amont de Béni Haroun, le barrage Hammam Grouz, implanté sur le haut Rhumel dans un site calcaire fortement tectonisé et moyennement karstique, se caractérise par des fuites dont le volume réel est sous-estimé dans les bilans établis par l'ANBT, ne reflétant donc pas les pertes réelles du lac de retenue. Les résultats de l'étude de (Mihoubi et al, 2013 et 2017) indiquent que les apports de la crue exceptionnelle de l'année 2002/03 sont à l'origine du premier déversement de crue du barrage et ont eu, pour conséquence, de débits remarquables de fuites d'eau confirmées à l'aide des traçages chimiques.

Concernant le barrage de Béni Haroun, selon Toumi (2009) et Toumi et al (2018), le débit total mesuré (somme du débit issu des galeries et celui des drains à l'aval), s'élève à plus de 807 l/s pour une profondeur moyenne du lac (sans tenir compte des débits répandus par les différentes résurgences qui sont difficilement mesurables, et les débits des infiltrations profondes).

Depuis la mise en eau du barrage de Béni Haroun, les pertes par fuites ont apparu de façon nette en 2015/16. Depuis, une moyenne annuelle de 31.025 hm<sup>3</sup> est régulièrement signalée dans les bilans d'eau de l'ANBT.

### **3.5. Vidange de fond et déversement de crue**

La vidange de fond: est avant tout un organe de sécurité, destiné principalement à vider partiellement ou entièrement le barrage en cas du passage d'une crue, ou en cas de besoins de maintenance. Il se compose d'un orifice muni d'une vanne et d'une conduite d'évacuation

L'évacuateur de crue est un élément clé pour la sécurité d'un barrage, il permet de faire transiter les débits de crue en toute sécurité et d'éviter ainsi une surverse qui pourrait avoir des conséquences dramatiques sur la sécurité de l'ouvrage (Mahoui, 2018). Certains déversoirs de crue sont équipés de système de vannes permettant de contrôler le débit restitué, mais les déversoirs dits à seuil libre, comme celui de Beni Haroun, restent les plus fiables vis-à-vis des ruptures ou des pannes mécaniques, ils ne nécessitent aucune intervention humaine pour leur fonctionnement.

Il importe d'étudier dans ce qui suit la variation à l'échelle annuelle des volumes évacués par le déversoir de crue et par la vidange de fond, et également les déversements, effectués suite à des événements de crues exceptionnels.

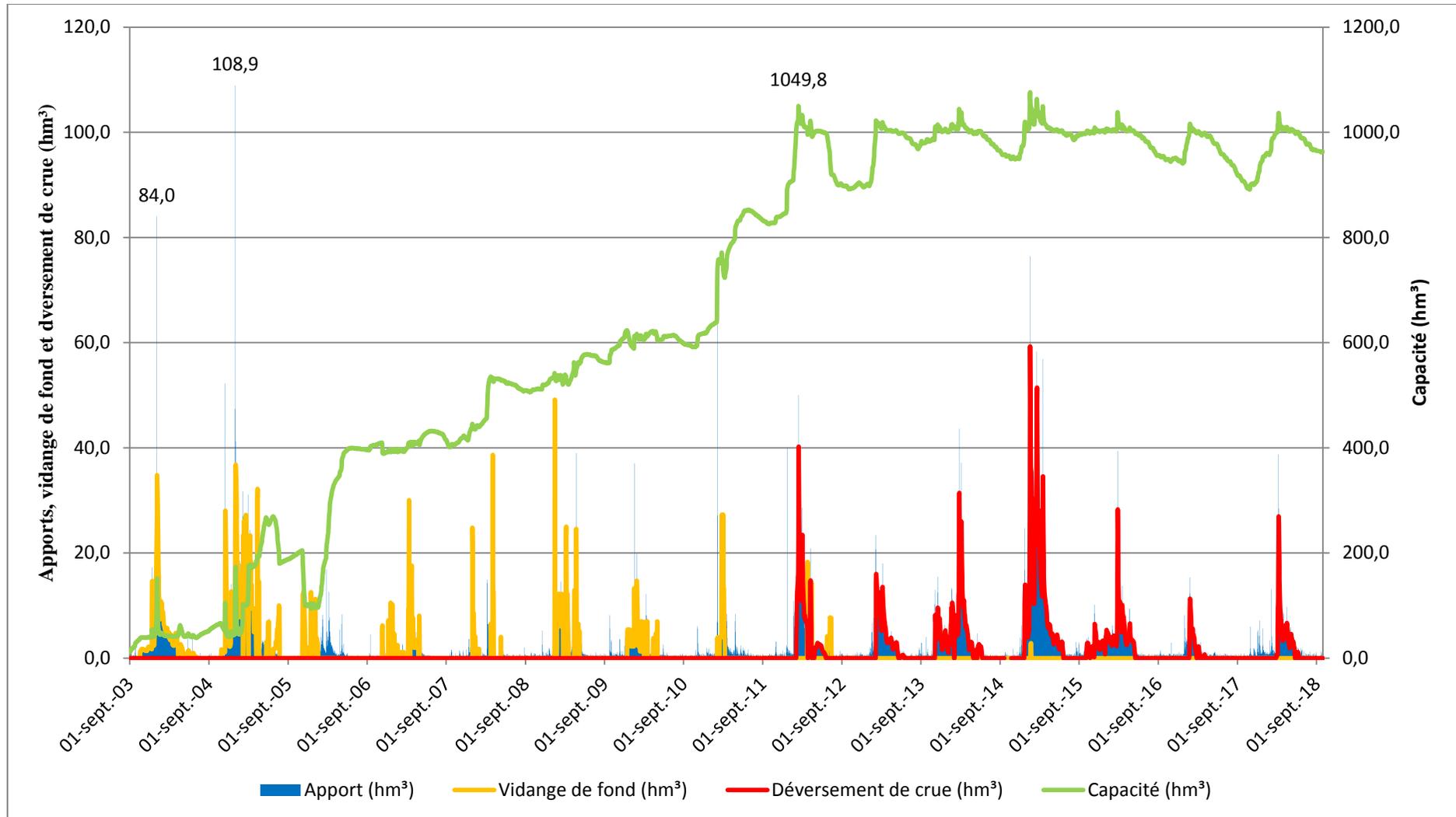


Figure 129: Hydrogramme journalier, vidange de fond, déversement de crue et capacité du barrage de Beni Haroun (2003/04-2017/18)

Au barrage Béni Haroun, en raison des retards de réalisation des systèmes de transfert et d'adduction, une proportion importante (près de 80 %) des apports annuels observés au cours des 15 ans exploitation, a été évacuée par le déversoir de crues et par la vidange de fond. La figure 129 met en évidence l'existence de deux périodes distinctes d'exploitation de ces ouvrages annexes:

- au cours de la première phase de 2003/04 à 2011/12, l'évacuation du surplus d'eau se fait par la vidange de demi-fond pour garantir la sécurité du barrage ;

- la deuxième phase qui débute de 2011/2012 jusqu'à ce jour est marquée par l'entrée en jeu de l'évacuateur, en particulier suite au premier déversement effectué le 13 février 2012 lorsque la capacité du réservoir a atteint le maximum de 1049.8 hm<sup>3</sup>.

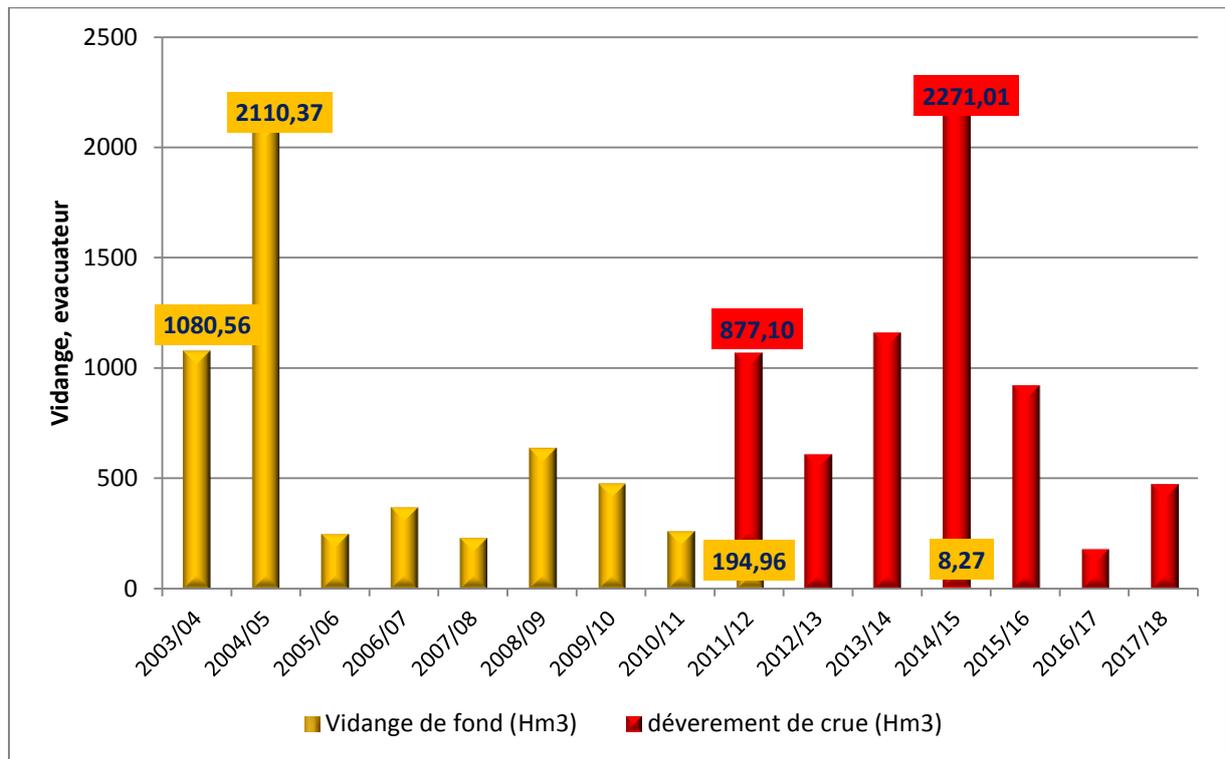


Figure 130: Variation annuelle des déversements de crue et de vidange de fond du barrage de Béni Haroun (2003/04-2017/18)

Les volumes d'eau évacués par vidange de fond ont atteint une moyenne de 375.78 hm<sup>3</sup>/an (37 % des apports moyens) avec des maximaux (un volume cumulé de 1595.46 hm<sup>3</sup>) enregistrés, pour des raisons évidentes, pendant les deux premières années d'exploitation de la retenue (Figure 130).

Après les premiers déversements effectués durant l'année 2011/12 (un volume total annuel de 877.10 hm<sup>3</sup>), le barrage continue à déverser jusqu'à l'année 2017/18, sans faire recours à la vidange de fond, sauf au cours de l'année particulièrement abondante de 2014/2015 lorsque le barrage a réceptionné l'apport exceptionnel de 2505.95 hm<sup>3</sup> (Figure 130).

## 4. GESTION DES CRUES DU BARRAGE DE BENI HAROUN: QUELQUES EXEMPLES

### 4.1. Rappel

Les crues constituent la première cause des ruptures des barrages; les statistiques montrent qu'environ 30 accidents des barrages sont dus au problème de surverse, suite à des crues exceptionnelles, d'où l'importance à accorder à la problématique de la gestion des crues.

Une crue est généralement définie par son débit de pointe (débit maximum), son volume, sa durée et sa fréquence (Souanef, 2015).

**La crue de projet** est une notion essentiellement subjective en ce sens qu'elle tient, ou peut tenir compte des conditions économiques du projet et des risques encourus, de la nature de ces risques (vies humaines, industries, pertes agricoles, ...). Par ailleurs, suivant la nature de l'aménagement (réservoir, fil de l'eau, ...), le paramètre à prendre en considération peut être le débit instantané maximal ou le volume assorti éventuellement de la forme de la crue (hydrogramme de la crue de projet).

**Le laminage d'une crue** est l'amortissement d'une crue avec diminution de son débit de pointe et également de son volume dans le temps, par effet de stockage et de déstockage dans un réservoir, compte tenu de la loi hauteur-débit de l'évacuateur et de la courbe de remplissage du réservoir. Le laminage des crues de l'oued Kébir -Rhumel transitant par le barrage Beni Haroun a pour objectif d'assurer la sécurité de l'ouvrage lui-même ainsi que la protection des zones urbaines et agricoles situées à l'aval.

L'évacuateur à seuil libre du barrage Beni Haroun est conçu pour le laminage de la crue maximum probable (C.M.P) de  $16.640 \text{ m}^3/\text{s}$  d'une période de retour de 10 000 ans.

### 4.2. Vidange et laminage des crues au barrage de Béni Haroun

Faute de données sur les chroniques horaires traduisant le déroulement détaillé des événements de crue, cette étude porte principalement sur les débits journaliers maximums véhiculés au barrage de Béni Haroun.

Le tableau 46 résume les principales caractéristiques des crues qui ont été observées durant la période 2003/04-2017/18. La très grande majorité des événements extrêmes se déroule pendant la période hivernale; elles sont engendrées par des précipitations importantes présentant des intensités fortes.

Nous avons choisi quelques exemples des crues pour montrer l'évolution journalière des principaux termes du bilan d'eau pendant les fortes crues; il en résulte de fortes valeurs de débits transitant par la vidange de fond et par l'évacuateur de crue, comme illustrés par les graphiques des figures 131 à 136. Les valeurs des volumes évacués à travers la vidange de fond et le déversoir de crue sont volontairement représentées en valeurs négatives sur ces graphiques.

Tableau 46: Quelques exemples de crues transitant par le barrage de Béni Haroun (période 2003/04 – 2017/18)

Date de la crue	Débit de pointe $Q_i$ max (m <sup>3</sup> /s)	Débit journalier maximum $Q_j$ max (m <sup>3</sup> /s)	Apport journalier max (hm <sup>3</sup> )	Hauteur d'eau ou cote (m)	Déversement journalier (hm <sup>3</sup> )	Vidange de fond journalier (hm <sup>3</sup> )	Etat de la réserve journalière dans la retenue (hm <sup>3</sup> )
Crue du 25 au 27 janvier 2003	2029	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Crue du 01 au 10 janvier 2004	1934	971,96	84	162,52	0	26,8	151,4
Crue du 30 décembre 2004 au 08 janvier 2005	2011	1260,41	108,87	164,36	0	24,9	168,5
Crue du 12 au 15 janvier 2009	976	552,08	47,7	184,98	0	49,1	540,3
Crue du 30 janvier au 18 mars 2012	(*)	579,05	50,03	201,36	23,5	0	1049,8
Crue du 22 au 27 janvier 2015	914	884,83	76,452	202,03	59,27	0	1075,9
Crue du 12 au 15 mars 2016	(*)	319	27,59	201,03	28,59	0	1037,09

(\*) Absence de données de mesures

**-Vidange de la crue du 1<sup>er</sup> au 10 janvier 2004 :** la cote du plan d'eau était le 1<sup>er</sup> janvier 2004 de 148.7 m, la pluie n'a cessé de pleuvoir durant toute la journée. Les vannes de vidange étaient complètement ouvertes avec un volume de chasse de 17.74 m<sup>3</sup>/s (Photo 5). Le pic de la crue a été atteint le 4 janvier 2004 à 1h30, avec un débit maximum instantané de 1934 m<sup>3</sup>/s. L'apport journalier a augmenté dès le premier jour de la crue, passant d'une valeur de 39.44 hm<sup>3</sup> à une valeur de 83.97 hm<sup>3</sup>; un volume de 26.80 hm<sup>3</sup> a été évacué par la vidange de fond pendant le jour suivant. La décrue n'a pris fin que le 10 janvier 2004 (Figure 131).



Photo 5: Vidange demi-fond (vue rive gauche) pendant la crue de janvier 2004 (ANBT Béni Haroun, 2004)

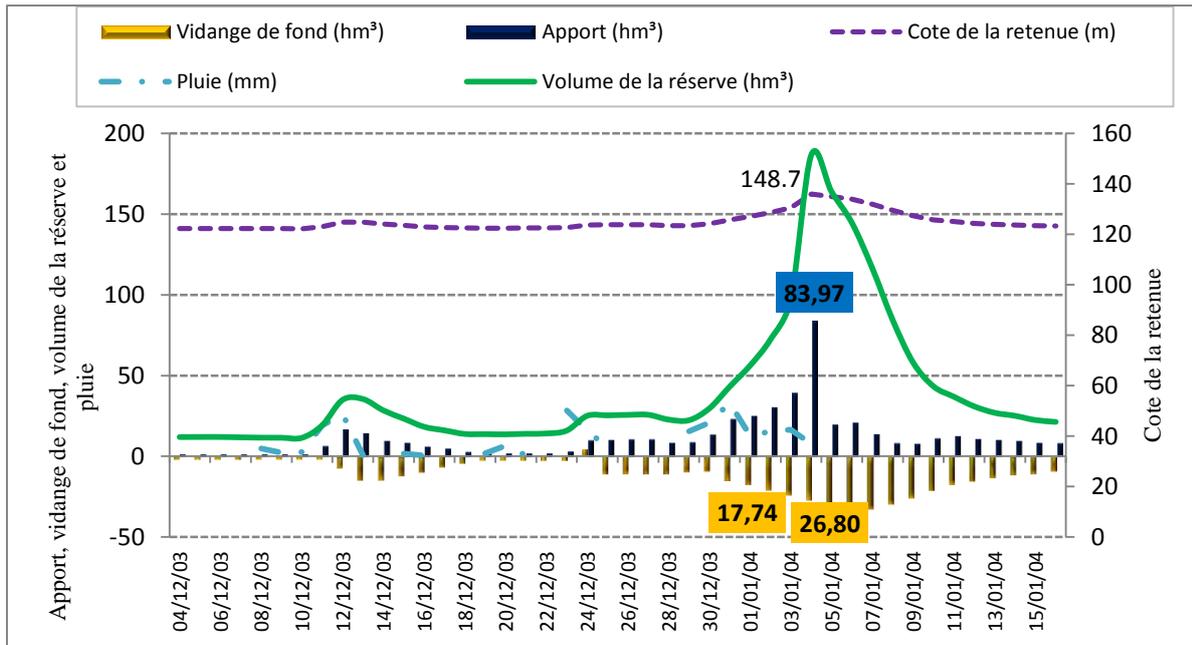


Figure 131: Cruée du 01 au 10 janvier 2004

**-Vidange de la crue de décembre 2004-janvier 2005:** le débit maximum instantané enregistré observé le 30 décembre était de 2011 m³/s. et l'apport maximum journalier était de 108.87 hm³ (30.62 % de l'apport total mensuel estimé à 355.52 hm³). Le volume de la réserve du barrage a dépassé les 168 hm³ et la vidange de fond effectuée en 24 heures était de 36.38 hm³ (Figure 132).

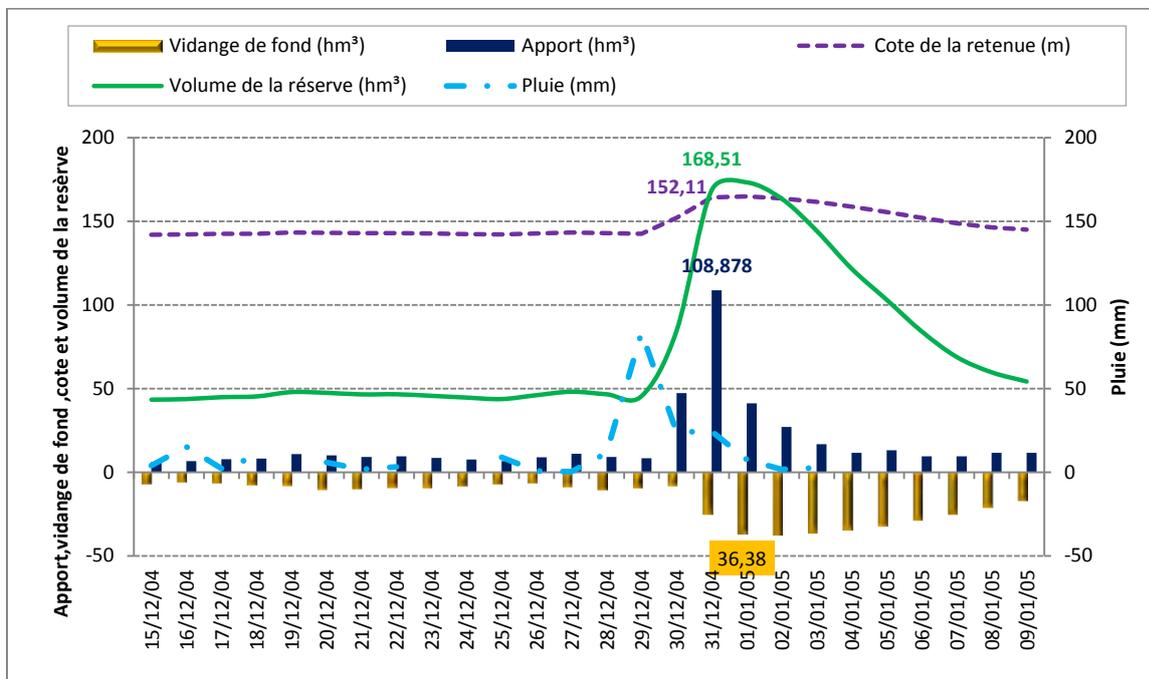


Figure 132: Cruée de décembre 2004 - janvier 2005

**-Vidange de la crue du 12 au 15 janvier 2009 :** la cote du plan d'eau était de 184,76 m, lorsque la crue a commencé à monter le 12/01/2009, suite à la pluie qui n'a cessé durant les 48 heures qui suivent. La crue entrante présente un débit maximum instantané de 976 m³/s,

enregistré à 21h40 mn le 13/01/2009, correspondant à un niveau du plan d'eau de la retenue de 185.05 m. L'apport journalier a augmenté dès le premier jour de la crue passant de 8.90 hm<sup>3</sup> à 47.66 hm<sup>3</sup> pendant le jour suivant. Sur la durée totale de l'évènement, un volume de 84.74 hm<sup>3</sup> a été évacué par la vidange de demi-fond. La décrue a pris fin le 15/01/2009 (Figure 133).

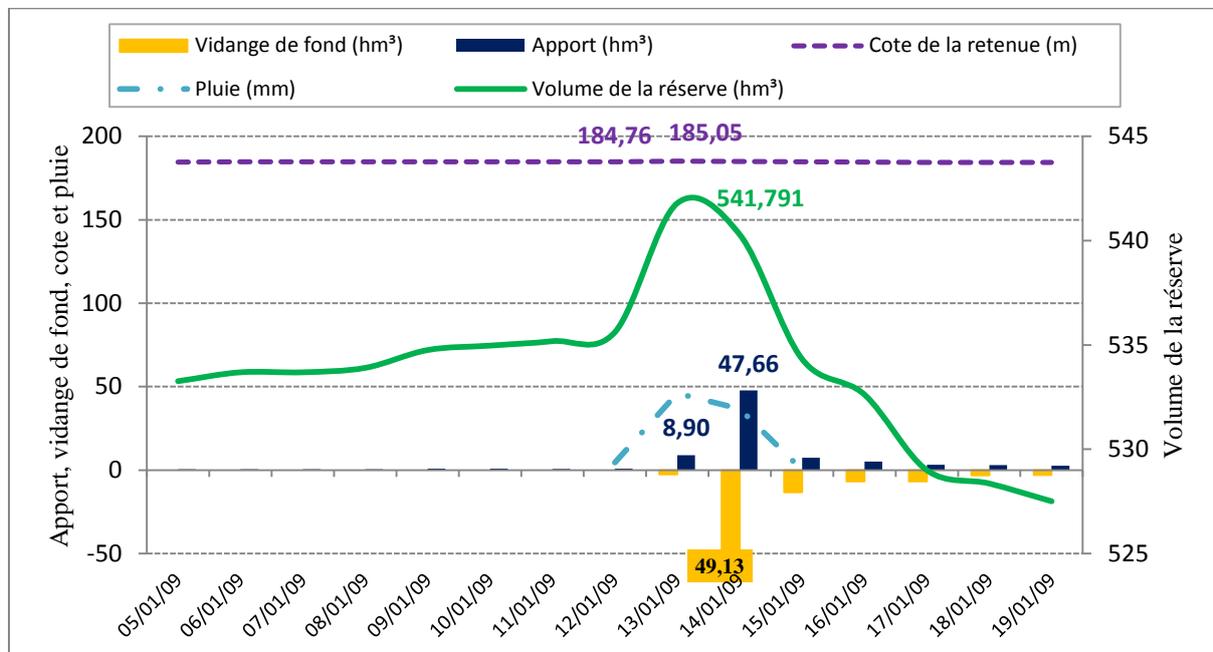


Figure 133: Cruée du 12 au 15 janvier 2009

**-Laminage des crues de février – avril 2012:** cet épisode hydrologique est marqué par le déroulement de trois crues successives, en février, mars et de façon moindre en avril

Le 12 février 2012, suite à une montée d'eau, le barrage a connu son premier déversement de crue. Le 23 février à 15h00, la pointe de crue a été particulièrement forte sur le barrage de Béni Haroun dont le niveau du plan d'eau a atteint 201.36 m et son volume de réserve 1049.8 hm<sup>3</sup>, dépassant la capacité théorique (VNR arrêté dans l'étude d'APD). Cette crue a engendré une augmentation très rapide des apports (50.03 millions de m<sup>3</sup> en une journée). Le volume de déversement avait atteint 40.2 hm<sup>3</sup> (Photo 6).

La deuxième pointe de crue du 11 mars 2012 à 6:00 heure a provoqué une montée de la cote de la retenue pour atteindre un maximum de 200.92 m, enregistré le 12 mars à 4 :00 heure. Le volume évacué maximum est évalué à 19.6 hm<sup>3</sup>. La décrue n'a pris fin qu'en date du 18/03/2012 (Figure 134). Après un épisode de répit, une troisième onde de crue est constatée à partir du 8 avril atteignant son débit de pointe le 18 avril 2012 (apport journalier maximum de 20.9 hm<sup>3</sup> et un déversement journalier maximum de 14.8 hm<sup>3</sup>).



Photo 6: Premier déversement du barrage de Beni Haroun: crue du 23 février 2012 (ANBT, Béni Haroun, 2012)

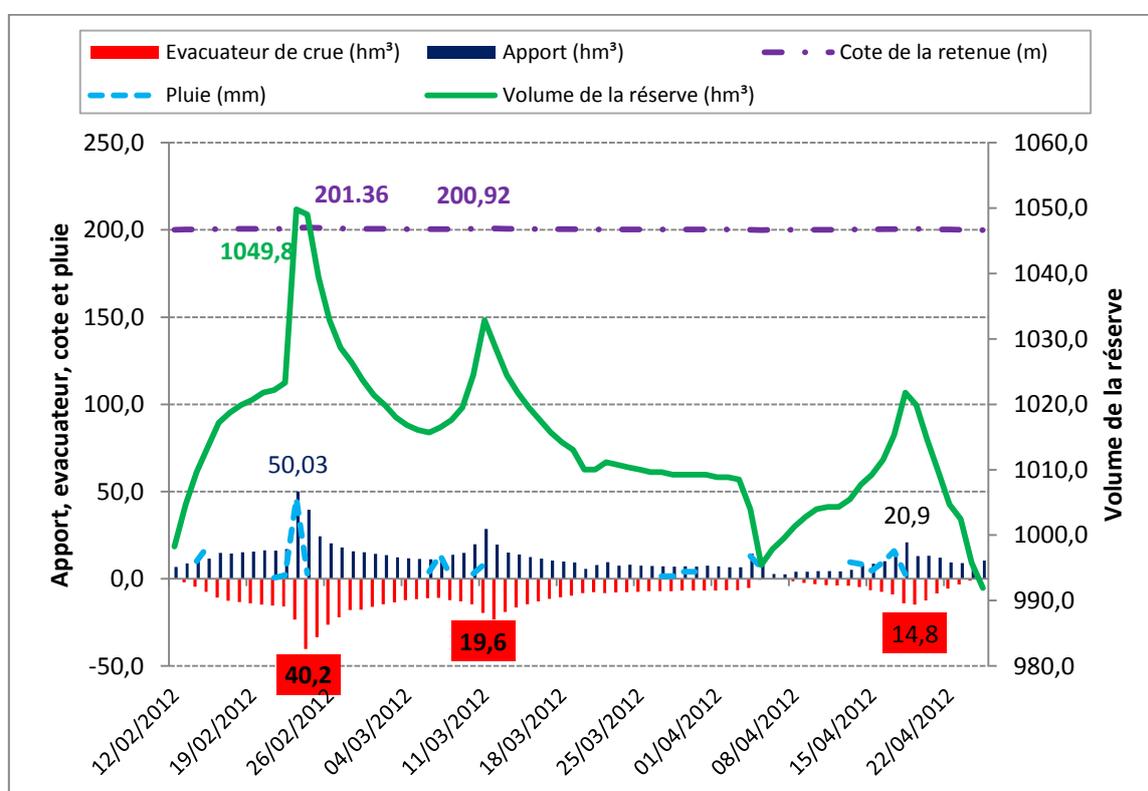


Figure 134: Crues de février- avril 2012 au barrage de Beni Haroun

**-Laminage des crues de janvier–mars 2015:** l'année hydrologique 2014/15 est considérée comme une année exceptionnelle, du fait que le barrage a connu une pluviométrie très importante ayant touché le centre et l'est du pays. C'est la plus grande valeur de précipitations (830.1 mm) enregistrée au niveau de la station pluviométrique du barrage, après celle de l'année 2004/05. Des crues successives ont provoqué des déversements continus pendant 6 mois (de janvier à juin 2015).

La crue s'est manifesté à partir du 22 janvier 2015, la cote du plan d'eau était alors de 200.23 m. Les volumes entrants au lac de la retenue sont remarquables: l'apport journalier maximum du 27 janvier 2015 a atteint 76.45 hm<sup>3</sup> suite à une pluviométrie très importante (55 mm),

ramenant le plan d'eau à la cote de 202.03 m et la capacité de la retenue à 1075,9 hm<sup>3</sup>, volume jamais atteint depuis le début d'exploitation du barrage. C'est un pic historique et pour garantir la sécurité du barrage, l'opération de vidange de fond a été déclenchée simultanément au déversement. Le volume de déversement correspondant au pic de la crue (686 m<sup>3</sup>/s) est de 59.27 hm<sup>3</sup> et le volume de vidangé est de 2.83 hm<sup>3</sup> (Figure 135). La lame d'eau déversante maximale a été de 2.03 m.

Pendant cette crue, plusieurs phénomènes ont été constatés dans le barrage et dans ses ouvrages annexes: dégradation du passage à gué (les deux rives), éboulement des talus des routes d'accès du barrage, envasement des caniveaux des routes d'accès et glissement de terrain du versant dans la rive gauche (photos 7 et 8).

Suite à cette crue exceptionnelle, l'ANBT a émis les constatations suivantes :

- une légère montée de la piézométrie.
- légère augmentation des débits de drainage dans les galeries ainsi que des drains aval.
- réapparition de la résurgence d'eau au niveau du joint entre les plots 30 et 31 dans la galerie d'accès 175 en rive gauche.
- Amenées d'eau à travers des joints entre plots dans la galerie 175 BCR.



*Photo 7: Eboulement du talus de la route d'accès en rive gauche (ANBT Béni Haroun, 2015)*



*Photo 8: Chute de pierres sur les routes d'accès (ANBT Béni Haroun, 2015)*

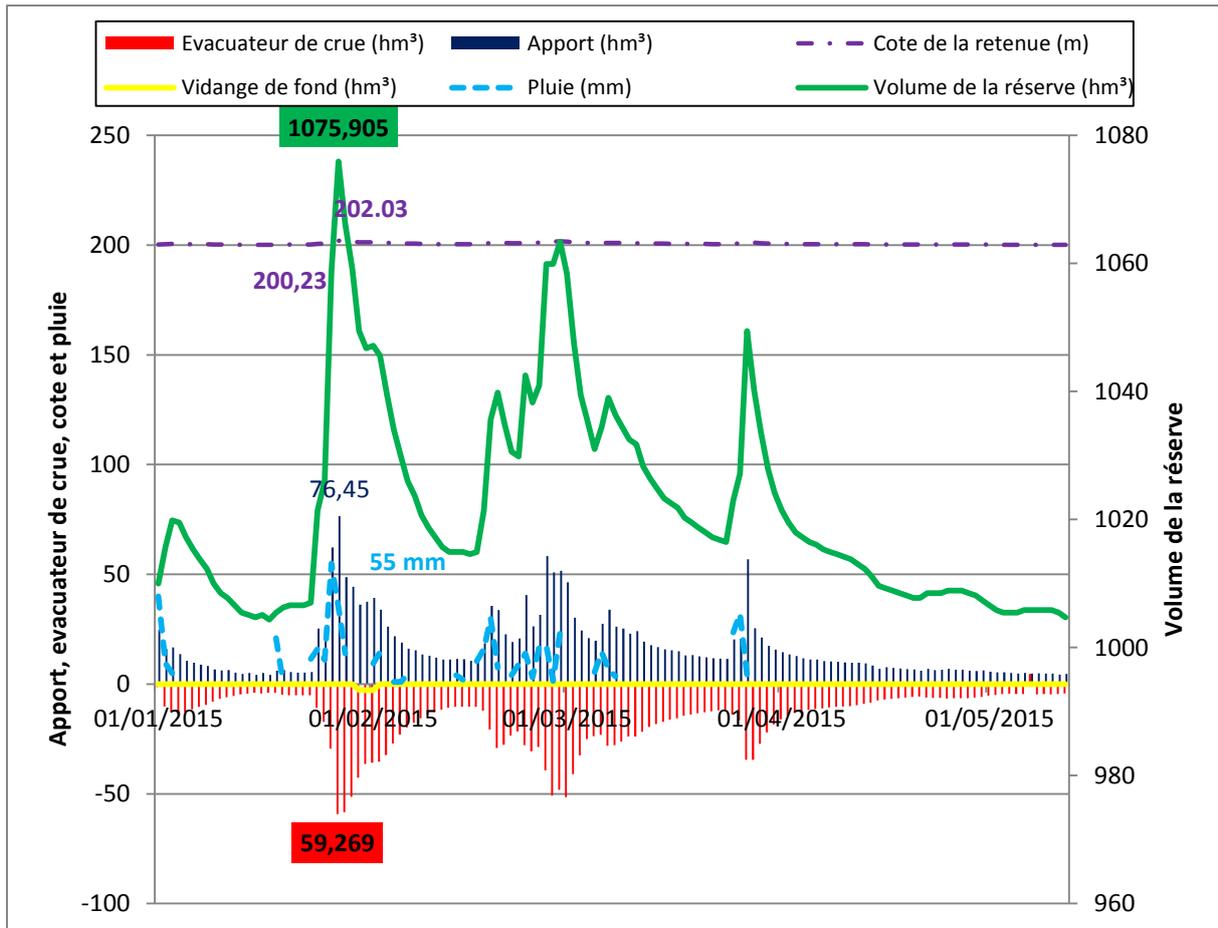


Figure 135: Crues de la période janvier-mars 2015 au barrage de Béni Haroun

**-Laminage de la crue du 12 au 15 mars 2016:** cette crue a été particulièrement importante, de par sa durée (supérieure à trois jours) et son volume considérable laminé par l'évacuateur de crue (1037.83 hm<sup>3</sup>) (Figure 136). L'apport hydrologique a dépassé 39.36 hm<sup>3</sup> pendant la journée du 13 mars 2016, suite à une pluviométrie très importante qui a atteint les 40 mm. Lors de cette crue principale, le déversement évolue parallèlement à l'hydrogramme journalier des apports.

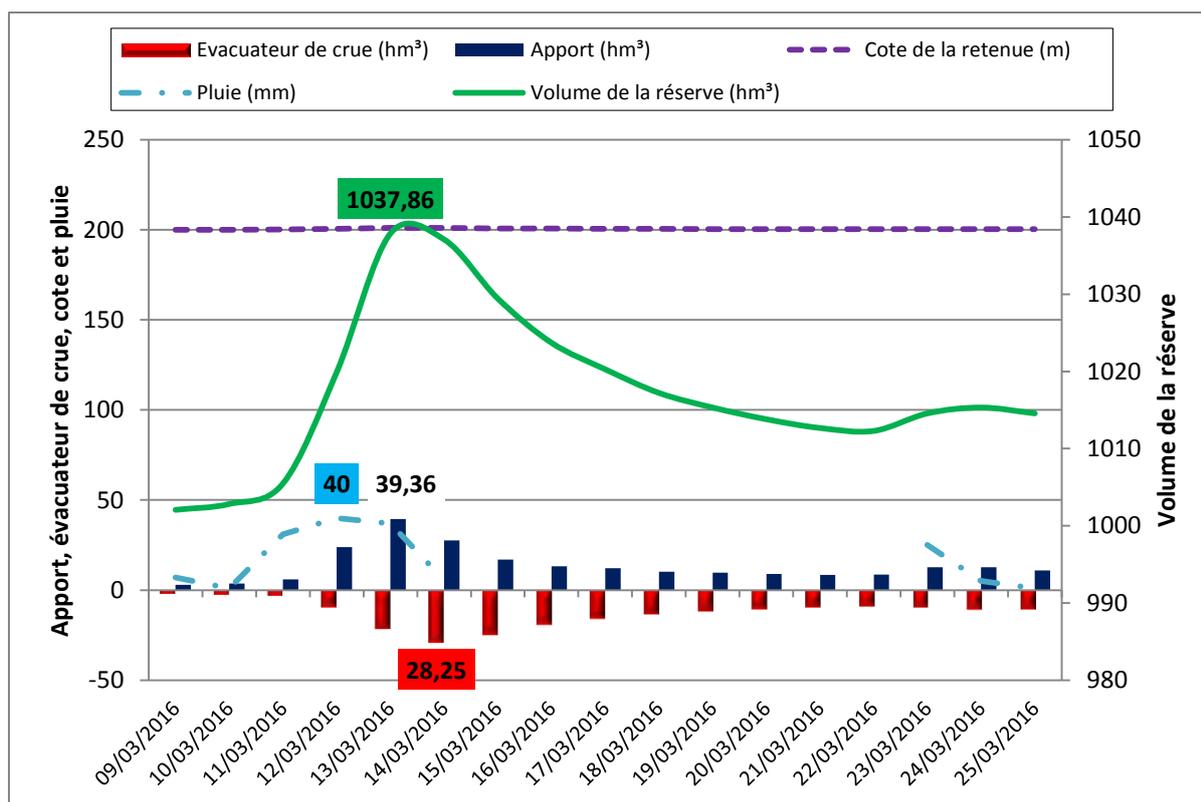


Figure 136: Cruet du 12 au 15 mars 2016 au barrage de Béni Haroun

## CONCLUSION

Le barrage de Béni Haroun qui contrôle 87.6 % de la superficie totale du bassin du Kébir-Rhumel, est un ouvrage très important, dans la région de Mila-Constantine et dans toute la région de l'Est algérien, de par le volume d'eau qu'il est capable de stocker (environ un milliard de m<sup>3</sup>), et aussi de par son système de transfert qui lui permet d'assurer la couverture des besoins d'alimentation en eau potable (AEP) et d'irrigation de cinq wilayas limitrophes.

Dans ce chapitre, a été évoqué le barrage de Béni Haroun à travers la caractérisation et l'interdépendance des différentes infrastructures qui le composent. Par ailleurs, le bilan de régularisation, outil de suivi de l'évolution mensuelle et interannuelle des entrées, sorties et stocks en eau du barrage de Béni Haroun, a mis en lumière le comportement de l'ouvrage hydraulique vis-à-vis des changements des paramètres hydro-climatiques et de la gestion des réserves.

A partir de ces analyses, l'on constate que le bilan d'eau se caractérise par une importante variabilité temporelle, interannuelle et mensuelle, durant la période de quinze années d'exploitation, la moyenne des affluents est de 1013.94 hm<sup>3</sup>/an, volume bien plus important que l'apport théorique de 435 hm<sup>3</sup>/an fixé dans l'étude d'APD. La nécessité d'effectuer un remplissage progressif du barrage, explique les importants volumes évacués par vidange de fond, notamment durant les deux premières années très pluvieuses de 2003/04 et de 2004/05.

L'année exceptionnellement humide de 2014/15 se distingue par un affluent annuel de 2505.95 hm<sup>3</sup>. L'analyse des données de la variation mensuelle des termes du bilan de cette

année hydrologique 2014/15, montre que le maximum des pluies, des apports et des réserves se situe principalement en hiver. En année sèche (2016/17), l'affluent annuel est de 442.45 hm<sup>3</sup> et une diminution des réserves a été observée en fin d'année (937.25 hm<sup>3</sup>). Cependant, d'une année à l'autre, le niveau de remplissage du barrage Béni Haroun reste tout de même très élevé, à cause de l'abondance des apports mais aussi parce que le volume des prélèvements des eaux demeure réduit, faute d'achèvement des infrastructures de transfert et de distribution d'eau au profit des secteurs utilisateurs.

Les résultats du bilan en eau mettent en évidence l'importance des défluent: les pertes en eau par évaporation et fuites d'une part, et les volumes évacués sous forme de déversement de crue et de vidange de fond, d'autre part. La moyenne de l'évaporation annuelle est de 42.39 hm<sup>3</sup> dont la moitié se situe pendant les trois mois d'été. Les pertes par fuites de la retenue ont apparus de façon nette en 2015/16, avec une moyenne annuelle de 31.025 hm<sup>3</sup>. Par ailleurs, les valeurs maximales des volumes évacués à travers la vidange de fond et le déversoir de crue correspondent étroitement aux années de forte abondance hydrologique. Lors du premier déversement de crue en février 2012, la cote de remplissage du barrage a atteint un pic de 201,36 m, correspondant à un volume de 1049,8 hm<sup>3</sup> et une surface inondée de 38,67 km<sup>2</sup>. Un autre pic dépassant le premier a été atteint le 27 janvier 2015 à la cote de 202.03 m, correspondant à une capacité de 1075.9 hm<sup>3</sup> et une surface inondée de 39.219 km<sup>2</sup>. L'étude de quelques chroniques de crues a permis de comprendre la gestion de ces événements extrêmes (à l'exemple des crues de l'année 2004/05, 2011/12 et 2014/15) à travers les opérations de vidange de fond (appelée « vidange de demi-fond ») et de laminage à travers le déversoir à seuil libre du barrage de Beni Haroun.

En périodes de crues, les flux brutaux et récurrents des oueds charrient des apports solides au barrage qui peuvent constituer une menace vis-à-vis de l'envasement accéléré de la retenue, et donc sur la durée de vie du barrage. Ces apports solides feront l'objet du chapitre suivant.

---

**CHAPITRE 5**

**DEBITS SOLIDES ET RISQUE D'ENVASEMENT DU  
BARRAGE DE BENI HAROUN**

---

## INTRODUCTION

En Algérie où la disponibilité de l'eau est limitée, sa répartition inégale et sa demande en forte croissance, la perte de capacité des barrages par leur envasement continu est considérée comme un problème crucial. Les barrages faisant l'objet d'un envasement accéléré verront leur capacité de régulation diminuer au fil de temps (Demmak, 2010). L'expérience mondiale évalue à 1 % par an le taux de perte en volume des barrages par sédimentation (Mahmood, 1987); ce taux peut atteindre 10 % en région méditerranéenne (Gazzalo et Bassi, 1969).

La récupération de la capacité perdue des barrages par des techniques de dragage, de succion ou de chasse des sédiments, représente une solution parfois indispensable, mais toujours temporaire puisqu'elle ne s'attaque pas à la véritable source du problème que représentent les transports solides des oueds, générées par le phénomène de l'érosion.

L'érosion dans certains bassins augmente sensiblement ces dernières décennies, à cause du changement du climat et du changement de régime hydrologique des oueds (Achite et Ouillon, 2016). La majorité des études montrent une grande difficulté à prévoir les quantités de matière transportée (Albergel et Pepin, 2003).

Les flux transportés par les oueds sont souvent analysés à partir des séries temporelles de débit et de concentration (El Mahi et al, 2012). De nombreux travaux ont été réalisés, pour étudier les transports solides des oueds algériens au cours de ces trois dernières décennies (Demmak, 1982; Terfous et al, 2001 ; Benkhaled et Remini, 2003; Achite et Meddi, 2004; Achite et Meddi, 2005; Bouanani, 2005; Khanchoul, 2006; Achite et Ouillon, 2007; Megnounif et al, 2003; Ghenim et al. 2007; Touaibia, 2010 ; Louamri, 2013 et 2010 ; Louamri et al, 2013; Marouf, 2012).

Notre étude sur le bassin du Rhumel-Endja a nécessité le traitement des chroniques de mesures de la concentration en matières en suspension et des écoulements liquides, relevées par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) aux stations hydrométriques de Grarem (bas Rhumel) et de Douar Tassadane (haut bassin de l'oued Endja). L'objet en sera l'analyse de la variabilité annuelle, mensuelle et saisonnière des apports solides, l'étude de l'impact de ces apports sur le barrage (envasement) et également les opérations de lutte menées pour réduire ce phénomène.

### 1. RELATION ENTRE DEBITS SOLIDES ET DEBITS LIQUIDES INSTANTANES

A l'aide d'une fonction de type puissance liant les débits solides instantanés (exprimés en kg/s) et les débits liquides instantanés (en m<sup>3</sup>/s), deux séries de débits solides journaliers, ont été générées:

- une série couvrant la période de 1973/74 à 2004/05 se rapporte à la station de Douar Tassadane;
- une série couvrant la période de 1973/74 à 2000/01 se rapporte à la station de Grarem.

#### 1.1. Bassin de l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane

Le tableau 47 synthétise les relations obtenues entre les débits liquides et les débits solides instantanés. Globalement, les graphiques de régression montrent une bonne corrélation, à l'échelle interannuelle, entre les débits liquides et les débits solides, la valeur de R est de l'ordre de 80 % (Figure 137 et 138).

A l'échelle saisonnière, le coefficient de corrélation est très significatif pour les mois de la saison d'automne (88 %) et secondairement pour ceux de la saison d'hiver (84 %) ; l'automne reste la saison plus érosive, et cela est dû principalement aux sols dénudés de végétation et au caractère agressif et intense des pluies (Tableau 47).

Tableau 47: Paramètres des courbes de régression débits solides - débits liquides instantanés de la station de Douar Tassadane

Période	Nombre de valeurs	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient de corrélation R	Relation
Automne	378	2.179	0.671	0.88	$Q_s = 0,6719Q_l^{2,179}$
Hiver	623	2.204	0.09	0.842	$Q_s = 0,0902Q_l^{2,2039}$
Printemps	734	1.742	0.129	0.721	$Q_s = 0,1299Q_l^{1,7423}$
Eté	234	2.207	0.429	0.761	$Q_s = 0,4286Q_l^{2,2067}$
Interannuelle	1969	0.2002	1.88	0.8	$Q_s = 0,2002Q_l^{1,88}$

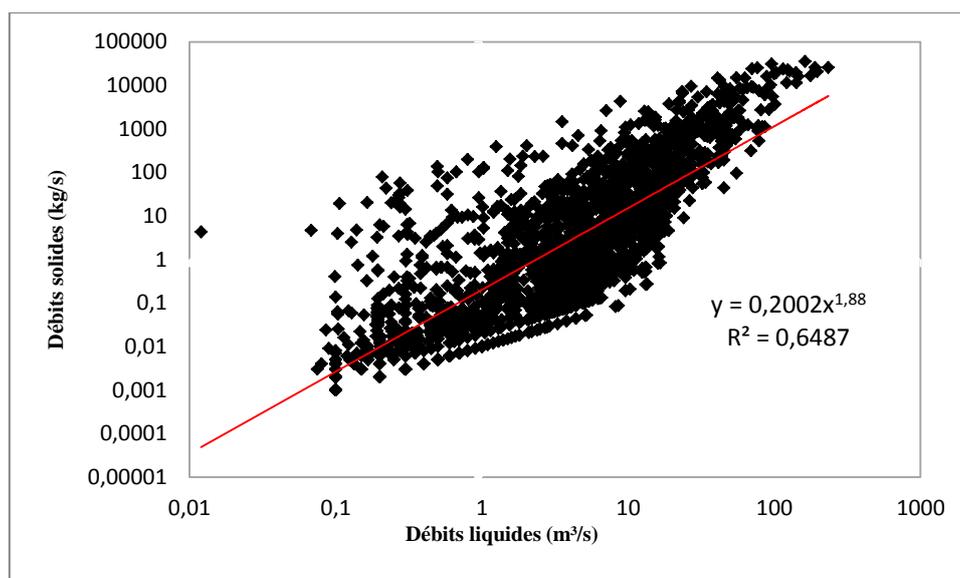


Figure 137: Relation entre les débits solides et les débits liquides instantanés à l'échelle interannuelle: station de Douar Tassadane

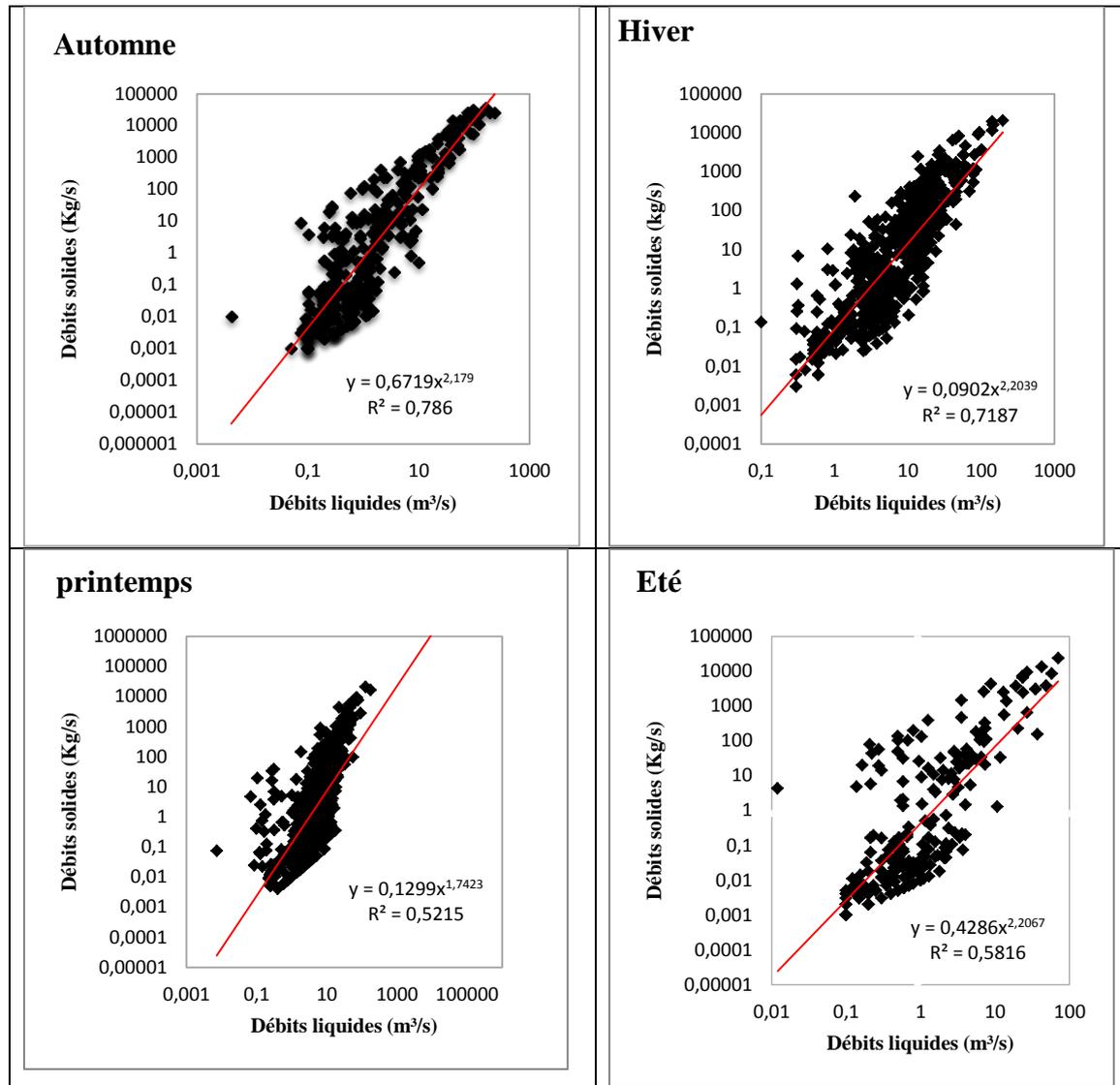


Figure 138: Relation entre débits liquides et débits solides à l'échelle saisonnière : station de Douar Tassadane

## 1.2. Bassin de l'oued Rhumel à Grarem

Le tableau 48 présente les résultats des relations obtenues entre les débits liquides et les débits solides instantanés du sous bassin de l'oued Rhumel à Grarem. La fonction puissance est quasi systématiquement le meilleur modèle prédictif de la relation débit liquide -débit solide. La valeur de R est de 83 % à l'échelle interannuelle. Saisonnièrement, la relation est plus serrée en hiver et en printemps, d'où les coefficients de corrélation respectifs de 82 % et de 90 % (Figures 139 et 140).

Tableau 48: Paramètres des courbes de régression (courbe d'étalonnage) du bassin versant d'oued Rhumel à Grarem

Saisons	Nombre de valeurs	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient de corrélation R	Relation
Automne	266	2.559	0.0421	0.78	$Q_s = 0,0421Q_l^{2,5559}$
Hiver	197	1.8982	0.047	0.82	$Q_s = 0,047Q_l^{1,8982}$
Printemps	<b>259</b>	<b>2.0978</b>	<b>0.0236</b>	<b>0.9</b>	<b><math>Q_s = 0,0236Q_l^{2,0978}</math></b>
Été	45	0.196	3.1398	0.70	$Q_s = 3,1398Q_l^{0,1969}$
Interannuelle	767	1.9661	0.045	0.83	$y = 0,0453x^{1,9661}$

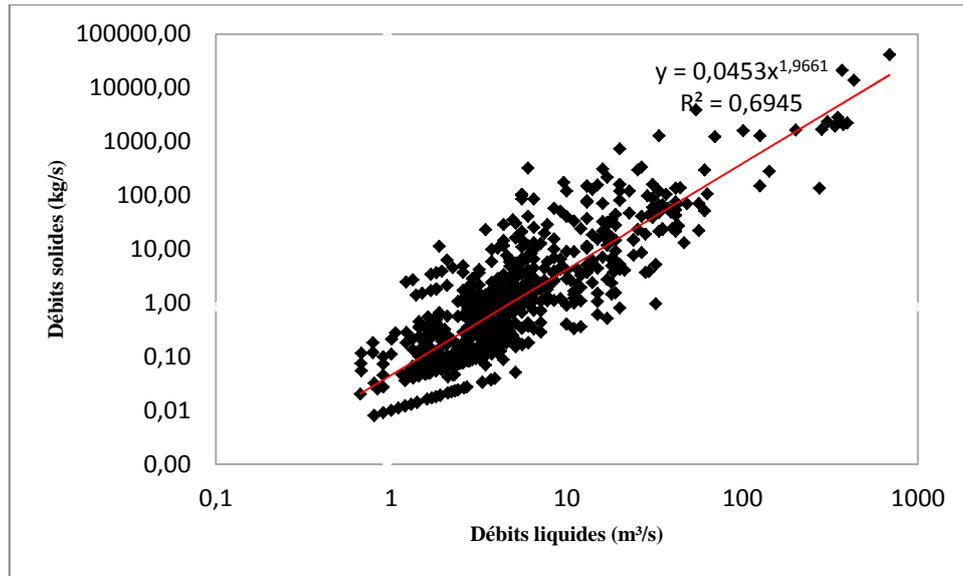
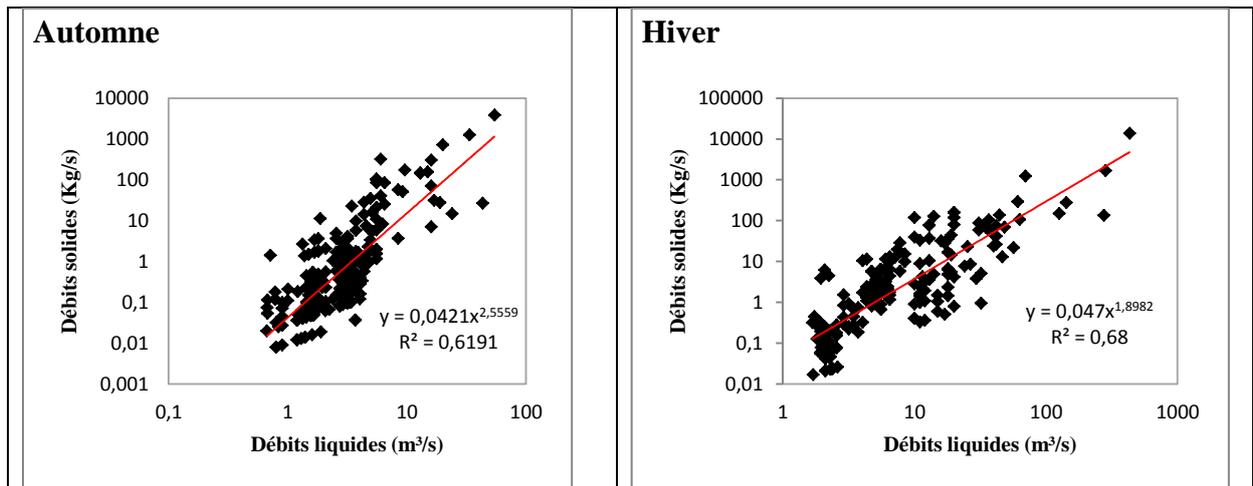


Figure 139: Relation entre les débits solides et les débits liquides instantanés à l'échelle interannuelle: station de Grarem



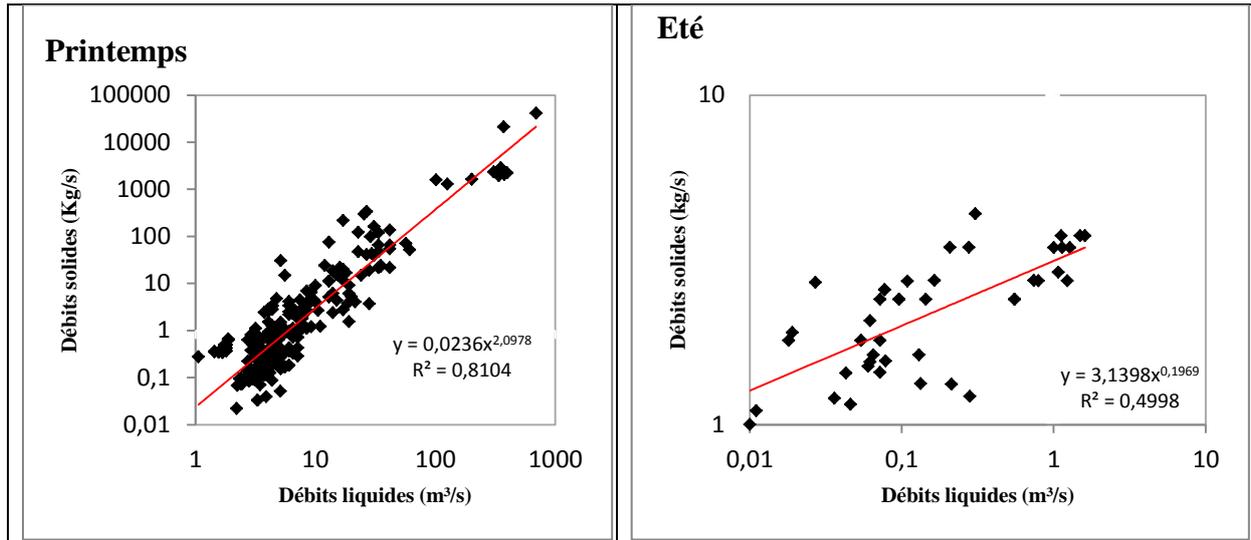


Figure 140: Relations entre les débits solides et les débits liquides instantanés à l'échelle saisonnière: station de Grarem

Pour parer à la sous-estimation de l'apport des sédiments par les courbes d'étalonnage, calculée pour les régressions saisonnières, le facteur de correction CF de Jansson est appliqué aux séries respectives des deux stations hydrométriques étudiées (Tableau 49).

Le facteur de correction de Jansson est calculé à partir de l'erreur quadratique de la régression logarithmique entre  $C_i$  (en g/l) et  $Q_{li}$  (en  $m^3/s$ ):

$$FC = 10^{1.1513\sigma^2}$$

$\sigma^2$ : Correspond à l'écart type de l'estimation des concentrations.

$$\sigma^2 = 1/(N-1) \sum (\log_{10} C_i - \log_{10} C'_i)^2$$

Les facteurs de correction FC1 et FC2 sont appliqué à l'ensemble des débits solides sous la forme :

$$Q_{sj} = b * Q_l^a * FC$$

Tableau 49: Valeurs des coefficients de correction saisonniers (CF)

Station	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Douar Tassadane	2.78	2.81	1.84	1.64
Grarem	6.52	2.13	8.42	0.6

## 2. LA CHARGE SOLIDE DES OUEDS A L'ECHELLE ANNUELLE

### 2.1. Variabilité interannuelle des apports solides et liquides

Les variations interannuelles révèlent que les apports solides et liquides subissent une forte irrégularité, Ces grandes fluctuations sont la conséquence d'une irrégularité du régime annuel d'écoulement, lié principalement à l'influence des précipitations par leurs valeurs extrêmes très dispersées et leurs intensités très variables (Bouguerra, 2016).

Les apports solides  $A_s$  sont exprimés en tonnes et les apports liquides  $A_l$  en  $hm^3$  et les apports spécifiques TSS en tonnes par kilomètre carré par an ( $t/km^2/an$ ):

$$A_l = Q_l \cdot T \cdot 10^{-6}$$

$$A_s = Q_s \cdot T \cdot 10^{-3}$$

$$T_{ss} = A_s / S$$

Avec:

$A_l$ : apport liquide annuel, mensuel ou saisonnier ( $hm^3$ )

$Q_l$  : débit liquide annuel, mensuel, ou saisonnier ( $m^3/s$ )

$A_s$ : apport solide annuel, mensuel ou saisonnier (tonnes)

$Q_s$ : débit solide annuel, mensuel, ou saisonnier ( $kg/s$ )

TSS: Transport solide spécifique du pas de temps considéré ( $tonnes/km^2$ )

T: temps en secondes (s)

S: superficie du bassin versant ( $km^2$ )

Les apports annuels en transports solides en suspension (exprimés en tonnes) aux stations de Douar Tassadane et de Grarem, sont résumés dans le tableau 50. Leurs variations interannuelles sont à lier à l'irrégularité des apports liquides.

Il est à noter, que l'apport solide annuel est très variable d'une année à l'autre et souvent il est très inférieur à la moyenne (21 années sur 25 pour la station de Grarem et 22 années sur 32 pour la station de Douar Tassadane). En effet, on remarque qu'à la station de Grarem, la moyenne de la série est fortement influencée par uniquement quatre années (1984/85, 1995/96 1998/99 et 1999/00).

A la station de Douar Tassadane, lors de l'année 2002/03, caractérisée par une forte hydraulité (voir chapitre 2), l'oued El Kébir - amont a évacué des volumes considérables (plus de 13,6 millions de tonnes) de matériaux solides en suspension, soit une dégradation spécifique moyenne du bassin versant de  $14201.75 t/km^2/an$ . L'année 1984/85 a été exceptionnelle sur l'oued Rhumel à la station de Grarem (voir chapitre 2), avec un apport solide de près de 14,2 millions de tonnes, soit une dégradation spécifique de  $2662.59 t/km^2/an$ .

Tableau 50: Apport liquide (Al), apport solide (As) et apport solide spécifique (TSS) aux stations de Douar Tassadane et Grarem

Station	Douar Tassadane			Grarem			
	Année	Al (hm <sup>3</sup> )	As (tonne)	TSS (t/km <sup>2</sup> /an)	Année	Al (hm <sup>3</sup> )	As (tonne)
1973/74	115,244	2197772	2289,35	1973/74	110,844295	623885,90	117,27
1974/75	53,64164	423882,04	441,54	1974/75	75,2385172	83187,85	15,64
1975/76	139,2946	1346333	1402,43	1975/76	144,197905	210209,38	39,51
1976/77	82,84354	2382895,9	2482,18	1976/77	130,685457	851155,57	159,99
1977/78	98,0218	834158,65	868,92	1977/78	103,230125	117420,85	22,07
1978/79	79,44267	702504,42	731,78	1978/79	161,014579	1049944,15	197,36
1979/80	54,61189	790042,26	822,96	1979/80	109,195469	170979,03	32,14
1980/81	78,57626	1050239,2	1094,00	1980/81	149,194905	209039,66	39,29
1981/82	163,6886	1695936	1766,60	<b>1984/85</b>	<b>674,305305</b>	<b>14164985,78</b>	<b>2662,59</b>
1982/83	80,77152	567753,91	591,41	1985/86	124,878344	117598,02	22,10
1983/84	163,8019	2622845,8	2732,13	1986/87	300,149748	1151303,12	216,41
1984/85	304,8231	6622785,4	6898,73	1987/88	82,1022122	74126,42	13,93
1985/86	61,56856	237428,9	247,32	1988/89	9,36125878	304880,55	57,31
1986/87	189,7466	1802097,6	1877,19	1989/90	55,5191425	56942,86	10,70
1987/88	34,94966	176620,61	183,98	1990/91	141,736269	245663,84	46,18
1988/89	91,35402	624368,61	650,38	1991/92	126,412782	213501,97	40,13
1989/90	22,78672	149190,94	155,41	1992/93	253,259448	1305811,61	245,45
1990/91	138,0523	6394681,6	6661,13	1993/94	130,647127	302160,96	56,80
1991/92	77,16575	1105634,5	1151,70	1994/95	206,768105	940707,39	176,82
1992/93	93,68478	588269,91	612,78	1995/96	197,205053	1639643,88	308,20
1993/94	61,02672	305295,04	318,02	1996/97	58,9467779	54667,94	10,28
1994/95	118,253	1137366,9	1184,76	1997/98	124,22003	346483,38	65,13
1995/96	71,78925	681300,24	709,69	1998/99	244,689369	10617965,72	1995,86
1996/97	13,28653	28032,634	29,20	1999/00	96,243038	1515045,33	284,78
1997/98	65,40383	1988870,2	2071,74	2000/01	8,39065171	454356,42	85,41
1998/99	82,84797	2973924,1	3097,84	<b>Moyenne</b>	<b>152,74</b>	<b>1472866,70</b>	<b>276,85</b>
1999/00	21,86815	59962,575	62,46	<b>Ecart Type</b>	<b>129,21</b>	<b>3360618,25</b>	<b>631,70</b>
2000/01	41,08	1802097,61	1877,19				
2001/02	14,54015	350125,58	364,71				
<b>2002/03</b>	<b>277,8831</b>	<b>13633683</b>	<b>14201,75</b>				
2003/04	149,7703	1302374,5	1356,64				
2004/05	203,9193	5192958	5409,33				
<b>Moyenne</b>	<b>101,43</b>	<b>1930357,23</b>	<b>2010,79</b>				
<b>Ecart Type</b>	<b>7021</b>	<b>2717260,81</b>	<b>2830,48</b>				

En général, les variations interannuelles des apports solides suivent celles de l'hydraulicité (apports liquides) avec des tonnages considérables caractérisant les années à fréquence élevée des épisodes de fortes crues (Figures 141 et 142).

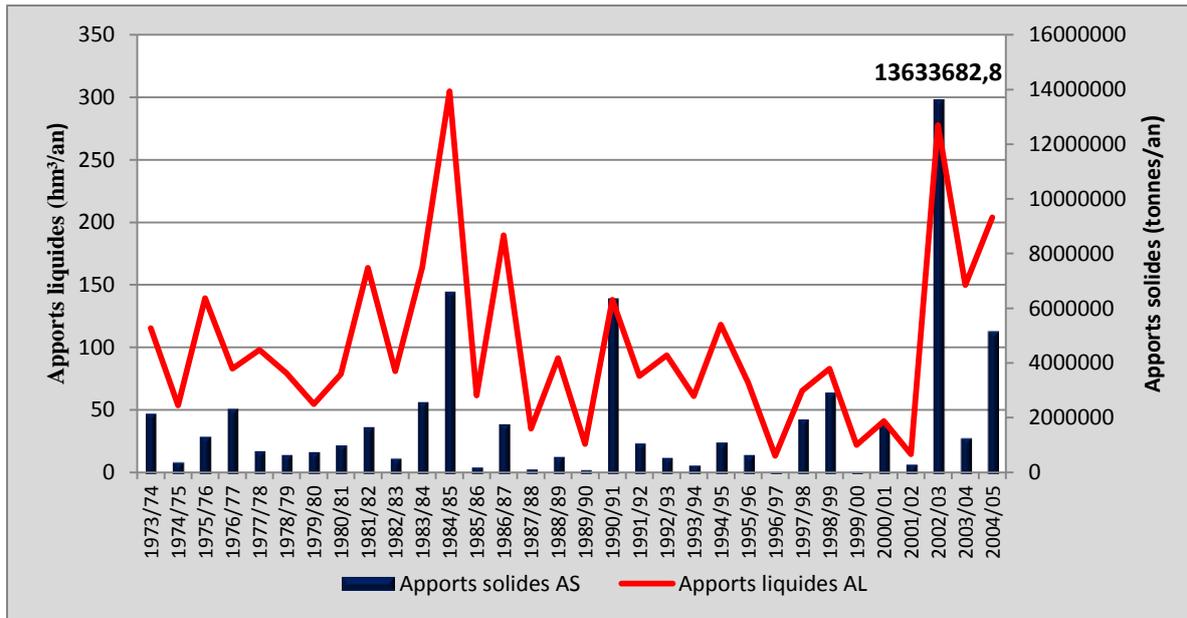


Figure 141: Variations annuelles des apports liquides et solides annuels de l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane (période: 1973/74-2004/05)

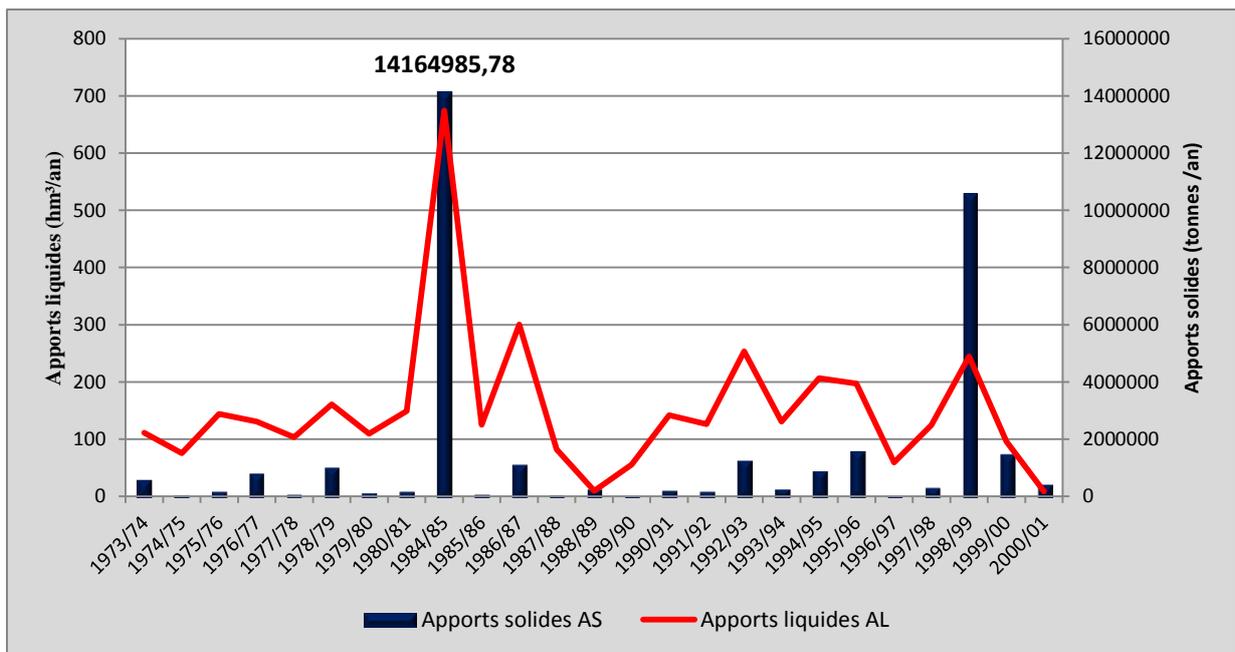


Figure 142: Variations annuelles des apports liquides et solides annuels de l'oued Rhumel à Grarem (période: 1973/74-2000/01)

## 2.2. Transport solide spécifique en lien avec les précipitations et la lame écoulee

Les fluctuations des transports solides se traduisent par une très forte variabilité (exprimée par l'écart-type ou variabilité absolue et le coefficient de variation ou variabilité relative), fortement liée à celle des apports liquides, eux-mêmes fortement corrélés avec les précipitations qui en sont le facteur générateur (Tableau 51, Figures 143 et 144).

La moyenne interannuelle de TSS à la station de Grarem, correspondant à la période de 1973/74-2000/01, est de 276.8 t/km<sup>2</sup>/an. Les valeurs annuelles extrêmes sont respectivement de 10.27 t/km<sup>2</sup>/an en 1996/1997 (année hyper sèche: P=244.74 mm ; E=11.13 mm) et de 2662.5 t/km<sup>2</sup>/an en 1984/85, année hyper humide (P= 607.97, E=125.69 mm).

La moyenne interannuelle du transport solide spécifique (TSS) est estimée à la station hydrométrique de Douar Tassadane à 2010.7 t/km<sup>2</sup>/an. En moyenne interannuelle, la lame d'eau écoulée (E) observée est de 101.67 mm pour une hauteur précipitée (P) de 536.33 mm. La valeur de TSS la plus faible observée pendant l'année hydrologique particulièrement sèche de 1996/97 (P=259.53 mm; E=13.81 mm) est de 29,2 t/km<sup>2</sup>/an, et la valeur la plus forte enregistrée pendant l'année très pluvieuse de 2002/03 (P=862.60 mm; E=298.27 mm) atteint 14210.7 t/km<sup>2</sup>/an.

La dégradation spécifique de l'oued Endja supérieur (Oued El Kébir-amont) à Douar Tassadane représente, en moyenne interannuelle, plus 5.5 fois la valeur de l'Oued Rhumel à Grarem. Au-delà de l'influence de la série de mesure de la station de Douar Tassadane couvrant une période plus longue et plus humide (années 2002/03-2004/05), cette différence s'explique principalement par la nature physco-geographique très différenciée des deux bassins-versants; aussi une dynamique érosive règne dans le bassin de l'oued Endja supérieur où les précipitations agressives s'abattent sur un ensemble morphologique (pentes assez fortes et couvert végétal discontinu) favorisant la mobilisation des sols et le transport solide.

Tableau 51: Transport solide spécifique et paramètres hydrologiques des oueds Rhumel (Grarem) et Endja supérieur (Douar Tassadane)

Paramètre	station hydrométriques Douar Tassadane (1973/74-2004/05)			station hydrométrique Grarem (1973/74- 2001/02)		
	TSS (t/km <sup>2</sup> /an)	P mm	E mm	TSS (t/km <sup>2</sup> /an)	P mm	E mm
Moyenne	2010.7	536,33	101,67	276.855	385,93	30,55
Ecart Type	2830.48	141,13	68,36	631.69	94,37	23,02
CV %	140.76	26,31	67,23	228.17	24,45	75,35
Maximum (année)	14210.753 (2002/03)	862.60 (2002/03)	298.27 (2002/03)	2662.71 (1984/85)	607,97 (1984/85)	125,69 (1984/85)
Minimum (année)	29.20 (1996/97)	259,53 (1996/96)	13,81 (1996/97)	10.27 (1996/97)	244,74 (1996/97)	11.13 (1996/97)

TSS: transport solide spécifique

P : lame d'eau précipitée aux bassins annuels de la station

E : Ecoulement moyen annuel

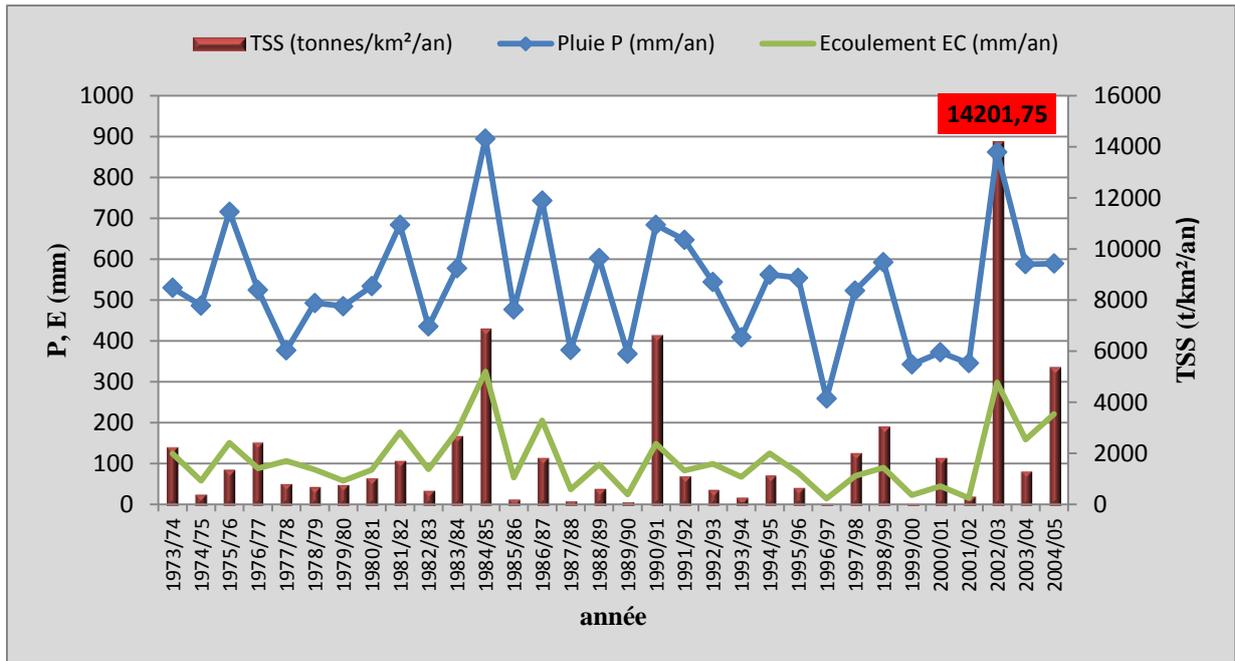


Figure 143: Variations annuelles du transport solide spécifique (TSS), de l'écoulement (E) et des précipitations (P) à la station de Douar Tassadane (période: 1973/74–2004/05)

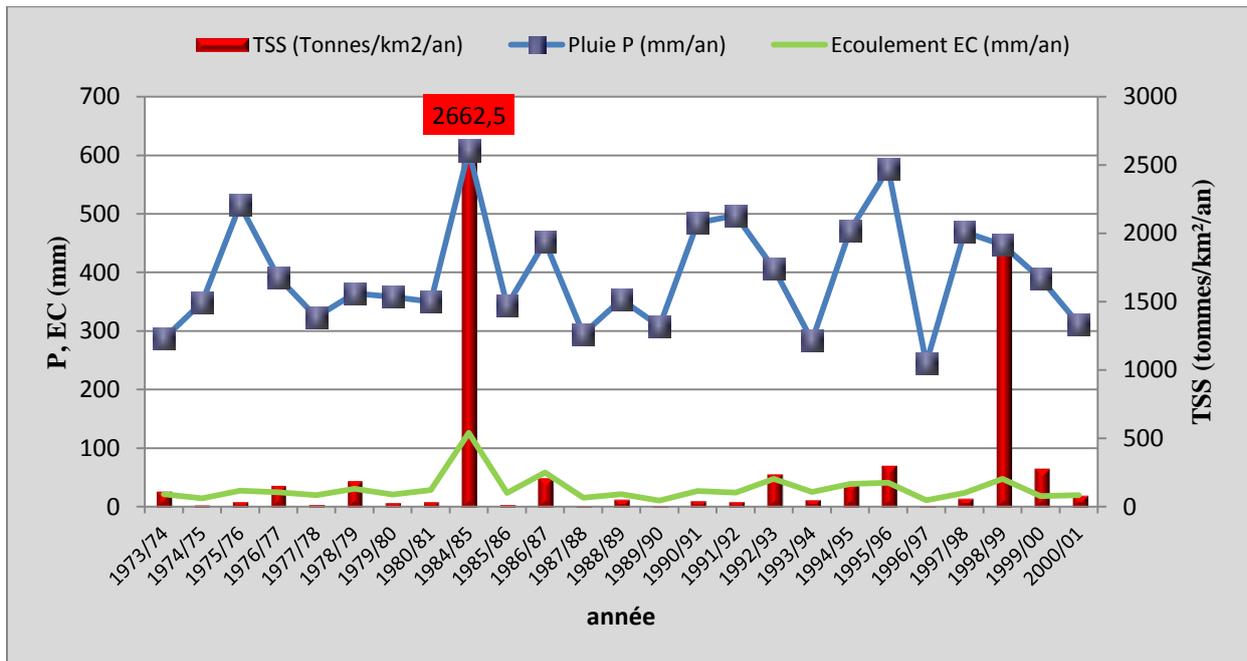


Figure 144: Variations annuelles du transport solide spécifique (TSS), de l'écoulement (E) et des précipitations (P) à la station de Grarem (période: 1973/74–2000/01)

Il ressort des estimations de la dégradation spécifique que la moyenne de 2010.78 t/km²/an obtenue sur l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane se situe dans l'intervalle des valeurs élevées estimées pour d'autres bassins algériens tels que les bassins de l'Isser à Lakhdaria et

Oued Mazafran (Côtiers Algérois) dont les dégradations moyennes sont respectivement de 2300 et 1610 t/km<sup>2</sup>/an (Bourouba, 1996).

Par contre, il s'avère que pour l'oued Rhumel à Grarem, son taux dégradation (TSS = 276.85 t/km<sup>2</sup>/an) correspond à la gamme des valeurs modestes obtenues dans des bassins faisant partie des régions semi-arides tel que le bassin de la Seybouse à Hammam Debagh dont la dégradation spécifique moyenne annoncée par Louamri (2013) se situe autour de 281 t/km<sup>2</sup>/an,

Notons à titre indicatif, d'autres valeurs de TSS indiquées par Bourouba (1997 et 1998) concernant le bassin de l'oued Soummam à Sidi Aich (490 t/km<sup>2</sup>/an), le bassin de l'oued Medjerda à Souk Ahras (680 t/km<sup>2</sup>/an) et le bassin de la Macta au barrage Cheurfa (150 t/km<sup>2</sup>/an). D'autres auteurs ont trouvé des valeurs nettement plus élevées comme celle de l'Oued Agrioun qui alimente le barrage d'Ighil Emda où la dégradation spécifique a été estimée à 7200 t/km<sup>2</sup>/an (Probst et al, 1992).

### **3. FLUCTUATIONS DES APPORTS SOLIDES ET LIQUIDES A L'ECHELLE MENSUELLE ET SAISONNIERE**

Les figures 145 et 146 montrent les variations des apports liquides moyens mensuels et les charges solides en suspension qui leur correspondent. Elles donnent un aperçu, mois par mois, sur la susceptibilité globale des bassins versants à la production des sédiments (Bouguerra, 2016). En effet, après la grande saison sèche, les premières pluies de septembre trouvent un sol sec et dur. La réponse du bassin en matières en suspension est donc très faible. Ce sont les pluies torrentielles du mois d'octobre suivies de celles de novembre qui entraineraient de grandes quantités de matières solides, et qui seront par la suite véhiculées en suspension par le cours d'eau.

Par ailleurs, nous avons tracé des graphiques à secteurs mettant en évidence, pour les deux stations étudiées, le pourcentage de contribution de chaque mois en termes d'apport solide spécifique (Figure 147). Pour mieux appréhender le phénomène de l'érosion et du transport solide. Enfin, il serait judicieux d'analyser la répartition saisonnière des flux de sédiments en suspension dans les deux bassins (Figure 148).

#### **3.1. L'oued Endja supérieur à Douar Tassadane**

Les mois de novembre jusqu'à avril sont caractérisés par de forts apports, solide et liquide, supérieurs à la moyenne, avec un pic remarquable de l'apport solide au mois de novembre. Les six mois restants se caractérisent par un faible apport liquide et solide (Figure 145).

Concernant le pourcentage de répartition mensuelle des apports solides spécifiques : 79 % de la charge solide est mesurée au cours de cinq mois seulement: en novembre (33 %), en décembre (10 %), en janvier (16 %), en février (11 %) et en mars (10 %) (Figure 147). Cette répartition est due à la fréquence des crues importantes. C'est ainsi que par exemple durant l'année 2002/03, 56 % de la charge annuelle en suspension ont été mesurés lors de la crue survenue entre le 23 et 28 janvier 2003 avec un débit de pointe de 250.71 m<sup>3</sup>/s. Cette crue a généré une turbidité de près de 148.57 g/l et un débit solide de pointe de 37250.16 Kg/s

L'apport solide a été estimé à 487788.32 de tonnes, soit 69 % de l'apport solide du mois de janvier 2003.

A l'échelle des saisons, 81 % du transport des matières en suspension de l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane s'effectue pendant l'automne (45 %) et l'hiver (36 %) (Figure 148). Le taux d'érosion d'hiver s'avère inférieur à celui de l'automne, cela s'explique par le fait que des quantités importantes de particules solides ont été transportées par les premières crues d'automne (Achite et Meddi, 2005). La variation du couvert végétal durant l'année et la nature des pluies d'automne (agressivité des pluies), contribuent à préparer les agrégats du sol à la destruction (Bouguerra, 2016). La saison d'été est une saison à érosion insignifiante (environ 1%) principalement en raison de l'extrême faiblesse des pluies et des écoulements.

La constatation de quantités importantes de sédiments transportés principalement en automne a été confirmée par d'autres auteurs sur d'autres bassins algériens. Meddi (1999) a observé que les plus fortes concentrations de sédiments dans le bassin de l'oued Ebda (Algérie du Nord) sont mesurées en automne et propose ainsi d'évacuer le maximum de sédiments du futur barrage lors de cette saison car les volumes d'eau sont moins importants par rapport aux saisons d'hiver et de printemps. Par ailleurs, Terfous et al (2001) ont observé pour le bassin versant de l'Oued Mouilah que les saisons où l'érosion est la plus intense sont l'automne et le printemps car les sols sont très érosibles en raison des cycles gel-dégel qui déstabilisent leur structure.

### 3.2. L'oued Rhumel à Grarem

Les mois de septembre, novembre, décembre et janvier ont des apports solides supérieurs à la moyenne du fait que les premières eaux de l'année jouent un rôle de lessivage des stocks de sédiments préparés (Figure 146). La variation mensuelle indique une décroissance continue des apports, liquide et solide, depuis avril jusqu'au mois d'août avec un minimum de dégradation spécifique en mois de mai.

Les mois de novembre, décembre et janvier, sont les plus importants de l'année en termes d'apport solide spécifique : 30 % en novembre, 23 % en décembre et 12 % en janvier (Figure 147).

Comme exemple illustrant l'importance des crues dans la fourniture d'apports solides de l'oued Rhumel à la station de Grarem, nous citons celle de décembre 1984. Cette crue a duré dix jours, avec un débit de pointe de 942.82 m<sup>3</sup>/s. Elle a généré une turbidité de près de 61.92 g/l et un débit solide de pointe de 58381.74 Kg/s L'apport solide s'élevait à 50 millions de tonnes soit 67 % de l'apport solide annuel.

La répartition saisonnière des transports solides de l'oued Rhumel confirme la variabilité mensuelle analysée plus haut : 82 % de la charge en suspension est transportée en automne (40%) et en hiver (42%) (Figure 148) Pour l'automne, la forte charge s'explique par le fait que les précipitations, souvent intenses, tombent sur un sol asséché et mal protégé par la végétation (Chibbani et al, 1999 ; Roose et al, 1999 in Bouanani, 2004).

Les crues d'automne et de printemps sont responsables de l'essentiel du transport solide. En effet, pendant l'été connu pour ces chaleurs intenses, le sol se dessèche, se fissure, se fragmente et voit son couvert végétal réduit, ce qui permet aux premières averses de l'automne de laver le sol de ces éléments fins détachés. Pendant le printemps qui succède à la saison hivernale froide et pluvieuse, les crues coïncident avec des versants saturés et déblayés.

En hiver la charge en suspension augmente proportionnellement aux apports pluviométriques si bien que le flux saisonnier reste inférieur à celui mesuré en automne malgré une hausse très significative des totaux pluviométriques.

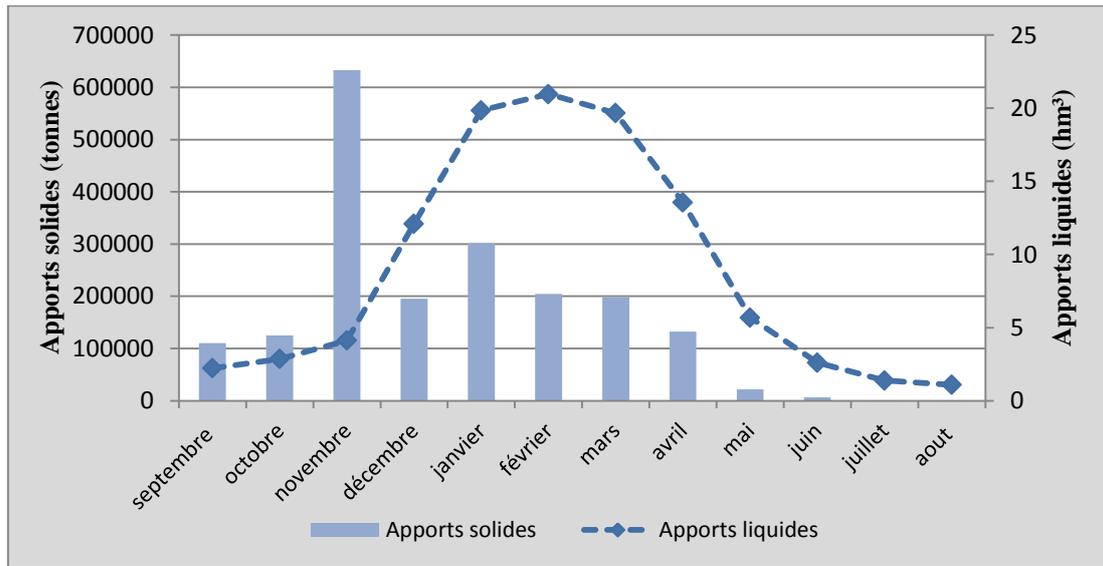


Figure 145: Apports liquides et solides moyens mensuels de l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane

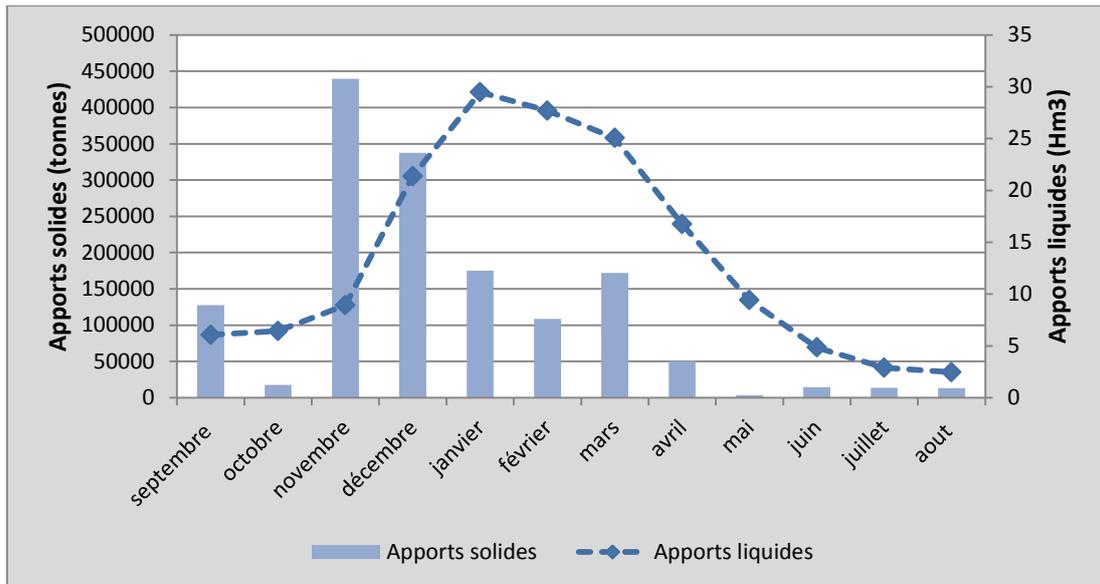


Figure 146: Apports liquides et solides moyens mensuels de l'oued Rhumel à Grarem

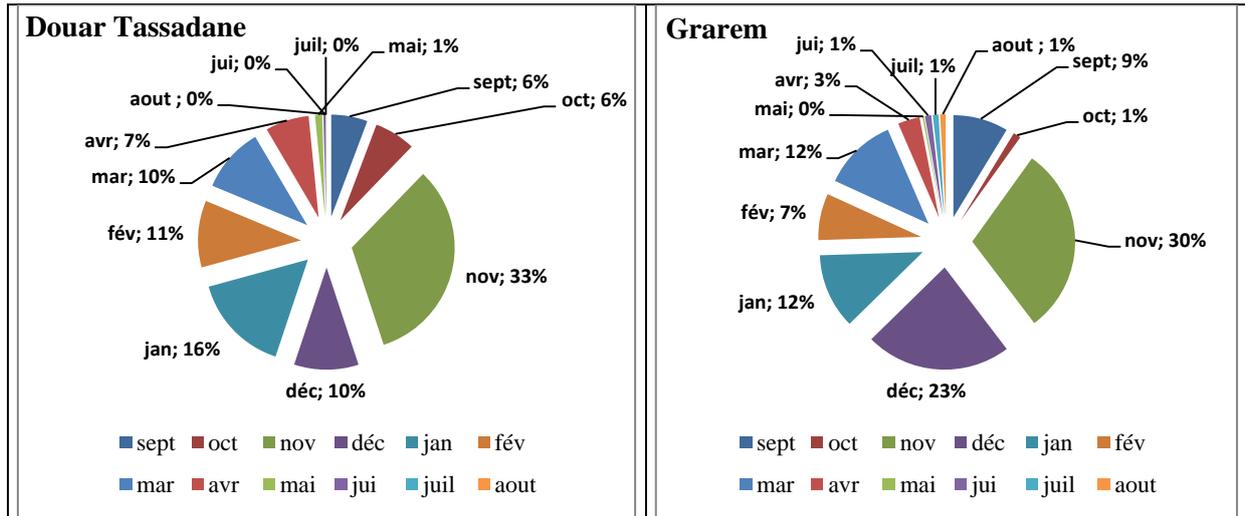


Figure 147: Répartition mensuelle (en %) des apports solides spécifiques aux stations de Douar Tassadane et de Grarem

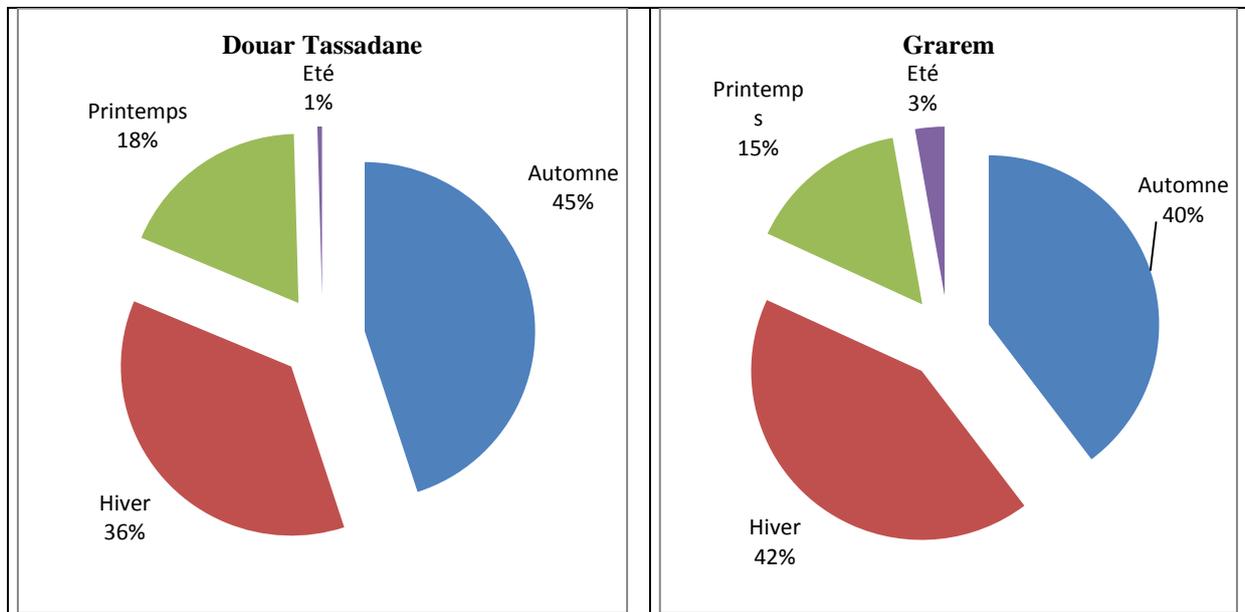


Figure 148: Part saisonnière en pourcentage des apports solides spécifiques des deux stations (Douar Tassadane et Grarem)

#### 4. ANALYSE DE LA CHARGE SOLIDE DES OUEDS EN PERIODE DE CRUE

##### 4.1. Méthodologie

La relation entre la concentration des sédiments en suspension ( $C_s$  en g/l) et le débit liquide (QL en  $m^3/s$ ) d'un cours d'eau est une relation qui permet non seulement de déterminer le transport solide dans l'oued mais également d'étudier l'évolution des concentrations en suspension et des débits liquides pour un événement hydrologique de crue (Hallouze, 2013). Nous citons les travaux de Benkhaled et al (2003), Bouanani (2004), Achite et al (2005), Touaibia et al (2011), Bouchelkia et al (2011).

Dans cette partie, on cherche à caractériser la relation  $C_s$ -QL à travers une série d'évènements de crues. L'analyse est orientée beaucoup plus vers l'aspect graphique que

donnerait la mise en graphe selon l'ordre chronologique des concentrations et des débits liquides, méthode qui permettrait un approfondissement de la connaissance de cette relation à l'échelle locale (Benkhaled et al, 2003).

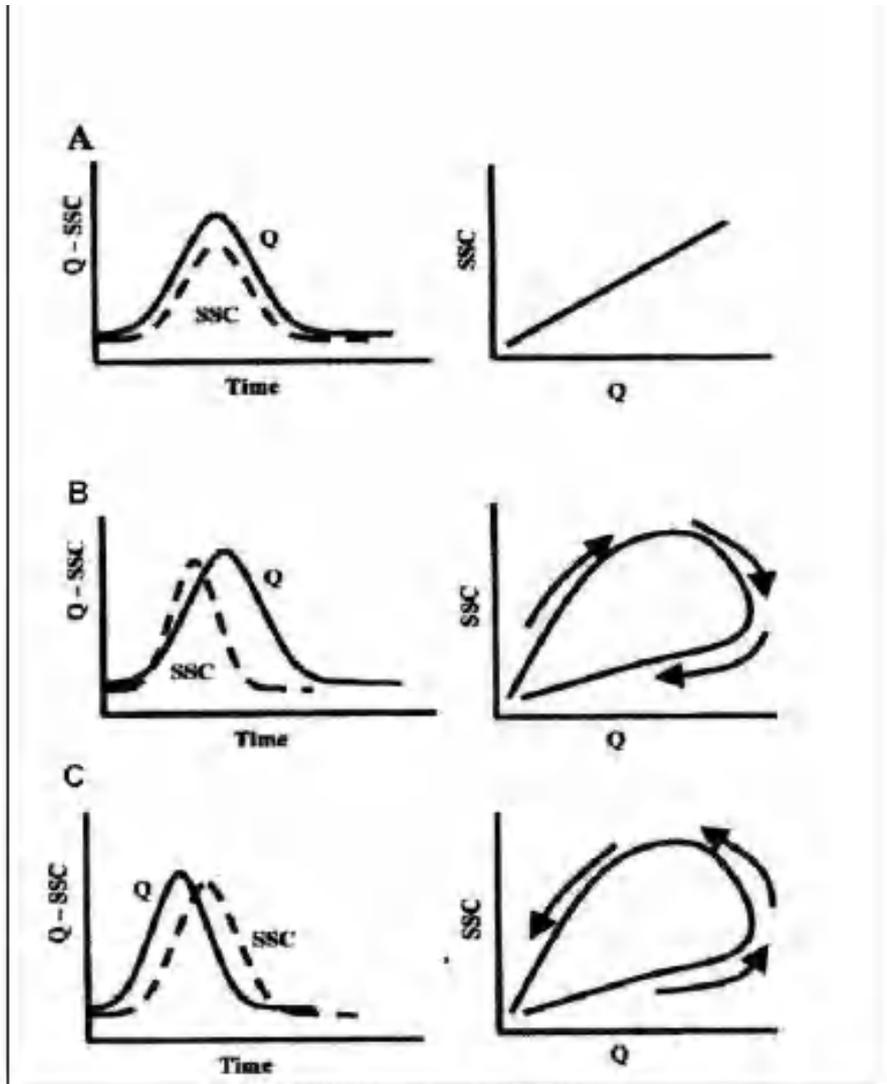


Figure 149: Modèles des relations concentration- débit liquide

La figure 149 présente la relation entre débit liquide  $Q$  ( $m^3/s$ ) et concentration des sédiments en suspension  $C$  ( $g/l$ ) :

(A) Les pics coïncident entre  $Q$  et  $C$ , symétrie des valeurs par rapport à l'axe des pics, soit les mêmes valeurs de  $C$  sur l'hydrographe, résultat d'une variation linéaire.

(B) Le pic ( $C$ ) devance celui de ( $Q$ ), les valeurs de  $C$  diminuent brusquement sur l'hydrographe, résultat d'une variation dans le sens horaire.

(C) Le pic ( $C$ ) est en retard par rapport au pic ( $Q$ ), les valeurs de  $C$  augmentent après un faible débit, d'où une courbe de variation dans le sens contraire d'une montre entre  $Q$  et  $C$ .

#### 4.2. Application au bassin de l'oued Rhumel à Grarem

On s'intéresse dans cette station aux six événements de crue les plus importants dans des conditions hydrologiques variables (période sèche, période humide...).

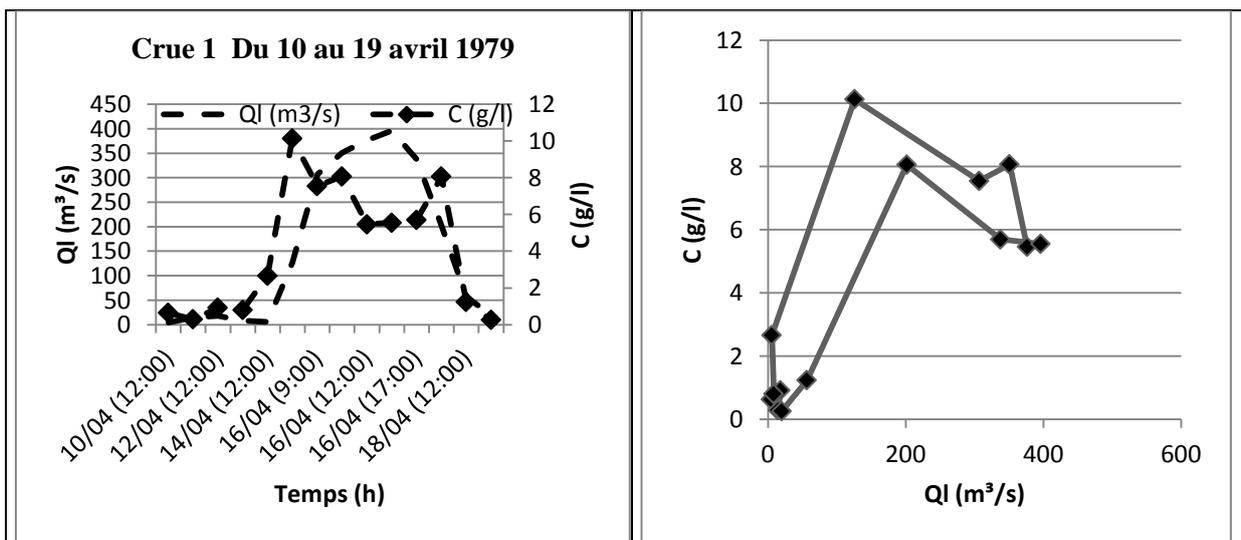
Le tracé des six (6) graphes temporels de la concentration des sédiments en suspension et du débit liquide de l'oued Rhumel à Garem permet ainsi de constater les caractéristiques types pour chaque crue étudiée (Figure 150). L'identification des crues sélectionnées est effectuée par le regroupement de crues de mêmes orientations et de même forme.

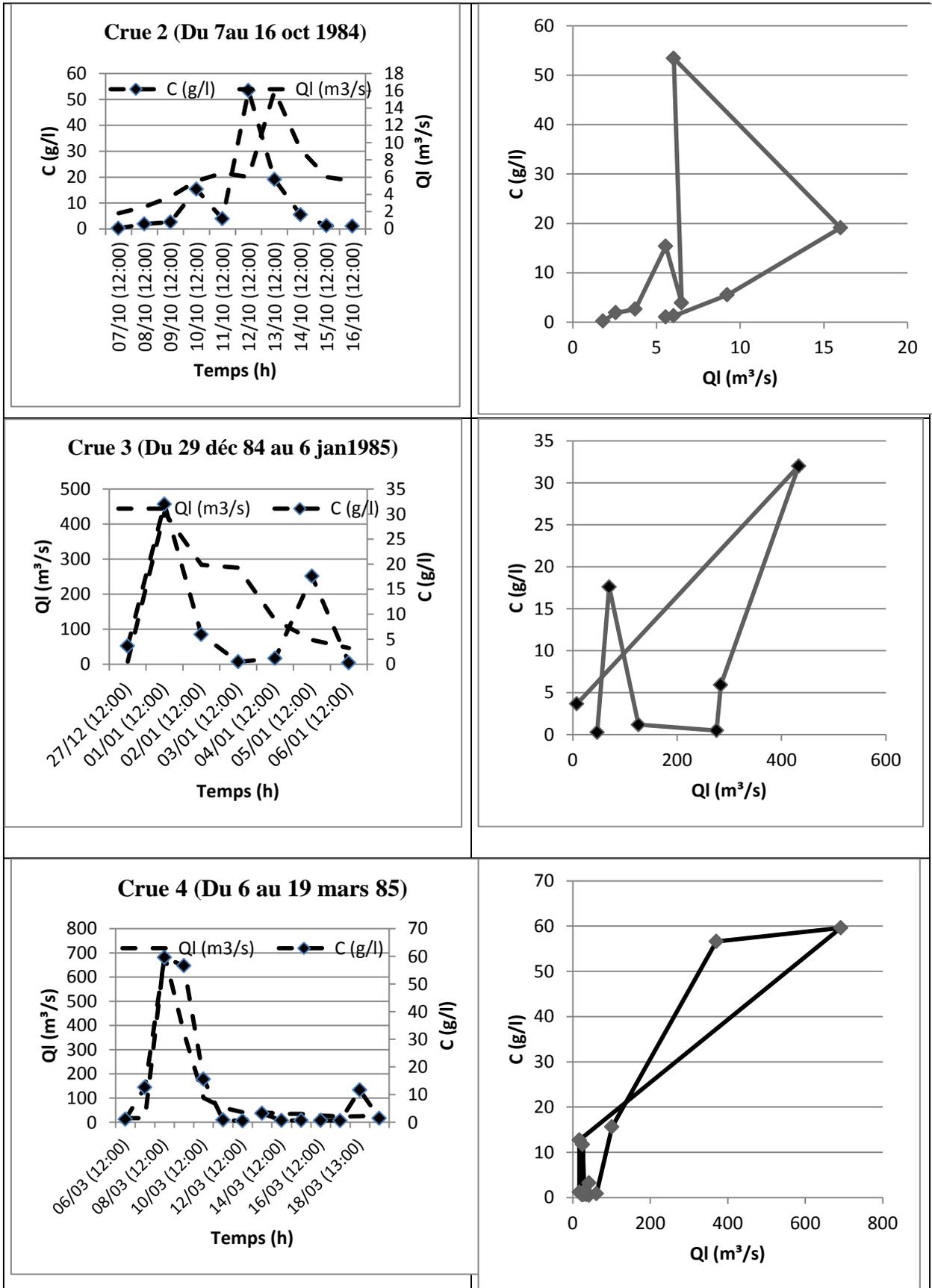
La majorité des graphes temporels analysés montrent que toutes des boucles d'hystérésis sont dans le sens des aiguilles d'une montre. Une boucle de cette forme indique la prédominance des sources des sédiments dans la vallée du bassin par rapport aux versants (Marouf et Remini, 2011 ; Marouf, 2012). Ce type d'hystérésis révèle un accroissement rapide des concentrations par rapport aux débits liquides, dû en bonne partie à la remise en suspension des dépôts fins dans le lit fluvial et sur les banquettes latérales.

La crue la plus importante, crue n°3, est celle du 29 décembre 1984 au 06 janvier 85, caractérisée par un débit maximal de l'ordre de 433.12 m<sup>3</sup>/s. Les crues 4 et 6 sont les crues les plus larges dont leurs temps de base atteint 275 heures.

#### 4.3. Application au bassin de l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane

Les graphes temporels analysés entre le débit liquide (Q) et la concentration des sédiments en suspension (C) montrent qu'il y a des boucles d'hystérésis qui donnent la forme (A) de la courbe (Cs-QL), à l'exemple de la crue des 16-24 janvier 1994, la crue des 22 -30 octobre 1991 et 24-30 mai 1992 (Figure 151). Ce qui explique que la concentration (Cs) est étroitement liée aux débits liquides (QL). Elle varie proportionnellement avec ce dernier lors de la montée et la descente des eaux. Les sédiments transportés en suspension durant ces épisodes de crues sont en grande partie arrachés des berges et du lit du cours d'eau (Megnounif, 2007).





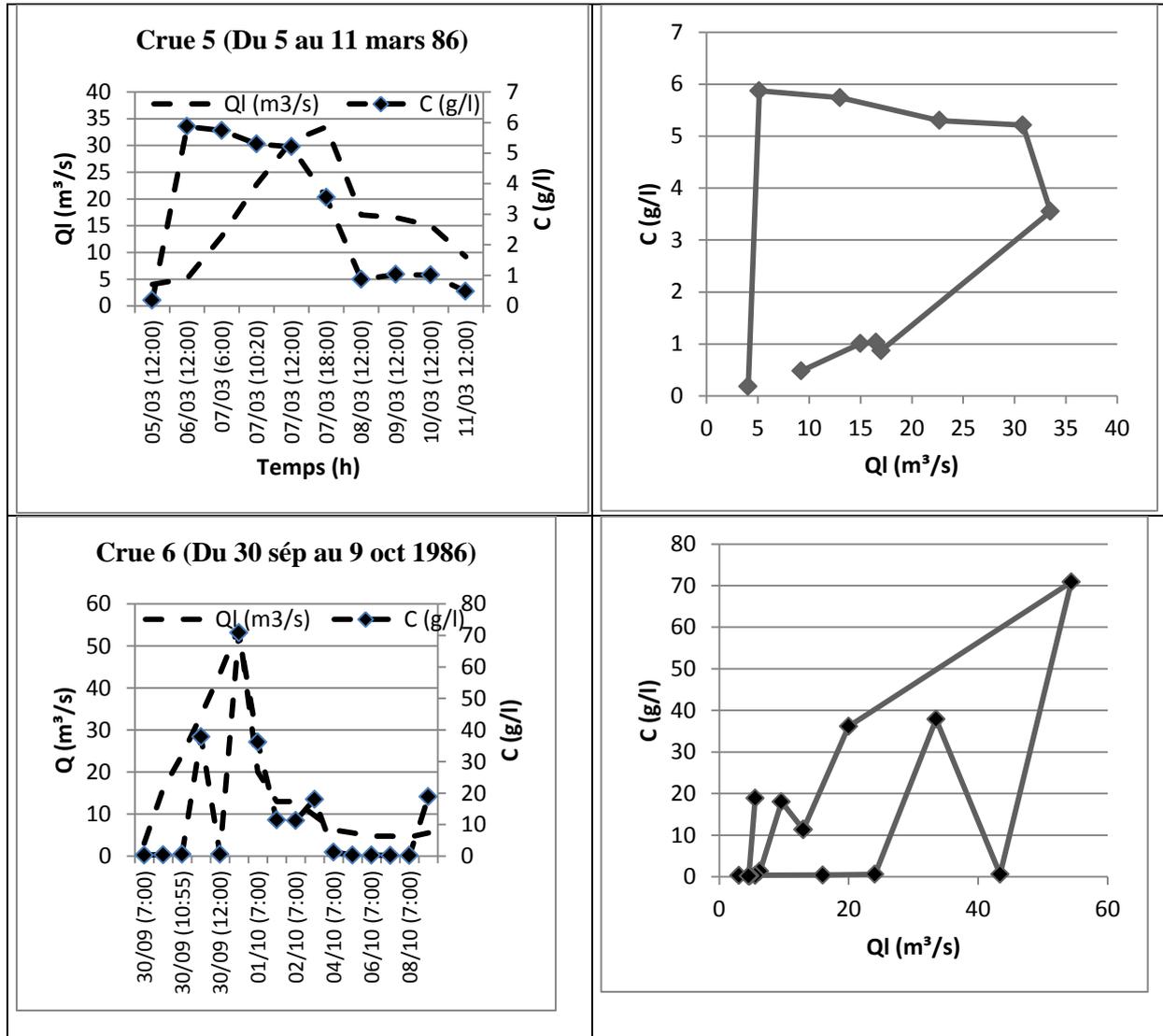
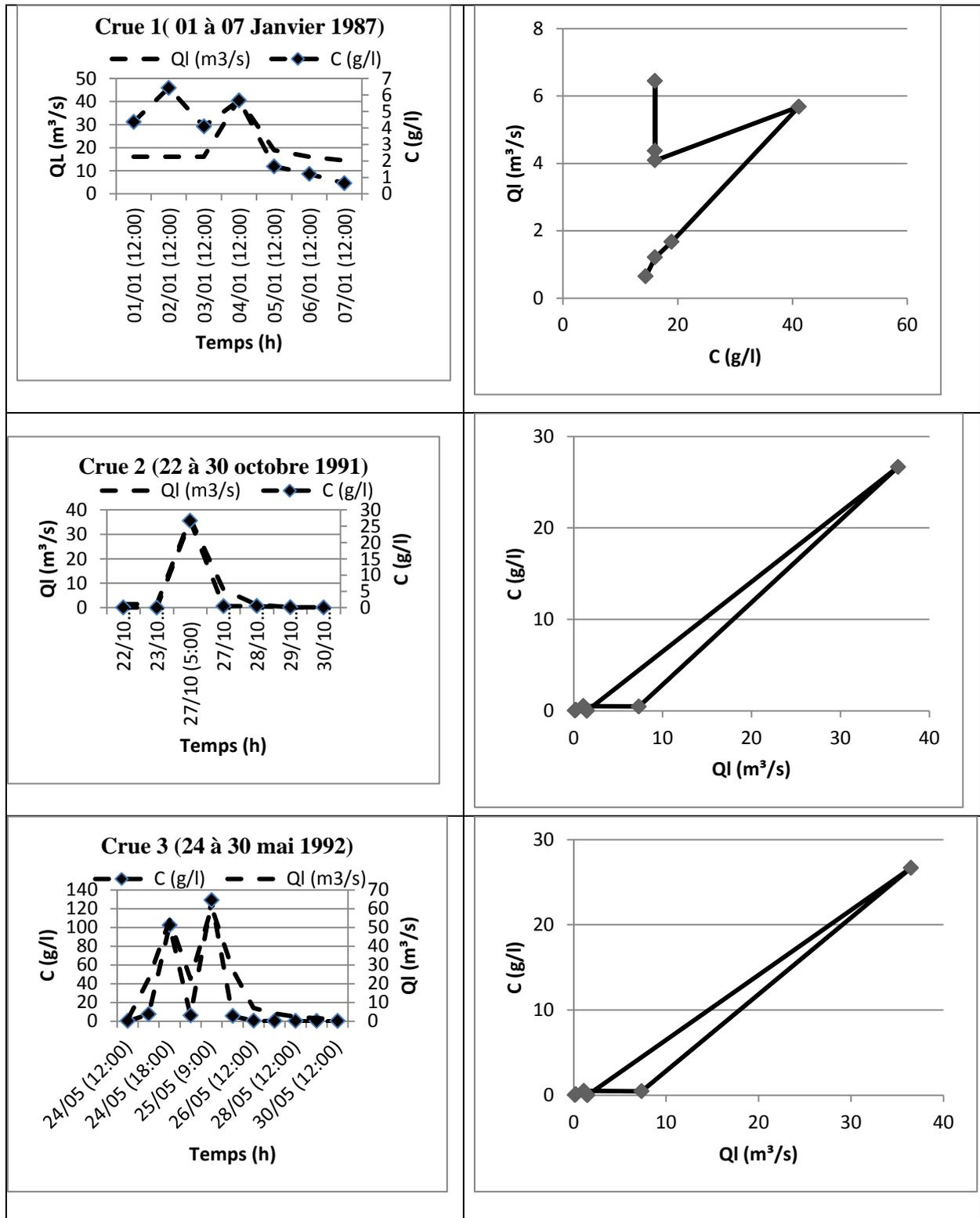


Figure 150: Courbes d'hystérésis entre les concentrations des sédiments et les débits de crues à la station de Grarem (période : 1978/79-1986/87)



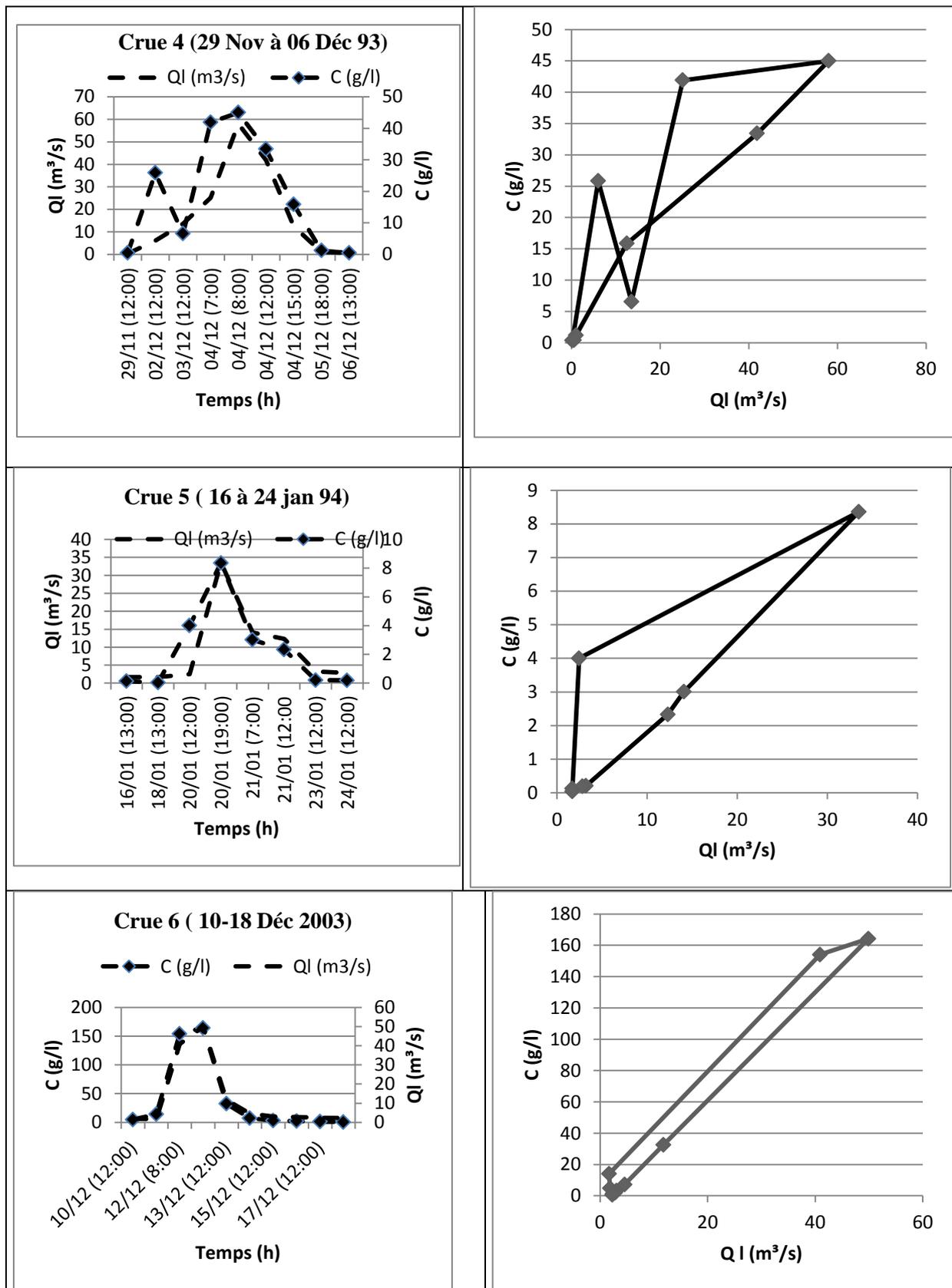


Figure 151: Courbes d'hystérésis entre les concentrations des sédiments et les débits de crues à la station de Douar Tassadane (période : 1978/79-2004/05)

## 5. ETIMATION DE L'ENVASEMENT DU BARRAGE DE BENI HAROUN ET STRATEGIE DE PROTECTION

### 5.1. Charge sédimentaire aux stations hydrométriques

L'estimation de la charge solide des deux principaux oueds, Rhumel et Endja, peut être un élément clef de l'évaluation du rythme d'envasement du barrage de Béni Haroun.

Les données de mesures de débits solides collectées reflètent plus ou moins bien les grands traits des variations annuelles, saisonnières et à l'échelle des épisodes de crues dans les des deux sous bassins jaugés.

Toutefois, le transport solide mesuré à la station de Grarem relève d'une série relativement courte et lacunaire, ne reflétant donc pas nécessairement la réalité hydrosédimentaire du sous bassin du Rhumel. Par ailleurs, l'oued Endja supérieur qui draine un sous bassin important (2260 km<sup>2</sup>) présentant plusieurs versants favorisant un fort potentiel d'érosion devrait contribuer de façon non négligeable à l'envasement de la retenue de Béni Haroun. Or, l'apport solide moyen (147424 tonne/an) estimé à la station de Douar Tassadane ne représente que 40 % de la surface du sous bassin de l'oued Endja. C'est pourquoi, il est proposé dans ce qui suit d'appliquer la méthode analogique pour estimer l'apport solide du bassin intermédiaire non jaugé, à partir des données observées dans un bassin jaugé et hydrologiquement comparable (bassin à l'amont de Douar Tassadane) (Tableau 52).

Cette méthode est basée sur deux paramètres (superficie et pluviométrie moyenne):

$$A_{est} = A_{obs} \left( \frac{S_{est}}{S_{obs}} \right) \cdot \left( \frac{P_{est}}{P_{obs}} \right)$$

$A_{est}$  : Apport solide à estimer (tonnes/an).

$A_{obs}$  : Apport solide de la station de Douar Tassadane (tonnes/an).

$P_{est}$  : Pluie moyenne du bassin a estimé (P oued Endja= Pluie Béni Haroun – Pluie Grarem)

$P_{obs}$  : Pluie du bassin jaugé

$S_{est}$  : Superficie du bassin versant du barrage (km<sup>2</sup>).

$S_{obs}$  : Superficie du bassin versant du barrage voisin (km<sup>2</sup>).

Tableau 52: Estimation par analogie de l'apport solide du bassin à l'amont de Béni Haroun

Oued	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Pluie moyenne du bassin (mm)	Apport solide (Tonne/an)	Apport solide spécifique (tonne/km <sup>2</sup> /an)
O. Endja à Douar Tassadane période commune : 1973/74-2000/01)	960	528,67	1474724	1536.17
O. Endja à Béni Haroun (par analogie) période commune: 1973/74-2000/01)	2260	505,53	3314880.77	1466.76
O. Rhumel à Grarem période commune: 1973/74-2000/01)	5320	385,93	1472866.7	276.85
O. Rhumel - Endja à Béni Haroun (période commune : 1973/74-2000/01)	7725,00	434,00	4787447.47	619.77

Au final, la valeur de TSS calculée sur les sous bassins des oueds Rhumel et Endja au barrage Béni Haroun est de 619.77 t/km<sup>2</sup>/ an (Tableau 52). Si on doit tenir compte du charriage, généralement estimé à 15 % du transport en suspension (Remini *et al*, 2004; Louamri, 2013 Louamri et al, 2010), la dégradation spécifique du bassin versant atteindrait 712.74 t/km<sup>2</sup>/ an.

## 5.2. L'envasement du barrage d'après la bathymétrie de 2013

La quantification des sédiments s'appuie sur les levés bathymétriques par échosondeur (Abdellaoui et al, 2002).

Le barrage de Béni Haroun considéré comme le plus grand barrage en Algérie, a connu un seul levé bathymétrique depuis sa mise en eau. Ce levé a été réalisé par le Laboratoire des Études Maritimes (L.E.M) du 22 Juillet au 23 septembre 2013, soit en 2 mois. Pour faire le levé bathymétrique complet de la cuvette de la retenue de Béni Haroun, il était nécessaire de déterminer près de 180645 points pour une surface totale à la cote des plus hautes eaux de 5611.65 ha (ANBT, 2014). La surface totale au niveau normal de la retenue est de 3845.65 ha (ANBT, 2014; Toumi et Rémini, 2018). Les profils bathymétriques ont été levés avec un intervalle de 50 m dans la zone des 1000 m de la digue et un intervalle de 100 m au-delà de cette limite.

Les résultats de cette campagne bathymétrique ont révélé que la capacité initiale du barrage de Béni Haroun qui était de 963 hm<sup>3</sup>, s'est réduite à 880 hm<sup>3</sup>, durant la période entre 2003 et 2013, ce qui donne un envasement total de 83 millions de m<sup>3</sup>, soit une perte totale de la capacité initiale du barrage de 8.62 %. L'apport moyen annuel en sédiments est de 8.3 hm<sup>3</sup>. En admettant une densité moyenne des sédiments de 1.6, ces valeurs nous donnent une dégradation spécifique de 1728 t/an /km<sup>2</sup> (Tableau 53). Cette valeur de la dégradation moyenne du bassin déduite des mesures bathymétriques est donc beaucoup plus forte que celle calculée plus haut à l'aide des mesures hydrométriques (712.74 t/km<sup>2</sup>/ an).

Ceci confirme la sous-estimation de l'envasement des barrages en se basant uniquement sur les données des transports solides des oueds, remarque déjà évoquée dans des travaux précédents (Louamri et al, 2010; Louamri, 2013; Bourouba, 1997 et 1998).

Par ailleurs, la campagne bathymétrique de 2013 a permis de revoir à la hausse les résultats de l'étude préliminaire du barrage de Béni Haroun qui a estimé, sur la base des débits solides des oueds Endja et Rhumel, le taux d'envasement du réservoir à 6 hm<sup>3</sup>/ an, soit une dégradation spécifique du bassin de 1 205 t /km<sup>2</sup>/an (Agence Nationale des Barrages et des transferts, Béni-Haroun, 2006).

Tableau 53: Perte de la capacité de stockage du barrage de Béni Haroun

Caractéristique	Mise en eau: Août 2003	Bathymétrie 2013 (source LEM)
Niveau maximum du barrage (m)	216.30	216.30
Niveau des plus hautes eaux (m)	214.80	214.80
Niveau de la retenue normal (m)	200	200
Superficie à la cote normale (ha)	3768	3846
Capacité à la cote normale (hm <sup>3</sup> )	963	880
Envasement (hm <sup>3</sup> )	0	83
Envasement moyen annuel (hm <sup>3</sup> /an)	0	8.3
Taux d'envasement (%)	0	8.62
Taux d'envasement annuel moyen (%/an)	0	0.862

La prévision des dépôts des sédiments dans une retenue de barrage, situé dans la région du Maghreb, est extrêmement importante pour les ingénieurs et les gestionnaires de barrages (Rémini et Hallouche, 2005).

Le volume mort est estimé entre les cotes 110 m (NGA) et 172 m (NGA), ce qui correspond à un volume de 240 hm<sup>3</sup>. La tranche du volume mort sera comblée chaque année d'un volume moyen de vase de 8,3 hm<sup>3</sup> et par conséquent le toit (172 m) de cette tranche serait atteint dans une durée d'environ 29 ans (soit : 240/8,3= 28.9) depuis la première mise en eau de cet ouvrage. Le volume mort serait comblé à l'horizon 2032.

Au-delà de cet horizon de 2032, le cumul de sédimentation risque de combler la totalité du volume utile du barrage de Béni Haroun (723 millions de m<sup>3</sup>) dans une durée de 87 ans (soit : 723 /8.3 = 87), c'est à dire à l'horizon 2119 (Figure 152).

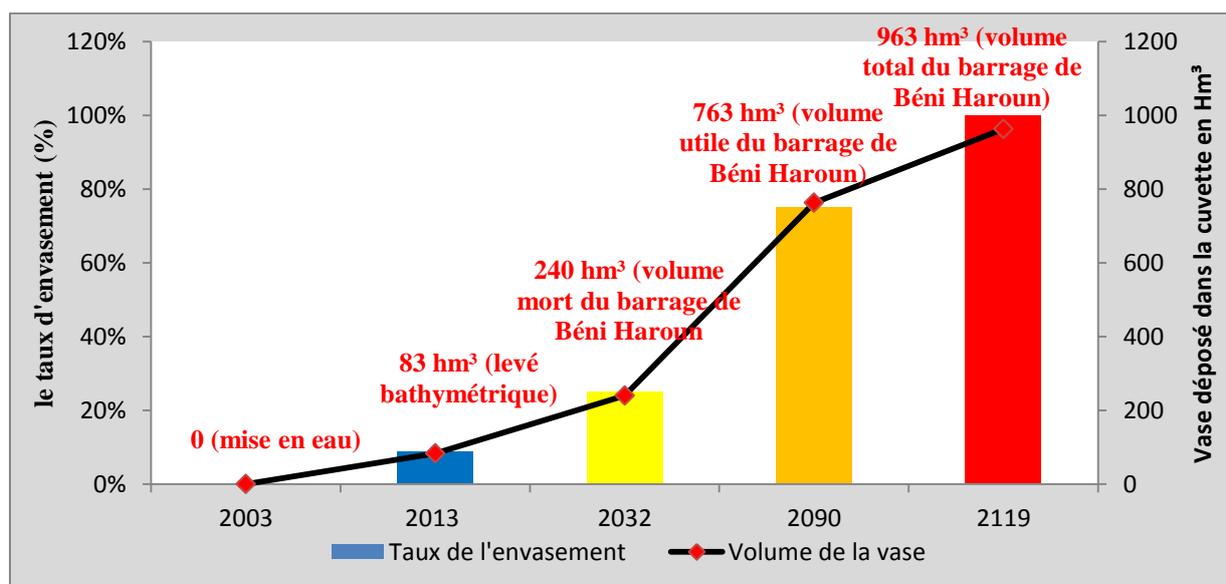


Figure 152: Prédiction du taux de sédimentation et du volume de la vase déposée dans la cuvette du barrage Béni Haroun

De ce fait, la durée de vie de ce barrage demeure conditionnée par un entretien et une gestion saine du barrage (utilisation de la vidange de fond pour la chasse des sédiments, particulièrement en périodes de crues) et également par l'accélération des travaux de protection biologique et technique du bassin versant.

### 5.3. Comparaison avec les barrages de l'Est Algérien

D'après la bathymétrie de 2014, les 21 barrages recensés dans l'Est Algérien ont perdu environ 317.56 hm<sup>3</sup> de leur capacité depuis leur mise en service, ce qui représente 11.98 % de la capacité totale de stockage.

Tableau 54: Résultats de l'envasement des barrages de l'Est Algérien d'après les données ANBT de 2014 (source Rémini, 2017)

Barrage	Wilaya	Oued	Année de mise en eau	Capacité initiale (hm <sup>3</sup> )	Capacité en 2014 (hm <sup>3</sup> )	Volume d'envasement en 2014 (hm <sup>3</sup> )	Taux d'envasement en 2014 (%)	Taux d'envasement annuel moyen (%/an)
Zerdezaz	Skikda	Safsaf	1945	31	13,02	17,98	58	0.84
Erraguène	Jijel	Djendjen	1963	200	160	40	20	0.39
Cheffia	El Tarf	Bounamoussa	1965	171,99	155,74	16,25	9,5	0.19
Bougous	El Tarf	Bougous	2010	65	59,06	5,94	9.1	<b>2.27</b>
Guenitra	Skikda	Fessa	1984	125	113,12	11,88	9,5	0.31
Béni zid	Skikda	Béni zid	1993	40	37,8	2,2	5,5	0.26
Zit Emba	Skikda	El Hammam	2001	117,39	112,69	4,7	4	0.30
El Agrem	Jijel	El Agrem	2002	34	27,71	6,29	18,5	1.54
K'sob	M'Sila	K'sob	1940	30	9,65	20,35	67,83	0.91
Foum El Gherza	Biskra	El Abiod	1950	47	11.28	35.72	76	1.18
Babar	Khenchela	El Arab	1995	41	36,49	4,51	11	0.57
Fontaine des Gazelles	Biskra	El Hai	2000	55,5	52,17	3,33	6	0.42
Foum El Gueiss	Khenchela	El Gueiss	1939	3	0.3	2.7	90	1.2
Koudiat Medouar	Batna	Chemora	2003	69	64,17	4,83	7	0.63
Ain Dalia	Souk Ahras	Medjerda	1987	82	72,57	9,43	11,5	0.42
<b>Béni Haroun (*)</b>	<b>Mila</b>	<b>Kébir Rhumel</b>	<b>2003</b>	<b>963</b>	<b>880</b>	<b>83</b>	<b>8,62</b>	<b>0.862</b>
Hammam Grouz	Mila	Rhumel	1987	45	36,9	8,1	18	0.66
Boussiaba	Mila	Jijel	2010	120	108	12	10	2.5
Hammam Debagh	Guelma	Bouhamdane	1987	200	183.5	16.5	8.25	0.30
Ain Zada	Bordj Bou Arreidj	Boussellam	1986	125	118,75	6,25	5	0.17
Tichy Haf	Bejaia	Boussellam	2007	80	74.4	5.6	7	1

(\*) Levés bathymétriques effectués en 2013 (juillet-septembre)

Les volumes de sédiments oscillent entre 83 hm<sup>3</sup> (Béni Haroun) et 2.2 hm<sup>3</sup> (Béni Zid). De par sa grande capacité, le barrage de Béni Haroun connaît une perte plus importante que les autres barrages de la région (Tableau 54). Cependant, en termes de taux d'envasement annuel moyen (%/an), il se place à la 8<sup>ème</sup> place. Le taux d'envasement annuel est supérieur à 1 %/an pour les barrages de Boussiaba, Bougous, El Agrem, Foum El Gueiss, Foum El Gherza et Tichy Haf, entre 0.5 et 1 %/an pour les barrages de K'sob, Béni Haroun, Zerdezaz, Hammam Grouz, Koudiat Medouar et Babar, et inférieur à 0.5 % pour les autres barrages.

L'envasement de certains barrages se trouve dans un état très avancé. Nous pouvons citer l'exemple de barrage de Foum El Gherza (Remini et al, 2015). Ce dernier construit en 1948 sur l'oued El Abiod, d'une capacité initiale de 47 hm<sup>3</sup>, représentant une forte sédimentation dès le début de sa réalisation. En deux ans (1948-1950), le batardeau amont ayant été complètement comblé (Remini, 2000). D'après le levé bathymétrique 2014, l'envasement du barrage de Foum El Gherza a continué son accroissement pour atteindre la valeur de 35.72 hm<sup>3</sup> soit un taux de sédimentation de 76%.

Le petit barrage de Foum El Gueiss construit au début des années 30 d'une capacité initiale de 3 hm<sup>3</sup> il est envasé à plus de 90 % de sa capacité totale. Les barrages El Agrem, Zit Emba, Fontaines Des Gazelles et Béni Zid connaissent des volumes de sédiments très faibles d'après la bathymétrie de 2014 (Tableau 54).

#### **5.4. L'envasement des barrages, un phénomène préoccupant dans les pays du Maghreb**

L'envasement des retenues des barrages est un phénomène préoccupant des pays du Maghreb. La Tunisie compte vingt-neuf barrages dont la perte de capacité peut atteindre 17 % de leur capacité globale initiale (Ben Mammou et Louati, 2007). Selon Ben Mammou (2007), les volumes moyens annuels des sédiments dans les retenues des barrages de la Tunisie selon des campagnes bathymétriques différentes varient de 0.02 hm<sup>3</sup> (barrage de Bezirk) à 6.6 hm<sup>3</sup> (barrage de Sidi Salem). Au Maroc, la sédimentation provoque une perte en eau de 700 m<sup>3</sup> soit une diminution de 0.5 % par an de la capacité totale des retenues (Boukhchane, 2001). D'après Lahlou (1994), les 23 grands barrages en exploitation au Maroc perdent annuellement 50 hm<sup>3</sup> de leur capacité de stockage soit un taux d'envasement de 6.2 %. Par ailleurs, Abdellaoui et al (2002) indiquent dans leur étude que l'envasement total du barrage Saboun (Nord- Ouest du Maroc) depuis la mise en eau en 1991 est de l'ordre de 196 010 m<sup>3</sup> soit une perte de la capacité initiale du barrage de 17.8 % qui correspond à un apport moyen annuel en sédiments de l'ordre de 21 779 m<sup>3</sup>.

#### **5.5. Stratégie de protection des barrages contre l'envasement**

A cause de l'envasement, la durée de vie des barrages est limitée, elle dépend de son temps de remplissage en matériaux solides. La menace ne s'arrête pas seulement sur la rentabilité mais aussi sur la sécurité de l'ouvrage, Plusieurs techniques peuvent être utilisées par les gestionnaires pour limiter l'envasement des barrages. Ces techniques sont les suivantes :

**-Le reboisement, la restauration des sols la formation des banquettes, la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds** sont des actions nécessaires pour lutter contre

l'envasement. Dans le cadre de la protection du bassin du barrage de Béni Haroun, un programme spécial a été lancé par les services des forêts. Il s'agirait d'implanter 2040 arbres du pin pignon dans les berges du barrage aux cotés de Grarem Gouga, Mila et Sidi Marouane.

- **Chasse à l'Espagnole** : Elle consiste à vider complètement le barrage au début de l'automne et à le laisser vider, toutes vannes ouvertes, jusqu'aux premières pluies. La première crue enlève sans difficulté les vases de l'année non encore consolidées. L'inconvénient de cette méthode: perte d'eau, peu efficace pour les vases consolidées et ne peut être appliquée que pour les barrages à régularisation annuelle (ce qui n'est pas souvent le cas des barrages en Algérie).

Cette technique est utilisée au Maroc, la France, l'Espagne. En Algérie, par exemple le barrage de Béni Amrane d'une capacité de 15.6 hm<sup>3</sup> est armé de six vannes de vidange qui ont évacué 2.2 hm<sup>3</sup> entre 1988 et 1993 (Rémini, 2010).

- **La technique des obstacles émergés** : c'est une nouvelle approche a pour but de mieux comprendre le phénomène de dépôt de particule, elle consiste à avoir un canal de section rectangulaire vitré, une série d'obstacle de bois de forme cubique et une quantité de vase (Remini, 2011)

- **La surélévation des barrages** : Cette méthode consiste, lorsque le taux de comblement est avancé, à élever la hauteur de la digue d'une taille variable, permettant la constitution d'une réserve supplémentaire pour compenser la perte du volume occupé par la vase (Remini, 2008).

- **La technique du soutirage** peut réduire la vitesse de sédimentation dans les retenues des nouveaux barrages. La pratique des soutirages consiste à évacuer les sédiments drainés par les courants de densité sur le fond de la retenue en utilisant des pertuis de vidange (vannettes de dévasement ou vanne de fond).

- **le dragage des retenues**: une opération qui consiste à extraire les matériaux situés sur le fond d'un plan d'eau. Les objectifs de cette opération sont de procéder à des travaux d'excavation sous l'eau dans les retenues des barrages, extraire les sédiments immergés tels que sable, gravier, argile, les métaux précieux et les agents fertilisants, et enfin la navigation gênée ou rendue impossible par l'envasement (Serbah, 2011). A travers l'expérience algérienne, le dragage s'est avéré une solution sure mise à part les difficultés de mise en dépôt et le coût. Le dragage des retenues de barrages a été pratiqué environ sur huit barrages algériens durant l'histoire d'hydraulique algérienne. Il s'agit des barrages de Sig, Cheurfas , Hamiz, Ksob, Zardezas, Merdja Sidi Abed, Fergoug (Remini et al, 2009; Remini et Hallouche, 2004).

- **la réalisation du barrage de décantation** : une méthode pour réduire l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage.

## **CONCLUSION**

Le bassin versant à l'amont du barrage Béni Haroun est plutôt dominé par un climat semi-aride qui se caractérise par une pluviométrie spatialement très contrastée et très irrégulière aux échelles interannuelle, saisonnière et mensuelle, voire journalière. Cette irrégularité a un impact direct sur l'action érosive et notamment sur le transport solide en suspension. Ce dernier dépend de plusieurs facteurs dont l'agressivité des averses, l'état du sol et la turbulence de l'écoulement.

Le bassin versant du Rhumel-Endja se caractérise par des altitudes allant de 15 à 1729 m, et la majorité des formations du bassin ont une perméabilité assez faible, avec une couverture végétale discontinue. Le substratum joue un rôle très important à l'échelle des sous bassins. En effet, nous constatons une augmentation de l'érodabilité avec l'affleurement des formations meubles à relief accidenté. Cette observation est particulièrement valable pour le sous bassin de l'oued Endja.

L'étude des débits solides a nécessité le traitement d'une chronique de mesures directes de la concentration en matières en suspension (MES) et des écoulements liquides, instantanés et journaliers, fournie par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) aux stations de Grarem (bas Rhumel) et de Douar Tassadane (haut bassin de l'oued Endja). Les informations relatives aux levés bathymétriques de l'ANBT réalisés sur le barrage de Béni Haroun en 2013 sont également exploitées.

Dans ce contexte méditerranéen semi-aride, une très forte variabilité des transports solides se manifeste à l'échelle interannuelle, et la quasi-totalité de l'apport solide est réalisée pendant les saisons d'hiver et d'automne. Lors de l'année très pluvieuse de 2002/03, l'oued Endja supérieur à la station de Douar Tassadane a transporté 13,633 millions de tonnes, soit une dégradation spécifique moyenne du bassin de l'ordre de 14201 t/km<sup>2</sup>/an.

L'année 1984/85 a été exceptionnelle sur l'oued Rhumel à Grarem, bassin relativement moins érodable que celui de oued Endja. L'apport solide a été estimé à 14,164 millions de tonnes, soit une dégradation spécifique de 2662 t/km<sup>2</sup>/an.

La valeur moyenne de TSS calculée sur les sous bassins des oueds Rhumel et Endja au barrage Béni Haroun est de 619.77 t/km<sup>2</sup>/an (712.74 t/km<sup>2</sup>/an si on doit tenir compte du charriage). Cependant, la campagne bathymétrique réalisée en 2013 par l'A.N.B.T. a abouti à une dégradation spécifique qui s'élève à 1728 t/an /km<sup>2</sup>, valeur bien plus forte que celle calculée à l'aide des mesures hydrométriques.

Le volume de sédimentation du barrage Béni Haroun a atteint, en 2013, 83 hm<sup>3</sup>, soit un envasement moyen de 8.3 hm<sup>3</sup>/an, et un taux d'envasement annuel moyen de 0.862 % par an. Par conséquent le toit (172 m) de cette tranche serait atteint dans une durée d'environ 29 ans (soit : 240/8,3= 28.9) depuis la première mise en eau du barrage et le volume mort serait comblé à l'horizon 2032. Le cumul de sédimentation risque de combler la totalité du volume utile du barrage de Béni Haroun à l'horizon 2119.

Pour lutter contre l'envasement, la restauration des sols la formation des banquettes, la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds sont des actions nécessaires pour lutter contre l'envasement. Aussi, la réalisation des techniques de chasse de la vase et la maîtrise des techniques de soutirage sont des facteurs déterminants pour prolonger la durée de vie du barrage.

Enfin, ce phénomène d'envasement, en plus de ses effets sur la réduction de la capacité utile de la retenue, il pose des problèmes sur la sécurité de l'ouvrage, l'envasement des canaux d'irrigation et la dégradation de la qualité de l'eau. C'est cet aspect qualitatif de l'eau de Béni Haroun que nous allons aborder au prochain chapitre.

---

**CHAPITRE 6**

**QUALITE DES EAUX DU BARRAGE DE BENI HAROUN**

---

## INTRODUCTION

En Algérie, en raison de l'augmentation incessante des besoins en eau douce qui dépassent les ressources naturelles conventionnelles, la mobilisation des eaux superficielles reste l'une des préoccupations capitales des pouvoirs publics. Ainsi, un programme de construction de barrages a été lancé dès les années 1980. Cependant, ces eaux de surface sont vulnérables face aux diverses pollutions et sont souvent de qualité médiocre. Elles peuvent contenir des quantités non négligeables en matières organiques naturelles telles que les substances humiques mais aussi des composés organiques issus de divers rejets polluants ou de pratiques agricoles intensives (Achour, 2001). C'est la raison pour laquelle l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) a installé un réseau de mesures physico-chimiques des eaux le long des oueds (Berkat, 2016). Aussi les Agences de Bassin Hydrographique (ABH) ont établi en 2009 une grille de classification de la qualité des eaux superficielles.

Le développement socio-économique et l'urbanisation rapide ont eu un impact néfaste sur la qualité des ressources en eau. De nombreux cas de pollution industrielle et urbaine ont été observés en l'occurrence au niveau des barrages, ces derniers étant l'exutoire de rejets extrêmement polluants (Harrat et Achour, 2010). Plusieurs études se sont intéressées à la qualité physico-chimique des eaux des barrages en Algérie (Touhari et al, 2014; Halimi, 2008; Mihoubi, 2009; Harrat et Achour, 2010 et 2011; Ouahchia et al, 2015; Merabet, 2010).

L'objectif de ce dernier chapitre est de suivre et d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux brutes de barrage de Béni Haroun, par la mesure de la température, du pH, de la conductivité électrique, du résidu sec,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , matière en suspension (MES), demande chimique en oxygène (DCO), demande biologique en oxygène pendant 5 jours ( $\text{DBO}_5$ ), matière organique (MO) et oxygène dissout (OD). Nous avons utilisé les données de la période de 2005 à 2014. Pour des raisons de difficulté d'accès aux données, nous n'avons pas pu avoir les données postérieures à 2014, exceptées celles de 2018 utilisées à titre de comparaison, avec la série décennale. Ces données sont effectuées par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT), à raison de douze prélèvements par année.

## 1. DEFINITION, PRINCIPE ET METHODE DE MESURE

### 1.1. Les paramètres physicochimiques

#### 1.1.1. Température ( $T$ °C)

La température de l'eau joue un rôle important en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz. Les vitesses des réactions chimiques et biochimiques sont accrues par la température d'un facteur 2 à 3 pour une augmentation de température de 10°C. Dès que l'on augmente la température de l'eau, l'activité métabolique des organismes aquatiques est alors accélérée. La valeur de ce paramètre est influencée par la température ambiante mais également par d'éventuels rejets d'eaux résiduaires chaudes (Rodier, 1984).

La mesure de la température a été effectuée sur le terrain en utilisant un thermomètre gradué au 1 /10 et en respectant les consignes de (Rodier et al, 2005). La température de l'eau a été

mesurée sur le site de prélèvement « barrage ». La lecture a été faite après une immersion de 10 minutes du thermomètre à environ 15 cm de profondeur. Les résultats sont exprimés en °C.

### 1.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH de l'eau est défini à l'aide de la concentration des ions ( $H^+$ ) contenues dans la solution. Le pH est un facteur qui influence énormément la cinétique des réactions chimiques (ammonification, nitrification, dénitrification). Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés (Beaudry et al, 1984). Des pH faibles augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique par contre des pH élevés augmentent les concentrations de l'ammoniac (Lounnas, 2008)

Le pH est pris avec un pH mètre électrométrique modèle (skalar), en plongeant l'électrode dans l'eau à environ 6 à 8 cm sous la surface. Le pH mètre est étalonné avec des solutions étalons pH 4, 7 et pH 10 à 20°C. Les résultats sont exprimés en unités pH.

### 1.1.3. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique d'eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm<sup>2</sup> de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Généralement l'on considère que la situation est particulière ou anormale au-delà de 2000 µS/cm et une conductivité de l'eau supérieure à 1500 µS/cm classe alors une eau comme difficilement utilisable dans les zones irriguées. Pour les usages industriels, l'interprétation des résultats doit se faire en fonction d'une analyse complète de l'eau retenons, pour le contrôle des rejets industriels, que la conductivité ne reflète qu'une minéralisation globale et que l'identification des éléments chimiques en cause est assez difficile (Rodier et al. 2009) (Tableau 55).

Tableau 55: Relation entre la conductivité électrique et la minéralisation (Rodier et al. 2009)

<i>Conductivité électrique</i>	<i>Taux de minéralisation</i>
CE < 100 µs /cm	minéralisation très faible
100 < C.E < 200 µs /cm	minéralisation faible
200 < C.E < 333 µs / cm	minéralisation moyenne
333 < C.E < 666 µs / cm	Minéralisation moyenne accentuée
666 < C.E < 1000 µs/ cm	Minéralisation importante
C.E > 1000 µs/cm	Minéralisation élevée

### 1.1.4. Les Résidus Secs

Le taux du résidu sec de l'eau non filtrée permet de peser la teneur en matières dissoutes ou salinité totale (qui représente la majeure partie) et la teneur en matières en suspension. Selon (Rodier et al, 2005), le résidu sec est la quantité de la matière solide dans l'eau, autrement dit :

la somme des matières en solution et en suspension. Ces dernières profèrent à l'eau sa couleur brunâtre et parfois sombre, ce qui conditionne la pénétration de la lumière dans le milieu et qui influence ainsi la faune et la flore aquatique.

#### 1.1.5. Calcium ( $Ca^{2+}$ )

Le calcium est le cinquième élément le plus abondant dans la nature. La concentration du calcium dans les eaux est liée principalement à deux origines naturelles :

- la dissolution des formations carbonatées ( $CaCO_3 = Ca^{++} + CO_3^-$ ).
- soit par dissolution des formations gypsifères ( $CaSO_4 \cdot 2(H_2O) = Ca^{++} + SO_4^- + 2(H_2O)$ ).

Une teneur faible en calcium peut être expliquée par un échange de base contre le sodium ou à l'absence de minéraux riches en calcium faiblement altérables, par contre une teneur élevée en calcium provient de la mise en solution du gypse ou de l'anhydrite (Mekaoussi, 2013).

#### 1.1.6. Magnésium ( $Mg^{2+}$ )

Le magnésium est le huitième élément le plus abondant dans la nature. Les principales sources du magnésium contenu dans ces eaux sont les minéraux ferromagnésiens des roches ignées et les carbonates de magnésium des roches sédimentaires (Day, 1963). Dans les régions riches en roches magnésiques, l'eau peut contenir des concentrations de 10 à 50 mg/l de cet élément. Les sulfates et les chlorures de magnésium sont très solubles et l'eau en contact avec la roche mère peut contenir plusieurs centaines de milligrammes de magnésium par litre (Becker et al, 1972). C'est aussi un élément de la dureté de l'eau dont la teneur dépend des terrains traversés. Indispensable pour la croissance, il intervient comme élément plastique dans l'os et comme élément dynamique dans les synthèses enzymatiques et hormonales. Les concentrations de magnésium ne sont pas tellement dépendantes des activités humaines, donc le magnésium n'est pas utilisé comme indicateur de stress lié à la pollution. Son apport journalier nécessaire à l'adulte est de 200 à 300mg. Toutefois, à partir de certaines teneurs, il donne à l'eau une amertume désagréable (Rodier, 1972)

#### 1.1.7. Chlorure ( $Cl^-$ )

Les chlorures sont fréquents dans les réserves d'eaux douces à un taux de 10 mg/l à 100 mg/l. Une forte teneur en chlorures peut indiquer une pollution par des eaux usées (Nalco, 1983). Les chlorures ( $Cl^-$ ) doivent être particulièrement suivis, leurs teneurs dans eaux de surface sont extrêmement variées, et sont principalement liées à la nature des terrains traversés (Rodier, 1984).

Le dosage des chlorures se fait selon la méthode colorimétrique. Le thiocyanate mercurique réagit en présence d'ions chlorures par double décomposition :



Il se forme du chlorure mercurique insoluble et il y a libération d'ions sulfocyanure, qui en présence d'ions ferriques donnent une coloration rouge intense, proportionnelle aux ions SCN et donc aux ions  $Cl^-$  (Rodier et al. 2005). Les résultats sont exprimés en mg/l de chlorures.

### 1.1.8. Sulfate ( $SO_4^{2-}$ )

Les sulfates sont des composés naturels des eaux. Ils sont liés aux cations majeurs tels que le calcium, le potassium et le sodium. Ils proviennent de certains minéraux, en particulier du gypse ou apparaissent à partir de l'oxydation des minéraux sulfureux (Bremond *et al*, 1973 ; Rodier, 1984). L'origine des sulfates dans les eaux sont variées : (i) naturelle sont l'eau de pluie (évaporation d'eau de mer :  $1 < c < 20$  mg/l), et la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment le gypse ( $CaSO_4$ ), mais également de la pyrite ( $FeS$ ) et plus rarement de roches magmatiques (galène, blende, pyrite). (ii) anthropique sont la combustion de charbon et de pétrole qui entraîne une production importante de sulfures (qu'on retrouve dans les pluies), et l'utilisation d'engrais chimiques (El Wartiti *et al*, 2012).

Le dosage des sulfates se fait par la méthode turbidimétrique. Les ions  $SO_4^{2-}$  sont précipités par le chlorure de baryum sous forme de sulfate de baryum très peu soluble selon la réaction chimique suivante :  $Ba^{+++}SO_4^{2-} \longrightarrow BaSO_4$

## 1.2. Les substances indésirables

### 1.2.1. Turbidité

Même occasionnelle, la turbidité est un caractère très important, car une eau susceptible d'être trouble peut être suspecte du point de vue bactériologique. Elle permet de préciser les informations visuelles de la couleur de l'eau. La turbidité est causée par les particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...). Elle se mesure à l'aide d'un turbidimètre et peut être exprimée en : 1 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) = 1 JTU (Jackson TU) = 1 FTU (Formazin TU) (Rodier *et al*, 2009). La turbidité peut être importante dans les aquifères karstiques. Elle occasionne des désagréments dans l'aspect de l'eau et sa saveur (goût de terre). Les pics de turbidité suivent les fortes précipitations (Gouaidia, 2008).

### 1.2.2. Matières en suspension

Dans les eaux superficielles non polluées, les matières en suspension ont surtout pour origine le bassin versant sous l'effet de l'érosion naturelle, les détritiques d'origine organique (débris végétaux...etc.) et le plancton. La nature des MES est donc souvent minérale et leur taux relativement bas sauf en périodes de crues des cours d'eau. Les eaux naturelles ne sont jamais exemptes de matière en suspension et on admet une teneur inférieure à 30 mg/l (Afri-Mehannaoui, 1998).

La détermination des matières en suspension s'effectue par centrifugation. L'eau à analyser est centrifugée à 3000 tr /min pendant 20 minutes. Le culot recueilli, séché à 105°C pendant 1h 30 min à 2h. Le taux des matières en suspension est exprimé en mg /l (Berkat, 2016).

### 1.2.3. Oxygène dissous

Les concentrations en oxygène dissous, constituent avec les valeurs de pH, l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. Dans les eaux de surface,

l'oxygène dissous provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. La concentration en oxygène dissous varie de manière journalière et saisonnière car elle dépend de nombreux facteurs tels que la pression partielle en oxygène de l'atmosphère, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriments. La concentration dépend également de la vitesse d'appauvrissement du milieu en oxygène par l'activité des organismes aquatiques et les processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans l'eau. Une teneur en oxygène inférieure à 1 mg d'O<sub>2</sub> par litre d'eau, indique un état proche de l'anaérobiose. Cet état se produit lorsque les processus d'oxydation des déchets minéraux, de la matière organique et des nutriments consomment plus d'oxygène que celui disponible. Une faible teneur en oxygène dissous provoque une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui se libèrent des sédiments (Rodier et al. 2009).

Mesuré au laboratoire par la méthode de WINKLER. En milieu alcalin, l'oxygène dissous forme avec de manganèse (II) hydroxyde (Mn(OH)<sub>2</sub>) un précipité brun d'hydroxyde manganique (III) (MnO(OH)<sub>3</sub>). La réduction de ce dernier en milieu acide en présence d'un excès d'iodure libre l'iode qui est dosé par le thiosulfate de sodium (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et en utilisant l'empois d'amidon comme indicateur. Les résultats sont exprimés en mg/l d'O<sub>2</sub> et en pourcentage de saturation (AFNOR, 1975).

#### **1.2.4. L'Azote ammoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)**

L'azote ammoniacal est fréquent dans les eaux superficielles. Il a pour origine de décomposition de la matière organique végétale et animale des cours d'eau. La nitrification des ions ammonium se fait en milieu aérobie faible. En général, l'ammonium se transforme assez rapidement en nitrites et nitrates par oxydation bactérienne (Brémond et al, 1973). Lorsque le pH augmente, on retrouve de l'ammoniac, qui est un gaz soluble dans l'eau et toxique pour la vie aquatique. Des problèmes apparaissent à partir d'une concentration de 0,1 mg NH<sub>3</sub><sup>+</sup> / l (De Villers et al, 2005).

#### **1.2.5. Les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

Les nitrates se trouvant naturellement dans les eaux, proviennent en grande partie de l'action de l'écoulement des eaux sur le sol constituant le bassin versant (Barkat, 2016). Les eaux naturelles non polluées contiennent généralement peu de nitrates. Les nitrates présents dans l'eau peuvent provenir de sources indirectes ou directes (De Villers et al, 2005). Lors du rejet d'azote organique (protéines, acides amines...), les molécules sont tout d'abord transformées en ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) qui est ensuite oxydé en nitrites puis en nitrates sous l'action de bactéries nitrifiantes. Ces processus d'oxydation, également appelés «nitrification», sont très sensibles à la présence de matières toxiques (métaux, pesticides) et aux températures basses (De Villers et al, 2005).

#### **1.2.6. Les Nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)**

Les nitrites constituent une étape importante dans la métabolisation des composés azotés ; ils s'insèrent dans le cycle de l'azote entre l'ammoniac et les nitrates. Leur présence est due, soit

à l'oxydation bactérienne de l'ammoniac, soit à la réduction des nitrates. Ils ne représentent qu'un stade intermédiaire et sont facilement oxydés en nitrates (par voie chimique et bactérienne) (Merabet, 2010).

Des concentrations élevées en nitrites, témoignent souvent de la présence de matières toxiques. Les nitrites sont surtout nuisibles pour les jeunes poissons. On considère que la situation est très critique à partir d'une concentration de plus de 3 mg  $\text{NO}_2^-/\text{l}$ . En absence d'oxygène, des bactéries anaérobies transforment les nitrates et produisent de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) ou de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) (De Villers et al, 2005).

#### **1.2.7. Les phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ )**

Les phosphates peuvent être d'origine naturelle (produit de décomposition de la matière vivante, lessivage de minéraux) mais, à l'heure actuelle, leurs présences dans les eaux sont plutôt d'origine anthropique (engrais, poly phosphates des formulations détergentes, eaux traités aux phosphates, industrie chimique...) (Brémond et al, 1973). Le contenu en phosphore total comprend non seulement les orthophosphates mais également les poly phosphates et les phosphates organiques. L'eutrophisation peut se manifester à des concentrations relativement basses en phosphates (50  $\mu\text{g P/l}$ ) (De Villers et al, 2005).

#### **1.2.8. Demande biochimique en oxygène ( $\text{DBO}_5$ )**

DBO est considérée parmi les mesures globales qui permettent de caractériser les eaux résiduaires et les eaux de surface. La demande biochimique en oxygène en 5 jours ( $\text{DBO}_5$ ), à 20°C et à l'obscurité. Le rejet des matières organiques fermentescibles par un émissaire d'égout, par exemple, provoque immédiatement une déplétion de la teneur en oxygène dissous par dégradation sous l'action des bactéries aérobies, qui va s'atténuer dans le sens du courant (Ramade, 2002).

#### **1.2.9. Demande chimique en oxygène (DCO)**

La demande chimique en oxygène est la quantité d'oxygène nécessaire pour obtenir une oxydation complète des matières organiques et minérales présentes dans l'eau. Certaines matières contenues dans l'eau sont oxydées par un excès de dichromate de potassium, en milieu acide en présence de sulfate d'argent et de sulfate de mercure. L'excès de dichromate de potassium est dosé par le sulfate de fer et d'ammonium (Rodier et al, 2005).

#### **1.2.10. La toxicité du fer**

La toxicité du fer sur la vie aquatique est difficile à préciser, car elle est fonction de l'état chimique de cet élément ; le fer ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) étant plus toxique que le fer ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ), et de la présence de précipité d'hydroxyde de fer qui tend à se déposer sur les branchies des poissons et à entrainer leur colmatage (Info-Tox, 1999).

#### **1.2.11. La toxicité du manganèse**

Le manganèse présente une action toxique faible et en général, il en faut des quantités déjà importantes pour créer des difficultés écologiques graves. Chez les poissons, les sels de

manganèse agissent probablement comme toxiques sur le système neurologique (Bremond et Vuichard, 1973).

En résumé, la toxicité des métaux lourds reste toujours inquantifiable, suite aux effets nocifs qu'elle cause pour les organismes aquatiques, car ces contaminants possèdent la caractéristique d'être non biodégradables au fil du temps, malgré le fait que certains parmi eux sont indispensables mais ils peuvent perdre ces critères lorsque leurs concentrations dépassent certaines limites.

### **1.3. Evaluation de la qualité des eaux de surface**

#### ***1.3.1. Grille de qualité des eaux brutes du barrage***

L'appréciation de la qualité des eaux repose sur la comparaison des teneurs en divers éléments chimiques analysés à des normes ou seuils (Tableau 56). L'ensemble des seuils pour les paramètres pris en compte constitue une grille de qualité, grâce à laquelle il est possible d'attribuer une classe de qualité des eaux brutes du barrage.

Pour une meilleure représentation des différents niveaux de pollution des eaux, nous avons attribué une couleur par classe qui définit une grille adoptée par l'ANRH:

-classe 1: eau de bonne qualité, utilisée sans exigence particulière, considérée comme exempte de pollution, apte à satisfaire tous les usages possibles, même les plus exigeants. Elle est représentée graphiquement par la couleur bleue.

-classe 2: eau de moyenne qualité, utilisée après un simple traitement. Elle peut néanmoins satisfaire tous les usages et ne requiert qu'un traitement simple pour l'approvisionnement en eau potable d'un réseau d'adduction urbain. Elle est représentée en jaune.

-classe 3: eau de qualité médiocre, suffisante pour l'irrigation et les usages industriels possibles, mais des traitements sévères sont requis pour la potabilisation, l'utilisation est tolérable pour abreuver les animaux domestiques. Elle est représentée en orange.

-classe 4: Pollution excessive, ne peut être utilisée qu'après des traitements spécifiques et très onéreux. L'usage est tolérable pour l'irrigation des cultures, l'utilisation est impossible pour les réseaux d'adduction d'eau potable. Elle est représentée en rouge.

Tableau 56: Grille de qualité des eaux des barrages adoptée par l'ANRH (2009)

	Unité	Classe 1 Bonne	Classe 2 Moyenne	Classe 3 Mauvaise	Classe 4 Très mauvaise
PH		6.5 – 8.5	6.5-8.5	8.5-9	>9 et <6.5
Résidu Sec		300 - 1000	1000 - 1200	1200 - 1600	> 1600
MES	mg/l	0-30	30-75	75-100	> 100
Ca <sup>2+</sup>	mg/l	40 - 100	100 - 200	200 - 300	> 300
Mg <sup>2+</sup>	mg/l	< 30	30 - 100	100 - 150	> 150
Na <sup>+</sup>	mg/l	10 - 100	100 - 200	200 - 500	> 500
Cl <sup>-</sup>	mg/l	10 - 150	150 - 300	300 - 500	> 500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	50 - 200	200 - 300	300 - 400	> 400
Oxygène diss	%	90 - 100	50 - 90	30 - 50	< 30
DBO <sub>5</sub>	mg/l O <sub>2</sub>	< 5	5-10	10-15	> 15
DCO	mg/l O <sub>2</sub>	< 20	20 - 40	40 - 50	> 50
MO	mg/l	< 5	5-10	10 - 15	> 15
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/l	≤ 0.01	0.01 - 0.1	0.1 - 3	> 3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	≤ 0.01	0.01 - 0.1	0.1 - 3	> 3
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	≤ 0.01	0.01 - 0.1	0.1 - 3	> 3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	≤ 10	10 - 20	20 - 40	> 40
Fe <sup>2+</sup>	mg/l	0 - 0.5	0.5 - 1	1 - 2	> 2
Mn <sup>2+</sup>	mg/l	0 - 0.1	0.1 - 0.3	0.3 - 1	> 1

### 1.3.2. Normes de potabilité physico-chimique

D'après les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Une eau potable du point de vue chimique, doit contenir sans excès un certain nombre d'éléments minéraux dont la présence lui confère une saveur agréable, à l'exception de ceux qui seraient des indices de pollution, ainsi que toutes autres substances toxiques (Tableau 57).

Tableau 57: Normes de potabilité des paramètres physico-chimiques (OMS, 2011)

Paramètres	Unité	Norme OMS
T eau	°C	2.5
pH	-	6.5-8.5
CE	µs/cm	1500
Rs	mg/l	1500
Ca <sup>++</sup>	mg/l	200
Mg <sup>++</sup>	mg/l	150
Cl	mg/l	≤ 250
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	≤ 250
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	≤ 50
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	≤ 0,1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	≤ 0,5
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/l	≤ 0,1
DCO	mg /l O <sub>2</sub>	30
DBO <sub>5</sub>	mg /l O <sub>2</sub>	5
O <sub>2</sub> diss	mg O <sub>2</sub> /l	5<O <sub>2</sub> ≤8
Fe	mg/l	Pas de valeur guide
Mn	mg/l	0,4

## 2. BILAN DE LA QUALITE DES EAUX DU BARRAGE DE BENI HAROUN DE 2005-2014

### 2.1. Les caractéristiques physico-chimiques des eaux

#### 2.1.1. Faciès hydro-chimiques (méthode de Piper)

Les faciès hydro-chimiques sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire la composition globale des eaux. Le faciès est déterminé par le calcul des quantités en réaction (concentrations en milligramme/l) et en tenant compte de la classification des ions (Brahmi, 2013; Gouaidia, 2008). Ce diagramme est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants et permet de comparer le chimisme des eaux et de faire une classification des échantillons d'eau analysés. Ceci est possible à l'aide de l'utilisation du diagramme de Piper établi à l'aide du logiciel DIAGRAMMES, version 5.1 - 2013, du Roland Simler Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (Simler, 2012).

L'examen du diagramme de Piper montre que toutes les eaux ont un faciès chloruré, sulfaté, calcique et magnésien (Figure 153). Ce faciès est en liaison surtout avec la géologie (carte géologique dans le chapitre 1 numéro de page 31), le climat, semi-aride au sud et humide au nord peut également influencer la composition chimique par effet de concentration lors de l'évaporation.

Le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) provient principalement de la dissolution des formations carbonatées (calcite et dolomite), qui caractérisent les faciès de plusieurs niveaux stratigraphiques au niveau de la région d'étude (ex : calcaires lacustres). Les évaporites sont présentes dans les formations du mio-pliocène et du trias évaporitique (carte géologique dans le chapitre 1 numéro de page 29).

Le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) provient généralement des formations dolomitiques par la dissolution des eaux en présence du gaz carbonique, et de la dissolution de magnésium  $\text{MgSO}_4$  dans les terrains gypsifères.

Les sulfates sont généralement liés à la présence des formations évaporitiques (Trias) qui sont généralement localisés près des affleurements du Trias (carte géologique du chapitre I numéro de page 29).

Les chlorures peuvent provenir de la contamination par les eaux usées d'origine domestique et industrielle ou de la dissolution des sels naturels par le lessivage des terrains salés. Le  $\text{Cl}^-$  est aussi un bon traceur des activités anthropiques.

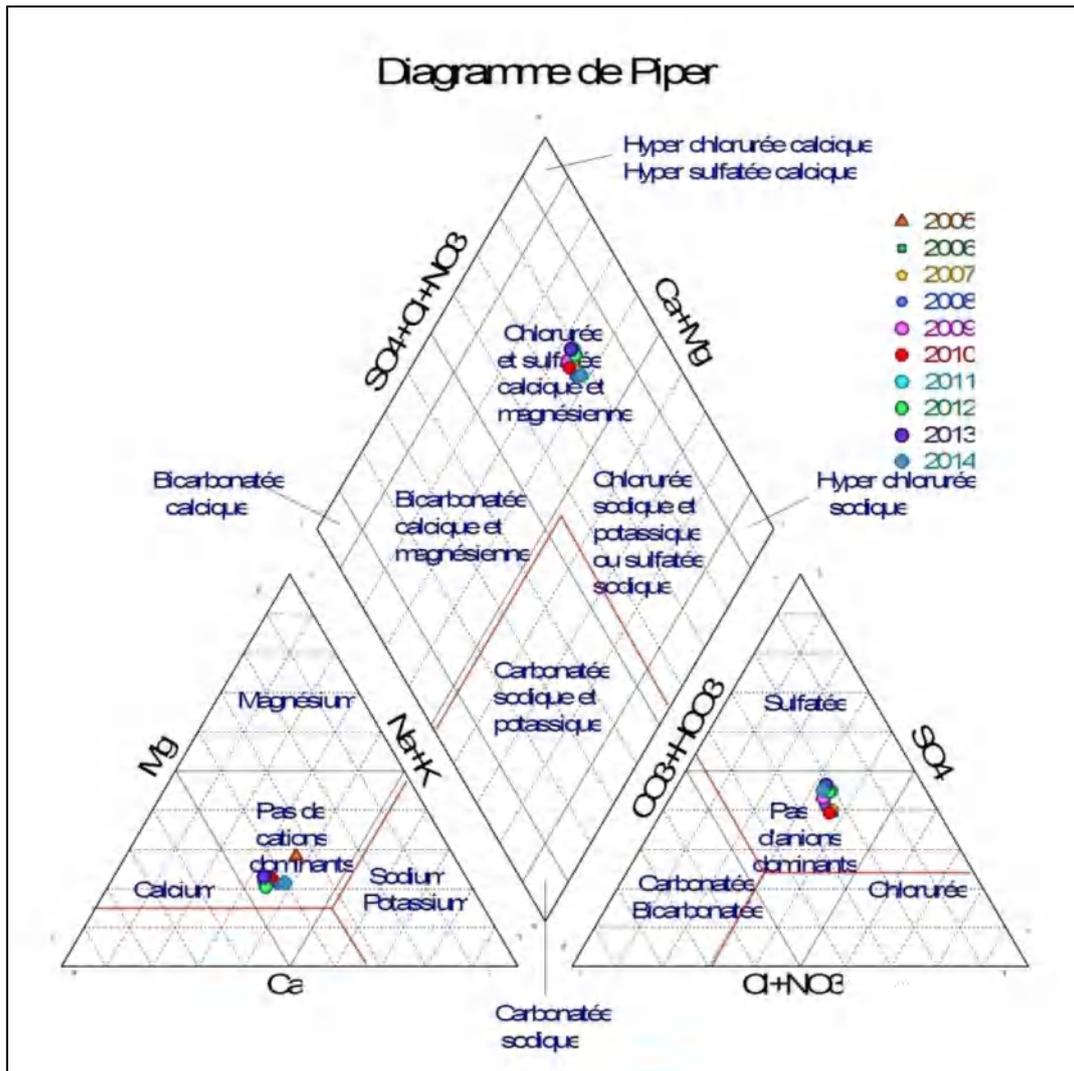


Figure 153: Faciès hydro-chimique des eaux de surface du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

## 2.1.2. Les paramètres physico-chimiques

### 2.1.2.1. Température (°C)

L'analyse thermique des eaux de surface du barrage de Béni Haroun montre que la température varie entre les mois d'hiver et les mois d'été. Cette variation elle est régulière globalement dans toutes les années. La température maximale a été enregistrée à la saison estivale ( $T_{\max}=30^{\circ}\text{C}$  durant le mois d'aout 2008 et juillet 2011), cette augmentation peut être expliquée par l'influence de la température de l'air et ceci d'autant plus que l'origine de l'eau est peu profonde (Rodier, 1996) (Figure 154) et la température minimale autour des mois d'hiver enregistrée au mois de janvier 2012 ( $T_{\min}= 5.5^{\circ}\text{C}$ ). Cette diminution peut être expliquée par hiver très froid (la température de l'air en janvier 2012 égale  $8^{\circ}\text{C}$ ).

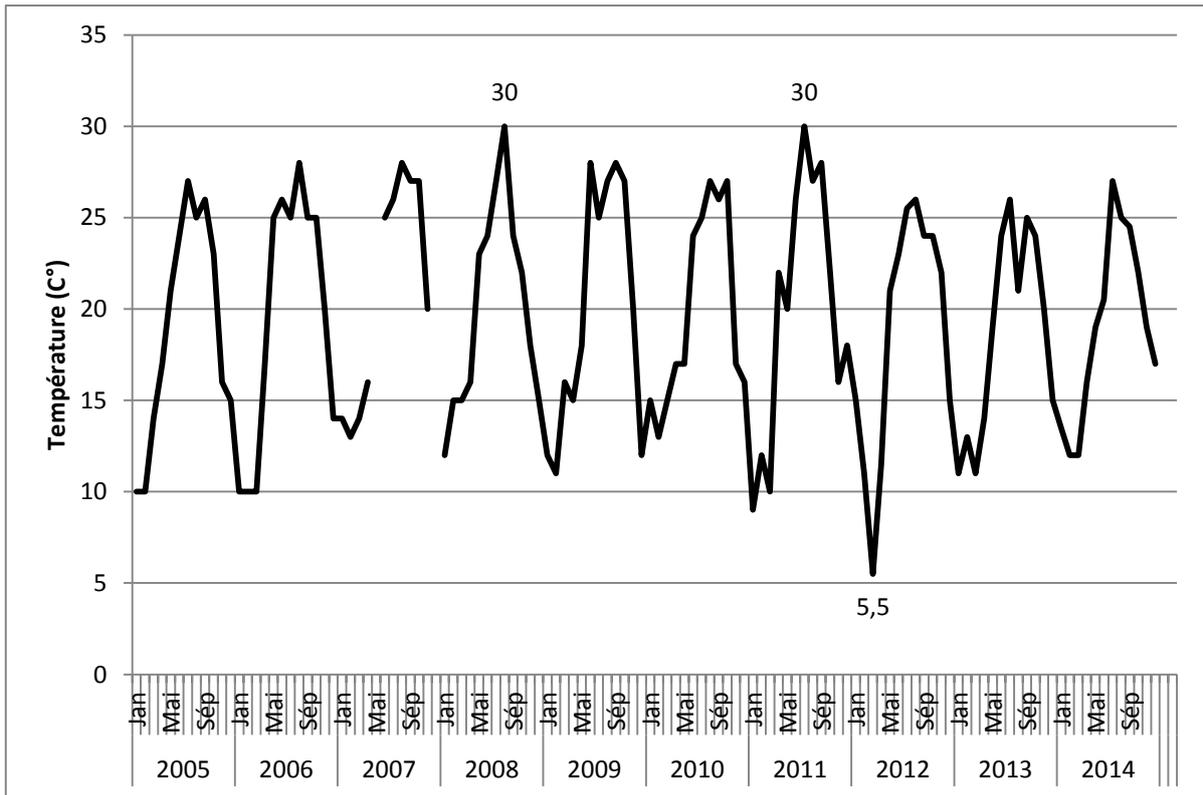


Figure 154: Variations des températures de l'eau du barrage de Béni Haroun entre 2005 et 2014

#### 2.1.2.2. Potentiel Hydrogène (pH)

Les valeurs du pH durant toute la période 2005-2014 sont comprises entre 7 et 8,2 (Figure 155) durant cette période, les eaux du barrage de Béni Haroun se situent dans la zone d'alcalinité moyenne (pH=6.5 à 8.2) et cette variation du PH reste dans les normes de potabilité selon la classification de ANRH (2009) (eau de bonne qualité).

Ceci s'explique par la nature géologique calcaire du barrage (carte géologique du chapitre 1 numéro de page 31). Ces variations du pH peuvent être expliquées également par les phénomènes de dilution qui peuvent intervenir sur les valeurs du pH des milieux aquatiques, ou par l'influence des eaux de ruissellements chargé généralement de diverses matières aux origines différentes.

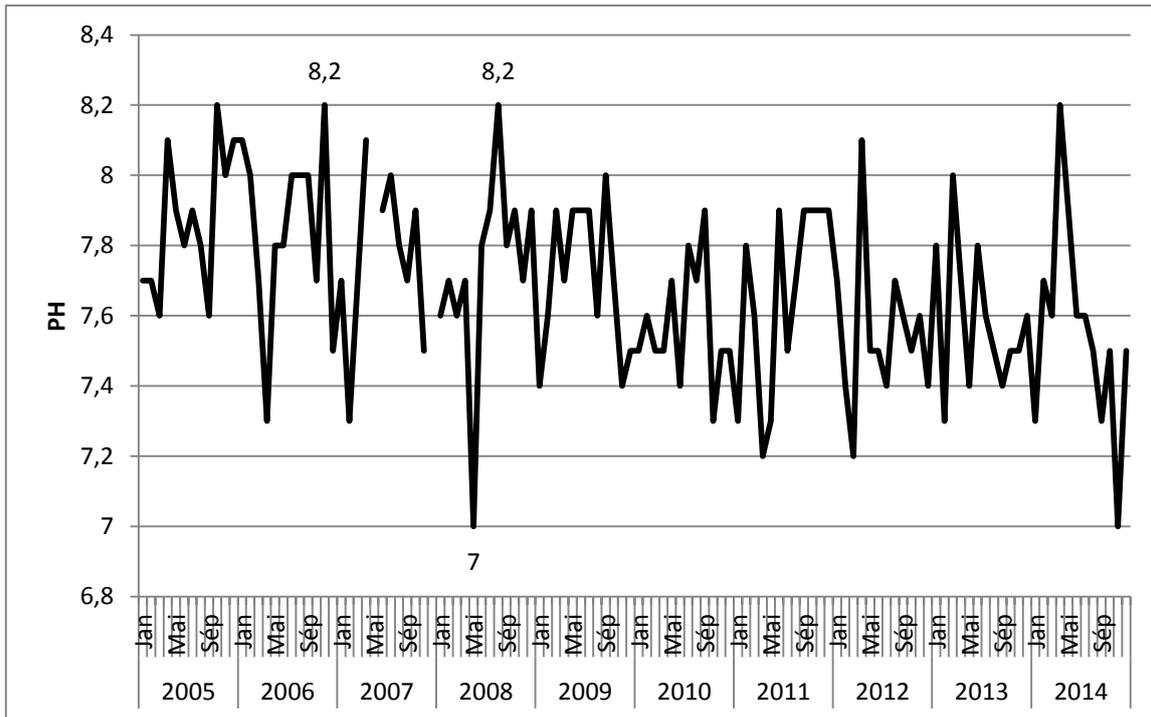


Figure 155: Variations du pH des eaux de surface du barrage de Béni Haroun entre 2005 et 2014

2.1.2.3. Conductivité électrique CE ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )

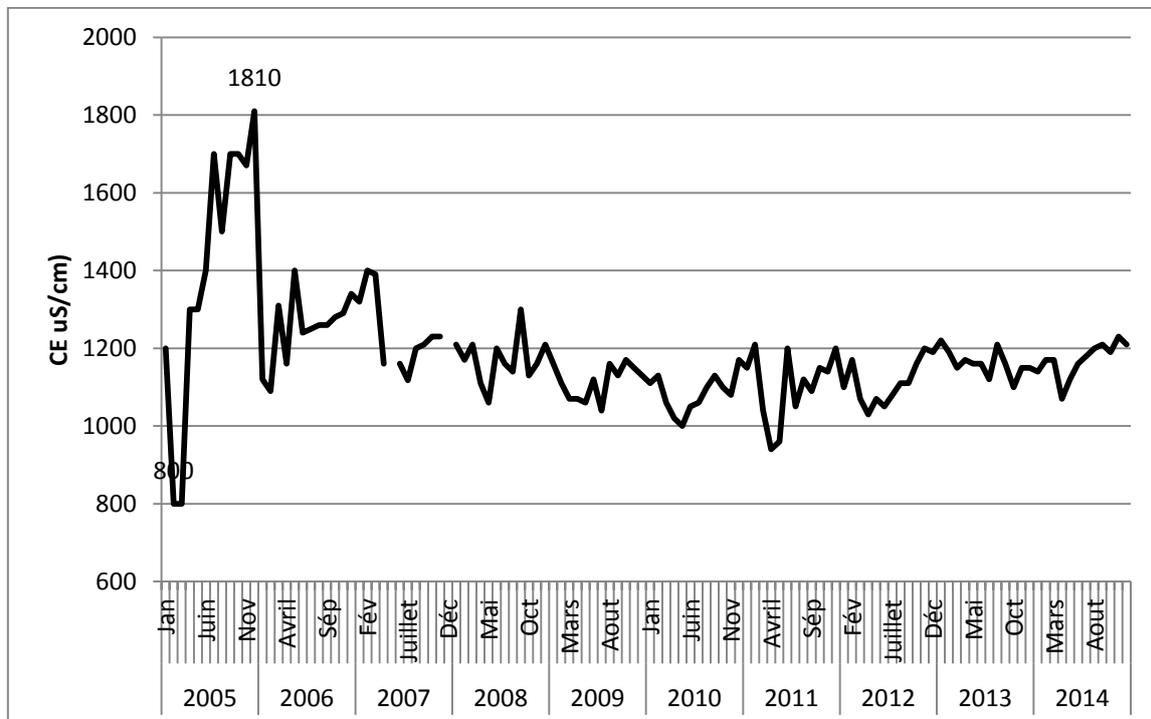


Figure 156: Variation mensuelle de la Conductivité électrique de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

D'après la figure 156 l'évolution de la CE est variable d'un mois à l'autre. Elle renseigne sur le degré de minéralisation globale des eaux superficielles. Les valeurs de la conductivité électrique sont comprises entre (800 et 1810  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), avec un minimum de (800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) enregistré aux mois de février et mars 2005 et une valeur maximale de 1810  $\mu\text{S}/\text{cm}$  au mois Décembre 2005.

Ces résultats sont proportionnels aux sels dissous traduisant ainsi une forte minéralisation des eaux de la région. Cette valeur extrême est probablement liée à l'apport des rejets industriels, domestique et agricole, aussi ceci pourrait s'expliquer par une pollution temporaire ou lessivage des terrains traversés. La moyenne est de 1161.19  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ce qui reflète d'après (Rodier et al, 2009) une minéralisation excessive ( $\text{CE} > 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Tableau 55).

#### 2.1.2.4. Résidu sec 105°C

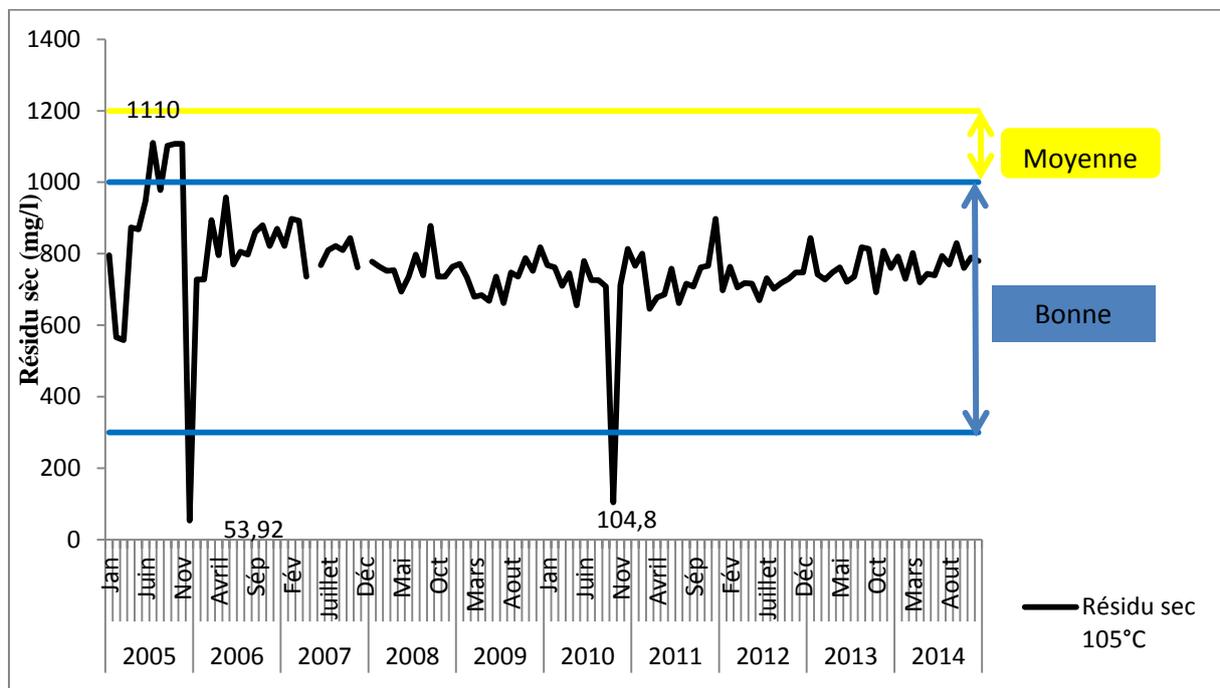


Figure 157: Variation mensuelle de la Résidu sec de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

Le taux du résidu sec au niveau des eaux du barrage du Béni Haroun présente des variations importantes dans le temps. on remarque que toutes les concentrations ne dépassent pas la norme de bonne qualité sauf quatre valeurs.

La valeur la plus élevée est 1110 mg/l a été enregistrée au mois d'octobre et novembre 2005. Un tel résultat pourrait être dû au lessivage des terrains traversés. La valeur la plus faible enregistré en décembre 2005 avec un taux de 53.92 mg/l et en octobre 2010 avec un taux de 104.8 mg/l (Figure 157), peut être attribuée à un phénomène de dilution par les rejets urbains. La valeur moyenne est de 764.29 mg/l. Selon notre étude les eaux brutes du barrage Béni Haroun, peuvent être classées en classe l'eau de bonne qualité selon la grille de l'ANRH (2009) (Tableau 56 et Figure 157).

2.1.2.5. Les cations

- Le calcium ( $Ca^{2+}$ )

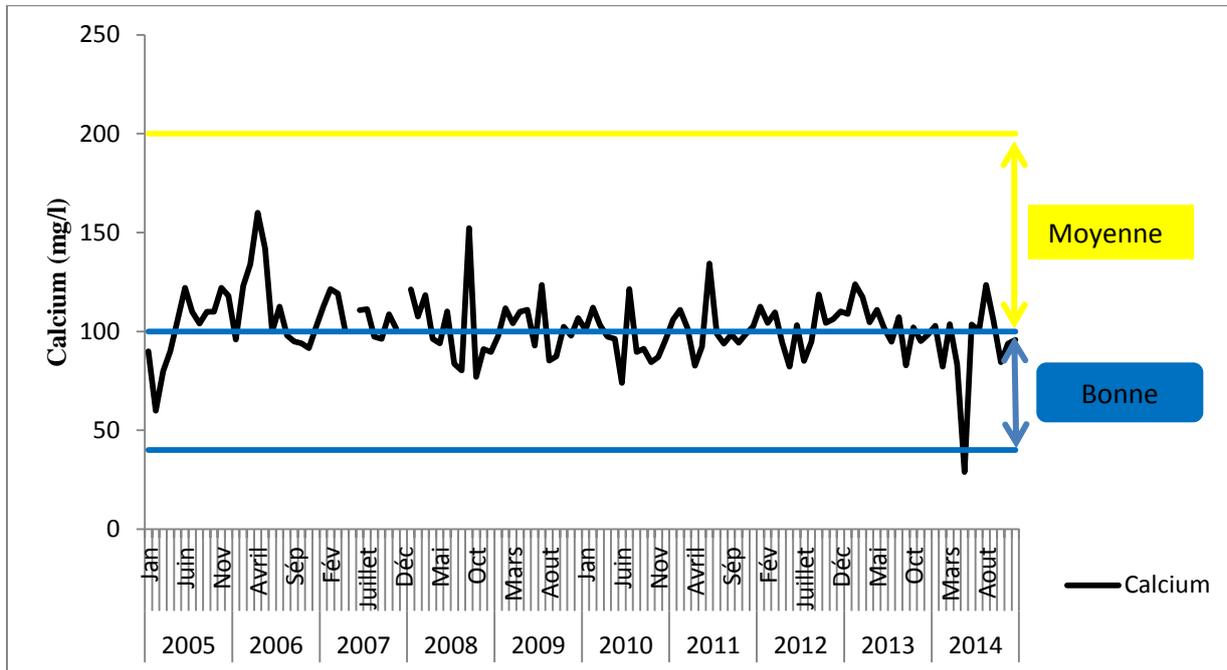


Figure 158: Variation mensuelle des teneurs en calcium de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

Les eaux du barrage du Béni Haroun présentent des teneurs assez élevées en calcium. En effet, les eaux du barrage présentent un taux de calcium élevé au mois d'avril 2006 (Figure 158). Ceci peut être dû à la dissolution des carbonates (calcite, calcite magnésienne). Ainsi, la teneur en ion calcium est liée directement à la nature géologique des terrains traversés par les cours d'eau (Brémond et Vuichard, 1973). La teneur faible en calcium enregistrée au mois d'avril 2014 (Figure 158) indique une faible dissolution du calcium qui pourrait être due au phénomène de dilution causée par les pluies d'hiver.

- Le magnésium ( $Mg^{2+}$ )

Les eaux du barrage de Béni Haroun présentent une teneur élevée en magnésium au mois de décembre 2005. Un tel résultat peut être dû à la fois aux divers rejets urbains et industriels et à la nature géologique des terrains traversés dont l'origine est semblable à celle du calcium : calcite magnésienne et dolomite, silicates et alumino-silicates, sulfates et chlorures magnésiens. Dans les eaux du barrage de Béni Haroun, les teneurs en magnésium proviennent principalement de l'altération des minéraux calciques et du drainage des dépôts évaporitiques (Farah, 1991). La teneur faible relevée au mois de mai 2014 (Figure 159) peut être due au phénomène de dilution causé par les précipitations enregistrées durant cette année ainsi que l'effet des eaux de ruissellement. Les eaux brutes du barrage Béni Haroun, sont de qualité moyenne.

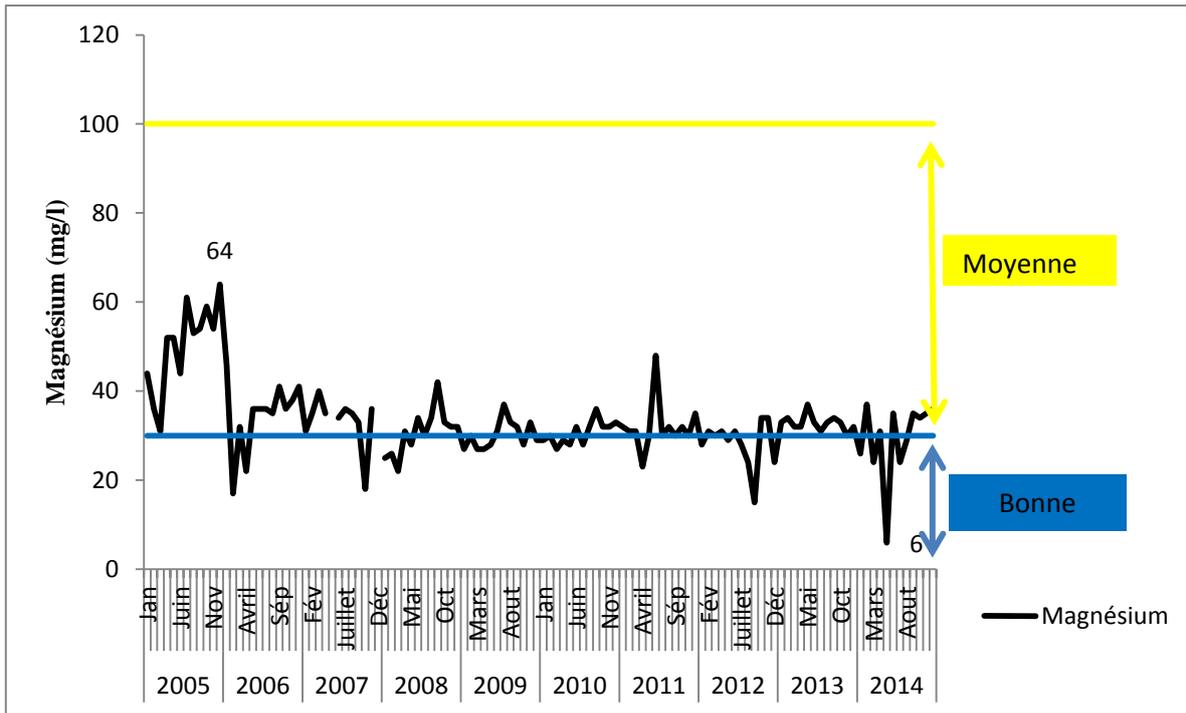


Figure 159: Variation mensuelle des teneurs en Magnésium de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

#### 2.1.2.6. Les Anions

##### - Chlorure ( $CL^-$ )

Les eaux de barrage présentent des teneurs en chlorures variant dans le temps, les valeurs en chlorures dans les eaux du barrage Béni Haroun ne dépassent pas la norme (300 mg /l).

La concentration maximale est de 280 mg/l prélevée au mois de décembre 2005 (notons que les teneurs en Chlorures sont très importantes en période humide), cette teneur montre la possibilité d'une pollution par les eaux usées ou par l'industrie (Franck, 2002 in Marouf, 2012).

La valeur moyenne est 144 mg/l. alors que la plus faible valeur est de 10 mg /l enregistrée en mai 2014; Ceci pourrait être attribué au lessivage des terrains traversés. Ces résultats sont conformes aux normes et que ces eaux sont de qualité entre bonne et moyenne (Figure 160).

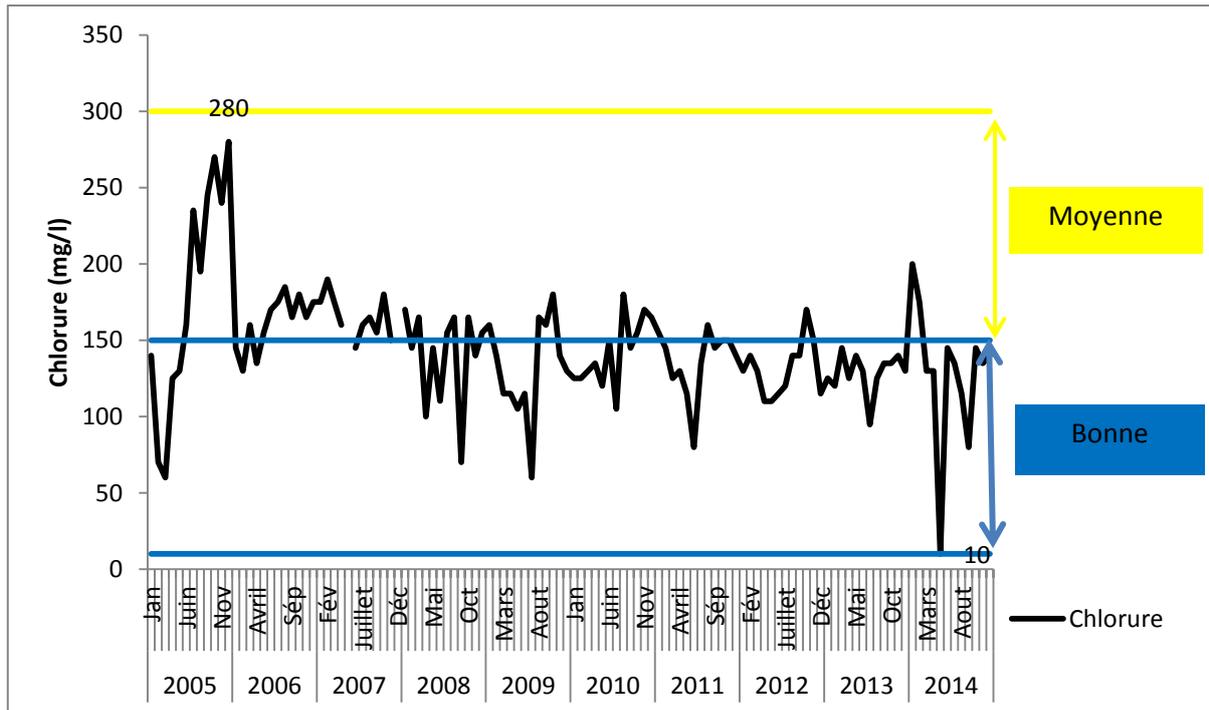


Figure 160: Variation mensuelle des teneurs en chlorures de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

- Sulfates ( $SO_4^{2-}$ )

Les eaux analysées présentent aussi des concentrations en ions sulfates supérieurs à 200 mg/l (Figure 161). Cela signifie que les terrains avoisinants contiennent des proportions importantes de sulfate de fer.

La présence des sulfates en quantité ( $>300$  mg/l). La valeur maximale est de 462 mg/l, a été prélevée au septembre 2008, peut aussi entraîner dans certaines conditions, une attaque de béton et accélérer la corrosion du fer (exemple attaque du béton de la digue du barrage de Béni Haroun) (Marouf, 2012) (Figure 161).

La faible teneur enregistrée au mois de mai 2014 est de 24 mg/l peut être due soit à une assimilation des plantes aquatiques des sulfates, soit aux eaux de pluie retenues durant ce mois et qui permettrait une dilution des eaux. Selon la grille de l'ARNH (2009), les résultats permettent de classer les eaux superficielles du barrage en classe III «eau de qualité moyenne».

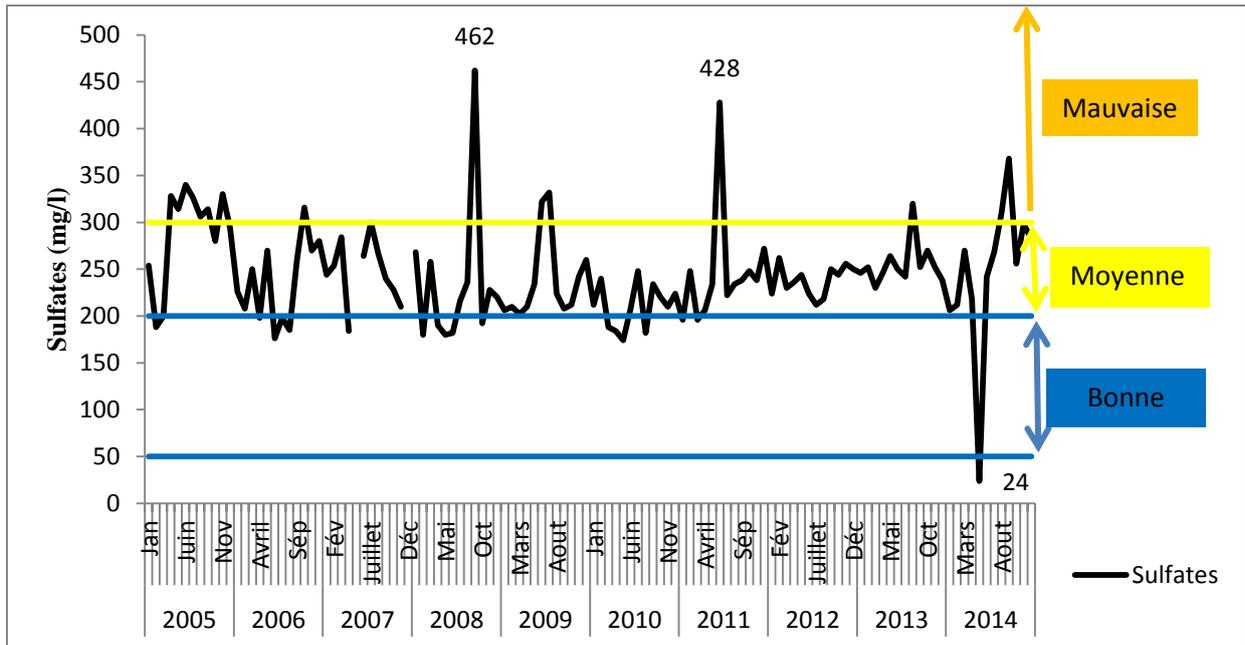


Figure 161: Variation mensuelle des teneurs en sulfates de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

## 2.2. Les substances indésirables

### 2.2.1. Nitrate ( $NO_3^-$ )

Les résultats obtenus pour le barrage présentent une concentration maximale en nitrates enregistrée au mois d'avril 2005, avril 2006 et mars 2009 (Figure 162), ces valeurs supérieures à 20 mg/l (norme de l'ANRH), indiquent une eau de qualité médiocre, d'origine surtout agricole. Ces teneurs peuvent être liées à la période printanière où la végétation serait abondante et où l'élévation de la température favorise la minéralisation de l'azote organique. Ainsi, la présence des nitrates stimule la croissance des algues et des plantes vertes, ce qui favorise la photosynthèse et par conséquent conduit à la formation d'oxygène au sein des cours d'eau (Brémond et Vuichard, 1973 ; soumaora, 2015).

Les concentrations minimales ou nulle (égale 0) en nitrates relevée au mois de (septembre 2008 et décembre 2014) (Figure 162) est due probablement au phénomène de dilution suite aux pluies durant ces mois. Selon les recommandations de l'ANRH (2009), les eaux du barrage sont dans l'ensemble d'une bonne qualité (classe 1).

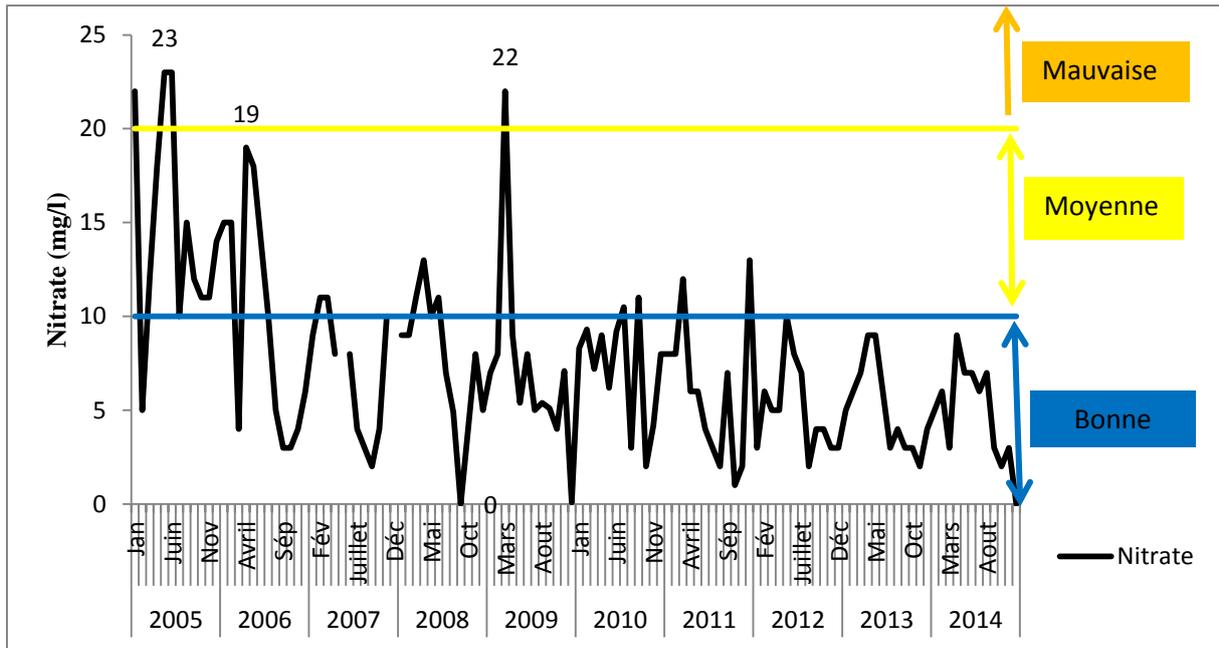


Figure 162: Variation mensuelle des nitrates de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

### 2.2.2. Les matières phosphorées ( $PO_4^{-3}$ )

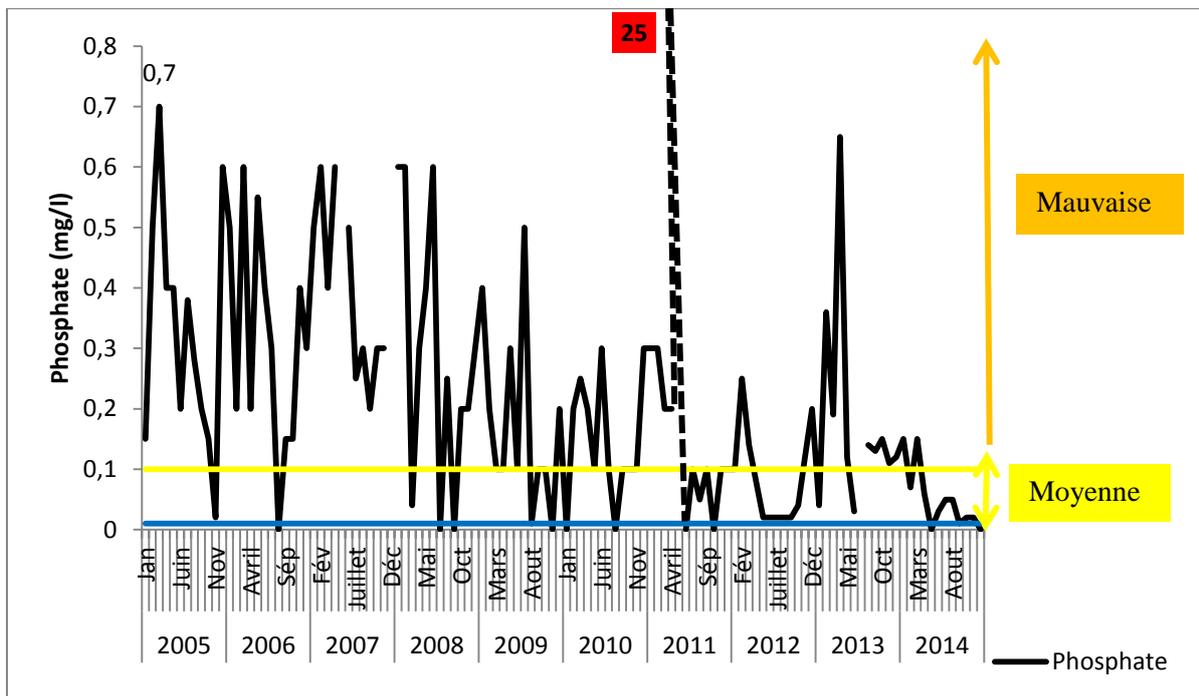


Figure 163: Variation mensuelle des teneurs en phosphate de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

Les teneurs en phosphates varient entre 0 mg/l et 0,7 mg/l, cette dernière teneur est enregistrée au mois de mars 2005.

Le phosphate est naturellement présent dans les eaux superficielles en faible quantité comme le cas des résultats du barrage de Béni Haroun (Figure 163), sauf le mois de mai 2011 marqué par une concentration élevée égale à 25 mg/l dépassant la valeur guide fixée par ( OMS, 2011) (Tableau 57), cette situation peut s'expliquer par les rejets d'une grande quantité des polluants industriels et domestiques au voisinage de la retenue (industrie, agroalimentaire, atelier de traitement de surface). Ou bien par le lessivage des terres cultivés renfermant des engrais phosphatés ou traités par certains pesticides (ABH, 1999).

### 2.2.3. Matière en suspension

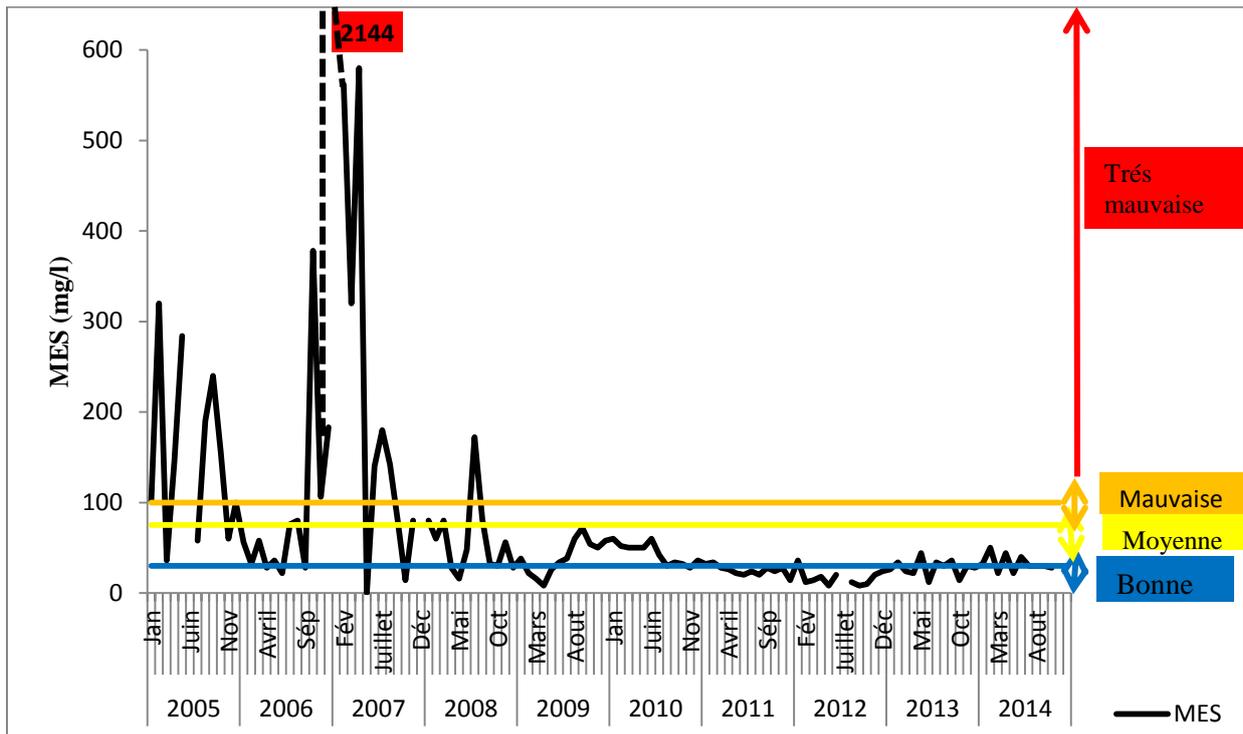


Figure 164: Variation mensuelle MES de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

Les valeurs des MES sont représentées par la figure 164. Les résultats des analyses montrent que les eaux du barrage présentent des concentrations de la teneur en matière en suspension très variable et irrégulière d'un mois à l'autre. La courbe visualise deux parties remarquables: l'une représente les concentrations les plus fortes englobes entre la période (2005-2008), ces valeurs montrent que l'eau du barrage est de qualité entre mauvaise et très mauvaises (la plupart des valeurs supérieurs à 75 mg/l); l'autre représente les teneurs les plus faibles appartiennent pendant la période (2009-2014). Ces concentrations inférieures à 75 mg/l, montrent que l'eau du barrage est de qualité acceptable pendant cette période.

Dans les eaux superficielles, les MES peuvent provenir soit des effets de l'érosion naturelle du bassin versant suite à de violentes précipitations comme le cas de nos données pendant la période (2005-2008) (les valeurs très élevées pendant la période des précipitations très abondante dues à des crues importantes.), soit des rejets d'eaux résiduares urbaines ou industrielles situées dans le bassin, tel que, les unités de céramique, marbre et briqueterie qui

déversent des particules argileuses et par conséquent vont engendrer des charges importantes des eaux (Marouf, 2012).

#### 2.2.4. DBO5

Le graphe de la DBO<sub>5</sub> (Figure 165), montre la présence d'une charge organique importante avec des valeurs moyennes oscillantes entre 0.5 et 25 mg/l O<sub>2</sub> de DBO<sub>5</sub> au niveau des eaux du barrage. Les concentrations de DBO<sub>5</sub> sont supérieures à 10 mg/l O<sub>2</sub> (trois épisodes de mauvaise qualité). Ces valeurs peuvent atteindre 25 mg/l O<sub>2</sub> en septembre 2009, 15 mg/l O<sub>2</sub> en avril 2011 et 13 mg/l O<sub>2</sub> en juin 2010. Ces fortes valeurs correspondent à une forte charge en matières organiques provenant essentiellement des industries agro-alimentaires.

L'évolution temporelle de la DBO<sub>5</sub> se caractérise par des valeurs plus importantes en période estivale qu'en période hivernale. La dilution provoquée par les eaux de pluie reste le facteur déterminant de cette constatation. Dans notre étude les eaux superficielles du barrage sont de qualité entre bonne et moyenne selon la grille d'ANRH (2009) (Tableau 56).

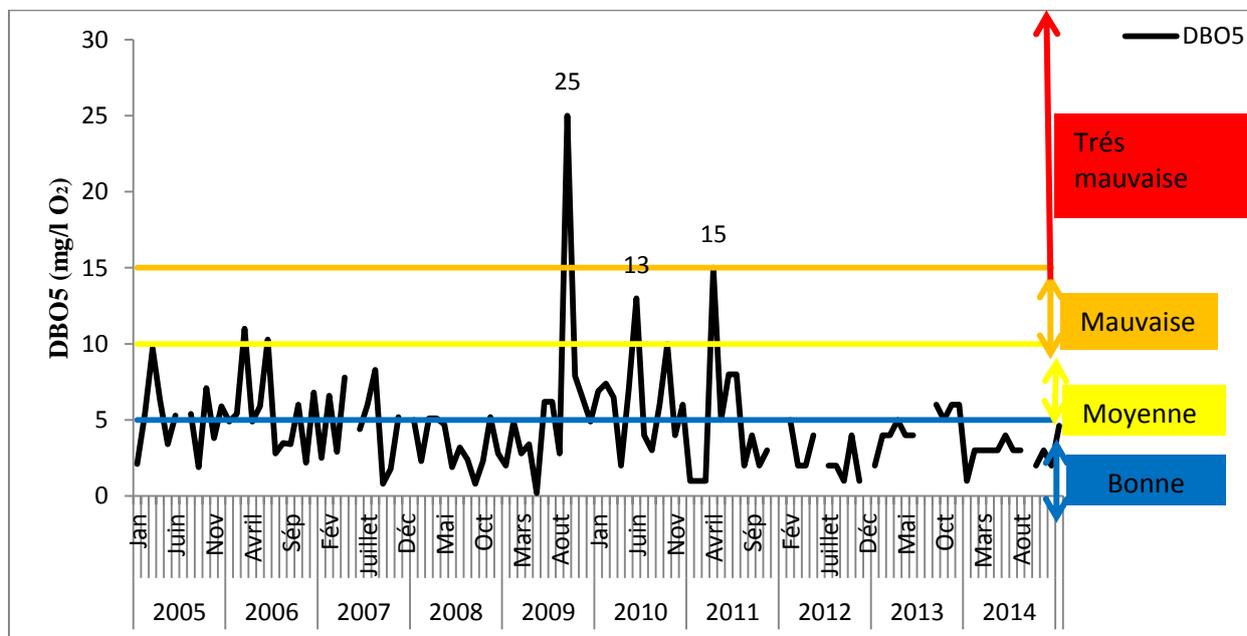


Figure 165: Variation mensuelle de la DBO<sub>5</sub> de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

#### 2.2.5. DCO

Les teneurs de la DCO oscillent entre une valeur minimale de 4.4 mg/l O<sub>2</sub> enregistrée en décembre 2010 (Figure 166) et une valeur maximale de 105.6 mg/l O<sub>2</sub> enregistré au barrage Béni Haroun en octobre 2010. La moyenne est de 42.77 mg/l O<sub>2</sub>. L'évolution globale de ce paramètre montre l'augmentation de la charge polluante suite à l'action anthropique.

Une très forte concentration est mesurée en septembre 2009, mai 2010, mai 2011 au niveau du barrage Béni Haroun. Ces observations pourraient être dues à une température élevée durant ces mois et une précipitation très faible ainsi qu'à l'apport important de matières organiques

ou bien dues à des rejets industriels ou bien des rejets d'eaux usées domestiques. Quant à la chute de la DCO au niveau des eaux du barrage Béni Haroun enregistrée au mois de décembre 2010 (4.4 mg/l) pourrait être attribués à une réduction de la charge des matières organiques, accompagnée d'une hausse de la teneur en oxygène qu'on peut probablement rapprocher d'une oxydation des polluants organiques et à l'effet de dilution des eaux de ce barrage. Selon la grille de ANRH (2009) les eaux du barrage Béni Haroun dans l'ensemble sont de qualité moyenne entre les années 2005-2009 et mauvaise entre les années 2010-2014.

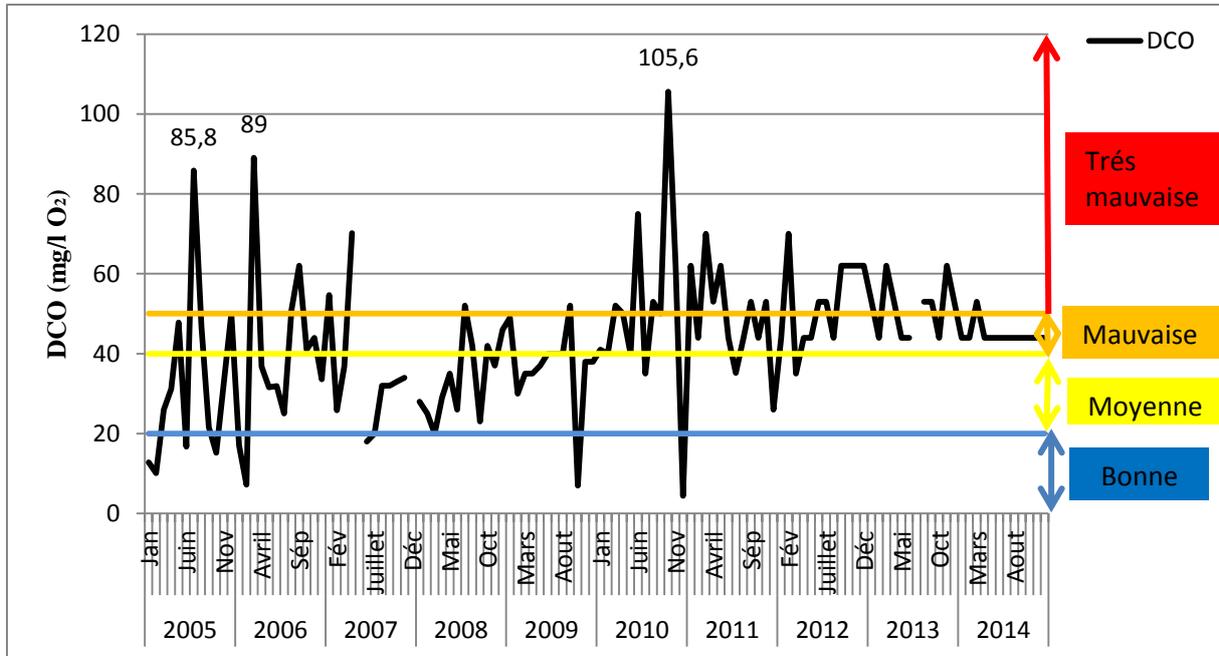
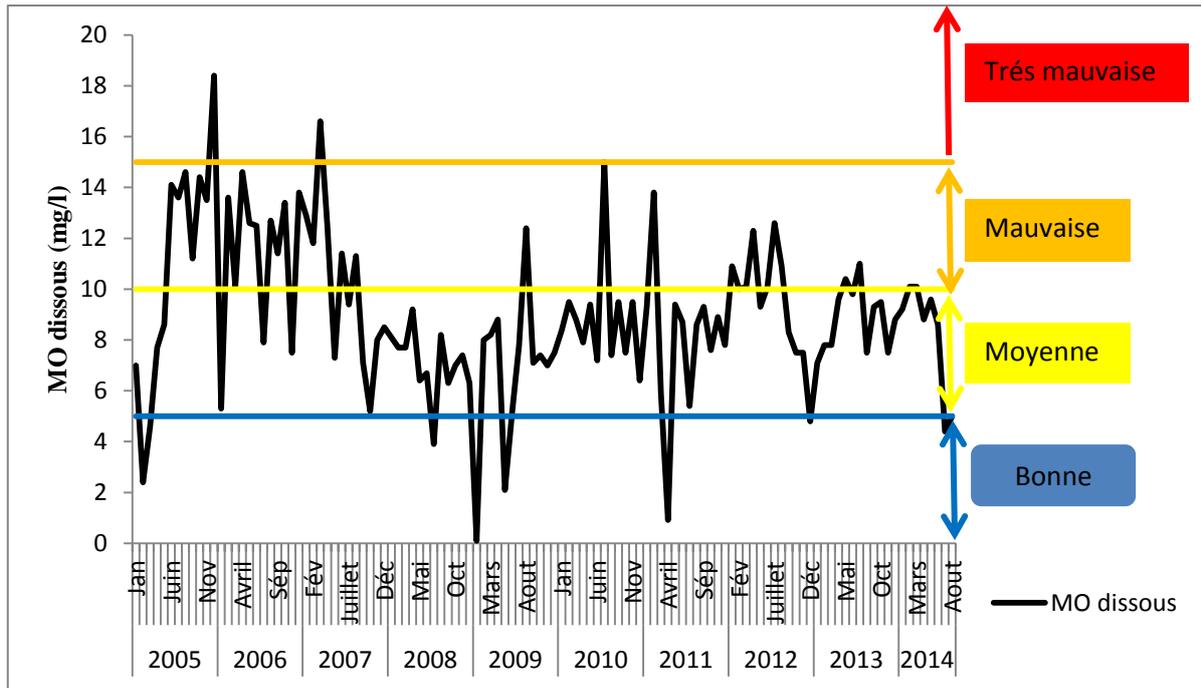


Figure 166: Variation mensuelle de la DCO de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

### 2.2.6. Matière organique dissoute

Au niveau du barrage de Béni Haroun, nous avons dosé une teneur élevée en MO, au mois de décembre 2005 (Figure 167), traduisant une forte charge organique qui peut être due à un enrichissement des eaux en matières organiques à la suite de fortes pluies durant cette année. La teneur la plus faible enregistrée au mois d'aout 2009 au niveau du barrage, traduit un retour à une situation initiale, suite à une bonne biodégradation des substances organiques déversées au niveau du barrage. De plus l'effet de dilution peut s'y ajouter. Les eaux du barrage de Beni Haroun sont de mauvaise qualité entre les années 2005-2007 devenues de qualité moyenne entre les années 2008-2014.



.Figure 167: Variation mensuelle de la matière organique dissoute de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

### 2.2.7. L'ammonium ( $NH_4^+$ )

Les teneurs en azote ammoniacal montrent des variations s'observant d'un mois à l'autre selon la figure 168. La teneur moyenne déterminée est de 0.076 mg/l. les eaux du barrage présente des teneurs assez faibles, parfois nulle, résultant probablement d'une bonne minéralisation ou une qualité des eaux bonnes selon les classes d'aptitude des eaux superficielles d'ANRH, ou encore du fait que les eaux usées soient traitées en stations d'épuration avant d'atteindre les barrages.

Les concentrations en azote ammoniacal les plus élevées sont enregistrées en mars 2006, septembre 2009, mai 2013 et juin 2008. Elles sont respectivement de 1.5, 0.45, 0.44 et 0.35 mg/l. sont toujours supérieurs à 0.1 mg/L (norme de l'ANRH), indiquent une eau de mauvaise qualité.

Les plus fortes concentrations sont observées au cours de notre étude (1.5 mg/l) en mars 2006 peuvent être dues aux rejets directs d'eaux usées qui se font dans le barrage. Nos valeurs traduisent un dysfonctionnement du cycle de l'azote et donc du processus de minéralisation de la matière organique (Berkat, 2016).

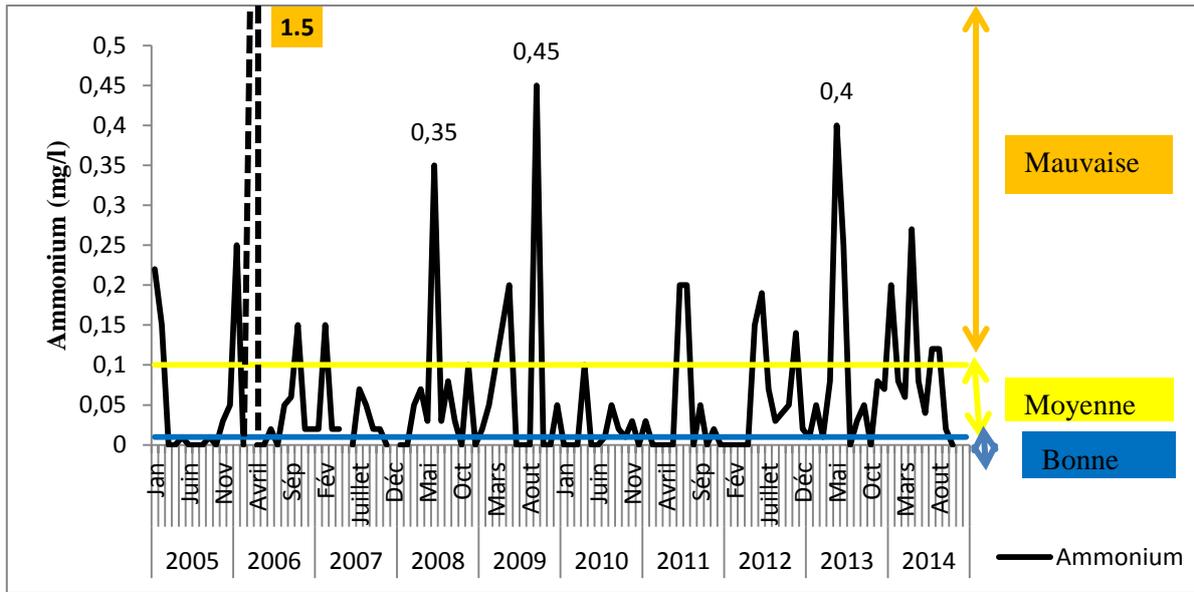


Figure 168: Variation des concentrations de l'ammonium de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

2.2.8. Les Nitrites ( $NO_2^-$ )

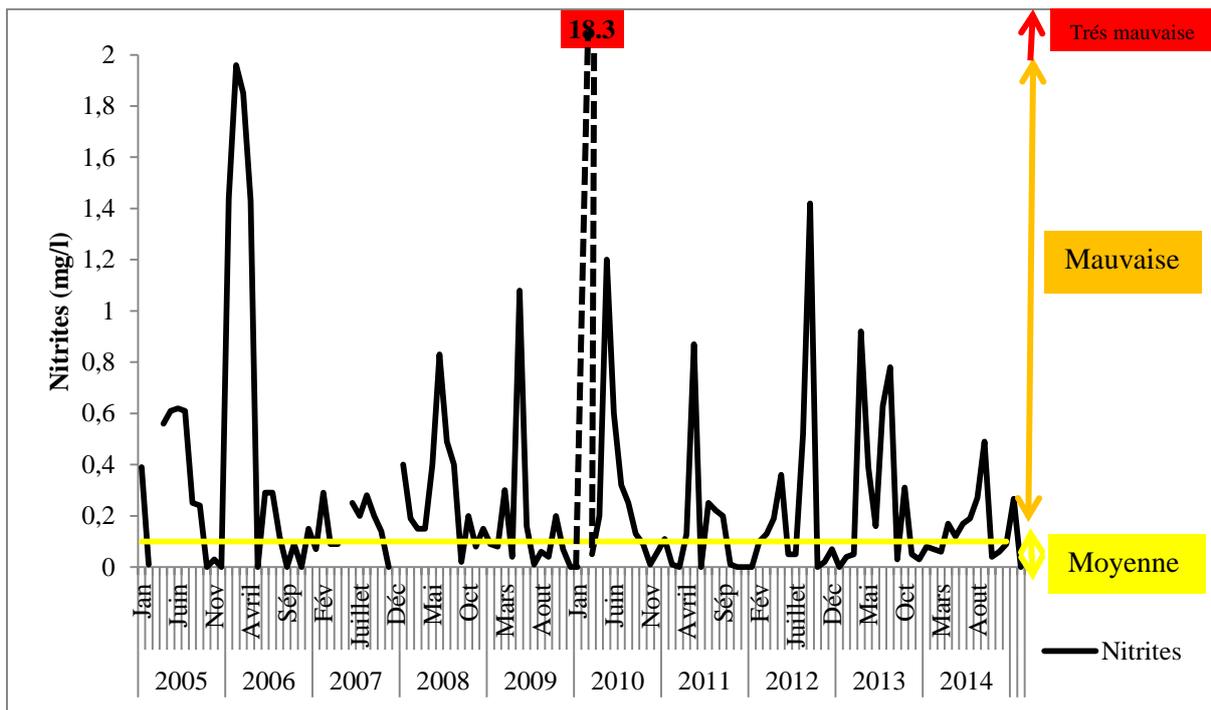


Figure 169: Variation des concentrations de la Nitrites de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014

Dans les eaux du barrage Béni Haroun, notre étude a montré des teneurs inférieures à la limite fixée par l'OMS et la grille de ANRH (classe de bonne qualité) (0.01 mg/l), des valeurs entre 0.01 et 0.1 mg/l (classe de qualité moyenne) et des valeurs entre 0.1-2 mg/l (classe de mauvaise qualité).

Ces eaux peuvent être considérées comme pures où se trouvant sous l'action d'une auto-épuration active c'est-à-dire il n'y a pas ou il y a très peu de nitrites dans les eaux et dans les zones où l'autoépuration est active. On remarque une valeur maximale de 18.3 mg/l enregistré au février 2010 (Figure 169). Cette valeur imputable aux rejets industriels où c'est des nitrites proviendrait soit de l'oxydation incomplète de l'ammonium, soit d'une réduction des nitrates qui sont d'origine agricole, sous l'influence des bactéries dénitrifiantes.

### 2.2.9. Manganèse

Les teneurs en manganèse du barrage de Béni Haroun varient d'un mois à l'autre. Le maximum (0,76 mg/l) est enregistré au mois d'avril 2012, la moyenne est de 0.049 mg/l (Figure 170).

La présence du manganèse (Mn) dans l'eau, est liée à la métallurgie, l'industrie électrique et l'industrie chimique. Dans les eaux aérées, les concentrations de cet élément sont souvent faibles. Selon la grille de ANRH (2009), les eaux dès dix ans de prélèvement sont en général, de bonne qualité par rapport à la teneur en manganèse ( $Mn < 0,1$ ).

En revanche dans les eaux peu aérées, on observe de fortes concentrations. Le manganèse peut apparaître dans l'eau à un potentiel Redox plus élevé.

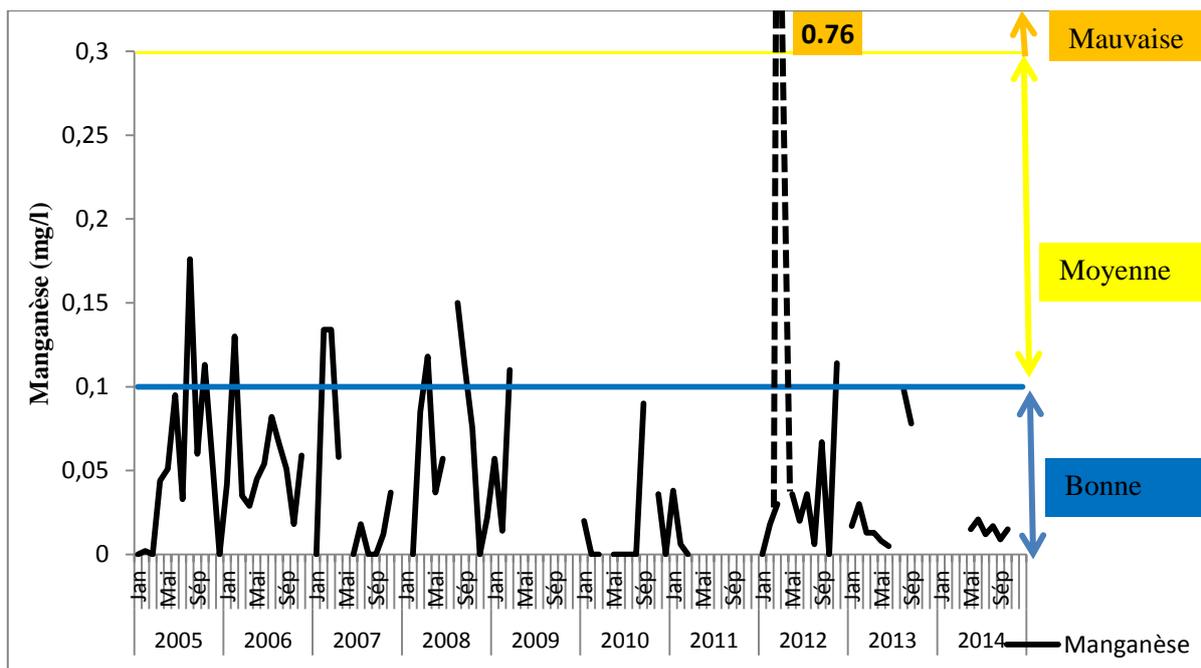


Figure 170: Variation mensuelle de Manganèse durant les dix ans (2005-2014) de l'eau du barrage de Béni Haroun

### 2.2.10. Le Fer

Les teneurs en fer des eaux du barrage de Béni Haroun sont très variables d'un mois à un autre (Figure 171). La valeur maximale (0.83 mg/l) est enregistrée au mois de janvier 2013, et la moyenne est de 0.090 mg/l. Selon la grille de ANRH (2009), les eaux du Barrage de Béni

Haroun sont d'une qualité bonne pendant dix ans sauf deux valeurs dépasse 0.5 mg/l (Figure 171) ce qui dû à des rejets industriels et/ou urbains.

Le fer dans les eaux superficielles peut avoir une origine tellurique, le plus souvent il provient du lessivage des terrains et des pollutions minières ou métallurgiques (Bremond et Vuichard, 1973 ; soumaora, 2015).

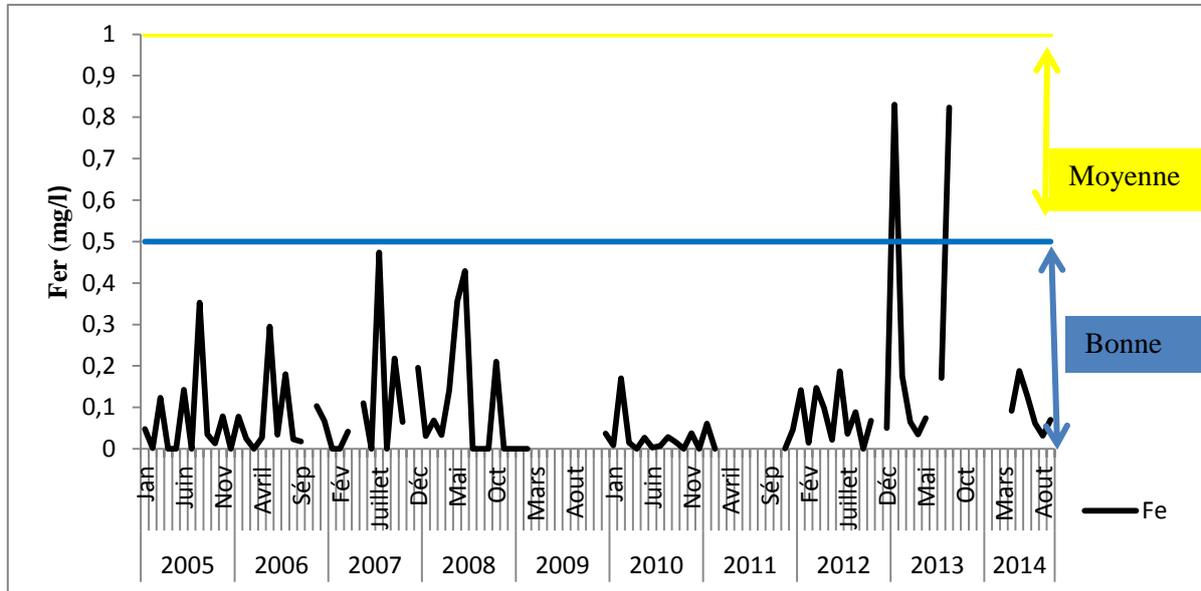


Figure 171: Variation mensuelle du Fer durant les dix ans (2005-2014) de l'eau du barrage de Béni Haroun

### 2.3. Évolution annuelle de la qualité des eaux du barrage de Béni Haroun

#### 2.3.1. La qualité des eaux entre 2005-2014

La moyenne annuelle des paramètres de qualité est calculée suivant la moyenne arithmétique qui est caractérisée par la fonction suivante :

$$M = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{i=N} X_j$$

Avec : X, la grandeur à mesurer, N nombre de mesures effectuées.

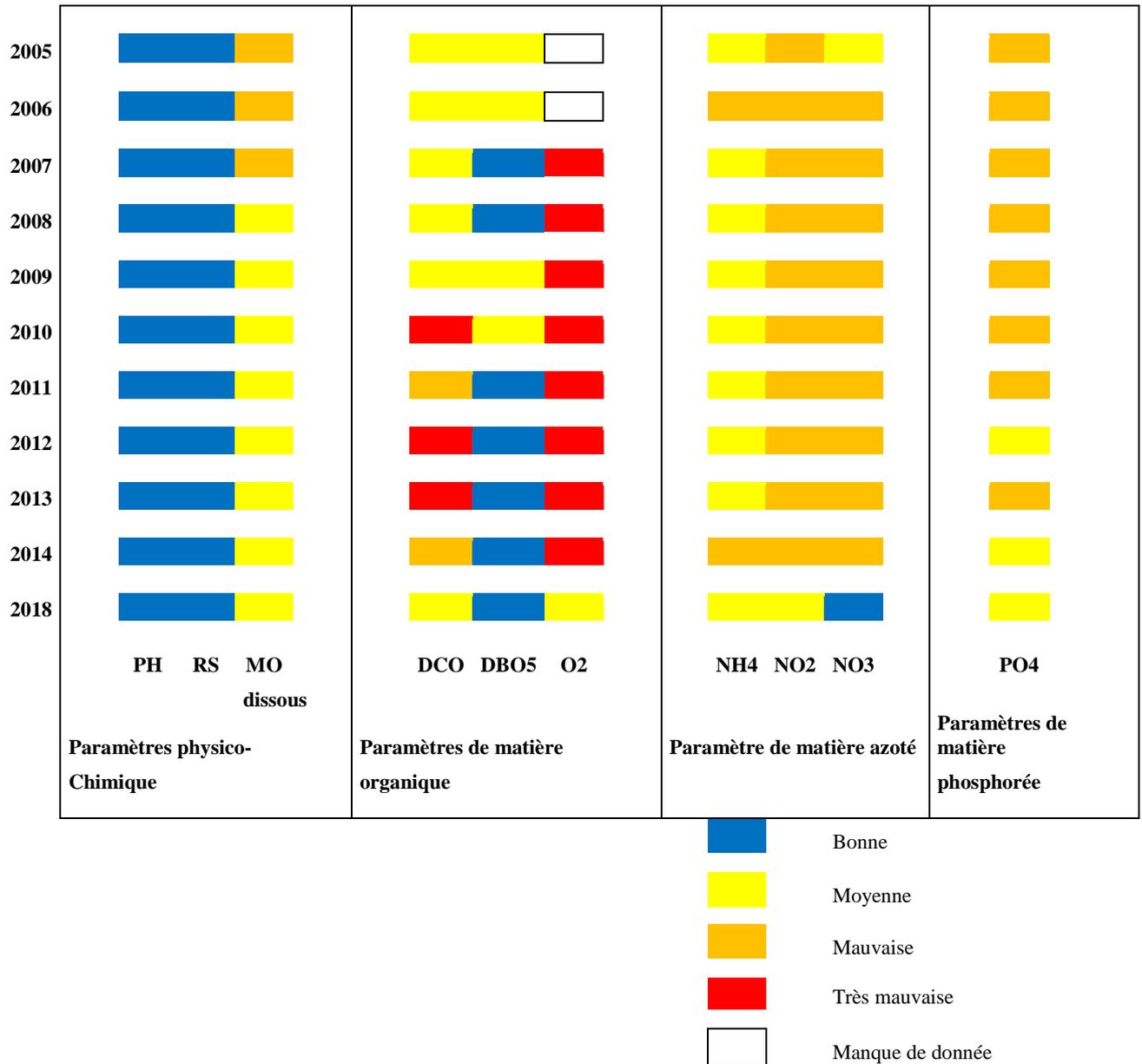


Figure 172: Fiche de Qualité moyenne annuelle des eaux de barrage de Béni Haroun

D'après la fiche de qualité annuelle du barrage Béni Haroun (Figure 172), on remarque une dégradation de la qualité des eaux au cours du temps, en raison de l'augmentation de la teneur en matières organiques, représentée par le paramètre DCO. En effet, la qualité des eaux qui était moyenne pour la période 2005-2009, est devenue médiocre pendant la période 2010-2014.

Pour DBO5, les eaux gardent une qualité allant de bonne à moyenne. La qualité régresse surtout à partir de l'année 2011. Six années sur dix enregistrent une bonne qualité.

Le résidu sec a donné une bonne qualité pendant la période 2005-2014.

Du point de vue teneurs en phosphates et sur un ensemble de dix années, l'eau du barrage montre une qualité moyenne à médiocre.

Vis-à-vis de l'ammonium, les eaux brutes du barrage Béni Haroun sont de qualité moyenne durant toute la période sauf les années 2006 et 2014, les eaux sont de mauvaise qualité. (Figure 172).

Pour ce qui est des nitrates et nitrites, les eaux brutes du barrage, sont de mauvaise qualité.

### **2.3.2. La comparaison de la qualité des eaux de l'année 2014 et l'année 2018**

Les eaux du barrage montrent une saturation totale en oxygène dissous ( $O_2$  dissous) pour l'année 2018. Donc dans l'ensemble l'eau du barrage est une eau bien oxygénée et la qualité est considérée comme moyenne pour l'année 2018 et la qualité est considérée comme mauvaise pour l'année 2014 (Figure 172).

Pour ce qui est de la concentration en matières organiques (MO), l'eau du barrage est considérée comme une eau d'une qualité moyenne durant les deux années 2014 et 2018.

Les nitrites ( $NO_2$ ) ont des valeurs faibles qui ne dépassent pas les 0.1 mg/l durant cette année, du point de vue concentration en nitrites, parmi les eaux de qualité moyenne. Par contre durant l'année 2014 montre une qualité mauvaise (Figure 181).

Les teneurs en ammonium ( $NH_4$ ) dans l'eau du barrage Béni Haroun ont permis de mettre en évidence une eau de qualité moyenne pour l'année 2018 et qualité mauvaise en 2014.

Les nitrates  $NO_3$ , la qualité bonne durant l'année 2018 et mauvaise durant l'année 2014 du fait que les valeurs n'ont jamais atteint les classes de pollution excessive.

Du point de vue teneurs en phosphates, l'eau du barrage montre une qualité moyenne pendant les deux années (2014 et 2018).

Par comparaison des données d'analyses de la qualité des eaux de l'année 2018 et l'année 2014, la qualité de l'eau du barrage est nettement améliorée durant l'année 2018.

### **2.3.3. Synthèse de la qualité des eaux brute du barrage entre les années 2005 et 2014**

Pour évaluer la qualité des eaux brute du barrage de Béni Haroun entre 2005 et 2014, l'étude de la concentration des éléments minéraux et azotés, en comparaison à la grille de qualité (Tableau 56) a permis de mettre en évidence (Figure 173) :

La teneur en azote (nitrates, nitrites et ammonium) en sulfates et chlorures dans les eaux du barrage est élevée suite les eaux usées ainsi que la présence de terrains agricoles irrigués près du barrage et lessivage des sols fertilisés par des engrais, pourraient justifier cette augmentation.

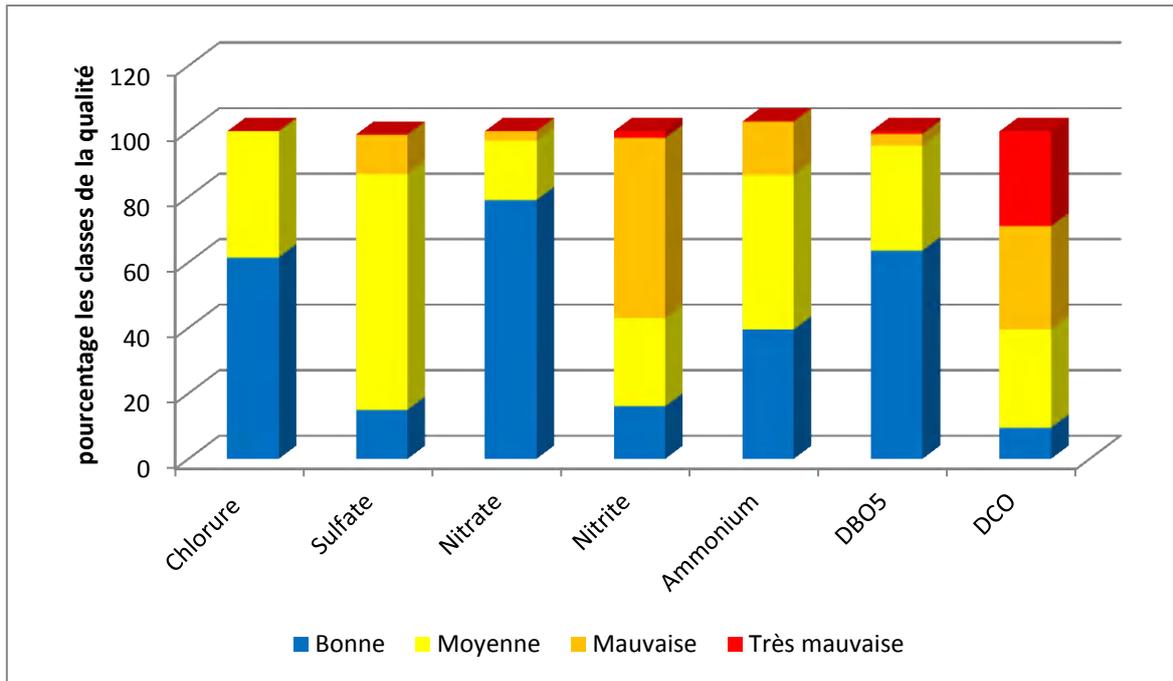


Figure 173: pourcentage de quelques paramètres de la qualité des eaux de barrage de Béni Haroun (2005-2014)

- la teneur en nitrates, enregistrée au niveau de la cuvette du barrage est moins importante ; 79 % des résultats sont en situation bonne contre 38.46 % en situation moyenne (Figure 173).
- La teneur en nitrites représente 16 % seulement en situation bonne contre 27% en situation moyenne et 55 % en situation mauvaise.
- La teneur en ammonium avec 39.5 % seulement en situation bonne contre 47% en situation normal et 16.5% en situation mauvaise.
- 84% de la teneur en sulfates est de classe moyenne à mauvaise.
- 38.5 % de la teneur en chlorures est de classe moyenne.
- 29 % de la teneur en DCO est de classe mauvaise
- 63.6 % de la teneur en DBO5 est de classe Bonne

Les eaux de surface du barrage de Béni Haroun ne sont pratiquement jamais potables sans aucun traitement du fait de diverses substances d'origine naturelle ou apportées par la pollution, pour améliorer leur qualité, elles nécessitent des traitements appropriés, c'est-à-dire leur faire subir des modifications physico-chimiques et biologiques (Degremont, 1989)

Les eaux du barrage Béni Haroun et d'après les résultats des analyses sur une série de 10 ans (2005 à 2014), montre qu'un grand pourcentage des teneurs les paramètres liés à la pollution agricole, industrielle et domestique sont supérieures aux normes, ce qui indique que les eaux de la retenue du barrage ne peuvent pas être consommé sans traitement préalable.

#### 2.3.4. Le traitement des eaux du barrage de Béni Haroun avant leur distribution

L'eau brute du barrage Beni Haroun a présenté globalement une qualité moyenne avec certains paramètres à des teneurs assez importantes (Achour, 2017). Alors que certains paramètres ont semblé être en grande partie corrigés par le traitement en station, d'autres paramètres tels que la matière organique, l'ammoniacale ont semblé moins bien influencés par le traitement des eaux en station. Il ya deux stations de traitement des eaux

**Station de traitement d'Oued Athmènia** est appelée la station de traitement de Sidi Khelifa, la station a été conçue par «DERGERMONT» société française spécialisée dans la production d'ouvrage de production d'eau potable .Outre la conception, la société assurait la gestion jusqu'à sa transmission à la société «SEACO» le 1er mars 2013. Cette station se trouve à la proximité du barrage réservoir d'Oued Athmenia, et devrait produire un volume de 330 000 m<sup>3</sup> par jour (plus de 120 hm<sup>3</sup> par an) (Mébariki, 2005). L'acheminement de ses eaux se fait par alimentation gravitaire. Ceci est rendu possible grâce à la topographie des lieux sur lesquels sont implantés les 2 ouvrages, à ce propos, on peut citer leurs côtes altimétriques qui sont respectivement de 844 m et 793 m pour le barrage et la station, soit une dénivelée de 51 m. Cette station de traitement moderne utilise la technique dite « d'ozonation ».

**La station de traitement d'Ain Tinn** est située sur les marges septentrionales des hautes plaines au Nord Est de l'Algérie à une dizaine de kilomètres à l'Est de la ville de Mila. Elle s'inscrit dans le cadre de projet du transfert des eaux du barrage de Beni Haroun, en permettant de produire suffisamment d'eau potable pour toute l'agglomération de Mila et ses communes, et d'approvisionnement en eau potable des villes de Mila, Constantine et les régions avoisinantes à partir du transfert de Beni Haroun. Depuis sa mise en service jusqu'à juillet 2007, La station d'Ain Tinn est alimentée gravitairement en eau brute à partir du barrage de Beni Haroun situe à environ 20 kilomètres en amont de la station (Achour, 2017).

## CONCLUSION

Pour conclure ce chapitre, il convient de rappeler que le barrage de Béni Haroun est le plus grand complexe hydraulique en Algérie. Il est destiné à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation, et couvre les besoins en eau de cinq wilayas. D'où l'intérêt d'un suivi régulier de la qualité physicochimique de ces eaux du barrage.

L'étude du faciès chimiques du barrage Béni Haroun par la méthode de PIPER a montré que les eaux sont caractérisées par un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien. La prédominance de ces éléments est liée à un double origine, naturelle et anthropique.

D'après les analyses de la qualité des eaux, les résultats obtenus montrent que la température saisonnière est inférieure à 30°C, et le pH est alcalin (ne dépasse pas 8.2). La conductivité est généralement élevée, traduisant une minéralisation excessive, les teneurs en matières en suspension sont également élevées, révélant une pollution organique. Le résidu sec a donné une bonne qualité pendant la période 2005-2014. La teneur en azote (nitrates, nitrites et ammonium) en sulfates et chlorures dans les eaux du barrage est élevée suite les eaux usées ainsi que la présence de terrains agricoles irrigués près du barrage et lessivage des sols fertilisés par des engrais, pourraient justifier cette augmentation. Les paramètres de pollution

reflétant un degré important marqué par une augmentation des teneurs en matières oxydables (MO dissoute), des DBO<sub>5</sub> et des DCO élevées.

Les résultats des analyses physico-chimiques de 2005 à 2014, disponibles sur le site de la retenue de Béni Haroun, montrent qu'un grand pourcentage des teneurs liés à la pollution agricole, industrielle et domestique est supérieur aux normes, ce qui indique que les eaux de la retenue du barrage ne peuvent être consommées sans traitement préalable. La synthèse des paramètres physico-chimique du barrage de Béni Haroun durant l'année 2005 a permis de classer cette eau entre moyenne et mauvaise. Tandis qu'en l'année 2014 l'eau du barrage étaient d'une qualité bonne à moyenne. Cependant, la qualité de l'eau du barrage s'est nettement améliorée durant l'année 2018 par comparaison aux données de l'année 2014. Les facteurs ayant pu favoriser cette amélioration sont les suivants:

Augmentation de la pluviométrie, en particulier celle correspondante à la crue de l'année 2014/15 (une année très humide au niveau du barrage de Béni Haroun) qui à participer à la dilution de la pollution.

Le barrage de Béni Haroun stocke un volume important en eau et une grande partie de ses eaux est renouvelable, vu les apports importants de ses affluents.

La réalisation de nouvelles stations d'épuration (STEP) pour le traitement des eaux usées des villes d'Oued Rhumel et d'Oued Endja et de leurs agglomérations.

Les eaux de surface ne sont pratiquement jamais potables sans un traitement préalable, du fait de diverses substances d'origine naturelle ou apportées par la pollution. Pour améliorer leur qualité, elles nécessitent des traitements appropriés, c'est-à-dire leur faire subir des modifications physico-chimiques et biologiques dans la chaîne de traitement classique.

---

**CONCLUSION GENERALE**

---

Ce travail de thèse s'inscrit dans une contribution à l'analyse et la compréhension du comportement des cours d'eau aux différents états du cycle hydrologique et de la variabilité des apports, à travers l'exemple d'un important bassin, physiquement contrasté, de l'Est algérien, formé par les oueds Rhumel et Endja. Le barrage «Béni Haroun », érigé à l'aval immédiat de la confluence de ces deux principaux oueds, d'une capacité de 963 millions de m<sup>3</sup>d'eau, est un ouvrage pivot dans la régularisation et le transfert des eaux à l'échelle régionale.

Les résultats de ce travail, de par le nombre conséquent de données collectées et leur traitement par plusieurs méthodes, statistiques et cartographiques, nous permettent d'émettre les principaux éléments de synthèse et les conclusions ci-après :

- **Des contextes physico-climatiques fortement contrastés**

A l'instar des bassins à écoulement exoréique de l'Algérie orientale, le bassin versant du Rhumel- Endja présente des caractères physiques nettement contrastés.

Le relief, montre des contrastes topographiques remarquables, avec des massifs culminants à des hauteurs très élevés et des vallées profondes. Au Nord, un ensemble de reliefs forme une imposante barrière rocheuse (la chaîne Numidique). Cette chaîne, d'orientation sensiblement Sud-Ouest/ - Nord-Est, est composée essentiellement de massifs calcaires jurassique. Au Sud, les hautes plaines présentent des aspects de relief plat et dénudé et au chevelu hydrographique assez lâche.

Quatre grandes unités géologiques peuvent être identifiées du Nord au Sud. La partie septentrionale du bassin versant est dominée par les nappes telliennes et les nappes du flysch alors que la partie sud est principalement composée par les dépôts associés à la nappe néritique constantinoise et aux formations peu ou pas tectonisées (formations mio-plio-quadernaires).

Le contexte climatique est également marqué par de forts contrastes, le climat est tempéré et subhumide au Nord, et de type semi-aride, continental au Sud. L'examen de la carte des isohyètes permet de saisir cette répartition latitudinale irrégulière, les pluies atteignent 800 mm par an, au Nord; elles tournent autour de 300 mm au Sud. La température la plus basse de la station de Constantine est atteinte au mois de janvier (+2.6 °C) et le maximum est observé au mois d'août (+33.90 °C); au niveau du barrage de Béni Haroun, la température la plus basse (+3.01° C) est enregistrée au mois de février et la température maximale (+32.33°C) au mois de juillet. L'évapotranspiration évolue suivant les deux saisons pluvio-thermiques; elle est très élevée en saison chaude, ce qui accentue le déficit hydrique après épuisement de la réserve utile des sols.

- **Variabilité hydro-pluviométrique à l'amont du barrage de Béni Haroun**

La variabilité spatiale des précipitations est suffisamment appréhendée sur neuf stations pluviométriques du bassin, les précipitations sont fortes au Nord du bassin (plus de 550 mm), moyennes dans la zone médiane (comprises entre 500 et 400 mm) et faibles au Sud (moins de 300 mm). L'irrégularité interannuelle sur 42 années d'observation (1970/71-2011/12), a été

bien mise en évidence en se fondant sur le coefficient de variation et l'écart à la normale. L'analyse de la variabilité des précipitations annuelles a été complétée par une étude fréquentielle par la loi racine normale, afin d'estimer les quantiles de précipitations pour différentes périodes de retour.

Les apports hydrologiques de la période 1973/74-2004/05 sont quantifiés, au niveau des différents sous bassins jaugés, et les profils apports-surfaces, illustrent la variabilité spatiale de l'écoulement le long des cours principaux. L'apport spécifique est modeste (1.03 l/s/km<sup>2</sup>) sur le haut Rhumel à Ain Smara, lié au caractère semi-aride du climat (moins de 400 mm de pluie par an). A la station de Grarem, l'écoulement interannuel s'accroît de façon notable pour atteindre 2.71 l/s/km<sup>2</sup> en raison de changement de domaine climatique (600 mm de pluie par an). La faiblesse du coefficient d'écoulement, notamment dans la zone semi-aride ( $C < 5$  % à Ain Smara) et sa forte valeur ( $C > 10$ ) dans la zone subhumide synthétisent bien les contrastes du milieu hydrologique.

Sur la période 1972/73-2004/05, les paramètres hydrologiques aussi bien annuels que mensuels ont connu une très grande variabilité, à mettre en relation directe avec la variabilité des précipitations.

- **Caractérisation statistique de la variabilité: cyclicité et tendance des pluies et des débits**

La caractérisation de la variabilité temporelle est affinée par une approche basée sur la détection des changements potentiels dans les enregistrements pluviométrique (Matrice de Bertin) d'une part, et par la méthode des ondelettes pour l'identification des principaux modes de variabilité des débits et des précipitations, d'autre part. Les résultats de la matrice Bertin appliquée pour les pluies sur 42 ans ont permis de déceler les différentes périodes humides et sèches. Le caractère sévère de la sécheresse apparaît entre 1987/88 à 2001/02 (caractère particulier au climat méditerranéen) et une phase humide survient à partir de l'année hydrologique 2002/03 avec une plus grande fréquence d'années humides et très humides.

La variabilité temporelle annuelle à pluri-annuelle des pluies des sous bassins par la transformée en ondelettes (série commune 1973/74-2004/05) indique que cette évolution est structurée par plusieurs modes de variabilité, trois modes en particulier: 1 an, 1-2 ans et 4-8 ans. Pour les débits, la variabilité est marquée par des fluctuations différentes: le cycle hydrologique annuel et les fluctuations d'échelle interannuelle à 1-2 ans, 2-4 ans, 4-8 ans et 8-10 ans. Des changements dans la composition spectrale sont également observés: le changement majeur observé dans les débits dès l'année 1984/85 est également observé dans les pluies dès l'année 1980/81.

L'étude de la relation débit/pluie par les écarts centrés réduits a montré que l'évolution de la variabilité des débits/précipitations pour l'ensemble des sous bassins versants s'inscrit dans un schéma presque identique avec quelques décalages des années; trois périodes ont été identifiées; la première période de forts débits/ précipitations correspond bien aux années 2002/03-2004/05 pour tous les sous bassins étudiées. La seconde période correspondant aux années 1973/74 -1983/84, est sèche pour toutes les stations d'observations des pluies et des

débites et enfin, la période située entre 1983/84 et 2001/02 est une alternance de périodes de faible/fort (débit et précipitation). Ces différences peuvent être expliquées par les différences de contexte géomorphologique des sous bassins et par les caractéristiques météorologiques locales.

Pour caractériser la variabilité commune (ou différente) entre les deux signaux (pluie, débit) et estimer l'impact des modes de variabilité des précipitations sur la variabilité des débits et la quantification simple du degré de la corrélation, l'analyse de la cohérence par ondelettes a permis de caractériser le degré de linéarité entre les pluies et les débits, suivant les différents niveaux d'échelles au cours du temps. La variabilité des débits aux sous bassins est fortement influencée par une variabilité d'origine pluviométrique (les pourcentages de cohérence restent à un niveau > 50 %) et seulement une part relativement réduite de cette variabilité est à expliquer par d'autres facteurs à caractère physiographique.

- **Caractérisation des régimes des oueds pendant les évènements extrêmes (crues, étiages)**

Le caractère aléatoire du régime des oueds se manifeste à l'échelle journalière et surtout l'échelle des évènements de crue.

L'analyse graphique des hydrogrammes de crues observées a permis de tirer des conclusions sur les types d'hydrogrammes se produisant dans le bassin du Rhumel-Endja. Des hydrogrammes assez classiques et monogéniques (à l'exemple de la crue de septembre 1973) ; on y retrouve les caractéristiques d'un hydrogramme, avec un temps de montée plus court que la durée de décrue; il est suivi par un tarissement prolongé. Le deuxième type concerne des crues complexes, à plusieurs pointes (comme celles observées en janvier 2003 et entre le 28 décembre 1984 et le 1<sup>er</sup> janvier 1985). Contrairement à la montée, la décrue se fait généralement de façon lente, en s'étalant sur plusieurs jours avant le rétablissement du débit de base.

Les fluctuations des apports des crues sont directement liées aux hauteurs de précipitations, leur intensité et leur répartition à travers les sous-bassins. A la station de Douar Tassadane, les épisodes pluvieux exceptionnels en 2002/03 ont engendré des crues conséquentes atteignant un pic de 609.4 m<sup>3</sup>/s, le 25 janvier 2003; le volume total écoulé pendant la crue est de l'ordre de 54.74 hm<sup>3</sup>. A la station de Koudiat Tendart, l'oued Bouselah a évacué 31.85 hm<sup>3</sup> pour un débit de pointe de 180 m<sup>3</sup>/s, soit 31.09 % du total annuel. La crue du Rhumel- Seguin à Ain Smara a écoulé 39.98 hm<sup>3</sup>, du 28 décembre 1984 au 1<sup>er</sup> janvier 1985, La crue du Rhumel à Grarem a charrié les 6 au 10 mars 1985 un volume de 172.04 hm<sup>3</sup>.

L'accroissement relatif des débits entre la crue biennale, décennale et centennale, est très variable sur tous les oueds. Il varie considérablement pour les débits maximums instantanés, de 2.43 à 5.81 fois pour la fréquence décennale et de 5.03 à 24.43 fois pour la fréquence centennale. Par ailleurs, l'ANRH a cherché à expliquer les caractéristiques de crue à partir des paramètres morphométriques et pluviométriques des bassins contrôlés par des stations hydrométriques. Cependant, la comparaison des débits fréquentiels estimés par les formules A.N.R.H. avec ceux obtenus par l'ajustement gaussien-logarithmique, montre que des écarts

importants sont constatés, pouvant aller du simple au double ou triple au niveau des trois stations étudiées. Le modèle de simulation de l'hydrogramme de crue (crue décennale, cinquantennale et centennale) proposé par l'ANRH a permis d'obtenir des résultats intéressants sur le bassin du Rhumel-Endja. Ils sont indispensables pour le dimensionnement d'ouvrages où la forme de l'hydrogramme de crue joue un rôle important (comme le laminage d'une crue à la traversée d'un barrage).

Concernant les écoulements d'étiage, les QMNA prennent les valeurs les plus faibles car elles traduisent la moyenne interannuelle du débit mensuel minimal enregistré chaque année. Pour une période de retour donnée, les quantiles les plus élevés sont enregistrés aux stations de Grarem et Douar Tassadane. Les quantiles les plus faibles sont enregistrés à la station de Bouchdira et Koudiat Tendart. La station de Grarem, station la plus en aval du Rhumel, maintient des quantiles d'étiage bien supérieurs à ceux des autres stations.

Les valeurs de VCN3 les plus sévères enregistrées sont observées durant la période 1997/98 à 2000/01 pour toutes les stations hydrométriques, Cette période est caractérisée par une sécheresse sévère dans le bassin. Les coefficients de tarissement et les volumes mobilisés par les aquifères montrent que les réserves en eaux souterraines sont sensibles aux fluctuations de la pluviométrie. En effet, dans la majorité des stations hydrométriques, les coefficients de tarissement diminuent pendant les années humides et augmentent pendant les années sèches.

- **Bilan de régularisation du barrage de Béni Haroun et variabilité hydrologique**

Les données du bilan de régularisation journalière (2003/04-2017/18) du barrage de Béni Haroun confirment le retour à une plus grande fréquence d'années humides à partir de 2003, année de mise en eau de cet ouvrage. L'apport moyen observé (1013.9 hm<sup>3</sup>/an) s'avère bien plus important que l'apport théorique (435 hm<sup>3</sup>/an) défini par les études de projet. La nécessité d'effectuer un remplissage progressif du barrage, explique les importants volumes évacués par vidange de fond, notamment durant les deux premières années très pluvieuses de 2003/04 et de 2004/05. L'année exceptionnellement humide de 2014/15 se distingue par un affluent annuel de 2505.95 hm<sup>3</sup>; le maximum des pluies, des apports et des réserves se situe principalement en hiver. En année sèche (2016/17), l'affluent annuel est de 442.45 hm<sup>3</sup> et une diminution des réserves a été observée en fin d'année (937.25 hm<sup>3</sup>). Cependant, d'une année à l'autre, le niveau de remplissage du barrage Béni Haroun reste tout de même très élevé, à cause de l'abondance des apports mais aussi parce que le volume des prélèvements des eaux demeure réduit, faute d'achèvement des infrastructures de transfert et de distribution d'eau au profit des secteurs utilisateurs.

Les pertes d'eau par évaporation sont estimées à 42.39 hm<sup>3</sup> par an dont la moitié pendant les trois mois d'été. Les fuites signalées depuis 2015/16, s'élèvent en moyenne à 31.025 hm<sup>3</sup>. Les déversements de crue qui succèdent aux flux d'apport des oueds, rapides et brutaux, constituent également un « manque à gagner » important pour les gestionnaires du barrage. Les valeurs maximales des volumes évacués à travers la vidange de fond et le déversoir de crue correspondent étroitement aux années de forte abondance hydrologique. Lors du premier déversement de crue en février 2012, la cote de remplissage du barrage a atteint un pic de 201,36 m, correspondant à un volume de 1049,8 hm<sup>3</sup> et une surface inondée de 38,67 km<sup>2</sup>. Un

autre pic dépassant le premier a été atteint le 27 janvier 2015 à la cote de 202.03 m, correspondant à une capacité de 1075.9 hm<sup>3</sup> et une surface inondée de 39.219 km<sup>2</sup>. L'étude de quelques chroniques de crues (crues des années 2004/05, 2011/12 et 2014/15) a permis de comprendre la gestion de ces événements extrêmes, à travers les opérations de vidange de fond (appelée « vidange de demi-fond ») et le laminage à travers le déversoir à seuil libre du barrage de Béni Haroun.

- **Flux hydro-sédimentaires et envasement**

L'application du modèle puissance basé sur la relation débit liquide-débit solide au niveau des deux stations hydrométriques, révélé que les apports sont très variables à l'échelle interannuelle, et la quasi-totalité de l'apport solide est réalisée pendant les saisons d'hiver et d'automne. Lors de l'année très pluvieuse de 2002/03, l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane a transporté 13,633 millions de tonnes, soit une dégradation spécifique moyenne du bassin de l'ordre de 14201 t/km<sup>2</sup>/an. L'année 1984/85 a été exceptionnelle sur l'oued Rhumel à Grarem, bassin relativement moins érodable que celui d'oued Endja. L'apport solide a été estimé à 14,164 millions de tonnes, soit une dégradation spécifique de 2662 t/km<sup>2</sup>/an.

La dégradation spécifique du bassin de l'oued Endja supérieur (Oued El Kébir-amont) à Douar Tassadane représente, en moyenne interannuelle, plus de 5.5 fois la valeur de l'oued Rhumel à Grarem, cette différence s'explique principalement par la nature physico-géographique très différenciée des deux bassins- versants. La dynamique érosive qui règne dans le bassin de l'oued Endja supérieur favorise la mobilisation des sols et le transport solide.

La valeur moyenne de TSS calculée sur les deux sous bassins des oueds Rhumel et Endja au barrage Béni Haroun (619.77 t/km<sup>2</sup>/an et 712.74 t/km<sup>2</sup>/an si on doit tenir compte du charriage), se révèle sous-estimé comparée au résultat de la campagne bathymétrique de l'ANBT réalisée sur la retenue du barrage en 2013. Elle abouti à un envasement annuel de 8.3 hm<sup>3</sup>/an (soit une dégradation spécifique du bassin de l'ordre de 1728 t/an /km<sup>2</sup>).

Par conséquent, le toit (172 m) de la tranche morte serait atteint dans une durée d'environ 29 ans (soit:  $240/8,3= 28.9$ ) depuis la première mise en eau du barrage et le volume mort serait comblé à l'horizon 2032.

- **L'aspect qualitatif de l'eau du barrage de Béni Haroun**

L'étude du faciès chimiques du barrage Béni Haroun par la méthode de PIPER a montré que les eaux sont caractérisées par un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien. La prédominance de ces éléments est liée à une double origine, naturelle et anthropique.

Les résultats des analyses physico-chimiques de 2005 à 2014, disponibles sur le site de la retenue de Béni Haroun, montrent qu'un grand pourcentage des teneurs liés à la pollution agricole, industrielle et domestique est supérieur aux normes, ce qui indique que les eaux de la retenue du barrage ne peuvent être affectées à la consommation humaine sans traitement préalable. La synthèse des paramètres physico-chimique du barrage de Béni Haroun durant

l'année 2005 a permis de classer cette eau entre moyenne et mauvaise. Tandis qu'en l'année 2014 l'eau du barrage étaient d'une qualité bonne à moyenne. Cependant, la qualité de l'eau du barrage s'est nettement améliorée durant l'année 2018 par comparaison aux données de l'année 2014.

Les eaux de surface ne sont pratiquement jamais potables sans un traitement préalable, du fait de diverses substances d'origine naturelle ou apportées par la pollution. Pour améliorer leur qualité, elles nécessitent des traitements appropriés, c'est-à-dire leur faire subir des modifications physico-chimiques et biologiques dans la chaîne de traitement classique.

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

- Abdellaoui B, Merzouk A, Aberkan M et Albergel J (2002) Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc). *Rev. Sci. Eau* 15 (4): 737-748
- Abdeddaim H (2018) Contribution à l'étude de l'influence de la structure du réseau hydrographique sur le risque hydrologique « cas des bassins de l'Est de l'Algérie », Thèse de Doctorat En Sciences Hydrauliques. Faculté des Sciences et de la technologie, Université Mohamed Khider – Biskra–, Algérie. pp 1-276.
- A.B.H (de 1999 à 2004) Les Cahiers de l'Agence, Agence de Bassin Hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue, Constantine.
- Achite M, Meddi M (2004) Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*, 15 (4), 367–373. [http://www.jle.com/fr/revues/agro\\_biotech/sec/e-docs/00/04/0A/10/article.md?type=text.html](http://www.jle.com/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/0A/10/article.md?type=text.html) [Accédé le 21 mars 2013]
- Achite M, Meddi, M (2005) Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'Oued Mina (Nord-Ouest algérien) *Revue des Sciences de l'Eau*, 18 (spécial), 37–58. [http://www.rse.inrs.ca/art/volume18/v18nS\\_37.pdf](http://www.rse.inrs.ca/art/volume18/v18nS_37.pdf) [Accédé le 21 mars 2013]
- Achite M., Ouillon S (2007) Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of Hydrology*, 343, 187–202.
- Achite M., Ouillon S (2016) Recent changes in climate, hydrology and sédiment load in the Wadi Abd, Algeria (1970-2010), *Hydrol, Earth Syst. Sci.*, 20, 1355-1372. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1355-2016>
- Achour S (2001) Incidence des procédés de chloration, de floculation et d'adsorption sur l'évolution de composés organiques et minéraux des eaux naturelles. Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Hydrauliques. Université de Tizi-Ouzou, Algérie. 231 p.
- Achour S, Chabbi F (2017) Etude Des Etapes D'oxydation/Désinfection de la station de traitement des eaux D'ain Tinn (Mila, Est Algerien). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°31, Sept 2017, pp. 233-247
- AFNOR (1975) Essais des eaux. Table de solubilité de l'oxygène dans l'eau. NFT 90-032.
- Afri-Mehennaoui F. Z (1998) Contribution à l'étude physico-chimique et biologique de l'Oued Kébir-Rhumel et de ses principaux affluents. Mémoire de magistère en Ecologie. Université Mentouri, Constantine, 238p.
- Afri-Mehennaoui F-Z, Sahli L, Mehennaoui S (2004) Assesment of sediment trace metal level and biological quality of Rhumel river by using multivariate analysis, *Environmetrics*, 15, pp. 435-446.
- Akli S. 2015. Economie des ressources en eau en Algérie : quelle place pour la gestion de la demande et quel impact sur l'économie de l'eau ? Application au bassin Côtier Algérois 02 A. Thèse de doctorat. Ecole Nationale supérieure d'agronomie . Alger . 200 p.
- Albergel J, Pipin Y (2003) Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens, *Hydrology of the mediterranean and semi arid regions*, no 278, pp: 373-379.
- Amirèche H (2001) L'eau, le substrat, la tectonique et l'anthropisation dans les phénomènes érosifs du Tell Nord-Constantinois. Thèse d'Etat. FSTGAT. Université de Constantine. Algérie. 229 p.

- Amireche H (2009) Dégradation dans les bassins versants de l'Algérie orientale, effets et stratégies d'aménagement cas du bassin versant des Zardezas. *Revue science et technologie*. 33-40p.
- Amoussou E (2010) Variabilité pluviométrique et dynamique hydrosédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono- Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie, 310p.
- A.N.B.T (2014) Agence Nationale des barrages et transferts, service d'exploitation du barrage de Beni Haroun (B.B.H) ; levés bathymétriques de onze barrages en exploitation, campagne de mesures Beni Haroun.
- ANBT (2014) Agence Nationale des Barrages et Transferts Fiche technique des barrages. Agence National des barrages et de transfert – Alger.
- ANRH (1993) Carte pluviométrique de l'Algérie à l'échelle du 1/500.00 + notice explicative, Alger.
- ANRH (2002) Carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie au 1/500 000 (2 feuilles, notice de 42 p.), Ministère des Ressources en Eau, Alger, Ed. I.N.C.T.
- ANRH (2003) Etude de synthèse sur les ressources en eaux de surface de l'Algérie du Nord, Alger, A.N.R.H., Rapport technique, 36 p.
- ANRH (2008) Etude générale des crues du Nord de l'Algérie Etude, Modélisation des débits de crues.
- Assaba M (2004) La connaissance des pluies mensuelles au service de la modélisation hydrologique des apports mensuels en eau de surface : application à l'Algérie du Nord, au Sud de la France et à la Corse, Thèse doctorat, Université de Nice - Sophia Antipolis, 399 p.
- Assemian E A, Kouame F K, Djagoua E V, Affian K, Jourda J P R, Adja M, Lasm T. ET Biemi J (2013) Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide : Cas du département de Bongouanou (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 26, n° 3, 2013, p. 247-261.
- Baxter R M et Glaude P (1980) Les effets des barrages et des retenues d'eau sur l'environnement au Canada: expérience et perspectives d'avenir, *Bulletins canadiens des sciences halieutiques et aquatiques*, 205 F : 44p.
- Beaudry T, Henry T-M (1984) Chimie des eaux, édition. Les griffons d'argiles, 1ère, édition, INC Canada. 537 pp.
- Becker E, Durfor C-J (1972) Constituents and properties of water. Dans: *Water quality in a stressed environment*. W.A. Pettyjohn (dir. de publ.). Burgess Publishing Company. – AELB, 49 p.
- Bekkoussa B, Meddi M, Jourde H (2008) Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *Sècheresse* 18(3), 173–184 p.
- Benayache N (2014) Évaluation du niveau de la pollution organique des eaux des barrages Hammam Grouz et Béni Haroun. Mémoire de Master 2 en Écologie et Écotoxicologie. Université de Constantine 1, 43 p.

- Benchabane N (2015) Relation Barrage-Nappes. Etude de cas : barrage Béni Haroun .Wilaya de Mila. Mémoire de magistère en Hydrogéologie. Université des frères Mentouri Constantine 1.113 p.
- Benfetta H, Ouadja A, Achour B, Remini B (2016) Perte de capacité dans les barrages situés dans les zones arides et semi arides. Cas des barrages de Gargar, Bouhanifia, Ouizert et Fom El Gherza. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°25, Mars 2016, pp. 183-201
- Benkhalel A, Remini B (2003) Analyse de la relation puissance débit solide–débit liquide à l'échelle du bassin-versant de l'Oued Wahrane (Algérie). Revue des Sciences de l'Eau, 16 (3), 333–356. [http://www.rse.inrs.ca/art/volume16/v16n3\\_333.pdf](http://www.rse.inrs.ca/art/volume16/v16n3_333.pdf) [Accédé le 21 mars 2013]
- Benkhalel A, Remini B (2003) Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algérie). J. Sci. Hydrol. 48 (2), 243–255.
- Ben Mammou A, Louati M-H (2007) Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie, Rev. Sci. Eau 20 (2): 201-210
- Berkat K (2016) Suivi de la qualité physico-chimique des eaux du Barrage Béni Haroun. Mémoire de Master 2 en Pollution des écosystèmes et Eco toxicologie. Université de Constantine 1, 54 p.
- Bernier J (1959) Comparaison des lois de Gumbel et de Fréchet sur l'estimation des débits maxima de crue. Réunion partielle de la Société Hydrotechnique de France (Section Hydrotechnique de France (Commission pour l'étude des débits de crue), Paris le 12 septembre 1957. La Houille Blanche ,1 : 47-56.
- Berolo W, Laborde J-P (2003) Les précipitations journalières extrêmes sur les Alpes-Maritimes : analyse statistique et cartographie automatique des paramètres. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université de Nice-Sophia Antipolis, 156 p.
- Bertraneu J (1955) Étude géologique du massif du Bou Taleb (Algérie). Service de la Carte géologique de l'Algérie.
- Binnie, Partners (1980) Barrage de Hammam Grouz, Monographie, 49 p.
- Bouanani A (2004) Hydrologie, Transport Solide et Modélisation : Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). Thèse de d'état en géologie appliquée : Option hydrogéologie, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 250 p.
- Bouanani A, Baba Hamed K, Mania J, Bensalah M (2005) Le comportement d'un système hydrologique en climat méditerranéen par l'analyse corrélatoire et spectrale des débits et des pluies. Cas de trois sous bassins sud-méditerranéens:(oued Sebdou, Moulah et Isser-Tafna-NW Algérie). Rev. Sci. Eau Journal Water Sci. 18, 215–224.
- Bouanani A (2005) Hydrologie, transport solide et modélisation, étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW Algérie). Thèse de Doctorat, Université Tlemcen, Algérie.

- Bouchaou L, Mangin A, Chauve P (2002) Turbidity mechanism of water from a Karstic spring: example of the Ain Asserdoune spring (Beni Mellal Atlas, Morocco). *Journal of Hydrology*, 265(1-4): 34-42.
- Bouchelkia H, Belarbi F, Remini B (2011) Quantification du transport solide en suspension par analyse statistique: cas du bassin-versant de l'oued Mouillah. *Le journal de l'eau et de l'environnement*. No. 19 p. 29–41.
- Boudjadja A, Messahel M, Pauc H (2003) Ressources hydriques en Algérie du Nord, *Revue Science de l'eau*, Numéro 16, PP : 285-304
- Bouguerra S (2016) Quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie Septentrionale : cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (Tlemcen). *Mémoire de Magister, Université Aboubekr Balkaid, Tlemcen Algérie*. 141p.
- Bouhaddioui C, Roy R (2006) On the distribution of the residual cross-correlations of Infinite order vector autoregressive series and applications. *Stat. Probab. Lett.* 76, 58–68.
- Boulahbel S, Mebarki A (2013) Fonctionnement hydrologique du Barrage de Béni Haroun (oued Kébir-Rhumel, Algérie orientale, CIRED Alger, pp 749 754
- Bourouba M (1996) L'érosion actuelle dans l'Algérie septentrionale: Bilan d'érosion comparatif de deux affluents du Cheliff : l'Oued Ebda et l'Oued Deurdeur. *Travaux de l'institut de Géographie de reims* .113-127 p.
- Bourouba M (1997) Les variations de la turbidité et leurs relations avec le débit et les précipitations dans les bassins-versants des Oueds Reboa et Boudouaou (Algérie orientale), *revue MEDIT*, 3, Bologne (Italie) : 52- 58.
- Bourouba M (1998) Contribution a l'étude de l'érosion et des transports solides de l'Oued Medjerda supérieur, (Algérie orientale). *Bulletin de l'ORSTOM*, 18: 76-97.
- Boutouatou F, Mébarki A, Nouaceur Z, Laignel B (2019) Les barrages de L'Est Algérien : Caractérisation, bilans d'eau et variabilité Hydrologique .*Revue des Sciences & Technologie D – N°50, Constantine* .9-23 p.
- Brahmi S (2013) Comportement des éléments chimiques dans les eaux de surface du Barrage de Beni Haroun (Est Algérien), *Mémoire de magister en Hydrogéologie , Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Tébessa*
- Bravard J.-P, Petit F (2000) *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*, Paris, A. Colin, Collection U. Géographie, 222 p.
- Brémond R, Vuichard R (1973) *Les paramètres de la qualité de l'eau*. Ed. La documentation française. Paris. 173p.
- Bricquet J-P (1990) Régime et bilan hydrologique de l'Afrique Centrale. In: *Paysages quaternaires de l'Afrique Centrale Atlantique* (éd. par R. Lanfranchi & D. Schwartz), 42-51. Publ. ORSTOM - Collection Didactiques, Paris.
- Bricquet J P, Bamba F, Mahe G, Toure M. et Olivry J.C (1997) Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique, *PHI-V*, 6, 83-95.

- Brockwell P J, and Davis R A (1987) Time Series: Theory and Methods. Springer-Verlag, New York.
- Brutsaert W (1982) Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 299 p
- Cailleux Q (2016) Etude et modélisation hydraulique destinées à l'élaboration des courbes de tarage de stations de mesure hydrométrique. Mémoire de Master en Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie. Université Pierre et Marie Curie. 50p
- Capurro A, Maltaa C, Diambra I, Contreras P (2005) Cross correlation of heartbeat and respiration rhythms, *physica*.
- Carrega P (1988) L'évapotranspiration potentielle et réelle dans le Midi méditerranéen. Son originalité par rapport au reste de la France, *Méditerranée* n°4, pp. 3-8.
- CEMAGREF (1989) Hydrologie appliquée aux petits bassins, Antony, Division Hydrologie, Hydraulique fluviale et souterraine, 528 p.
- Chadid O (2003) Analyse des séries hydrométéorologiques par la transformée en ondelettes (Phd Thesis). École de technologie supérieure.
- Chaumont M et Paquin C (1971) Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord, échelle 1/500.000 (4 feuilles et notice), Société de l'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, Alger, 24 p.
- Chetatha N (2016) Etude d'un barrage en terre (digue) barrage oued Halib (W. Setif), Mémoire de Fin D'études En vue de l'obtention du diplôme de Mastère Génie Civil, Université Ziane Achour de Djelfa.
- Chibbani R, Djilli K, Roose E (1999) Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bull. ORSTOM*, Rés. Eros., 19, 85-95.
- Corbonnois J, François D, Arts I, Sary M, Gille E, Gamez P, Devos A, Decloux J-P (1999) Répartition des écoulements en basses eaux. Aspects méthodologiques, XXIIe Assemblée Générale de L'UGGI, CNFGG, Birmingham, 18-30 juillet 1999, Rapport quadriennal 1995-1998, pp. 253-260.
- Corbonnois J (2000) Les facteurs de l'organisation spatiale des écoulements en étiage. Exemple du bassin du Mouzon (Lorraine), *Revue de géographie de l'Est*, tome XXXX, 1-2/2000, pp. 23-33.
- Cosandey Cl, Robinson M (2000) *Hydrologie continentale*. Paris, Armand Colin, Collection U. Géographie, 360 p.
- Day E-H (1963) The chemical elements in nature. London, U.K. Edit. G. George Harrap & co London.
- Degremont (1989) Mémento technique de l'eau, Technique et documentation, tome 1, 524 pp.
- Demmak A (1982) Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Paris VI, 323 p.
- Demmak A (2010) Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau, Programme MEDA de l'Union Européenne, Alger, Algérie, 102 p.

- De Villers J, Squilbin M, Yourassowsky C (2005) Qualité physicochimique et chimique des eaux de surface. Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement.
- El Mahi A, Meddi M, Matari A, Ketrouci K (2004) Etat de la pluviométrie en période de sécheresse en Algérie du nord et sa relation avec le phénomène ENSO. *Actes du colloque "Terre et Eau"* (Annaba, 2004), p. 420-423.
- El-Mahi A, Meddi M, Bravard J P (2012) Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'oued El Hammam (Algérie du Nord). *Hydrological Sciences journal*, 57 :8, 1642-1661.
- El Ouafi M (1993) Tariessement et vidange des réservoirs de la Liane (Nord de la France). *Hydrologie Continentale*, 8 (2), pp. 103-112.
- El Wartiti M, Malaki A, El Mahmoudi N (2012) Évaluation effective de la Vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine de Gharb à l'aide du SIG et la méthode DRASTIC (NW du Maroc). Chapitre IV : Hydrochimie et Vulnérabilité des aquifères souterrains. 25 p.
- Emberger L (1942) Un projet de classification des climats du point de vue phyto-géographique. *Bull. Sci. Hist. Nat. Toulouse*, 77: 97-124.
- Farah M-S (1991) Etude du comportement hydrogéochimique d'un oued en zone méditerranéenne semi-aride d'Afrique du Nord et de ses causes naturelles et anthropiques : l'oued Rhumel, Constantinois, Algérie, Thèse de Doctorat en Géologie Appliquée (Hydrogéologie) , Université d'Orléans, 217 p.
- Farah A K (2014) Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien. Magistère en Ecologie et Environnement. *Faculté des Sciences de la Nature Et de la Vie*. Université Constantine 1 (Algérie). 197p
- Fossou R M N, Lasm T, Soro N, Soro T, Soro G , De lasme O Z, Baka D, Onetie O Z, Orou R (2015) Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas des stations de bocanda et de dimbokro au centre-est de la cote d'ivoire (afrique de l'ouest). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°21, 97-120 p.
- Franck, Rejsk (2002) Analyse des eaux, Aspects réglementaire et techniques. Série Sciences et Techniques de l'Environnement, Edition Scérène, 361p
- Futatani S, Bos W J, Del-Castillo-Negrete D, Schneider K, Benkadda S, Farge M (2011) Coherent vorticity extraction in resistive drift-wave turbulence: Comparison of orthogonal wavelets versus proper orthogonal decomposition. *Comptes Rendus Phys.* 12, 123–131.
- Gaagai A (2009) Étude hydrologique et hydrochimique du bassin versant du barrage de Babar sur Oued El Arab région est de l'Algérie, mémoire de magistère. Université de Batna 117p.
- Galéa G, Mercier G, Adler M J (1999) Modèle débit-durée-fréquence d'étiage, concept et usage pour une approche régionale des régimes des basses eaux des bassins hydrographiques de la Loire (France) et du Crisu-Alb (Roumanie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 12/1 (1999), pages 93-122.
- Garcia F (2016) Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 222 p.

- Gaujous D (1995) La pollution des milieux aquatiques, aide-mémoire, Édition2, Éditeur Tec& Doc Lavoisier, 220 p.
- Gaula B-T, Savane I, Konan B, Fadika V, Kouadio G-B (2006) Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide), Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 7 Numéro 1
- Gausson H (1948) Carte des précipitations de l'Algérie (moyenne 1913-47), échelle 1/500. 000. I.G.N., Paris.
- Gausson H, Bagnouls F (1952) L'Indice xérothermique. B. de l'Association des Géographes français, 222 et 223
- Gazzalo T, Bassi G (1969) Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituant les bassins versants des cours d'eau italiens. Ex/raits de publications de l'Agence IIOlienne d'Hydraulique, 53.
- Ghachi A (1986) Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie. Thèse. Doctorat, OPU. 508 p.
- Ghenim A, Terfous A, Seddini A (2007) Etude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes: cas du bassin-versant de l'Oued Sebdou (NordOuest algérien). Sécheresse, 18 (1), 39–44
- Girard G, (1966) Estimation de l'évaporation sur les réservoirs de barrages en région intertropicale semi-aride. Extrait de la publication no. 70 de l'A.I.H.S. Symposium de Garda : 233-244 p.
- Gouaidia L (2008) Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi arde, cas de la nappe de Meskiana, nord est algérien, thèse de doctorat d'état, univ. D'Annaba, 199 p.
- Grossmann A, Morlet J (1984) Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelet of constant shape. SIAM, J. Math. Anal., 15: 723-736.
- Guidoum A (2004) Etude hydrologique du bassin versant de l'Oued Chemorah à la station de Chemorah (W. de Batna, Est Algerien). Mémoire de Magister en Hydraulique, Université Hadj Lakhdar, Batna, 259 p.
- Guidoum A (2017) Caractérisation hydrologique et analyse du transport solide en suspension dans trois ensembles hydrographiques du nord-est algérien. Etude de cas dans la Seybouse, les hautes plaines constantinoises et Chott Melghir (Coupe Nord-sud) (PhD Thesis). Université Mohamed Khider-Biskra.
- Gumbel E J (1958) Statistics of Extremes, Columbia Press, New York, 375 p
- Halimi S (2008) Ressources et essai de gestion intégrée des eaux du bassin versant d'oued Cherf/Sedrata (Nord – Est Algérien). Thèse de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, Faculté des sciences de la Terre Département de Géologie, Option : Hydrogéologie. 126p.
- Halouze F (2013) Modélisation du transport solide dans le bassin d'El oued Mina et de la sédimentation du barrage S.M.B.A. Thèse de doctorat .Ecole nationale supérieure d'hydraulique (ENSH).

- Hamlat A.2014. Contribution à la gestion des ressources en eau des bassins versants de l'Ouest Algérien à l'aide d'un système informatisé. Thèse de doctorat .Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. 243p.
- Harrat N, Achour S (2010) Pollution physico-chimique des eaux de Barrage de la région d'El Tarf. Impact sur la chloration, Larhyss Journal, n°8, 47-54.
- Harrat, N, Achour S (2011) Qualité et réactivité des eaux de barrage de Zit El Amba alimentant la station de traitement d'Azzaba, *Courrier du Savoir Scientifique et Technique*, n°11, 113-117.
- Hayane S M (1983) Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Sikkak (région de Tlemcen). Thèse Doctorat 3e cycle, Université Oran. 236 p, 91 figures.
- Heusch B, Milles-Lacroix A (1971) Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin du Maghreb, *Mines et Géologie*, n° 33, Rabat, pp. 21-39.
- Hirche A, Boughani A, Salamani M (2007) Évolution de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides algériennes. *Sécheresse* 18, 314–320.
- Horowitz A J (2002) The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment. In Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, 30 April- 2 May, Reno, Nevada.
- IISD (2003) L'Institut international du développement durable 2003 : Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre International Institute for Sustainable Development 2003.
- Jelassi M A (2014) Caractérisation de la variabilité hydrologique de la Medjerda dans le cadre de la future mission spatiale SWOT, Mémoire de master, université Rouen (France) and Reports on Engineering Practice 70, ASCE, Am. Soc. Civil Engrs., New York, NY, 360 p.
- Jensen M E, Burman, R D, Allen R G (1990) Evapotranspiration and irrigation requirements. ASCE Manuals
- Jowett J-R (1980) Clean lakes program guidance manual. United States Environmental Protection Agency. Washigton D.C. 20460. EPA-440/5-81-003.
- Kabouya M (1990) Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 p.
- Kerdoud S (2006) Le bassin versant de Béni Haroun : Eau et pollution, Mémoire de magister, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire.
- Khanchoul K (2006) Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants du Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat, Université Annaba, Algérie
- Ketrouci K (2014) Application de modèles hydrologiques dans l'estimation des crues extrêmes en Algérie. Thèse de doctorat, Faculté de l'Architecture et de Génie Civil Département de l'Hydraulique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 244p
- Kiken M (1983) Carte d'Esquisse techtonique de l'Algérie.

- Kingumbi A, Bergaoui Z, Bourges J, Hubert P, Kallel R (2000) Etude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie Centrale. File:///C:/Apacheroot/htdocs/medweb/WEB-documents/kingumbi.htm (1 sur 8) [07.12.2000 11:41:13]
- Kingumbi A (2006) Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie Centrale. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, 300 p.
- Kouassi A M (2007) Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat unique, Université de Cocody, 210 p.
- Kouassi A.M, Kouame K F, Saley M B, et Biemi J (2013) Impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). Larhyss Journal, N°16, 121-138
- Kouassi A-M, Nassa R-A-K, N'guessan B-T-M, Kouame K-F, Biemi J (2018) Caractérisation des débits d'étiage dans un contexte de changements climatiques : cas du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire). Agronomie Africaine, Vol.30, N°3, pp.215-223.
- Labat D, Ababou R, Mangin A (2000) Rainfall–runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. J. Hydrol. 238, 149–178 p.
- Labat D (2005) Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. Journal of Hydrology, 314(1-4): 275-288.
- Labat D (2008) Wavelet analysis of the annual discharge records of the world's largest rivers, Advances in Water Resources, 31(1), 109-117.
- Labat D (2010) Cross wavelet analyses of annual continental freshwater discharge and selected climate indices, Journal of Hydrology, 385(1-4), 269-278.
- Laborde J P, Mouhous M (1998) Logiciel Hydrolab, version 98.2, équipe Gestion et valorisation de l'environnement de l'UMR 5651 « Espace » du CNRS, 43 p.
- Laborde J P (2000) Hydrologie de surface, Cours Université de Nice-Sophia Antipolis, 191 p.
- Laborde J.P., Assaba, M. & Belhouli, L (2003) Les chroniques mensuelles de pluies de bassin: un préalable à l'étude des écoulements en Algérie, (Colloque International SHF, Gestion du risque eau en pays semi-aride, Tunis, Tunisie, 21-22 mai 2003).
- Laftouhi N, Persoons E (2007) Influence des Variations Climatiques Sur Le Régime Hydrologique du Bassin Versant Du Ksob (Essaouira Maroc). *Technical Document In Hydrology*, Vol. 80, Édit. Unesco Et Hydrosociences-Montpellier, P. 85-98.
- Lahache R G, Pillet G (2008) Projection des ressources en eau de la Tunisie sous les effets des changements climatiques globaux. *XIII<sup>th</sup> World Water Congress* (Montpellier. 2008), 12 p.
- Lahlou A (1982) La dégradation spécifique des bassins versants et son impact sur l'envasement des barrages, IAHS Publ, numéro 137, pp : 163-169.
- Lahlou A (1994) Envasement des barrages au Maroc. Casablanca (Maroc) ; Editions Wallada, 277 p.

- Laignel B, Nouaceur Z, Jemai H, Abida H, Ellouze M, Turki (2014) Vers un retour des pluies dans le nord-est tunisien?, in: Proceedings of the Actes Du XXVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie-2 pp. 727–732.
- Lakache H, Nouaceur Z, Mébarki A, Mesnage V (2019) La relation pluie - débit dans un hydro système semi-aride méditerranéen : cas du bassin de l'oued Endja, a l'amont du barrage Beni Haroun (Algerie Orientale). *Revue des Sciences & Technologie D – N°50, Constantine* .25-35 p.
- Lamb P J (1982) Persistence of subsaharan drought. *Nature* 299. 46-47 p.
- Lang C et Gille E (2006) Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'été. *Norois, numéro 201 (2006/4)*.
- Lang C (2007) Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Thesis (PhD). CEGUM, Université Paul Verlaine (Metz).
- Lang Delus C (2011) Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage, article 571, (en ligne)*.
- Larocque M, Mangin A, Razack M, Banton O (1998) Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology* 205:217-231.
- Lavabre J, Cambon J P, Folton C, Makhlof Z, Michel C (2010) LOIEAU : un logiciel pour l'estimation régionale de la ressource en eau – application à la détermination des débits de référence de la région méditerranéenne français. *Ingénieries –Eat –N°12*. 59-66 p.
- Lefort P (1992) Cours de transport solide dans le lit des cours d'eau. Institut national polytechnique de Grenoble, France (INP), 225 p.
- Louamri A (2010) Contribution à l'évaluation des Transports Solides de L'Oued Bouhamdane à la Station de Medjez Ammar II et a Barrage de Hammam Debag. *International Network Environmental Management Conflicts, Santa Catarina- Brasil, 1/1 : 23-29*.
- Louamri A (2013) Le bassin versant de la Seybouse (Algérie orientale) Hydrologie et aménagement des eaux Thèse de doctorat d'Etat, Université Mentouri de Constantine, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire .
- Louamri A, Mebarki A, Laignel B (2013) Variabilité interannuelle et intra-annuelle des transports solides de l'Oued Bouhamdane, à l'amont du barrage Hammam Debagh (Algérie orientale). *Hydrological Sciences Journal*, 58 (7), 1559–1572.
- Lounnas A (2008) Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station hamadi-kroma de skikda, Algérie, mémoire de magister. Univ. du 20 Août 1955 Skikda. 120 p.
- Magnounif A, Terfous A, Bouanani A (2003) Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la haute-Tafna (Nord-Ouest Algerien). *Rev Sci Eau* 16 (3) : 369-380.
- Mahmood K (1987) Reservoir sedimentation: impact, extent, mitigation. *II'orid Bank Technical l'aper n°71*. Washington OC, USA

- Mahé G, Olivry J C (1999) Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa, C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa 328 621–626.
- Makhlouf Z, Michel C (1994) A Two-Parameter Monthly Water Balance Model For French Watersheds, *Journal Of Hydrology*, 162, pp. 299-318.
- Makhoukh M, Sbaa M, Berrahou A, Clooster M (2011) Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc Oriental). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 09, pp 149-169
- Marouf N, Rémini B (2011) Temporel Variability in Sediment Concentration and Hysteresis in the Wadi Kébir Rhumel Basin of Algeria. *The hong kong institution on engineers Transactions*, No 1, p13-21
- Marouf N (2012) Etude de la qualité des eaux et de transport solide dans le barrage de Béni Haroun (Mila), son impact sur l'environnement de la région. Thèse de doctorat à l'université de Biskra. 242 p.
- Massei N, Dupont J P, Mahler B J, Laignel B, Fournier M, Valdes D, Ogier S (2006) Investigating transport properties and turbidity dynamics of a karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses. *J Hydrologie*. 329, 244–257.
- Massei N, Laignel B, Rosero E, Motelay-massei A, Deloffre J, Yang Z.-L, Rossi A (2011) A wavelet approach to the short-term to pluri-decennal variability of streamflow in the Mississippi river basin from 1934 to 1998. *Int. J. Climatol*. 31, 31–43p.
- Mebarki A (1982) le bassin du Kébir Rhumel, Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau, Thèse doctorat 3 ème cycle, Université de Nancy II,
- Mebarki A et Thomas C (1988) Analyse des relations entre écoulements superficiels et souterrain à partir des hydrogrammes des cours d'eau. Application au bassin du Kébir-Rhumel dans le Constantinois (Algérie), *Hydrologie continentale*, O.R.S.T.O.M paris
- Mebarki A (2000) Etiages, rejets et protection des ressources en eau des bassins méditerranéens de l'Algérie orientale. *Géocarrefour*, 75/4, l'interface nature-sociétés dans les hydrosystèmes fluviaux : 399-416.
- Mebarki A (2003a) Cartographie automatique des précipitations: application à l'Est algérien. *Revue des Sciences et Technologie*, série B, n° 20, pp. 100-107.
- Mebarki A (2003b) Cartographie automatique du contexte hydro climatique algérien (Algérie orientale et bassin du Kébir-Rhumel), *Revue du Laboratoire d'Aménagement du Territoire*, n°1, pp. 72-89.
- Mebarki A (2003c) Analyse et cartographie automatique des éléments du bilan hydrologique en vue de l'aménagement : cas de l'Est algérien et de ses bassins semi-arides et arides, *Colloque international : Oasis, eau et population*, Biskra, 22-24 septembre 2003, Université de Biskra, LARHYSS.
- Mebarki A (2005) Hydrologie des bassins de l'Est algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement, Thèse de doctorat d'Etat, Université Mentouri de Constantine, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire.

- Mebarki A (2006) Aménagement des eaux de surface : les barrages et leur impact régional dans l'Est algérien .Colloque international sur la protection et préservation des ressources en eau c.i.p.p.r.e. Université de Blida, faculté des sciences de l'ingénieur, département de génie rural.15 p.
- Mebarki A (2007) Une nouvelle cartographie du déficit hydrique : application l'Est algérien (et Algérie du nord), Bulletin des sciences Géographiques N°20, (Octobre 2007) PP 39-45
- Mebarki A, Benabbas C et Grecu F (2008) Le système « Béni Haroun » (Oued Kébir –Rhumel, Algérie) : aménagement hydrauliques et contraintes morpho-géologiques Analele Univeriti Bucuresti, Geografie, LVII, 37-51.
- Mebarki A (2009) Ressources en eau et aménagement en Algérie. Les bassins hydrographiques de l'Est. Office des Publications Universitaires, Alger, 389 p.
- Mebarki A (2009) la région du Maghreb face à la rareté de l'eau. L'exemple du défi algérien : mobilisation et gestion durable des ressources,icd+18 2 nd international conférence: climat, Sustainability and Development in semi-arid, regions august 16-20, 2010, Fortaleza-ceara, Brazil
- Mebarki A (2010) Hydrologie, barrages et transferts d'eau en Algérie orientale. Bulletin des sciences géographiques N°25 : 33-41 p.
- Mebarki A et Laborde J.P. (2012) Synthèse cartographique des bilans hydriques de l'Algérie du Nord. Séminaire international « Eau et climat, Regards croisés Nord-Sud », Université de Rouen, 25 et 26 septembre 2012.
- Meddi M (1995) Etablissement d'un Modèle expliquant la répartition spatiale des pluies annuelles et mensuelles en fonction de la morphométrie. Revue EDIL INFO-EAU, Trimestriel International de Liaison Eau Environnement, 5, 9-21 p.
- Meddi M (1999) Étude du transport solide dans le bassin versant de l'oued Ebda (Algérie). Zeitschrift fur Géomorphologie, 43,167-183
- Meddi M et Hubert P (2003) Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. In : *Hydrology of the Mediterranean and semiarid regions*, IAHS publication, n°278, p. 229-235.
- Meddi H et Meddi M (2007) Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *GeographiaTechnica*, n° 2, p. 49-55.
- Meddi M, Assani A, Meddi H (2010) Temporal variability of annual rainfall in the macta and tafna catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management* 24(14): 3817-3833 p.
- Medjereb A (2005) Etude pluviométrique de l'Algérie Nord-Occidentale. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et Aménagement du Territoire, USTHB, Alger, 569p.
- Medejerab A, Henia L (2011) Variations Spatio-Temporelles De La Sècheresse Climatique En Algérie Nord-Occidentale. *Courrier Du Savoir – N°11, Mars 2011, Pp.71-79*
- Mehennaoui- Afri F. Z (1998) Contribution à l'étude physico-chimique et biologique de l'Oued Kébir-Rhumel et de ses principaux affluents. Mémoire de magistère en Ecologie. Université Mentouri, Constantine, 238p.

- Megnounif A, Terfous A, Bouanani A (2003) Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (nord-ouest algérien). *Revue des Sciences de l'eau*, 16/3 : 369-380.
- Megnounif A (2007) Etude du transport des sédiments en suspension dans les écoulements de surface, *Thèse de Doctorat*, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 184p.
- Meigh, J, Tate, E et McCartney M (2002) Methods for identifying and monitoring river flow drought in southern Africa. *Friend 2002-Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice*, (274), 181-188.
- Mekaoussi N (2013) Comportement des éléments chimiques dans les eaux de surface de Hammam Debagh (Est algérien), mémoire de magister, Univ. de Batna, 110 p.
- Mekhloufi N (2014) Prédétermination et Prévision des étiages des Oueds de l'Algérie Septentrionale. Mémoire de Magistère de l'Université de Kasdi Merbah Ouargla, faculté des sciences pratique département d'Hydraulique et Génie Civil, 120p.
- Melghit M (2012). Qualité physico-chimique, pollution organique et métallique des compartiments Eau /Sédiments de l'oued Rhumel, et barrages Hammam Grouz et Beni Haroun. Université Mentouri de Constantine ; Mémoire de Magistère en Ecologie. 175p.
- Merabet S (2010) Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux brutes et distribuées du barrage réservoir de Beni Haroun, thèse de magister, Université de Constantine.
- Mesquita j (2009) Facteurs de contrôle climatique et géomorphologique de la variabilité hydrologique de bassins versants en substrat carbonate Comparaison Haute Normandie (FR) et Région d'Austin, Texas (USA), l'université de Caen (France)
- Mihoubi N (2009) Fonctionnement et gestion hydrogéologique et hydrologique des ressources en eau du bassin de Hammam Grouz, Mémoire de magister, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire, Département de la géologie,
- Mihoubi N, Mebarki A, Laignel B (2013) Hydrologie et bilans d'eau d'un barrage en zone karstique semi-aride : Hammam Grouz (Oued Rhumel, Algérie), *Bulletin des sciences géographiques*, N°28 : 37-44 p.
- Mihoubi N, Mebarki A (2017) Bassin du Haut-Rhumel : contexte hydrogéologique et fuites d'eau du barrage de Hammam Grouz. *Revue des Sciences & Technologie D – N°45*, Constantine .131-140 p.
- Mkhandi S H, Kachroo R K, Gunasekara T A G (2000) Flood frequency analysis of southern Africa: II. Identification of regional distributions. *Hydrol, Sci, J*, 45/3: 449–464.
- Moreau F (1995) Méthodes de traitement de données géophysiques par transformée en ondelettes. (Phd Thesis). Université Rennes 1.
- Musset R (1935) Les calculs relatifs au régime pluviométrique : fraction pluviométrique, écart pluviométrique relatif, coefficient pluviométrique relatif. *Etudes Rhodaniennes*, 11 : 75-85.
- Mutua, F.M., (1994) The use of the Akaike Information Criterion in the identification of an optimum flood frequency model. *Hydrol. Sci. J.* 39/3 :235–244.

- MRE- Ministère des Ressources en Eau (2010) Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau en Algérie. Mission 2 : Ressources et demandes ; Tome 3 : Envasement des barrages. Programme MEDA de l'Union Européenne, Ministère des Ressources en eau de la République Algérienne Démocratique et Populaire, Direction des études et des aménagements hydrauliques, 65 p.
- Nalco (1983) Manuel de l'eau, Tec- Doc- Lavoisier, Paris.
- Nandalal K. D. W, Bogardi Janos J (2007) Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs: Applicability and Limits Cambridge University Press, 144p.
- Nazoumou Y (2002) Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone aride : Etude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan (Tunisie centrale).Thesis (PhD). ENIT, Tunisie, 264.
- Nguimalet C. R, Orange D, (2015) Caractérisation de la baisse hydrologique de l'Oubangui à Bangui. Comm. Orale, Colloque International "Hydrologie des Grands bassins fluviaux de l'Afrique", 26-30 Octobre 2015, Hammamet, Tunisie, 8 p
- Niang A J, Ozer A. et Ozer P (2008) Fifty years of landscape evolution in South-Western Mauritania by means of aerial photos. Journal of Arid Environments, vol. 72, n° 2.97-107 p.
- Nouaceur Z, Laignel B, Turki I (2013) Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? Physio-Géo,
- Nouaceur Z, Laignel B (2016) Caractérisation des événements pluviométriques extrêmes Sur la rive sud du bassin méditerranéen : Études du cas du « quart nord-est » algérien, colloque de l'association internationale de climatologie.
- Nouar T, Toumi A, Messaadi (2005) Etude de la pollution des eaux superficielles du bassin de Guelma. Le Journal de l'Eau et de l'Environnement N°06. pp32-40
- OMM (2006) Suivi de la sécheresse et alerte précoce: principes, progrès et enjeux futurs OMM-N° 1006 2006, Organisation météorologique mondiale ISBN 92-63-21006-3
- OMM (2013) Le Climat Dans Le Monde 2001 – 2010 Une décennie d'extrêmes climatiques rapport de synthèse OMM-N° 1119 Organisation météorologique mondiale ISBN 978-92-63-21119-4
- OMS (2011) L'organisation mondiale de la santé dans sa Version World Health Organization (WHO), 2011. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva. 564 p.
- Olivry J C, Bricquet, I P , Mahe G (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de J'Afrique humide? In: Hydrology of Warm Humid Regions (ed. by J. S. Gladwell) (Proc Yokohama Symp., July 1993), 67- 78. IAHS Publ. no. 216.
- Ouahchia C, Hamaidi-Chergui F, Hamaidi M-S, Saidi F (2015) Qualité bactériologique de l'eau potable des différents réservoirs et chez les consommateurs de la commune de Tipaza alimentés par la station de Sidi Amar à partir de l'eau de surface du lac barrage de Boukourdane. Larhyss Journal, n°23, 139-154.
- Piper A-M (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Trans. Am. Geophys. Union 25,

- Probst JL, Amiotte suchet P (1992) Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrol.Sci.J.* 37: 621-637.
- Ramade F (2002) Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement.
- Remini B (2000) L'envasement des barrages : quelques exemples algériens. Bulletin du réseau Erosion (France), 20/2 :165- 171p.
- Remini B, Hallouche W (2004) La sédimentation dans les barrages algériens. Gestion du risque Eau en pays semi-aride, *La Houille Blanche*, 1
- Remini B, Hallouche W (2005) Prévision de l'envasement dans les barrages du Maghreb. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680.
- Remini B (2008) La surélévation des barrages: une technique de lutte contre l'envasement - exemples algériens. *Revue de la Houille Blanche*, n°5. 103-108 p.
- Remini B, Hallouche W et Achour B (2009) Chapitre 08 L'Algérie : plus d'un siècle de des envasements des barrages. Ouvrage intitulé : Etat des ressources en eau au Maghreb en 2009, édité par UNESCO Office in Rabat, pp. 123-142.
- Rémini B (2010) La problématique de l'eau en Algérie du Nord. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp. 27-46
- Remini B, Bensafia D, Missoum M (2015) Silting of Foum el Gherza Reservoir. *Géoscience Engineering Volume LXI*, No.1. pp. 1-9, ISSN 1802-5420
- Remini (2011) Une nouvelle approche de lutte contre des barrages : la technique des obstacles émergents. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 09,43-53p.
- Remini (2017) Une nouvelle approche de gestion de l'envasement des barrages. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°31.51-81p.
- Rezak S (2014) Hydrologie algérienne : synthèse des apports de crues sur sig. Thèse de doctorat. Université d'Oran.173 p.
- Roche M (1986) Dictionnaire français d'hydrologie de surface avec équivalents en anglais, espagnol, allemand, Masson Editeur, 288 p.
- Rodier J (1984) L'analyse de l'eau, Eaux naturelles, Eaux résiduaires et Eaux de mer, 7<sup>ème</sup> édition. Ed. Dulod, Paris.
- Rodier J (1996) L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8<sup>e</sup> édition Dunod, Paris.
- Rodier J, Bazin C, Broutin J-P, Champsaur H. Et Rodi L (2005) L'analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduaires. Eau de mer. 8<sup>ème</sup> Ed. DUNOD. Paris, 1383 pp.
- Rodier J (2009) Analyse de l'eau. 9<sup>ème</sup> édition Ed. Dunod bordas, Paris, 526 p.
- Rodier J (2009) Analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduaires. Eau de mer. 9<sup>ème</sup> édition. Ed. Dunod bordas, Paris. 1526 p

- Roose E, Chibbani R, Bourougaa L (1999) Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Bull. ORSTOM*, Rés. Eros., 19, 85-95.
- Rossi A (2010) Analyse spatio-temporelle de la variabilité hydrologique du bassin versant du Mississippi : rôles des fluctuations climatiques et déduction de l'impact des modifications du milieu physique, thèse de doctorat, Université de Rouen).
- Saley M-B (2003) Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semimontagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 209p.
- Sary M (1976) Géographie physique d'une haute plaine steppique algérienne : Le Hodna (Thèse de Doctorat).Strasbourg.
- Savane I, Coulibaly K-M, GIOAN P (2001) Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, 4 (12), pp. 231-237.
- Savane I, Coulibaly K-M, Gion P (2003) Etude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de tarissement des cours d'eau. *Sécheresse*, 14 (1), pp.37-42.
- Seltzer P (1946) Le climat de l'Algérie, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carbonnel, 219 p, 2 cartes hors-texte.
- Serbah B (2011) Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage BAKHADDA Tiaret. Mémoire magister, Université de Tlemcen, 2011, 129 p.
- Simler R (2012) Logiciel d'hydrochimie multi langage en distribution libre. *Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon*, Version 2.
- Slimani S (2009) Les fonctionnements hydrologiques de l'aquifère karstifié de la Craie de Haute-Normandie: conséquences des contextes morphologiques et structuraux, thèse de doctorat université de Rouen (France)
- Smakhtin V- U (2001) Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(3-4), 147-186.
- SOGREAH (1983) Erosion et transport solide au Maghreb. Analyse bibliographique, PNUD Projet RAB/80/011, 1982, 45 p.
- SORO T, SORO N, -Solange Y, LASM T, SORO G, AHOUSSE K ,BIEMI j (2011) La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire).Revue de la Géographie physique et de l'environnement , volume N° 05. 55-73p.
- Souanef N (2015) Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'Oued Abiod, Magister en Hydraulique, Faculté des Sciences et de la technologie, Université Mohamed Khider – Biskra. Algérie. pp 1-134.
- Stephen T (2000) Process, from and change in dryland rivers : a review of recent research. *Earth-Science Reviews*, 51, 67-107.
- Talia A (2002) Evolution des régimes pluviométrique et hydrologique du Nord de l'Algérie. Mémoire de magister, Centre Universitaire de Mascara, Algérie, 162 p.

- Taibi S, Meddi M, Souag D, Mahe G (2013) Évolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). *Clim. Land Surf. Chang. Hydrol. IAHS Publ* 359, 191–197.
- Tarmoul S (2018) Etude comparative de l'écoulement sur les bassins versants endoréiques du Hodna et des hauts plateaux constantinois. Cas d'étude des oueds l'ham, Lougmane, Soubella et Chemorah (Algérie orientale). Thèse de doctorat à l'université de Constantine. 251p.
- Terfous A, Meghounif A, et Bouanani A (2001) Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest algérien). *Revue des Sciences de l'Eau*, 14 (2), 175–185. [http://www.rse.inrs.ca/art/volume14/v14n2\\_173.pdf](http://www.rse.inrs.ca/art/volume14/v14n2_173.pdf) [Accédé le 21 mars 2013]
- Terfous A, Meghounif A, Bouanani A (2001) Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (nord-ouest algérien). *Revue des Sciences de l'eau*, 14/2 : 173-185.
- Thornthwaite C W (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 55-94.
- Tixeront J (1960) Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. Dans : *Assemblée Générale d'Helsinki*, 25 juillet-6 août. IAHS pub N°53, 26-41.
- Tootle G A, Piechota T C, Singh A (2005) Coupled oceanic-atmospheric variability and US streamflow. *Water Resour. Res.* 41.
- Torrence C, Webster P J (1998) Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system, *American Meteorological Society*
- Torrence C, Compo G.P (1998) A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79, 61–78p.
- Torrence C, Webster P J (1998) The annual cycle of persistence in the El Niño/Southern Oscillation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 124, 1985–2004 p.
- Touati B (2010) Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable. Thèse de Doctorat. Université Mentouri Constantine. pp 278-288'.
- Touaibia B (2010) Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. *Sécheresse*, 21 (1), 1–6
- Touhari F (2015) Etude de la qualité des eaux au nord ouest de l'Algérie, Thèse de doctorat, école nationale supérieure d'hydraulique, Blida. Algérie. Pp 80-118.
- Touhari F, Meddi M, Mehaiguen M, Razack M (2014) Hydrogeochemical assessment of the Upper Cheliff groundwater (North West Algeria). *Environ Earth Sci* ISSN 1866-6280 DOI10.1007/s12665-014-3598-6. 21p.
- Toumi A (2006) La problématique des fuites d'eau du barrage de Hammam-Grouz, Algérie. *Larhyss journal* n°5, Juin 2006, pp.41-48.
- Toumi A (2009) Étude des fuites d'eau dans les barrages « Quelques exemples de l'Est Algérien », Thèse de doctorat es sciences en Hydraulique, université de Mohamed Khieder Biskra, Algérie, 258 pages.

- Toumi A, Remini B (2018) Perte de la capacité de stockage d'eau au barrage de Beni Haroun, Algérie. SAGREN journal Vol 02, No 1, pp 80-97
- Tractebel Ingénierie (1997) Barrage de Beni Haroun en béton compacté au rouleau. Avant-Projet Détaillé. Volume 1: Rapport de synthèse, Alger, Agence Nationale des Barrages.
- Tractebel Ingénierie (1999) Transfert de Beni Haroun, Rapport de synthèse, vol. 1, Alger, A.N.B.
- Tricart J et Hirsch F (1960) Relations entre le débit et la superficie des bassins fluviaux. Paris, Annales de géographie, n° 375, LXIX è année, pp. 451-461.
- UNESCO (1986) Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. 155p.
- Vila, J.M (1977) Notice explicative de la carte géologique de l'Algérie. Echelle : 1/50 000.
- Vila, J.M (1980) La chaîne alpine nord-orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse Doctorat D'Etat, Université P et M Curie, Paris VI, 665p.
- Vila, J.M (1994) Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algéro-tunisiens: Trias allochtone glaciers de sel sous-marins et vrais diapirs. Mém. Serv. Géol. Algérie, n°6. 105- 152 p.
- Vissin W-E (2007) Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, France, 286p.
- Vogel R M, Kroll C N (1991) the Value of Streamflow Record Augmentation Procedures in Low-Flow and Flood-Flow Frequency-Analysis. Journal of Hydrology, 125(3-4), 259-276.
- Walling D E (1977) Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small bassin. Water resources research, 13, 3: 531-538.
- Wildi W (1983) La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie): structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn. 24, 201–297p.
- Yahiaoui A (2012) Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérables en Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès). Doctorat en Hydraulique. Ecole Nationale Polytechnique. Blida (Algérie). 220p
- Zamrane Z (2016) Recherche d'indices de variabilité climatique dans des séries hydroclimatiques au Maroc: identification, positionnement temporel, tendances et liens avec les fluctuations climatiques: cas des grands bassins de la Moulouya, du Sebou et du Tensift (Phd Thesis). Université Montpellier.
- ZEBIRI. A (1994) Identification et caractérisation du risque d'inondation, le cas de la ville de Constantine et d'une section de l'oued Boumerzoug, thèse de magister, Université de Constantine (Algérie).

---

**LISTE DES FIGURES**

---

<i>Figure 1: Présentation schématique: thèmes, approches et moyens d'investigation</i> .....	4
<i>Figure 2: Localisation géographique des stations pluviométriques</i> .....	9
<i>Figure 3: Exemple d'application de la méthode des " double cumuls " sur les données pluviométriques des stations à contrôler (Belaa)</i> .....	11
<i>Figure 4: Equipement hydrométrique et barrages de la région d'étude</i> .....	12
<i>Figure 5: Schéma représentatif de la méthode de matrice Bertin</i> .....	15
<i>Figure 6: Mesures des concentrations en matières en suspension et débits liquides instantanés à la station de Douar Tassadane (période: 1987/88-2004/05)</i> .....	17
<i>Figure 7: Mesures des concentrations en matières en suspension et débits liquides instantanés à la station de Grarem (période : 1977/78- 1992/93)</i> .....	18
<i>Figure 8: Schéma méthodologique de l'estimation de l'apport solide et de l'envasement au barrage de Béni Haroun</i> .....	19
<i>Figure 9: Localisation du point de prélèvement physico-chimique de la retenue de Beni Haroun. (Google earth, 2018)</i> .....	20
<i>Figure 10: Présentation de la zone d'étude, vue à travers un Modèle Numérique de Terrain (MNT à maille de 100 m, coordonnées métriques Lambert Nord Algérie, traité par REZAK, 2014)</i> .....	22
<i>Figure 11: Carte des altitudes du bassin des oueds Rhumel - Endja</i> .....	23
<i>Figure 12: Réseau hydrographique du bassin d'étude</i> .....	24
<i>Figure 13: Profils en long du Kébir -Rhumel (d'après Mebarki, 1982 et 1984)</i> .....	25
<i>Figure 14: Formations géologiques du bassin de Rhumel-Endja (Extrait de la carte structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale de J-M Vila, 1980) (Benchabane, 2015)</i> .....	27
<i>Figure 15: Les grands domaines hydrogéologiques du Kébir-Rhumel (Mebarki et Thomas, 1988)</i> ....	29
<i>Figure 16: Contexte géologique du site du barrage de Beni Haroun (d'après étude d'Avant-Projet Détaillé A.N.B.T, 1997)</i> .....	30
<i>Figure 17: Couverture végétale du bassin Rhumel-Endja (INSID, 2011)</i> .....	31
<i>Figure 18: Carte des précipitations annuelles moyennes du bassin Rhumel-Endja (période: 1965/66-94/95) (ANRH, 1993 in Mébarki, 2005)</i> .....	32
<i>Figure 19: Température moyenne, maximale et minimale des deux stations</i> .....	33
<i>Figure 20: Courbe ombro-thermique de la station de Constantine (1978/79-2003/04)</i> .....	34
<i>Figure 21: Courbe ombro-thermique de la station de Barrage Béni Haroun (2004/05-2017/18)</i> .....	34
<i>Figure 22: Diagramme d'Emberger</i> .....	35
<i>Figure 23: Paramètres mensuels du bilan hydrique de Thornthwaite, station de Constantine (1978/79-2003/04)</i> .....	38
<i>Figure 24: Paramètres mensuels du bilan hydrique de Thornthwaite, station de Barrage Béni Haroun (2004/05-2017/18)</i> .....	38
<i>Figure 25: Pluies annuelles dans le bassin du Rhumel-Endja à Beni Haroun (période moyenne 1970/71-2011/12)</i> .....	43
<i>Figure 26: Variations interannuelles des précipitations (1970/71-2011/12)</i> .....	48
<i>Figure 27: Ajustement à la loi Racine-normale des précipitations annuelles (1970/71-2011/12)</i> .....	50
<i>Figure 28: Répartition spatiale du mois le plus humides aux stations (1970/71-2011/12)</i> .....	52
<i>Figure 29: Les variations mensuelles des précipitations (1970/71-2012)</i> .....	53
<i>Figure 30: Régime saisonnier des pluies dans les stations de la zone d'étude (1970/71-2011/12)</i> .....	56
<i>Figure 31: Moyenne des précipitations dans le bassin Rhumel-Endja (1970/71-2011/12)</i> .....	56
<i>Figure 32: Profil hydrologique (modules-surfaces) du Bassin Rhumel –Endja jusqu'au barrage Béni Haroun</i> .....	59

<i>Figure 33: Relation entre les logarithmes des modules et des surfaces d'Oued Rhumel-Endja a Béni Haroun (cours d'eau principal) .....</i>	60
<i>Figure 34: Bilans d'écoulement annuels moyens des bassins du Rhumel-Endja.....</i>	62
<i>Figure 35: Bilans hydrologiques moyens amont- aval du bassin de Beni Haroun (période commune : 1972/73-2004/05).....</i>	63
<i>Figure 36: « Boîtes à moustaches » des pluies interannuelles aux bassins (P simulées ANRH) (période: 1973/74-2004/05) .....</i>	64
<i>Figure 37: Variations de la lame écoulée pour les bassins aux stations hydrométriques (1973/74-2004/05) .....</i>	65
<i>Figure 38: Rangement par ordre croissant du coefficient d'écoulement annuel moyen des bassins aux stations hydrométriques (1973/74-2004/05) .....</i>	65
<i>Figure 39: Répartition par ordre croissant des déficits d'écoulement annuel pour les bassins aux stations hydrométriques (1973/74-2004/05) .....</i>	66
<i>Figure 40: Températures moyennes annuelles (°C) du bassin Rhumel-Endja (1965/66-1994/95) .....</i>	68
<i>Figure 41: Carte des évapotranspirations réelles annuelles (E.T.R Turc) (1965/66-1995/96).....</i>	69
<i>Figure 42: Lames écoulées annuelles du bassin en mm (période 1965/66-95/96) .....</i>	70
<i>Figure 43: Carte des écoulements annuels moyens du bassin Rhumel-Endja (apports simulés à l'aide de LOIEAU, période: 1965/66-1994/95 « étude de Synthèse ANRH, 2003 »).....</i>	71
<i>Figure 44: Carte du déficit d'écoulement annuel connaissant EC LOIEAU du bassin Rhumel-Endja (1965/66-1994/95).....</i>	72
<i>Figure 45: Variations annuelles de l'hydraulicité des stations hydrométriques (1973/74-2004/05)....</i>	75
<i>Figure 46: « Boîtes à moustaches » des débits de six stations (période: 1973/74-2004/05) .....</i>	76
<i>Figure 47: Ajustement des débits moyens annuels à une loi de probabilité (1973/74-2004/05) .....</i>	77
<i>Figure 48: Répartition des débits annuels fréquentiels aux stations. Les boîtes à moustache représentent les quantiles en année humide et sèche .....</i>	79
<i>Figure 49: Variations des débits mensuels et des coefficients mensuels des débits (1973/74-2004/05).....</i>	81
<i>Figure 50: Matrice de Bertin appliquée aux pluies annuelles de bassins versant de Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun sur la période de 1970/71-2011/12.....</i>	84
<i>Figure 51: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin d'oued El Kébir amont à Douar Tassadane .....</i>	87
<i>Figure 52: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin d'oued Bouselah à Koudiat Tendart.....</i>	87
<i>Figure 53: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin d'oued Rhumel Seguin à Ain Smara .....</i>	88
<i>Figure 54: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin Rhumel aval à Grarem .....</i>	88
<i>Figure 55: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du sous bassin d'oued Smendou à Bouchdira .....</i>	88
<i>Figure 56: Les spectres en ondelettes continues des chroniques pluies et débits du barrage Béni Haroun (Q simulé Loi Eau).....</i>	89
<i>Figure 57: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin d'oued El Kébir amont (Oued Endja supérieur).....</i>	92
<i>Figure 58: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin de Bouselah .....</i>	93
<i>Figure 59: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin de Rhumel-Seguin.....</i>	93

Figure 60: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin d'oued Rhumel aval.....	94
Figure 61: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau de sous bassin d'oued Smendou .....	94
Figure 62: Evolution interannuelle de la pluviométrie et des débits au niveau du barrage de Béni Haroun .....	95
Figure 63: Les spectres de la cohérence pluies et débits du bassin versant .....	98
Figure 64: Répartition spatiale des pluies journalières maximales annuelles dans le bassin du Rhumel-Endja.....	104
Figure 65: Répartition mensuelle des évènements pluviométriques extrêmes sur dix stations pluviométriques (série hétérogène comprises entre 1970/71-2011/12) .....	105
Figure 66: Répartition saisonnière du nombre des pluies extrêmes pour les stations du bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage du Béni Haroun .....	107
Figure 67: Ajustement à la loi de Gumbel des précipitations maximales journalières .....	109
Figure 68: Cartographie du gradex des pluies journalières maximales annuelles du bassin-versant de l'oued Rhumel-Endja .....	110
Figure 69: Pluies journalières maximales de fréquence décennale du bassin-versant Rhumel-Endja .....	111
Figure 70: Pluies maximales journalières de fréquence cinquantennale du bassin-versant Rhumel-Endja .....	111
Figure 71: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de la station de Douar Tassadane en (m <sup>3</sup> /s) .....	114
Figure 72: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de Koudiat Tendart en (m <sup>3</sup> /s).....	115
Figure 73: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de la station d'Ain Smara en (m <sup>3</sup> /s) .....	115
Figure 74: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de la station de Grarem en (m <sup>3</sup> /s).....	115
Figure 75: Hydrogrammes des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de la station de Bouchdira en (m <sup>3</sup> /s).....	116
Figure 76: Ajustement à la loi log-normale des débits maximaux journaliers annuels.....	118
Figure 77: Ajustement à la loi log-normale des débits instantanés maximaux annuels .....	119
Figure 78: fréquence des débits maximums instantanés selon les mois de l'année .....	121
Figure 79: fréquence des débits maximums journaliers selon les mois de l'année .....	122
Figure 80: Hydrogrammes journaliers des crues de Septembre 1973 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara et Grarem.....	123
Figure 81: Hydrogrammes horaires des crues des 25-26 Septembre 1973 aux stations de Douar Tassadane et Ain Smara .....	124
Figure 82: Hydrogramme journaliers des crues de Février 1975 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Grarem et Bouchdira .....	125
Figure 83: Hydrogrammes horaires des crues de 16-19 Février 1975 aux stations de Douar Tassadane, Grarem et Ain Smara .....	125
Figure 84: Hydrogrammes journaliers de crue Avril 1979 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Grarem et Bouchdira .....	126
Figure 85: Hydrogrammes horaires des crues de 16-18 Avril 1979 aux stations de Douar Tassadane, Ain Smara et Grarem .....	127

<i>Figure 86: Hydrogrammes journaliers de crue- Décembre 1984-Janvier 1985 aux stations Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Grarem et Bouchdira .....</i>	128
<i>Figure 87: Hydrogrammes horaires des crues de 28 Décembre 1984-01 janvier 1985 aux stations Douar Tassadane, Ain Smara et Grarem .....</i>	129
<i>Figure 88: Hydrogrammes journaliers de crue mars 1985 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart, Ain Smara, Grarem et Bouchdira .....</i>	130
<i>Figure 89: Hydrogrammes horaires des crues de 06-10 mars 1985 aux stations de Douar Tassadane, Ain Smara et Grarem .....</i>	130
<i>Figure 90: Hydrogrammes journaliers de crue janvier 2003 aux stations de Douar Tassadane, Koudiat Tendart et Bouchdira .....</i>	131
<i>Figure 91: Hydrogrammes horaires des crues de 11-13 janvier 2003 aux stations de Douar Tassadane et Koudiat Tendart .....</i>	132
<i>Figure 92: Hydrogrammes horaires des crues de 24-28 janvier 2003 aux stations de Douar Tassadane et Koudiat Tendart .....</i>	132
<i>Figure 93: Feuille de calcul à la première ouverture (paramètres de simulation de l'hydrogramme de crue) (ANRH, 2008) .....</i>	137
<i>Figure 94: Résultats du calcul de la crue de projet à la station de Douar Tassadane .....</i>	138
<i>Figure 95: Hydrogramme de la crue de projet au pas de temps de 2 heures à la station de Douar Tassadane .....</i>	139
<i>Figure 96: Simulation des hydrogrammes de crue décennale, cinquantennale et centennale à la station de Douar Tassadane .....</i>	140
<i>Figure 97: Simulation des hydrogrammes de crue décennale, cinquantennale et centennale à la station Koudiat Tendart .....</i>	140
<i>Figure 98: Simulation des hydrogrammes de crue décennale, cinquantennale et centennale à la station Ain Smara .....</i>	141
<i>Figure 99: Les villes d'Algérie au plus haut pourcentage d'évènements de crues et inondations recensés (Nouri, 2016) .....</i>	145
<i>Figure 100: Courbe des débits classés et débits caractéristiques associés de la station de Douar Tassadane en année humide (1984/85) .....</i>	148
<i>Figure 101: Courbe des débits classés et débits caractéristiques associés de la station de Douar Tassadane en année sèche (1996/97) .....</i>	149
<i>Figure 102: Quantiles des débits d'étiage (QMNA) du bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun .....</i>	152
<i>Figure 103: Exemple de VCN<sub>d</sub> de durées 3 et 10 jours de la station de Douar Tassadane (étiage de août-septembre 2005) .....</i>	152
<i>Figure 104: Evolution interannuelle des VCN<sub>3</sub>, et débits associés pour différentes périodes de retour (a. Douar Tassadane; b : Koudiat Tendart; c : Ain Smara; d : Grarem ; e : Bouchdira) .....</i>	155
<i>Figure 105: Seuils d'étiage des stations hydrométriques du bassin Rhumel-Endja .....</i>	158
<i>Figure 106: Droite de tarissement aux débits journaliers d'étiage de la station de Douar Tassadane (année 1982/83) .....</i>	160
<i>Figure 107: Statistiques descriptives (« boîte à moustache ») des coefficients de tarissement des stations du Rhumel-Endja .....</i>	161
<i>Figure 108: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station de Douar Tassadane .....</i>	162
<i>Figure 109: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station de Koudiat Tendart .....</i>	162

<i>Figure 110: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station d'Ain Smara .....</i>	163
<i>Figure 111: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station de Grarem .....</i>	163
<i>Figure 112: Variation des coefficients de tarissement et des volumes mobilisés de la station de Bouchdira .....</i>	163
<i>Figure 113: Localisation du barrage de Béni Haroun dans le bassin versant du Kébir-Rhumel.....</i>	171
<i>Figure 114: Exemple de barrage rigide (barrage poids) (extrait de Chetatha, 2016) .....</i>	175
<i>Figure 115: Coupe en travers du barrage de Béni Haroun (d'après ANBT) .....</i>	176
<i>Figure 116: La retenue du Béni Haroun (image satellitaire Google Earth 2016) .....</i>	176
<i>Figure 117: Schéma synoptique du transfert général du barrage Béni Haroun vers les 6 wilayas (Mila, Jijel, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna, Khenchela) (ANBT).....</i>	179
<i>Figure 118: Schéma synoptique de transfert nord (source ANBT).....</i>	181
<i>Figure 119: Transfert Oued Athmènia vers les barrages Koudiat Médouar et Ourkiss.....</i>	182
<i>Figure 120: Schéma théorique du bilan d'eau d'un barrage.....</i>	183
<i>Figure 121: Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de Béni Haroun (2013) .....</i>	184
<i>Figure 122: Evolution de la courbe Surface- Hauteur du barrage de Béni Haroun (2013).....</i>	184
<i>Figure 123: Variations annuelles Apports, réserves et précipitations du barrage Béni Haroun (2003/04-2017/18).....</i>	186
<i>Figure 124: Régime mensuel des apports et pluies en année humide et sèche du barrage de Béni Haroun .....</i>	187
<i>Figure 125: Régime mensuel des réserve en année humide et sèche du barrage de Béni Haroun.....</i>	188
<i>Figure 126: Volumes régularisés (A.E.P) par le barrage de Béni Haroun .....</i>	189
<i>Figure 127: Pertes annuelles par évaporation de la retenue du barrage de Béni Haroun .....</i>	190
<i>Figure 128: Variations des évaporations mensuelles et saisonnières du barrage de Béni Haroun ...</i>	190
<i>Figure 129: Hydrogramme journalier, vidange de fond, déversement de crue et capacité du barrage de Beni Haroun (2003/04-2017/18) .....</i>	192
<i>Figure 130: Variation annuelle des déversements de crue et de vidange de fond du barrage de Béni Haroun (2003/04-2017/18) .....</i>	193
<i>Figure 131: Crue du 01 au 10 janvier 2004.....</i>	196
<i>Figure 132: Crue de décembre 2004 - janvier 2005.....</i>	196
<i>Figure 133: Crue du 12 au 15 janvier 2009.....</i>	197
<i>Figure 134: Crues de février- avril 2012 au barrage de Beni Haroun.....</i>	198
<i>Figure 135: Crues de la période janvier-mars 2015 au barrage de Béni Haroun .....</i>	200
<i>Figure 136: Crue du 12 au 15 mars 2016 au barrage de Béni Haroun.....</i>	201
<i>Figure 137: Relation entre les débits solides et les débits liquides instantanés à l'échelle interannuelle: station de Douar Tassadane .....</i>	205
<i>Figure 138: Relation entre débits liquides et débits solides à l'échelle saisonnière : station de Douar Tassadane.....</i>	206
<i>Figure 139: Relation entre les débits solides et les débits liquides instantanés à l'échelle interannuelle: station de Grarem.....</i>	207
<i>Figure 140: Relations entre les débits solides et les débits liquides instantanés à l'échelle saisonnière: station de Grarem.....</i>	208
<i>Figure 141: Variations annuelles des apports liquides et solides annuels de l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane (période: 1973/74-2004/05).....</i>	211

Figure 142: Variations annuelles des apports liquides et solides annuels de l'oued Rhumel à Grarem (période: 1973/74-2000/01) .....	211
Figure 143: Variations annuelles du transport solide spécifique (TSS), de l'écoulement (E) et des précipitations (P) à la station de Douar Tassadane (période: 1973/74–2004/05) .....	213
Figure 144: Variations annuelles du transport solide spécifique (TSS), de l'écoulement (E) et des précipitations (P) à la station de Grarem (période: 1973/74–2000/01) .....	213
Figure 145: Apports liquides et solides moyens mensuels de l'oued Endja supérieur à Douar Tassadane .....	216
Figure 146: Apports liquides et solides moyens mensuels de l'oued Rhumel à Grarem .....	216
Figure 147: Répartition mensuelle (en %) des apports solides spécifiques aux stations de Douar Tassadane et de Grarem.....	217
Figure 148: Part saisonnière en pourcentage des apports solides spécifiques des deux stations (Douar Tassadane et Grarem).....	217
Figure 149: Modèles des relations concentration- débit liquide .....	218
Figure 150: Courbes d'hystérésis entre les concentrations des sédiments et les débits de crues à la station de Grarem (période : 1978/79-1986/87).....	221
Figure 151: Courbes d'hystérésis entre les concentrations des sédiments et les débits de crues à la station de Douar Tassadane (période : 1978/79-2004/05) .....	223
Figure 152: Préviation du taux de sédimentation et du volume de la vase déposée dans la cuvette du barrage Béni Haroun .....	226
Figure 153: Faciès hydro-chimique des eaux de surface du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014 .....	242
Figure 154: Variations des températures de l'eau du barrage de Béni Haroun entre 2005 et 2014 .	243
Figure 155: Variations du pH des eaux de surface du barrage de Béni Haroun entre 2005 et 2014	244
Figure 156: Variation mensuelle de la Conductivité électrique de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014 .....	244
Figure 157: Variation mensuelle de la Résidu sec de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014 .....	245
Figure 158: Variation mensuelle des teneurs en calcium de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014.....	246
Figure 159: Variation mensuelle des teneurs en Magnésium de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014 .....	247
Figure 160: Variation mensuelle des teneurs en chlorures de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014 .....	248
Figure 161: Variation mensuelle des teneurs en sulfates de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014.....	249
Figure 162: Variation mensuelle des nitrates de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014	250
Figure 163: Variation mensuelle des teneurs en phosphate de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014 .....	250
Figure 164: Variation mensuelle MES de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014.....	251
Figure 165: Variation mensuelle de la DBO <sub>5</sub> de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014	252
Figure 166: Variation mensuelle de la DCO de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014	253
Figure 167: Variation mensuelle de la matière organique dissoute de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014 .....	254
Figure 168: Variation des concentrations de l'ammonium de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014 .....	255

<i>Figure 169: Variation des concentrations de la Nitrites de l'eau du barrage Béni Haroun entre 2005 et 2014</i> .....	255
<i>Figure 170: Variation mensuelle de Manganèse durant les dix ans (2005-2014) de l'eau du barrage de Béni Haroun</i> .....	256
<i>Figure 171: Variation mensuelle du Fer durant les dix ans (2005-2014) de l'eau du barrage de Béni Haroun</i> .....	257
<i>Figure 172: Fiche de Qualité moyenne annuelle des eaux de barrage de Béni Haroun</i> .....	258
<i>Figure 173: pourcentage de quelques paramètres de la qualité des eaux de barrage de Béni Haroun (2005-2014)</i> .....	260

---

**LISTE DES TABLEAUX**

---

<i>Tableau 1: Caractéristiques des stations pluviométriques du bassin du Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun (d'après ANRH, Alger) .....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 2: Les stations hydrométriques du bassin-versant du Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun (Source: ANRH-Constantine) .....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 3: Caractéristiques des séries de débits de crue des stations hydrométriques (Source: ANRH Alger).....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 4: Paramètres statistiques de la concentration (C), du débit liquide (Ql) et du débit solide (Qs) des stations de Douar Tassadane et Grarem .....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 5: Caractéristiques morphométriques du bassin de l'oued Rhumel (D'après Mebarki. thèse doctorat de troisième cycle, 1982) .....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 6: Valeurs de coefficient pluvio-thermique d'Emberger des stations météorologiques .....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 7: Bilan d'eau selon Thornthwaite pour la station de Constantine (1978/79-2003/04) .....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 8: Bilan d'eau selon Thornthwaite pour la station de Béni Haroun (2004/05-2017/18).....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 9: Précipitations annuelles moyennes (en mm), sur la période 1970/71-2011/12, pour dix stations d'ANRH sur le bassin du Rhumel-Endja.....</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 10: Ecart à la moyenne des précipitations annuelle extrêmes (1970/71-2011/12).....</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 11: Précipitations annuelles fréquentielles (mm).....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 12: Moyenne, écart-type, et coefficient de variation des séries pluviométriques (mm) (1970/71-2011/12).....</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 13: Le régime saisonnier des précipitations période (1970/71 – 2011/12) .....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 14: Apports hydrologiques annuels moyens de l'oued Rhumel-Endja à Béni Haroun .....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 15: Modules absolus et spécifiques des bassins emboîtés et unitaires.....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 16: Bilans hydrologiques moyens 1972/73-2004/05 des bassins contrôlés par des stations hydrométriques.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 17: Bilans hydrologiques moyens amont- aval du bassin de Beni Haroun (période commune: 1972/73-2004/05) .....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 18: Récapitulatif des résultats des différentes méthodes de calcul du bilan hydrologique ....</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 19: Débits moyens annuels (m<sup>3</sup>/s) et durée de récurrence (années) (Période 1973/74-2004/05) .....</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 20: Variabilité en hautes eaux et basses eaux des débits mensuels .....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 21: Distribution et qualification des cumuls pluviométriques annuels (mm) selon les quintiles .....</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 22: Synthèse de comparaison entre les pluies et les débits du bassin Rhumel-Endja .....</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 23: Synthèse de la variabilité des débits et des pluies du bassin Rhumel-Endja (période commune : 1973/74-2004/05).....</i>	<i>96</i>
<i>Tableau 24: Les degrés de la linéarité entre les pluies et les débits (1973/74-2004/05).....</i>	<i>97</i>
<i>Tableau 25: Statistiques des séries des précipitations journalières maximales annuelles (série hétérogène comprise entre 1970/71-2011/12).....</i>	<i>103</i>
<i>Tableau 26: Nombre de Pjmax observés selon les mois de l'année (séries hétérogènes de la période 1970/71-2011/12).....</i>	<i>105</i>
<i>Tableau 27: Pluies journalières maximales fréquentielles (séries hétérogènes de la période 1970/71-2011/12) .....</i>	<i>108</i>
<i>Tableau 28: Débits maximaux moyens journaliers et instantanés annuels observés aux stations hydrométriques du bassin Rhumel-Endja.....</i>	<i>113</i>
<i>Tableau 29: Débits moyens journaliers maximaux fréquentiels (m<sup>3</sup>/s).....</i>	<i>117</i>
<i>Tableau 30: Débits maximaux instantanés fréquentiels (m<sup>3</sup>/s) .....</i>	<i>117</i>

Tableau 31: Caractéristiques des principales crues et les apports des principales crues.....	134
Tableau 32: Modèles de prédétermination des débits de crue (débits instantanés et journaliers maximums) pour les différents temps de retour .....	135
Tableau 33: Valeurs des débits des crues estimés et observés (Station Douar Tassadane, Koudiat Tendart et Ain Smara) .....	136
Tableau 34: Caractéristiques potentielles de la crue de projet .....	142
Tableau 35: Les inondations en Algérie (Yahiaoui, 2012).....	144
Tableau 36: Débits caractéristiques en année humide et en année sèche des stations hydrométriques du bassin Rhumel-Endja.....	149
Tableau 37: Débits mensuels d'étiage et modules annuels observés aux stations hydrométriques ....	150
Tableau 38: Débit mensuels d'étiage et durée de récurrence (période 1973/74-2004/05) .....	151
Tableau 39: Résultats de l'analyse fréquentielle de la variable VCN3 des années sèches.....	154
Tableau 40: Exemples de débits-seuils dans le bassin Rhumel-Endja à l'amont du barrage de Béni Haroun .....	157
Tableau 41: Coefficients de tarissement des oueds (1973/74-2000/01).....	160
Tableau 42: Les principales études concernant le projet du barrage Béni Haroun (d'après ANBT, 2014).....	174
Tableau 43: Les principaux travaux réalisés du projet du barrage Béni Haroun (d'après ANBT, 2014) .....	174
Tableau 44: Les principaux travaux réalisés après la crue de 2004 au barrage Béni Haroun (ANBT, 2014).....	175
Tableau 45: Bilan de régularisation interannuel du barrage de Béni Haroun (2003/04-2017/18)....	185
Tableau 46: Quelques exemples de crues transitant par le barrage de Béni Haroun (période 2003/04 – 2017/18) .....	195
Tableau 47: Paramètres des courbes de régression débits solides - débits liquides instantanés de la station de Douar Tassadane .....	205
Tableau 48: Paramètres des courbes de régression (courbe d'étalonnage) du bassin versant d'oued Rhumel à Grarem .....	207
Tableau 49: Valeurs des coefficients de correction saisonniers (CF) .....	208
Tableau 50: Apport liquide (Al), apport solide (As) et apport solide spécifique (TSS) aux stations de Douar Tassadane et Grarem.....	210
Tableau 51: Transport solide spécifique et paramètres hydrologiques des oueds Rhumel (Grarem) et Endja supérieur (Douar Tassadane).....	212
Tableau 52: Estimation par analogie de l'apport solide du bassin à l'amont de Béni Haroun .....	224
Tableau 53: Perte de la capacité de stockage du barrage de Béni Haroun.....	226
Tableau 54: Résultats de l'envasement des barrages de l'Est Algérien d'après les données ANBT de 2014 (source Rémini, 2017) .....	227
Tableau 55: Relation entre la conductivité électrique et la minéralisation (Rodier et al. 2009).....	234
Tableau 56: Grille de qualité des eaux des barrages adoptée par l'ANRH (2009) .....	240
Tableau 57: Normes de potabilité des paramètres physico-chimiques (OMS, 2011) .....	240

---

**LISTE DES PHOTOS**

---

<i>Photo 1: Crue du 19 septembre 2018 à Djebli Ahmed (près de Constantine) Source : <a href="http://www.aps.dz">http://www.aps.dz</a> .....</i>	<i>147</i>
<i>Photo 2: Evacuateur de crue du barrage de Beni Haroun: vue amont et vue aval (ANBT, 2014) ....</i>	<i>177</i>
<i>Photo 3: Vidange de demi-fond du barrage de Beni Haroun (ANBT, 2014) .....</i>	<i>177</i>
<i>Photo 4: Galerie de dérivation du barrage de Beni Haroun (ANBT, 2014) .....</i>	<i>178</i>
<i>Photo 5: Vidange demi-fond (vue rive gauche) pendant la crue de janvier 2004 (ANBT Béni Haroun, 2004).....</i>	<i>195</i>
<i>Photo 6: Premier déversement du barrage de Beni Haroun: crue du 23 février 2012 (ANBT, Béni Haroun, 2012) .....</i>	<i>198</i>
<i>Photo 7: Eboulement du talus de la route d'accès en rive gauche (ANBT Béni Haroun, 2015) .....</i>	<i>199</i>
<i>Photo 8: Chute de pierres sur les routes d'accès (ANBT Béni Haroun, 2015).....</i>	<i>199</i>

---

**ANNEXES**

---

## Annexe 1 : Température moyen, maximale et minimales des deux stations

Mois	Constantine Ain El Bey 1978/79-2003/04			Béni Haroun Barrage 2004/05-2017/18		
	T°C min	T°C moy	T°C max	T°C min	T°C moy	T°C max
<b>S</b>	15,40	21,32	28,70	16,38	22,26	29,19
<b>O</b>	11,30	16,71	23,80	12,34	18,18	25,00
<b>N</b>	7,00	11,28	16,80	7,39	12,25	18,47
<b>D</b>	3,80	7,75	12,90	4,15	8,70	14,47
<b>J</b>	2,60	6,66	11,80	3,39	7,66	13,52
<b>F</b>	2,90	7,65	13,20	3,01	7,41	13,79
<b>M</b>	4,80	9,90	15,70	4,52	9,88	16,86
<b>A</b>	6,70	12,30	18,60	8,31	13,53	19,70
<b>M</b>	10,70	17,06	24,10	12,05	17,72	24,04
<b>J</b>	15,30	22,31	30,00	17,46	22,96	29,50
<b>J</b>	18,00	25,32	33,90	21,72	26,68	32,33
<b>A</b>	18,60	25,65	33,90	22,38	26,40	32,13
<b>Moyenne</b>	<b>9,76</b>	<b>15,33</b>	<b>21,95</b>	<b>11,09</b>	<b>16,14</b>	<b>22,42</b>

## Annexe 2 : Apports liquides et solides moyens mensuels

Tableau 1 : Apports liquides et solides moyens mensuels à Oued Endja à Douar Tassadane (Période 1973/74-2004/05)

Mois	Al (hm <sup>3</sup> )	P (mm)	AS (T)	ASS (t/km <sup>2</sup> /mois)
septembre	2,22	31,42	110147,21	114,74
octobre	2,86	37,86	125001,10	130,21
novembre	4,13	59,78	633005,71	659,38
décembre	12,10	91,43	195397,84	203,54
janvier	19,85	74,36	301686,77	314,26
février	20,97	64,07	204229,38	212,74
mars	19,66	57,51	198422,42	206,69
avril	13,55	53,38	132339,93	137,85
mai	5,69	40,43	21707,69	22,61
juin	2,61	13,29	6306,07	6,57
juillet	1,39	5,04	1205,48	1,26
aout	1,08	8,56	907,61	0,95

Tableau 2 : Apports liquides et solides moyens mensuels à Oued Rhumel à Grarem . (Période 1973/74-2000/01)

Mois	Al (Hm <sup>3</sup> )	P (mm)	AS (t)	ASS (t/km <sup>2</sup> /mois)
septembre	6,05	30,58	127363,90	23,94
octobre	6,43	30,36	17690,66	3,33
novembre	8,91	37,78	439608,94	82,63
décembre	21,36	49,76	337362,20	63,41
janvier	29,47	43,64	175239,96	32,94
février	27,68	40,91	108606,62	20,41
mars	25,04	42,79	171818,82	32,30
avril	16,73	40,44	50646,42	9,52
mai	9,40	38,24	3521,81	0,66
juin	4,84	15,07	14545,51	2,73
juillet	2,88	4,73	13389,38	2,52
aout	2,45	9,71	13072,49	2,46