

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**

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

**En collaboration avec
L'UNIVERSITE DE ROUEN-NORMANDIE**



LABORATOIRE DE MORPHODYNAMIQUE CONTINENTALE ET COTIERE UMR CNRS 6143 M2C

**THESE DE DOCTORAT DE 3^{ème} CYCLE (LMD)
Spécialité : Hydrologie et gestion des hydrosystèmes**

N° d'ordre : 47/D3C/2020

Série : 02/ST/2020

**Par :
Farah BOUTOUATOU**

**Sous la direction de : Pr Azeddine MEBARKI
Co-directeur : Pr Benoit LAIGNEL**

Thème :

**LES BARRAGES EN EXPLOITATION DANS L'EST ALGERIEN :
FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET AMENAGEMENT.
ETUDE DE CAS**

Thèse soutenue publiquement à Constantine le 05 /11/2020 devant le jury composé de :

Hafiza TATAR	Professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine 1	Président
Azeddine MEBARKI	Professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine 1	Rapporteur
Benoit LAIGNEL	Professeur à l'Université de Rouen-Normandie (France)	Examineur
Boualem REMINI	Professeur à l'Université S. Dahleb Blida	Examineur
Ahmed BOUGHERARA	Maître de Conférences (A) à l'Université Frères Mentouri Constantine 1	Examineur
Azzedine GHACHI	Maître de Conférences (A) à l'Université S. Boubnider Constantine 3	Examineur

AVANT – PROPOS

Cette thèse a été réalisée au sein du Laboratoire LASTERNE de la Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire (Université Frères Mentouri Constantine 1), en collaboration avec le laboratoire l'UMR CNRS 6143 Morphodynamique Continentale et Côtière M2C (Université Rouen), sous la direction des Professeurs Azeddine MEBARKI et Benoît LAIGNEL. Elle a bénéficié du soutien du Programme algéro-français PROFAS B+.

Elle est l'aboutissement d'un travail de recherche de cinq années au cours desquelles j'ai pu bénéficier de l'aide de professeurs et chercheurs confirmés, aussi bien en Algérie qu'en France.

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

Par la suite, je remercie Benoit LAIGNEL, Professeur au Département Géosciences et Environnement, et membre du Laboratoire UMR CNRS 6143 M2C de l'Université de Rouen, d'avoir co-dirigé ma thèse, et qui nous donne toujours de très bons conseils et répond d'une manière directe et efficace à nos différentes questions.

Je remercie le Professeur Lafite ROBERT, directeur du laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière de Rouen /Caen pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire M2C de Rouen durant la période de janvier à septembre 2019, dans le cadre du Programme Profas B+.

J'exprime également ma sincère reconnaissance aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail : Madame Hafiza TATAR, Monsieur Boualem REMINI, Monsieur Ahmed BOUGHERARA, et Monsieur Azzedine GHACHI.

Un grand merci à Valérie MESNAGE, Maître de Conférences/HDR (UMR CNRS 6143 M2C), votre simplicité et votre enthousiasme ont facilité mon intégration à Rouen. Nos échanges scientifiques fructueux ont contribué à l'amélioration de ce travail.

Un immense merci également à Zeineddine NOUACEUR, Maître de Conférences (UMR IDEES CNRS 6226), pour votre précieux soutien et vos orientations claires à la problématique de cette thèse.

Ces stages m'ont fourni l'occasion de rencontrer et de discuter avec Matthieu FOURNIER, Sophie LEBOT, Imen TURKI, Mariama KABBA, Tan minh VU.

Merci à mes collègues : Sabrina Tarmoul, Halima Lakache, Saadi Iskounen, Hamida Cherni, Rokia Azioun. Abdelaaziz Merabti.

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans les données qui m'ont été gracieusement fournies par les ingénieurs et responsables des différents services en charge de la gestion des réseaux de mesures,

en particulier ceux de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT). Je tiens à exprimer mes remerciements particulièrement à : Messieurs Khaled DJIR et Mourad HOUGLAOUEN de l'ANBT d'Alger, Monsieur Yazid LADASI (barrage de Zardezas), Messieurs Mounir MEGHZILI et Mohamed NEKAKA (barrage de Béni Haroun), Monsieur Kamel BAHRI (barrage de Hammam Debagh).

À titre plus personnel je remercie ma petite famille et mes amis qui, avec cette question récurrente, « quand est-ce que tu la soutiens cette thèse ?, bien qu'angoissante en période fréquente de doutes, m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final.

A la mémoire de ma mère

LISTE DES ABREVIATIONS

ABH-CSM	Agence de bassin hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellegue
AEP	Alimentation en Eau Potable
AEI	Alimentation en Eau Industrielle
ANB	Agence Nationale des Barrages
ANBT	Agence Nationale des Barrages et des Transferts
APD	Avant-Projet Détaillé
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydriques
BCR	Béton Compacté Rouleau
BCV	Béton Conventionnel Vibré
CTH	Organisme National de Contrôle Technique de la construction hydraulique
DRE	Direction des Ressources en Eau
ETP	Evapotranspiration Potentielle
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GR2M	Génie Rural à Deux paramètres Mensuels
IME	Institut Méditerranéen de l'Eau
IRR	Irrigation
LEM	Laboratoire des Études Maritimes
MAO	Mostaganem-Arzew-Oran
MGCTI	Méthode Graphique Chronologique de Traitement de l'Information
MNT	Modèle numérique du Terrain
NAO	North Atlantic Oscillation
ONID	Office National de l'Irrigation et du Drainage
PHE	Niveau des plus hautes eaux
PNE	Plan National de l'Eau
RN	Niveau normal de la retenue
SIG	Systèmes d'Information Géographique
SEGGTH	Monographie des grands barrages

RESUME

L'Algérie connaît au cours de ces trois dernières décennies un vaste programme de construction de barrages. L'Est algérien, région climatiquement la plus arrosée du pays, est équipé de 25 barrages en cours d'exploitation, répartis à travers des bassins hydrographiques aux caractères physiques très contrastés. Une grande variété caractérise ces ouvrages hydrauliques du point de vue de leurs bassins versants, de leurs lacs de retenue, de leurs digues et ouvrages annexes.

Les données de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (A.N.B.T) sur le bilan de régularisation, ont permis le suivi de l'évolution mensuelle et interannuelle des entrées, sorties et réserves des barrages ainsi que la connaissance de la variabilité des apports hydrologiques qui les alimentent. Sur un échantillon de dix barrages dont la période hydrologique commune est de 23 ans (de septembre 1990 à août 2013), l'important écart entre le volume interannuel régularisé (21.0 hm³) et le volume régularisable (37.7 hm³), renseigne sur l'importance du déficit de fourniture en eau, fortement lié à la fréquence des années sèches. L'approche statistique de la méthode graphique chronologique de traitement de l'information (de type « matrice Bertin ») appliquée pour trois principaux termes du bilan (apport, pluie et taux de remplissage), indique une forte relation entre les paramètres étudiés ; elle montre une nette croissance des années sèches, de septembre 1990 à août 2002, avec, toutefois, un retour des années humides à partir de l'année 2003.

Ces résultats sont confirmés par l'analyse en ondelettes : la variabilité des apports aux barrages est fortement influencée (de 66 % à 93 %) par une variabilité d'origine climatique et seulement une part relativement réduite de cette variabilité (de 7 à 34 %) est à expliquer par d'autres facteurs tels que la physiographie du bassin versant.

Les résultats du bilan en eau mettent en évidence de considérables pertes en eau par évaporation, de même que le volume des fuites d'eau, plus particulièrement sur les sites karstiques (Hammam Grouz, Foum El Gherza...) peuvent atteindre des pics importants, en particulier pendant les années pluvieuses (1990/91 et 2004/05). Les phénomènes de crue sont également à l'origine de remarquables volumes évacués par les déversoirs et les vidanges de fond des barrages, à l'exemple des crues étudiées dans le détail pour trois barrages (Cheffia, Zardezas et Foum El Gherza).

Par ailleurs, la quantification de la sédimentation des retenues, établie sur la base des campagnes bathymétriques, montre une réduction de la capacité de stockage des barrages, variable dans l'espace et dans le temps ; la perte de capacité globale est passée de 231 hm³ selon les levés de 2004 à 328 hm³ selon les levés de 2014.

Enfin, l'analyse a porté sur les systèmes de transferts d'eau inter-bassins à partir des grands barrages, et sur les possibilités de parvenir à des systèmes d'aménagement interconnectés, rendant solidaires les bassins de l'Est algérien.

Mots clés : Bassin versant, barrage, bilan de régularisation, matrice de Bertin, ondelettes, variabilité hydrologique, envasement, aménagement, Est algérien.

ABSTRACT

During last three decades, Algeria is known for an immense and ambitious program in building of dams. Climatically, East Algeria is of the most abundant rainfall in the territory, where 25 dams are recently in operation, distributed through watersheds, with very contrasting physical characters. On the hydrotechnical plan, it's characterized by the large variety in hydraulic properties specified from the perspective of their basins catchment, availability of lakes/reservoirs, and other auxiliary works.

Data of water balance from the National Agency of Dams and Transfers (A.N.B.T) associates the follow-up and studies on the monthly and annual evolutions of entries, exits and deficits in the dams, as well as the knowledge of the hydrological behavior of the construction driven by the rainfall and other climatic fluctuations generally. Based on the analysis in ten dams with a hydrological observation over 23 years (from September 1990 to August 2013), a significant difference between the average interannual regulated volume (21.0 hm³) and theoretical regulated volume (37.7 hm³) shows an importance deficit in the water supply system which is strongly related to the frequency of wet and dry years. A chronological graphic method, with a statistical approach in data processing (type "Bertin matrix"), is applied for three principal parameters (input, rainfall and storage rate). The result indicates a strong relationship between the parameters studied: a clear growth from the dry years from September 1990 until August 2002, and vice versa for wet years from 2003.

These results are confirmed by the wavelet analysis: the dams storability are strongly influenced (from 66 % to 93 %) by a climatic variability and the left (from 7 to 34 %) is related to other factors such as the physiography of basin catchments.

Results of the water balance show strong water losses by evaporation. The volume of water leaked, particularly on the karst sites (Foum El Gherza and Hammam Grouz), can reach to a significant peak specifically during the wet years 1990/91 and 2004/05. Otherwise, the phenomena of risings origins from excessive volumes evacuated from reservoirs or drainage of dams as details in the flood study for three dams Cheffia, Zardezas and Foum El Gherza.

The quantification of sediment volumes in the dams (bathymetric campaigns 2004 and 2014) shows a reduction in storage capacity of the dams over time with a storage loss of 231 hm³ according to the survey in 2004, and 328 hm³ comparing to 2014.

Finally, the analysis focuses on the inter-basin water transfer systems from large dams, and on the possibility of an interconnected management system to cooperate the basins in Eastern Algeria.

Keywords: Basin catchment, dam, regularization balance, Bertin matrix, wavelet, hydrological variability, sedimentation, planning, East Algeria.

ملخص

شهدت الجزائر على مدى العقود الثلاث الماضية برنامجا طموحا لبناء السدود. يعتبر الشرق الجزائري المنطقة ذات المناخ الأكثر رطوبة في الاقليم و يشمل 25 سدا مستغلا حيث تنتشر هذه السدود عبر احواض تجميعية ذات مميزات فيزيائية جد مختلفة. على المستوى الهيدرولوجي، اختلاف كبير يميز هذه المنشآت الهيدرولوجية من حيث الاحواض ، البحيرات، الحواجز و المنشآت.

معطيات الموازنة لتعديل المياه للوكالة الوطنية للسدود والتحويلات تسمح بمتابعة التطور الشهري و السنوي للمداخل الهيدرولوجية، المخارج و السعة و أيضا معرفة السلوك الهيدرولوجي للمنشآت اتجاه الامطار و التقلبات المناخية بصفة عامة. على مستوى عشرة سدود ذات فترة هيدرولوجية مشتركة مدتها 23 سنة (من سبتمبر 1990 إلى أوت 2013) ، يقدر متوسط الحجم بين السنوات التي تم تنظيمه بنحو 21.0 هم³ مقابل حجم نظري متوسط منتظم بنحو 37.7 هم³ ويبين هذا الفارق أهمية عجز تزويد المياه المرتبط بتعدد السنوات الجافة.و من ناحية اخرى تم تطبيق النهج الإحصائي لمعالجة المعلومات الزمنية لثلاث عوامل (المداخل الهيدرولوجية، الأمطار ونسبة امتلاء السدود). تشير المصفوفة إلى وجود علاقة قوية بين العوامل المدروسة حيث تظهر زيادة واضحة للسنوات الجافة من سبتمبر 1990 حتى أوت 2002 مع عودة للسنوات الرطبة ابتداءا من السنة 2003.

هذه النتائج مؤكدة بواسطة تطبيق طريقة اطياف الموجات : تغير مداخل السدود يتأثر بشدة (من 66 % إلى 93 %) بالتغير المناخي ، جزء صغير من هذا التغير (من 7 % إلى 34 %) مرتبط بعوامل اخرى مثل الخصائص الفيزيائية للحوض.

تظهر نتائج الموازنة المائية خسارة كبيرة في الماء بسبب التبخر حيث بلغ حجم التسربات المائية، ولا سيما في مواقع الكارست (فم الغرزة و حمام غروز) الذروة خلال السنتين 1991/1990 و 2005/2004. إن ظواهر الفيضانات هي أيضا مصدر الكميات الكبيرة التي يتم تصريفها بواسطة منشآت التفريغات الفيضية و القاعدية ، كما هو الحال في سد الشافية، زردازة و فم الغرزة .

يبين القياس الكمي لأحجام الرواسب في السدود (الرفع الطبوغرافي لسنتي 2004 و 2014) خسارة في السعة بمرور الوقت حيث قدرت هذه الخسارة ب 231 هم³ سنة 2004 ، وقد ارتفعت هذه الخسارة إلى 328 هم³ في سنة 2014.

اخيرا قدمنا مختلف الافاق التي تسمح بالوصول الى شبكات التنمية المترابطة مما يجعل احواض الشرق الجزائري متصلة ببعضها.

الكلمات المفتاحية: حوض تجمعي، السد، الموازنة المائية، مصفوفة برتين، اطياف الموجات، التغيرات الهيدرولوجية، التوحد، التهيئة، الشرق الجزائري.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS

RESUME

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1 : CADRE DE L'ETUDE, DONNEES ET METHODES

INTRODUCTION AU CHAPITRE..... 8

1. CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE 8

1.1. Le cadre orographique des bassins d'alimentation des barrages 8

1.1.1 L'Atlas tellien 8

1.1.2 Les Hautes Plaines 8

1.1.3 L'Atlas saharien 9

1.2. Le réseau hydrographique..... 10

1.2.1 Les bassins d'alimentation à écoulement exoréique 11

1.2.2 Les bassins d'alimentation à écoulement endoréique 17

1.3. Contexte géologique des bassins d'alimentation des barrages 20

1.3.1 Les bassins de l'Atlas tellien 22

1.3.2 Les bassins des Hautes plaines..... 26

1.3.3 Les bassins des piémonts Nord et Sud de l'Atlas saharien.....28

1.4. Contexte climatique des bassins d'alimentation des barrages 31

1.4.1 Distribution spatiale des précipitations 31

1.4.2 Distribution spatiale des températures et des évapotranspirations potentielles 33

1.4.3 Les zones bioclimatiques 34

2. HISTORIQUE : PERIODES D'IMPLANTATION DES BARRAGES 35

2.1. Les premières implantations de 1938 à 1963 36

2.2. La relance hydraulique à partir des années 1980..... 37

2.3. La poursuite du rythme de réalisation de 2001 à nos jours..... 39

3. PRESENTATION DE LA BASE DE DONNEES 41

3.1. Les données du bilan d'eau..... 42

3.2. Les données climatiques : Indice NAO 44

3.3. Les données des apports simulés des bassins d'alimentation des barrages..... 46

3.4. Les informations relatives aux levés bathymétriques 46

4. METHODES UTILISEES POUR LE TRAITEMENT DES DONNEES.....	47
4.1. Traitement statistique	47
4.1.1 <i>Bilan de régularisation des eaux.....</i>	47
4.1.2 <i>Méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI).....</i>	49
4.1.3 <i>Méthode des variables centrées réduites.....</i>	49
4.2. Traitement spectral	50
4.2.1 <i>Analyse en ondelettes continues</i>	50
4.2.2 <i>Analyse de la cohérence en ondelettes</i>	52
4.3. Traitement géo- spatial	53
4.3.1 <i>Modèle Numérique de terrain (M.N.T) et Système d'Information Géographique (S.I.G.)..</i>	53
4.3.2 <i>La cartographie hydroclimatique.....</i>	54
CONCLUSION	54

**CHAPITRE 2 : CARACTERISATION HYDROLOGIQUE ET HYDROTECHNIQUE
DES BARRAGES (BASSINS D'ALIMENTATION, LACS DE RETENUE,
DIGUES ET OUVRAGES ANNEXES)**

INTRODUCTION AU CHAPITRE.....	56
1. CARACTERISATION HYDROLOGIQUE DES BASSINS D'ALIMENTATION DES BARRAGES	56
1.1. Les superficies des bassins	56
1.2. Les pentes des bassins	57
1.3. L'écoulement moyen annuel.....	59
1.4. Analyse descriptive des apports simulés par la variable centrée réduite	63
2. CARACTERISATION HYDRO-TECHNIQUE : DIGUES, OUVRAGES ANNEXES ET LACS DE RETENUE	68
2.1. Conception et dimensionnement des digues des barrages	68
2.1.1 <i>Définition et typologie des barrages</i>	68
2.1.2 <i>Répartition des barrages de l'Est algérien selon la nature de leur digue.....</i>	72
2.2. Les ouvrages annexes : une grande diversité	79
2.2.1 <i>Type et fonctionnement des évacuateurs de crues.....</i>	79
2.2.2 <i>Systèmes de vidange de fond</i>	83
2.2.3 <i>Ouvrages de prise d'eau.....</i>	84
2.3. Les lacs de retenue.....	88
2.3.1 <i>Superficie des retenues.....</i>	88
2.3.2 <i>Capacité des retenues.....</i>	90
2.3.3 <i>Relations surface- volume-hauteur des retenues : les courbes de remplissage</i>	91

2.3.4 Niveau normal de retenue (NNR) et Niveau des plus hautes eaux (PHE).....	94
CONCLUSION	97
 CHAPITRE 3 : VARIABILITE TEMPORELLE ET SPATIALE DU BILAN D’EAU DES BARRAGES (APPORT, RESERVE ET PRECIPITATIONS) ET LIEN AVEC LES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES	
INTRODUCTION AU CHAPITRE.....	99
1. VARIATIONS INTERANNUELLES ET MENSUELLES DES APPORTS, RESERVES ET PRECIPITATIONS.....	101
1.1. Variations interannuelles.....	101
1.2. Variations du régime hydro-pluviométrique mensuel en année déficitaire et en année excédentaire	108
2. VARIABILITE INTERANNUELLE DES APPORTS, RESERVES ET PLUIES PAR LA MATRICE DE BERTIN	114
2.1. Irrégularité interannuelle des apports aux barrages	114
2.2. Une reprise progressive des pluies sur la dernière décennie	116
2.3. Le niveau des réserves des barrages : une tendance à la hausse	117
3. LES MODES DOMINANTS DE LA VARIABILITE DES PLUIES ET DES APPORTS AUX BARRAGES	119
3.1. Détermination des grands modes de variabilité hydropluviométriques par la méthode des ondelettes continues.....	119
3.1.1 Identification des principaux modes de variabilité des pluies.....	119
3.1.2 Identification des principaux modes de variabilité des apports hydrologiques	122
3.2. La cohérence en ondelettes continues : évolution de degré de corrélation entre apports et pluies au cours du temps.....	125
4. LIENS POTENTIELS ENTRE L’OSCILLATION CLIMATIQUE NORD ATLANTIQUE (NAO) ET LA VARIABILITE HYDROLOGIQUE DES BARRAGES	127
4.1. Identification des modes dominants de la variabilité de l’indice climatique NAO.....	128
4.2. Quantification de la relation entre l’indice climatique (NAO), les pluies et apports aux barrages	129
CONCLUSION	132

CHAPITRE 4 : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PERTES EN EAU (EVAPORATION, FUTES), DEVERSEMENTS DE CRUE ET VIDANGES DE FOND

INTRODUCTION AU CHAPITRE.....	136
1. PERTES EN EAU DES BARRAGES : EVAPORATION ET FUTES.....	136
1.1. Les évaporations des barrages	136
<i>1.1.1 Rappel sur la question de l'évaporation des barrages et son ampleur</i>	<i>136</i>
<i>1.1.2 Variabilité interannuelle de l'évaporation des barrages</i>	<i>137</i>
<i>1.1.3 Variations de l'évaporation d'une année à une autre</i>	<i>140</i>
<i>1.1.4 Variations mensuelles et saisonnières des évaporations.....</i>	<i>144</i>
1.2. Les fuites des barrages	146
<i>1.2.1 Rappel bibliographique sur les fuites des barrages</i>	<i>146</i>
<i>1.2.2 Variations interannuelles et annuelles des fuites des barrages de l'Est algérien</i>	<i>147</i>
2. LES VOLUMES EVACUES : DEVERSEMENTS DE CRUE ET VIDANGES DE FOND.....	152
2.1. Variations interannuelles et annuelles des déversements de crue et des vidanges de fond des dix barrages	153
2.2. Facteur à l'origine du déversement de crue et de la vidange : les crues exceptionnelles .	159
<i>2.2.1 Rappel bibliographique</i>	<i>159</i>
<i>2.2.2 Les crues de l'oued Bounamousa au barrage Cheffia.....</i>	<i>160</i>
<i>2.2.3 Les crues de l'oued Saf-Saf au barrage Zardezas.....</i>	<i>163</i>
<i>2.2.4 Les crues de l'oued El Abiod au barrage Foum El Gherza</i>	<i>165</i>
CONCLUSION :.....	166

CHAPITRE 5 : L'ENVASEMENT, FACTEUR DE REDUCTION DU VOLUME UTILE DES BARRAGES

INTRODUCTION AU CHAPITRE.....	169
1. ETAT DES CONNAISSANCES SUR L'ENVASEMENT DES BARRAGES	169
1.1. Pour une meilleure connaissance de l'envasement des barrages	169
1.2. Moyens de lutte contre l'envasement des barrages	173
2. QUANTIFICATION DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES DE L'EST ALGERIEN	175
2.1. Les données de mesures bathymétriques	175
2.2. L'envasement entre la mise en eau et le levé bathymétrique de 2004.....	177
<i>2.2.1 Envasement et perte de capacité</i>	<i>177</i>

2.2.2 Les barrages dont la perte de capacité est supérieure à 50 %.....	179
2.2.3 Les barrages dont la perte de capacité est comprise entre 30 et 50 %.....	181
2.2.4 Les barrages dont la perte de capacité est inférieure ou égale à 10 %.....	183
2.3. L'envasement entre la mise en eau et le levé bathymétrique de 2014.....	183
3. ETUDE DE L'ENVASEMENT DE QUATRE BARRAGES : ZARDEZAS, K'SOB, CHEFFIA ET BENI HAROUN.....	186
3.1. Le barrage de Zardezas	186
3.2. Le barrage de K'sob.....	188
3.3. Le barrage de Cheffia	190
3.4. Le barrage de Béni Haroun.....	192
CONCLUSION	194

**CHAPITRE 6 : BARRAGES, VOLUMES REGULARISES ET
TRANSFERTS INTER-BASSINS . VERS UN SYSTEME D'AMENAGEMENT
INTERCONNECTE**

INTRODUCTION AU CHAPITRE.....	197
1. CONFRONTATION ENTRE VOLUME REGULARISE REEL ET THEORIQUE	197
1.1. Le volume régularisé : définition et bref rappel des méthodes de régularisation	197
1.2. Le ratio volume régularisé réel/volume régularisable théorique des barrages de l'Est algérien	200
1.2.1 En valeurs moyennes interannuelles	202
1.2.2 Amplitude de la variabilité : valeurs médianes et extrêmes.....	203
2. REPARTITION PAR SECTEUR D'UTILISATION DES VOLUMES D'EAU REGULARISES.....	204
2.1. Répartition sectorielle du volume total régularisé.....	204
2.2. Variations annuelles par secteur d'utilisation des volumes régularisés	207
2.2.1 Barrage Cheffia	207
2.2.2 Barrage Zardezas	208
2.2.3 Barrage Guenitra	209
2.2.4 Barrage Hammam Debagh.....	210
2.2.5 Barrage Ain Dalia.....	211
2.2.6 Barrage Hammam Grouz	212
2.2.7 Barrage Ain Zada.....	212
2.2.8 Barrage K'sob.....	213
2.2.9 Barrage Foum El Gueiss.....	214
2.2.10 Barrage Foum El Gherza	214

3. VALORISATION DES RESSOURCES EN EAU DES BARRAGES : TRANSFERTS D'EAU ET INTERCONNEXIONS	215
3.1. Les systèmes de transferts d'eau en Algérie.....	215
3.2. Les projets structurants dans la région de l'Est Algérien	216
3.2.1 <i>Le système Mexa-Bougous et Cheffia –Bouhaloufa – Boulatane.....</i>	217
3.2.2 <i>Le système Ain Dalia –Foum El Khanga.....</i>	218
3.2.3 <i>Le système Zardezas-Guénitra-Zit Emba face aux besoins pressants de la ville de Skikda</i>	220
3.2.4 <i>Le complexe de Béni Haroun</i>	223
3.2.5 <i>Le complexe hydraulique Sétif- Hodna</i>	224
3.2.6 <i>Le système de transfert Tichy Haf.....</i>	227
CONCLUSION	228
CONCLUSION GENERALE.....	230
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	237
LISTE DES FIGURES	256
LISTE DES TABLEAUX	262
LISTE DES PHOTOS	264
ANNEXES	267

INTRODUCTION GENERALE

La mobilisation des ressources en eau est d'une importance capitale pour la couverture des besoins en eau des populations et pour le développement socio-économique de manière générale. Avec les besoins grandissants en eau liés à l'essor démographique et au développement accéléré des activités économiques, d'ambitieux programmes de construction de barrages réservoirs pour stocker les eaux sont mis en œuvre, avec chaque année, plus de 250 nouveaux barrages réservoirs construits dans le monde (Nandalal et al, 2007). L'Afrique du Nord est l'une des zones du continent qui construit ces dernières années le plus de barrages afin d'augmenter la disponibilité des ressources en eau (Rémini et al, 2009). Les 49 barrages tunisiens permettent un stockage de 2.2 milliards de m³ (Otedd, 2007) ; le Maroc totalise 125 barrages pour une capacité qui dépasse 16 milliards de m³ (Bouaicha et al, 2010) et depuis les années 1980, les eaux de surface en Algérie font l'objet d'une mobilisation accrue se traduisant par un parc de 74 barrages (situation de l'année 2015).

A l'instar des autres régions du pays, l'Est algérien bénéficie de la mise en eau d'un nombre important de barrages. Au total, 25 barrages sont en cours d'exploitation, répartis à travers des bassins septentrionaux, à écoulement de type exoréique (Côtiers constantinois, Soummam, Kébir-Rhumel, Seybouse et Medjerda) et des bassins méridionaux, à écoulement de type endoréique (Hauts Plateaux, Chott Melrhir et Chott Hodna).

La problématique des barrages en Algérie présente plusieurs aspects comme la variabilité des apports hydrologiques et par conséquent celle des réserves, les pertes en eau (évaporation, fuites), les déversements suite aux crues exceptionnelles, et l'ampleur de la sédimentation. Les travaux de recherche menés dans le cadre de cette thèse tentent d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Quels sont les principaux traits techniques et hydrologiques caractérisant les barrages? Et les contraintes ayant accompagné la construction de ces ouvrages ?
- Quel constat peut-on établir sur le fonctionnement hydrologique des barrages à partir des données de calcul de leurs bilans d'eau ? Quels sont les caractères particuliers de la variabilité hydrologique de lacs des barrages? Les fluctuations climatiques contrôlent-elles les modes de variabilité hydrologique de façon prédominante ?
- Quel bilan peut-on tirer autour de l'ampleur et la variabilité des pertes en eau (naturelles et liées à la gestion des ouvrages), et des volumes évacués soustraits aux volumes régularisables ?
- Quelle évaluation peut-on faire sur le rythme de sédimentation de lacs de retenues et quelle prédiction peut-on faire sur la durée de vie des barrages? et les techniques de lutte contre ce phénomène ?

- Enfin, quel est la part des volumes régularisés et alloués aux secteurs d'utilisation, comparativement aux volumes régularisés théoriques ? Et quelles perspectives d'aménagement apportent les systèmes de transferts d'eau ?

Pour répondre à ces questions, nous avons exploité plusieurs données décrites dans le **premier chapitre**. Ces données se composent de diverses informations physiques et hydrotechniques caractérisant la variété des 25 barrages en cours d'exploitation (bassins d'alimentation des barrages, digues, ouvrages annexes et lacs de retenue), des données du bilan d'eau et de la variation des réserves des retenues, des levés bathymétriques, des données des lâchers des barrages au profit des secteurs utilisateurs, des données climatiques (indice NAO en particulier) et des données spatialisées du contexte hydrologique (cartes numérisées des précipitations et des écoulements, le MNT à maille de 100 m en coordonnées métriques Lambert Nord Algérie). Aussi, avons-nous adopté différentes approches méthodologiques : les méthodes statistiques descriptives (les histogrammes, les box plots, les analyses des variables moyennes centrées réduites), la méthode du bilan d'eau des barrages qui permet de suivre l'évolution des gains et pertes de capacité d'une retenue, l'approche statistique de la méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTT) de type matrice Bertin, ainsi que les méthodes spectrales (analyses par la transformation en ondelettes continues, cohérence en ondelettes), qui permettent de détecter les structures (périodicités, fluctuations) et leur évolution au cours du temps (discontinuités) des signaux instationnaires. Ces méthodes ont été déjà appliquées dans plusieurs études, sur des bassins versants situés en Afrique du nord, aux Etats unis ou concernant les grands fleuves français.

Le contexte physico-climatique des bassins d'alimentation des barrages est marqué par de forts contrastes, avec un climat méditerranéen au Nord et continental subdésertique au Sud (figure 1). Les caractères physiographiques, et climatiques entraînent des répercussions aussi bien sur les modalités d'écoulement que sur les aménagements.

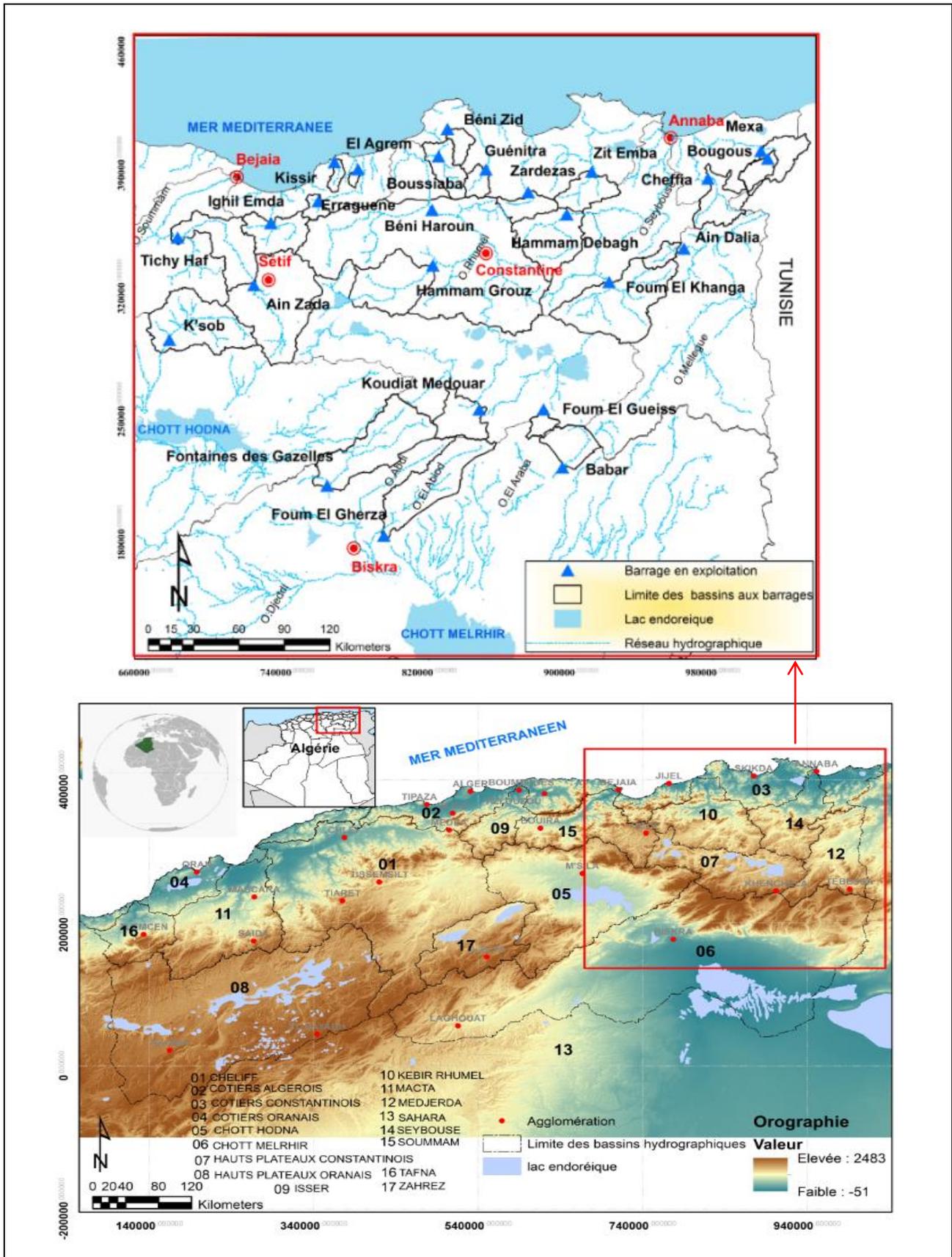


Figure 1 : Situation de la zone d'étude en Algérie et répartition géographique des barrages de l'Est algérien (Relief vu à travers un MNT à maille de 100 m, coordonnées métriques Lambert Nord Algérie, traité par Rezak, 2014).

Dans un **deuxième chapitre**, la connaissance de l'écoulement s'avère d'une grande importance pour une exploitation et une gestion rationnelle des ressources en eau à l'échelle d'un bassin. La carte de l'écoulement moyen annuel et l'analyse des débits conduisent à connaître la variabilité spatio-temporelle de la lame d'eau écoulée à l'amont des sites de barrages. Aussi, l'étude des caractéristiques hydrotechniques identifiant la variété des barrages en cours d'exploitation (la nature de leurs digues, leurs ouvrages annexes et leurs lacs de retenue), permettent, par ailleurs, de comprendre les aspects techniques, structurel et fonctionnel de ces ouvrages.

La compréhension et le suivi de la gestion de ces ressources en eau mobilisées sont basés sur l'analyse détaillée de leurs bilans d'eau, objet central du **troisième chapitre**. La période d'exploitation est variable d'un barrage à l'autre, avec cependant une période commune de 23 ans (de 1990/91 à 2012/13) qui concerne un échantillon de dix (10) barrages suffisamment représentatifs de la variété du contexte physique de l'Est algérien. A ce titre, les analyses de la variabilité temporelle et spatiale des apports, réserves et précipitations, et leur lien potentiel avec les fluctuations climatiques sont abordés pour mettre en lumière trois aspects principaux : la variation interannuelle et mensuelle du comportement hydrologique des bassins d'alimentation des barrages, la détermination des discontinuités et des périodes caractéristiques par des outils statistiques (matrice de Bertin, ondelettes continues et cohérence en ondelette), et enfin le lien entre la variabilité hydrologique et les fluctuations climatiques à large échelle (en utilisant les fluctuations de l'indice NAO).

En outre, cette variabilité des bilans d'eau est influencée par d'autres paramètres tels que les pertes en eau (évaporation, fuites à travers les rives et les fondations), déversements de crue et vidanges de fond. C'est l'objectif recherché du **quatrième chapitre**, qui consiste à connaître l'importance et la variation spatio-temporelle des différents volumes soustraits au volume régularisable.

L'envasement, au cœur du **cinquième chapitre**, est un phénomène susceptible d'être accentué par ces fluctuations hydroclimatiques, en particulier suite aux effets des crues qui deviennent plus fréquentes, et qui charrient des apports solides conséquents. Les apports solides influent sur la durée de vie des barrages suite à une sédimentation plus ou moins rapide des retenues, ce qui nécessite différentes mesures de protection en amont et à l'aval.

Dans la mesure où le phénomène d'envasement affecte le volume utile des barrages, il entraîne par conséquent une diminution du volume régularisable fourni annuellement, pour les différents usages de l'eau. L'analyse des ratios volume régularisé réel / volume régularisé théorique des barrages, abordée au **sixième chapitre**, permet de mesurer le degré de satisfaction des besoins des secteurs utilisateurs (AEP, Irrigation, industrie). Il sera aussi question de l'impact des transferts d'eau inter-bassins pour combler le déficit en eau de certaines wilayate de l'Est algérien.

Ces axes de recherche sont résumés dans l'organigramme présenté dans la figure 2.

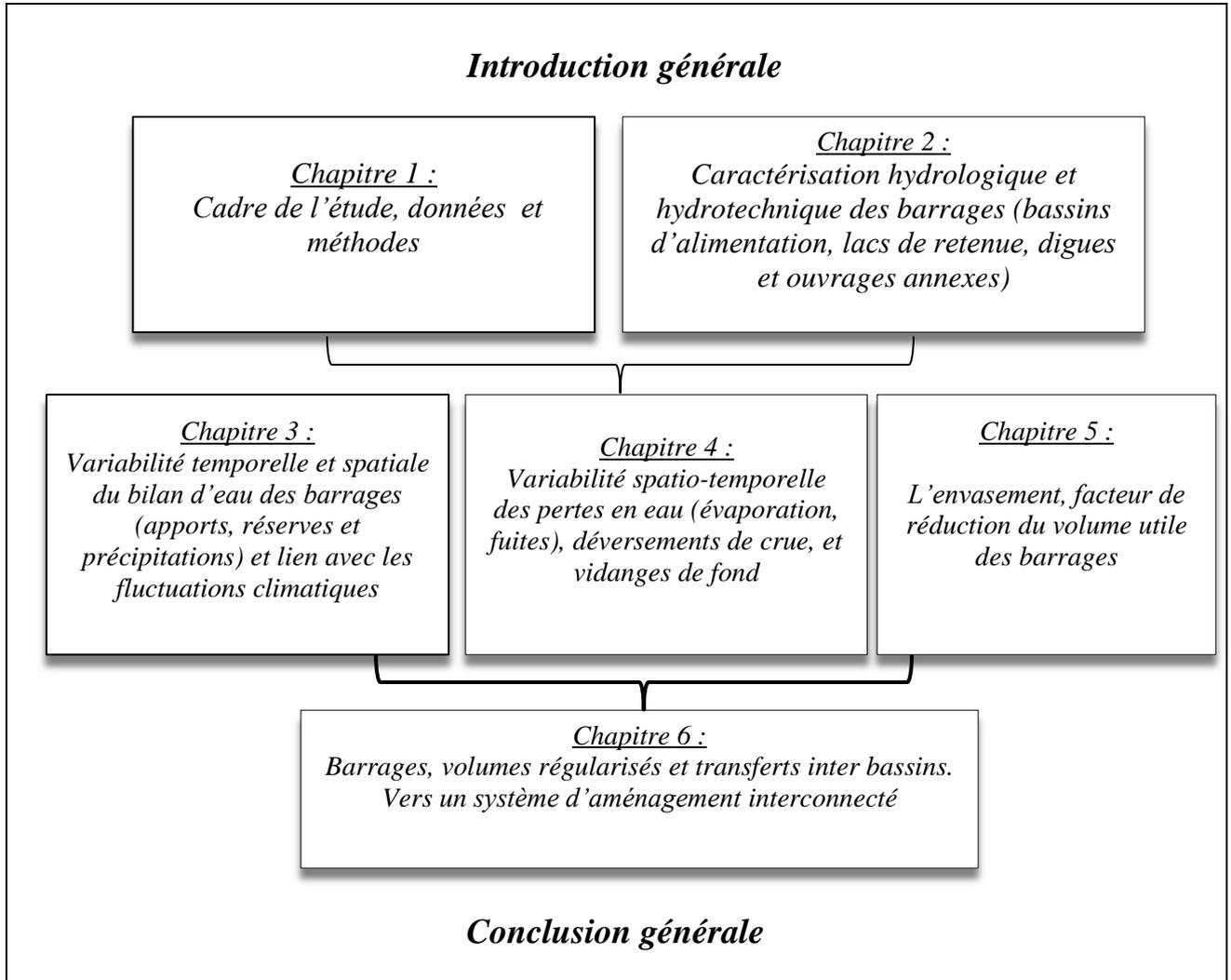


Figure 2 : Organigramme du plan de la thèse

CHAPITRE 1

CADRE DE L'ETUDE, DONNEES ET METHODES

INTRODUCTION AU CHAPITRE

Ce premier chapitre est consacré à la caractérisation du contexte physique des bassins d'alimentation des barrages en exploitation dans l'Est algérien.

Dans un premier temps, une description générale des différents bassins d'alimentation sera fournie à travers leurs caractéristiques physiographiques, hydrographiques, géologiques et climatiques, bases indispensables à la compréhension des mécanismes hydrologiques. Dans un second temps, sera présentée l'évolution chronologique de l'implantation des barrages dans la région, depuis la période coloniale jusqu'à l'année 2015. Enfin, seront passées en revue les données utilisées ainsi que les différentes méthodes employées dans le cadre de cette thèse.

1. CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude fait partie du Nord-Est algérien. La superficie globale des bassins contrôlés par les barrages s'étend sur 25 224 km² dont nous donnons une brève description des ensembles orographiques, hydrographiques, géologiques et climatiques.

1.1. Le cadre orographique des bassins d'alimentation des barrages

L'organisation morpho-structurale de la zone d'étude est assez complexe, composée principalement de trois unités physiques, du Nord au Sud : l'Atlas tellien, les Hautes Plaines et l'Atlas saharien (figure 3).

1.1.1 L'Atlas tellien

La plupart des bassins étudiés se caractérise par des reliefs de la chaîne tellienne dont l'altitude maximum dépasse 1990 m (Erraguene et Ighil Emda). Cette chaîne constituée par une succession de massifs montagneux, côtiers et sublittoraux s'étendant du bourrelet de Béjaïa à l'Ouest jusqu'à la frontière tunisienne à l'Est. Plus au Sud on retrouve les chaînes telliennes externes constituées quant à elles par le massif de la petite Kabylie qui s'étend depuis l'Ouest de la vallée de la Soummam jusqu'à la vallée de Djendjen et le massif d'El Aouana à l'Est (**Abdelhafid karim, 2014**). Les principaux massifs montagneux sont : l'Edough (1008), Collo (980 m), Aouana, Bougaroun, Maouana (1411 m) et la chaîne des Babors (2004 m).

Les bassins d'alimentation de quinze (15) barrages (Mexa, Bougous, Cheffia, Ain Dalia, Hammam Debagh, Zit Emba, Zardezas, Guénitra, Béni Zid, Boussiaba, Kissir, El Agrem, Erraguene, Ighil Emda, Tichy Haf) couvrent cette zone géographique de l'Atlas tellien.

1.1.2 Les Hautes Plaines

Les Hautes Plaines, entre les chaînes de l'Atlas tellien oriental au Nord et les monts du Hodna, du Belezma, de l'Aurès et des Nememchas au Sud, se distinguent par deux sous-ensembles dont le premier, se situant au Nord, se rapproche du domaine tellien et le second plus au Sud, c'est-à-dire la zone steppique, correspond à l'espace de raccordement ou de jonction entre le domaine tellien et le domaine saharien (**Raham, 2001**).

Ces plaines sont occupées en leur centre par des dépressions fermées comme Chott El Hodna, Chott Tinnsilt, Chott El Maleh, Sabkhet Djendli, Garaet Guellif, Garaet Ank Djemel, et El Marhssel, Garaet El Tarf ... etc.

Les bassins d'alimentation de cinq (5) barrages (K'sob, Ain Zada, Hammam Grouz, Béni Haroun, Foum El Khanga) couvrent en totalité ou partiellement cette zone géographique des Hautes plaines.

1.1.3 L'Atlas saharien

Au niveau de cette zone, se situent les bassins hydrographiques, répartis entre le piémont Nord et Sud de l'atlas saharien, alimentant les cinq (5) autres barrages concernés par l'étude (Koudiat Medouar, Foum El Gueiss, Babar, Foum El Gherza et Fontaines des Gazelles).

L'Atlas saharien est principalement constitué de massifs volumineux, relativement ouverts, dont les principaux sommets atteignent plus de 2000 m tels que le massif de l'Aurès qui s'individualise comme un ensemble homogène sur le plan topographique où les limites sont très nettes avec les hautes plaines au Nord et le pré Sahara au Sud. Il s'inscrit en gros entre les courbes de niveau 100 m au Nord et 400 m au Sud avec des sommets dépassant les 2000 m (Djebel Chelia) et qui sont les plus élevés de l'Algérie septentrionale (**Meharzi, 1994**).

Le Sud de la région d'étude comprend la partie Nord du chott Melrhir (-34 m). Ce dernier constitue un réceptacle pour les oueds du flanc méridional des Aurès et des Némemchas, avec un sens d'écoulement Nord-Sud; c'est au niveau de cette grande dépression lacustre que se déverse l'oued Dejedi, d'une largeur de 500 m environ (**Mate, 2003**).

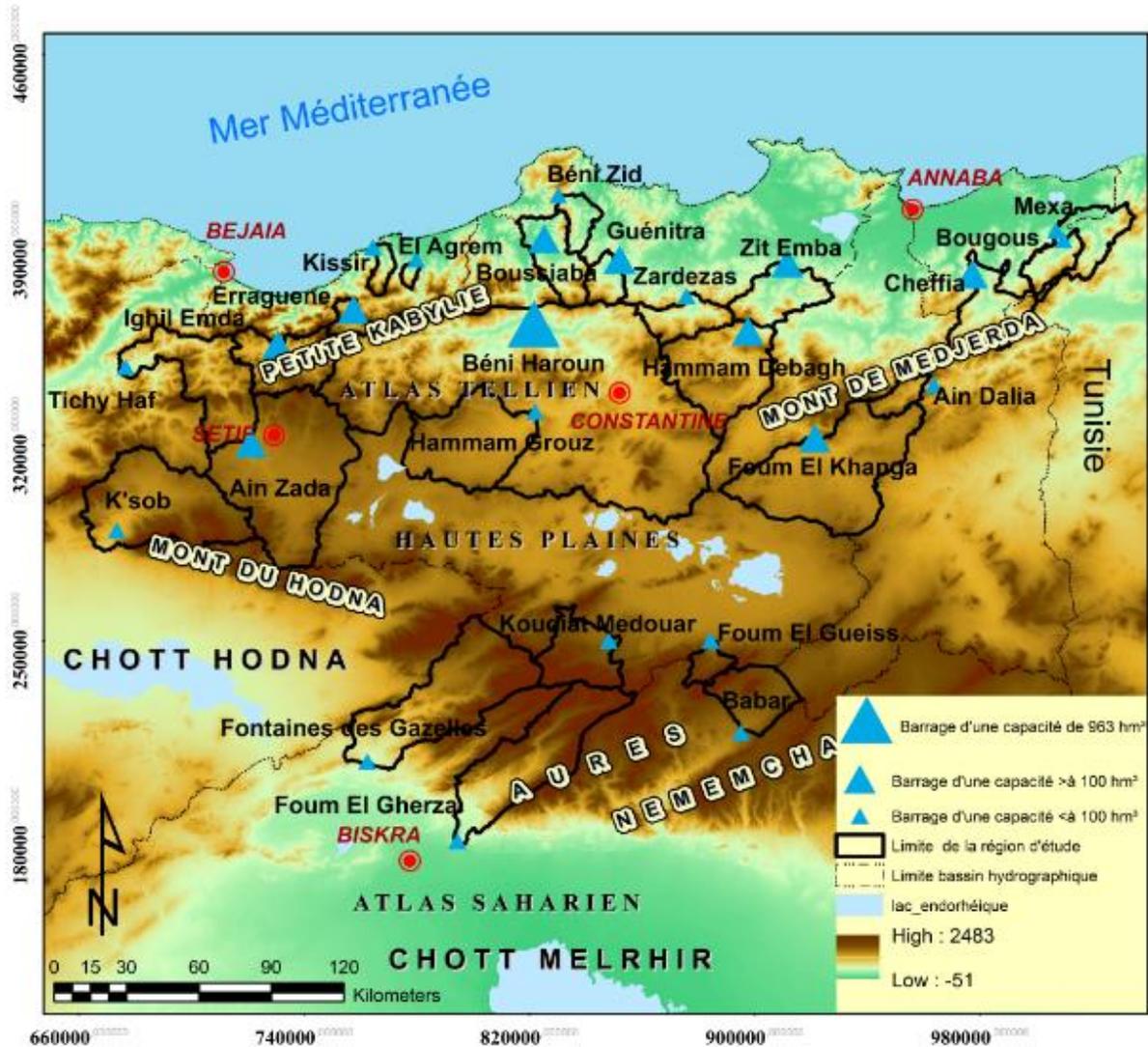


Figure 3 : Les grands ensembles orographiques de la zone d'étude vus à travers un Modèle Numérique de Terrain (MNT à maille de 100 m, coordonnées métriques Lambert Nord Algérie, traité par REZAK, 2014).

1.2. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Il est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. La disposition du réseau est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques.

Le découpage hydrographique de la région d'étude permet de distinguer :

- 19 bassins septentrionaux à écoulement exoréique : Côtiers constantinois (11), Soummam (2), Kébir-Rhumel (3), Seybouse (2) et Medjerda (1).
- 6 bassins méridionaux à écoulement endoréique : Hauts Plateaux (2), Chott Melrhir (3) et Chott Hodna (1).

1.2.1 Les bassins d'alimentation à écoulement exoréique :

1.2.1.1. Le bassin des Côtiers Constantinois

En allant de la frontière Tunisienne vers l'Ouest, les principaux cours d'eau rencontrés sont l'oued Mafragh, l'oued Kébir-Ouest, l'oued Saf-Saf, l'oued Guebli, l'oued Djendjen et l'oued Agrioun. Les bassins alimentant 11 barrages drainent une superficie de 3486 km², soit 30 % de la superficie totale du bassin des Côtiers Constantinois (figure 4).

Le barrage de **Mexa** sur l'oued Kébir- Est se situe à la confluence de deux affluents : l'oued Ballouta traversant la frontière algéro-tunisienne et qui reçoit quelques affluents (oued El Mellah, oued Seloul et oued Maouche) et l'oued **Bougous** qui reçoit l'affluent le plus important de Berla. Le barrage Bougous, érigé en amont, sur l'oued du même nom, est venu renforcer la modeste capacité du barrage de Mexa.

Le barrage de **Cheffia** est implanté sur la haute vallée de la Bounamoussa (confluence de l'oued El Kébir et Bouhadjar) qui prend son origine à Koudiat Ben Ahmed dont l'altitude est de 1140 m.

Le bassin du barrage de **Zit Emba** est drainé principalement par oued El Hammam qui prend sa source à partir des sources thermales d'Ouled Ali (versant Nord tellien). Au début, il se dirige vers l'Ouest, ensuite il tourne au Nord, en rejoignant l'oued Emchekel près de l'agglomération de Ain Charchar et forme ainsi l'oued Kébir – Ouest (**Belhadj, 2017**).

Le bassin du barrage **Zardezas** (oued Saf-Saf) est drainé par un réseau hydrographique dense et bien ramifié, présentant un cheminement maximal de 27 km (**Derdous, 2016**). Le cours d'eau principal est alimenté par trois tributaires principaux : l'oued Khemakhem (Est-Nord), l'oued Khorfane (Sud-Nord) et l'oued Bou Adjeb (Est-Nord).

Le bassin du barrage **Guenitra** est drainé par l'oued principal de Fessa qui prend naissance au Sud-Ouest de la chaîne numidique de Sidi Dris, ainsi que par ses différents affluents tels que oued Essouk, oued Mellouh, oued Meraya.

La confluence de l'oued Fessa et oued El Khanga donne naissance à l'oued Guebli qui constitue le principal cours d'eau du bassin de **Beni Zid**. Il reçoit sur sa rive droite l'oued Meraya, puis l'oued Bir Recade et sur la rive gauche oued Lezas puis oued El Gratem (**Mecibah, 2017**). L'oued Guergoura capté par le barrage de Beni Zid, résulte de la confluence de deux oueds, Zaggar et Bou el Aouidet.

Le bassin du barrage **El Agrem** s'étend sur une superficie de 39 km² ; il se subdivisé en trois grandes parties : la partie orientale (l'oued Merhaba et l'oued Bou Bahri), la partie occidentale (oued Tezercourt, oued Harma et l'oued Abima) et la partie septentrionale (oued El Agrem).

Le bassin du barrage **Kissir**, d'une largeur moyenne de 5.6 km, est drainé par l'oued principal de Kissir. La longueur du talweg principal est de 19 km.

Le bassin du barrage **Erraguene** se trouve dans la région de la petite Kabylie, entre le massif des Babors et la côte méditerranéenne à Ziama Mansouria. Il est drainé par le cours d'eau supérieur de Djendjen qui se dirige dans la direction Ouest-Est, parallèlement à la côte, et s'incurve brusquement vers le Nord au voisinage de Texenna pour se jeter dans la mer à l'Est de Jijel.

Le bassin du barrage **Ighil Emda** est drainé par l'oued Agrioun, lui-même formé par la confluence de trois oueds principaux : Oued Berd qui draine le Nord-Est et le Sud-Ouest du bassin, oued Atteba dans le Sud-Ouest et oued Embarek qui draine le Nord-Ouest du bassin. Le réseau est dense, dépassant 4 km/ km², et se caractérise par la dominance de cours d'eau d'ordre 1 soit près de 63 % (**Rémini et al, 1995**).

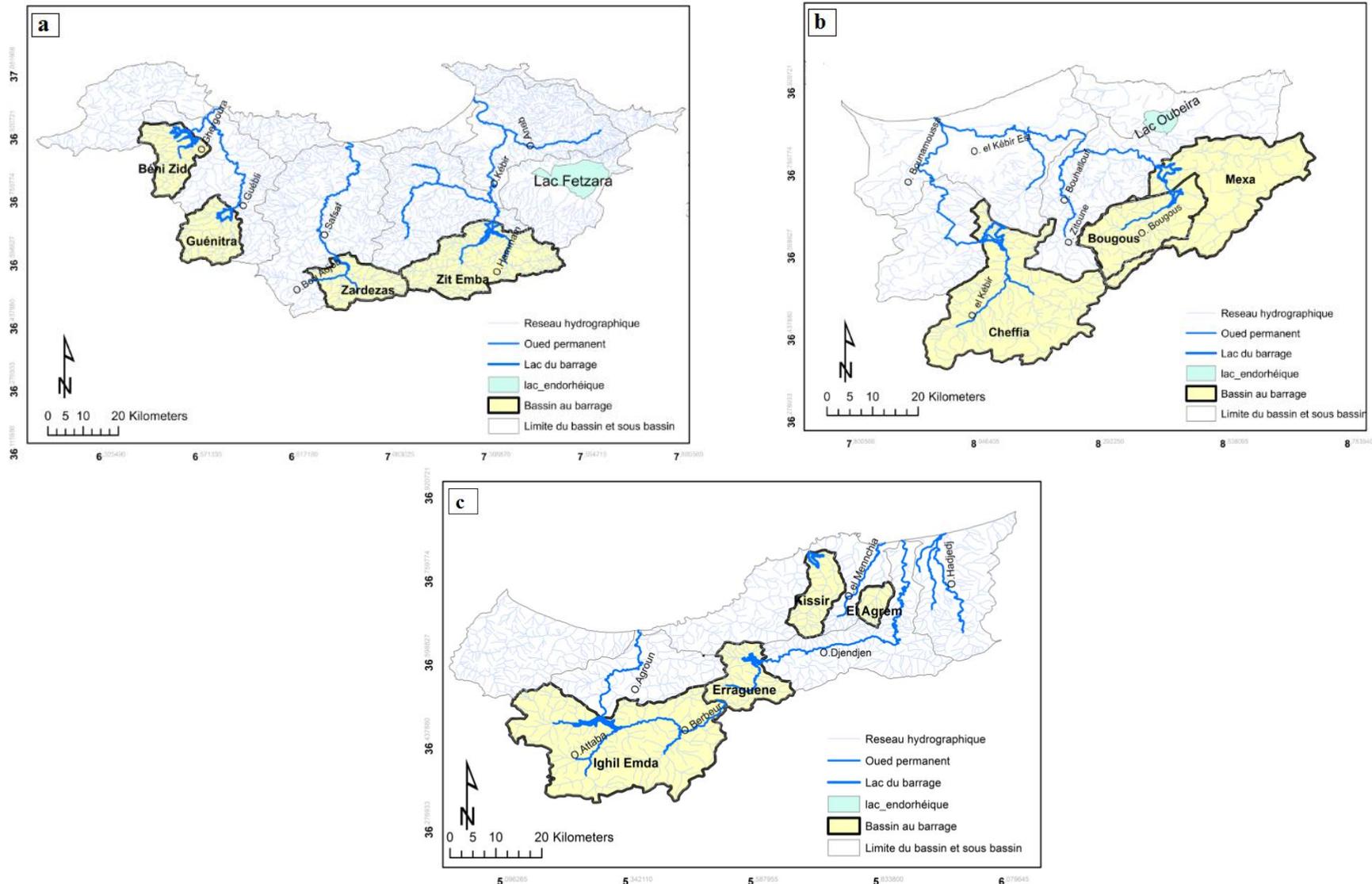


Figure 4 : Bassins des Côtiers constantinois et localisation des barrages
 a. Béni Zid, Guénitra, Zardezas, Zit Emba, b. Mexa, Bougous, Cheffia c. El Agrem, Kissir, Erraguene, Ighil Emda

1.2.1.2. Le bassin de la Soummam

Le bassin versant de la Soummam couvre une aire de 9125 km², dont 42 % sont drainés par les deux barrages d'Ain Zada et de Tichy Haf (figure 5).

Les deux barrages sont alimentés par l'oued Bousselam, affluent de la Soummam, qui prend sa source au djebel Meghris, au Nord de Sétif. Il coule d'abord Nord-Sud puis vire-t-il brusquement vers le Nord-Ouest et s'échappe des hautes Plaines par les gorges creusées dans les calcaires du Guergour, dans la région de Bougaa. Plus au Nord, il décrit une grande courbure et joint à lui un important affluent, oued El Main, venant du Sud. Après sa confluence dans la région d'Akbou avec l'oued Sahel qui draine les eaux d'oued Azrou, oued Ziane et oued Eddous, il débouche sur l'oued Soummam, le principal collecteur qui débouche à son tour sur la mer Méditerranée (**Mebarki, 2010**).

1.2.1.3. Le bassin du Kébir Rhumel

Le bassin de Kébir Rhumel couvre une superficie de 8815 km², dont 105 % sont drainés par les trois barrages de Boussiaba, Béni Haroun et Hammam Grouz (figure 6).

Le bassin du barrage **Boussiaba** (379 km²) est constitué par le principal oued du même nom (affluent de l'oued El Kébir), d'une longueur de 48 km. Le site du barrage se trouve à environ 3 km en amont de la confluence formée par l'oued Boussiaba et son affluent.

Le bassin du barrage **Beni Haroun** a une extension beaucoup plus grande (7725 km²), et subdivise en deux parties distinctes :

- Le bassin de l'oued Endja, formé à l'amont par la confluence de l'oued Dehamcha et l'oued Menaà. Le premier prend sa source au seuil des Hautes plaines au Nord d'El Eulma et le second aux environs d'Ain el Kébira dans les massifs de petite Kabylie. 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**) ;

- Le bassin de l'oued Rhumel qui draine deux zones physico-climatiques distinctes, les Hautes Plaines semi arides et le piémont Sud-tellien au climat subhumide. L'oued Rhumel reçoit plusieurs affluents tels que oued Dekri, oued El Mehari, oued Seguin, Oued Boumerzoug, oued Kheneg, oued Smendou...etc.

Ces deux rivières (Endja et Rhumel), confluent pour former l'oued Kébir, juste à l'amont du site du barrage de Béni-Haroun.

Le bassin du barrage **Hammam Grouz** est drainé par la haute vallée du Rhumel, qui se décompose en 4 sous bassins : le Rhumel-amont (de Belaa à Chelghoum Laïd) avec son affluent Oued El Mehari, l'oued Dekri, le sous bassin constitué par les affluents de la zone Sud-Est s'écoulant à partir d'une ligne de Dj Chebka-Toukouia et la zone hydrographique relativement inactive au Sud de Tadjenanet (**Mebarki, 1994 ; Mihoubi, 2009**).

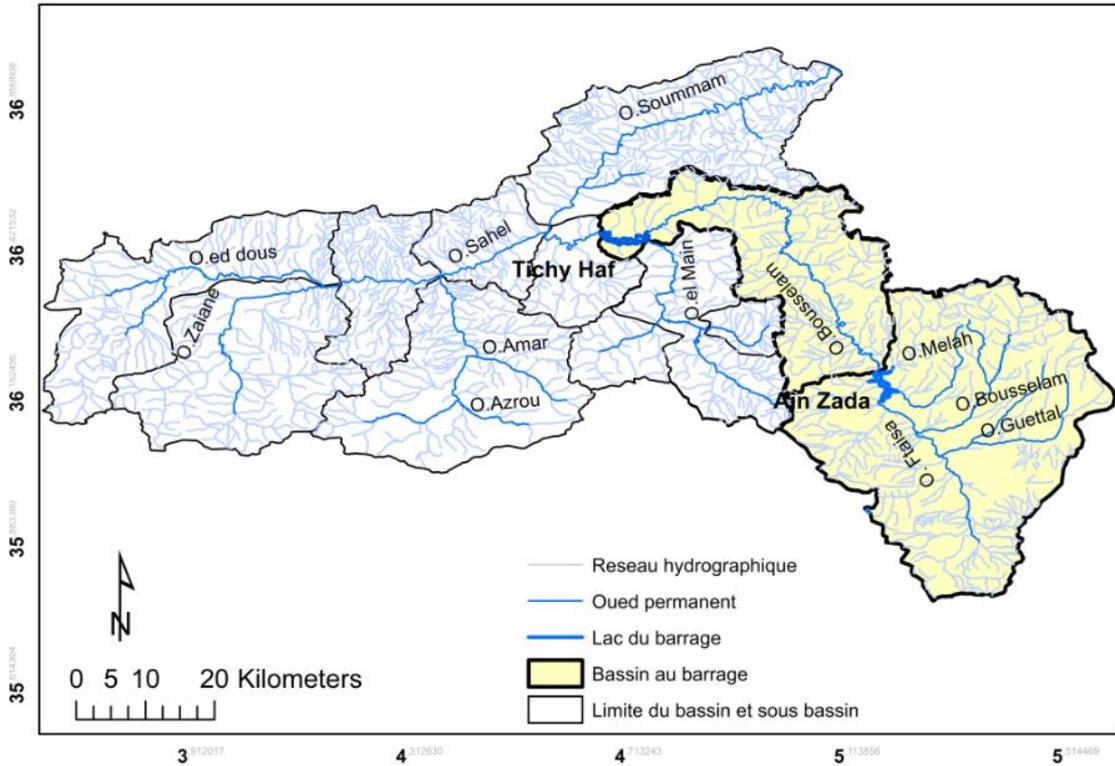


Figure 5 : Le bassin versant de la Soummam et localisation des barrages Ain Zada et Tichy Haf

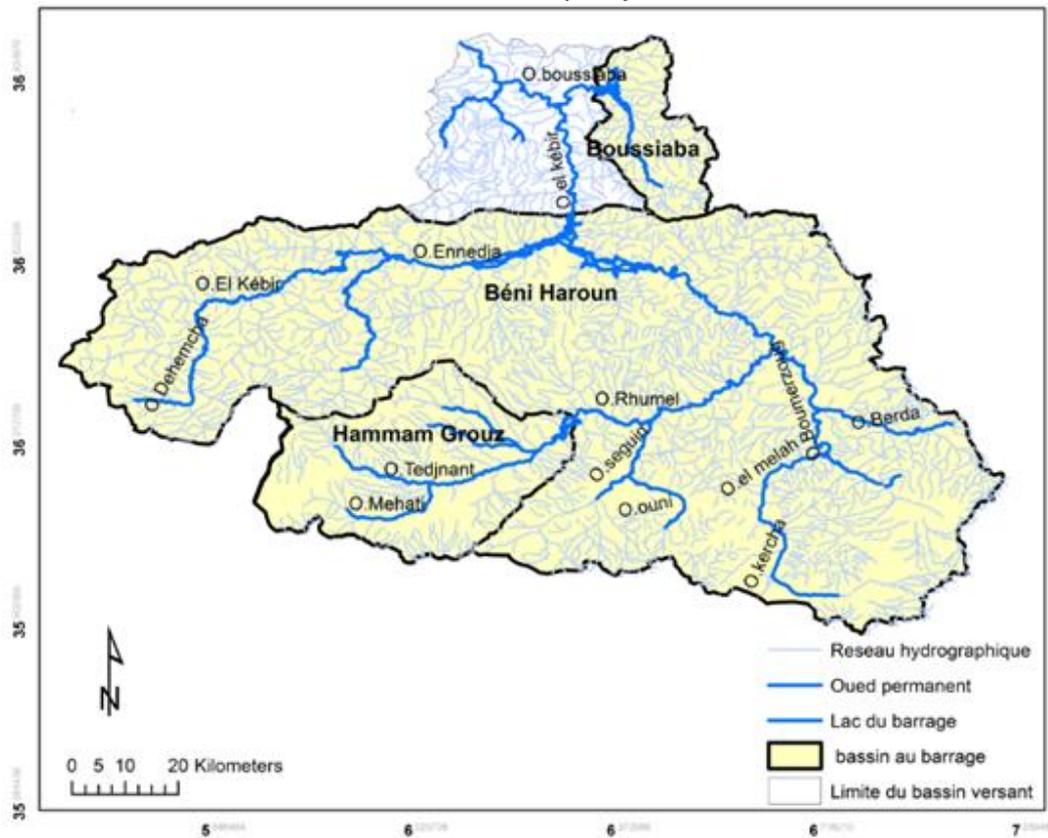


Figure 6 : Le bassin versant de Kébir Rhumel et localisation des barrages Hammam Grouz, Boussiaba et Béni Haroun

1.2.1.4. Le bassin de la Seybouse

Le bassin de la Seybouse s'étend sur une superficie de 6 745 km² et regroupe 2 barrages qui drainent une superficie totale de 2780 km² (figure 7).

Le réseau hydrographique du bassin au barrage **Hammam Debagh** est constitué par deux cours d'eau, l'oued Zenati et l'oued Sabath, dont la confluence donne naissance à l'oued Bouhamdane qui reçoit dans sa rive gauche l'oued El Hamira.

Le réseau hydrographique du bassin au barrage **Foum El Khanga** (Oued El Cherf) est constitué par l'oued Tiffech (la plaine synclinale), l'oued Crab qui se jette dans l'oued Tiffech, l'oued Lahmimime et l'oued Settara. Les deux cours d'eau, Lahmimime et Crab, prennent leur source sur le piémont Sud des monts de la Medjerda et forment l'oued principal, Cherf.

1.2.1.5. Le bassin de la Medjerda

Le bassin du barrage **Ain Dalia** représente 2.5 % de la superficie totale du bassin de la Medjerda (figure 8). Le site du barrage est situé sur l'oued Medjerda, cours d'eau caractérisé par un écoulement permanent. Il prend sa source en Algérie (Souk Ahras) et se jette dans la le Golf de Tunis (mer Méditerranée). Sa longueur totale est de 460 kilomètres dont 110 kilomètres se situent en Algérie.

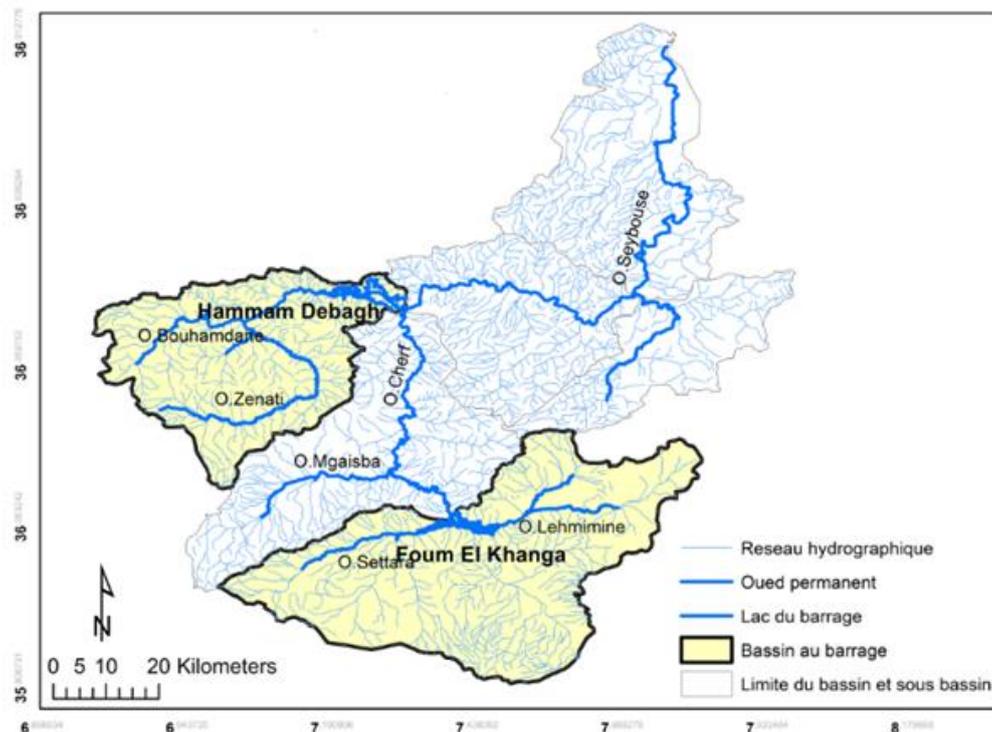


Figure 7 : Le bassin de la Seybouse et localisation des barrages Hammam Debagh et Foum El Khanga

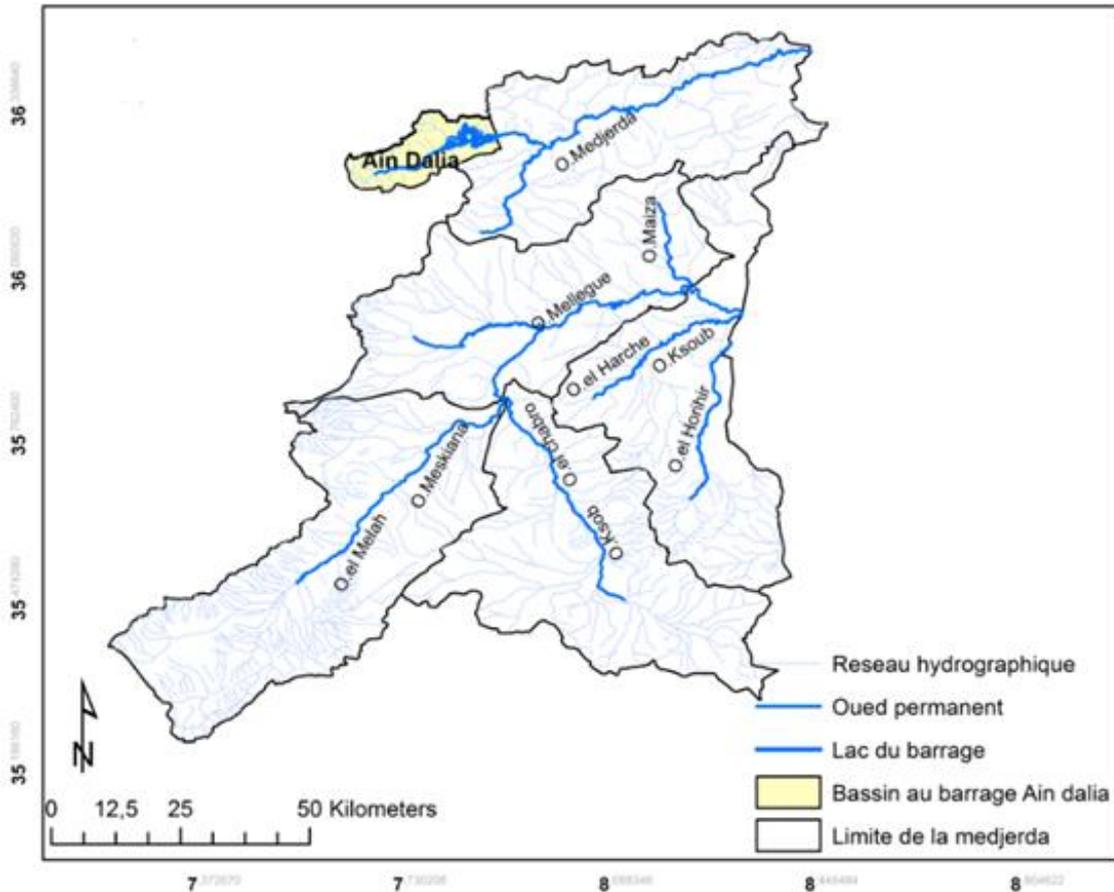


Figure 8 : Le bassin de la Medjerda et localisation du barrage Ain Dalia

1.2.2 Les bassins d'alimentation à écoulement endoréique

1.2.2.1. Le bassin des Hauts Plateaux constantinois

Ce bassin couvre une superficie de 9578 km², et présente un chevelu hydrographique caractéristique des zones semi-aride (l'endoréisme). Il se caractérise par la présence de plusieurs zones endoréiques (Chott el Beïda, Chott el Faraine, Sebket el Hamiet, Sebket Ez Zemoul, Garaet el Marhsel, Garaet Guellif, Garaet et Tarf,...etc.). Les zones contrôlées par les deux barrages **Koudiat Medouar** et **Foum El Gueiss**, couvrent autour de 8 % du bassin des Hauts plateaux constantinois (figure 9).

Le bassin du barrage **Koudiat Medouar** est formé par l'oued principal de Chemora qui résulte de la jonction de deux affluents, l'oued Reboa et l'oued Soultez. L'oued Chemora reçoit sur sa rive gauche les oueds de Taguedai et Amizraguen.

Le barrage de **Foum El Gueiss** collecte les eaux de l'oued El Gueiss qui prend naissance à la cote 2177 m au Dj Aidel (Sud du bassin des Hauts plateaux). Il coule suivant une direction Sud-Nord et reçoit sur ses rives gauche et droite ses principaux affluents, notamment les oueds Benber, Tarchin, Kerfadja et Kebass (**Tatar et Regad, 2015**).

1.2.2.2. Le bassin du Chott Hodna

L'aire totale du bassin de Chott Hodna atteint 25 843 km², dont 6 % sont drainés par le barrage de K'sob (figure 10).

Le bassin du barrage **K'sob** comprend la grande dépression de la Medjana au Nord de Bordj Bou Arreridj et la bordure Nord de Maadid. L'oued principal est K'sob, correspondant à l'oued le plus tellien des oueds du Hodna, parcouru par des crues violentes et abondantes pendant la saison pluvieuse, et par de faibles filets d'eau pendant la saison sèche (**FAO, 1967**). Il résulte de la jonction de deux grands oueds qui sont oued Soulit et oued Rabta ; les principaux affluents de l'oued sont: oued M'djaz (Bordj Bou Arreridj), oued Benia, oued Eldjaih et oued Zawche.

1.2.2.3. Le bassin du Chott Melhrir

Le bassin hydrographique du Chott Melhrir s'étend sur une superficie estimée à 68 797 km². Il se trouve aux confins septentrionaux du plateau saharien qui se situe dans la zone de transition entre le domaine atlasique et le domaine saharien.

Les bassins d'alimentation des barrages Babar, Foum El Gherza et Fontaines des Gazelles, occupent une superficie de 3527 km² soit 5 % de la superficie totale du bassin de Chott Melhrir (figure 11).

Le bassin du barrage **Babar** est constitué de plusieurs cours d'eau comme oued El Htiba et oued Tamagra qui se rejoignent pour former oued El Arab, d'une longueur totale de 170 km ; ce dernier appartient au bassin fermé du Chott Melhrir et draine les versants Sud-Est du massif de l'Aurès et ceux Nord-Ouest des montagnes de Nementcha (**ANBT, 2014**).

Le bassin du barrage **Foum El Gherza** comprend l'oued principal d'El Abiod (152 km) qui prend naissance au centre du massif des Aurès (région d'Arris) vers 1900 m d'altitude (**Ballais, 2010**). Il est formé par la réunion de plusieurs torrents descendants des pentes du Djebel Chélia (2328 m) et du Djebel Ichmoul (2071 m).

Le bassin du barrage **Fontaines des Gazelles** est constitué par le principal oued El Haï (140 km). Ce dernier prend naissance sur le synclinal d'El Kantara et draine la partie Nord-Ouest du bassin de Chott Melhrir (les Aurès, Batna, Ain Touta) (**Lahbassi et al, 2012**). Il est la jonction de deux cours d'eau, Fedhala issu du Djebel Ich Ali (1815m) et Tilatou qui descend des monts de Bellezma (2091 m) et coule dans la direction SE-NO (**Boumesseneh, 2007 ; Boudjema, 2015 ; Athmani et al, 2018**).

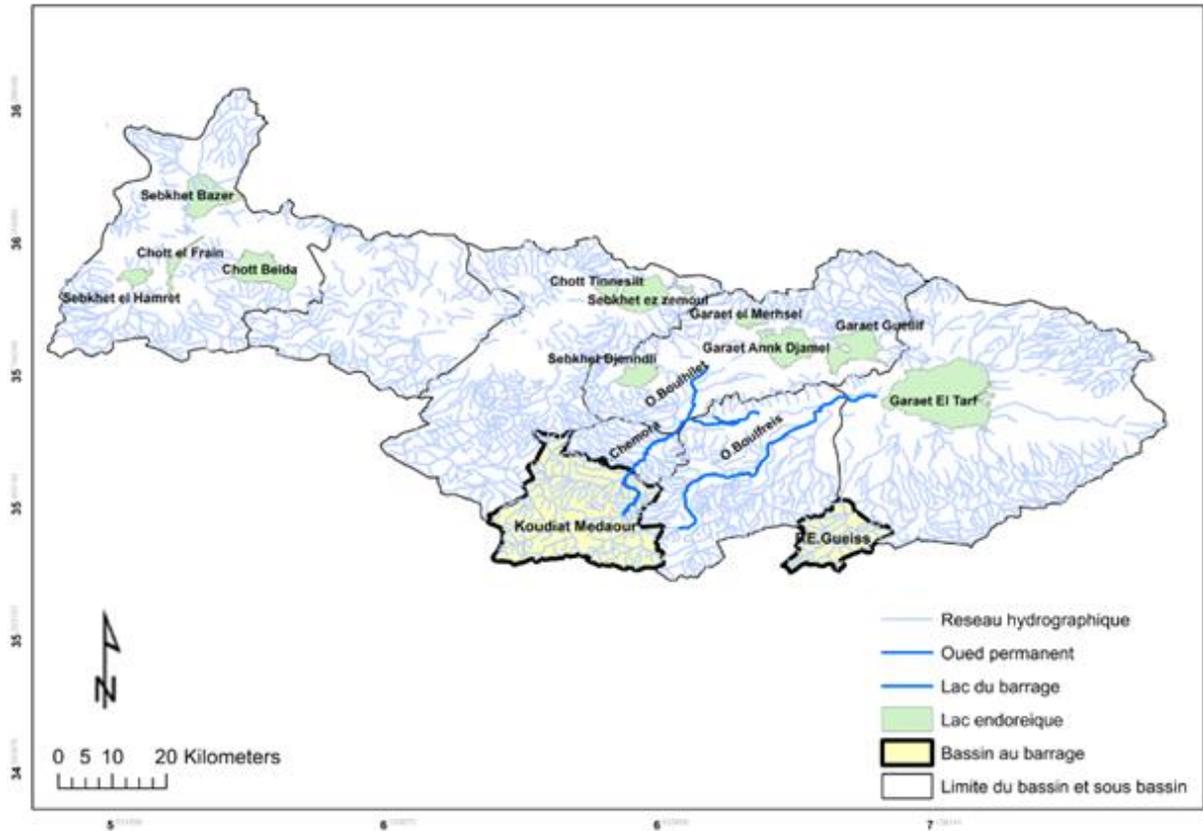


Figure 9 : Le bassin des hauts plateaux et localisation des barrages Foug El Gueiss et Koudiat Medouar

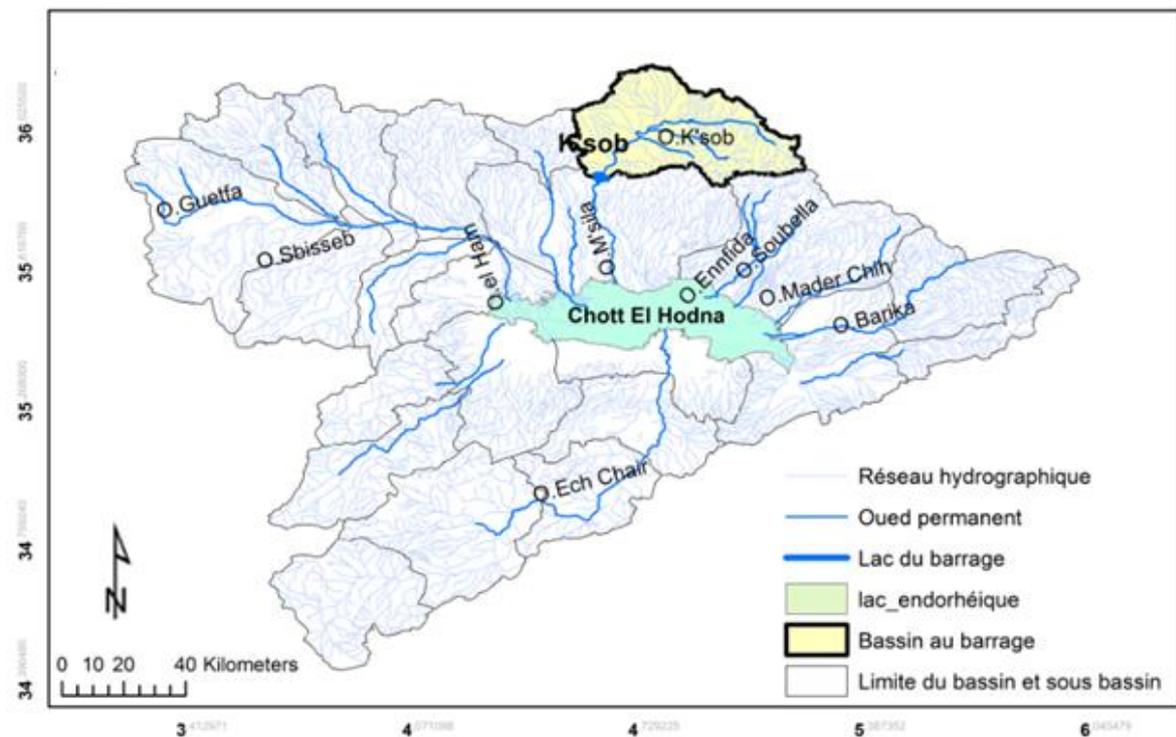


Figure 10 : Le bassin de Hodna et localisation du barrage K'sob

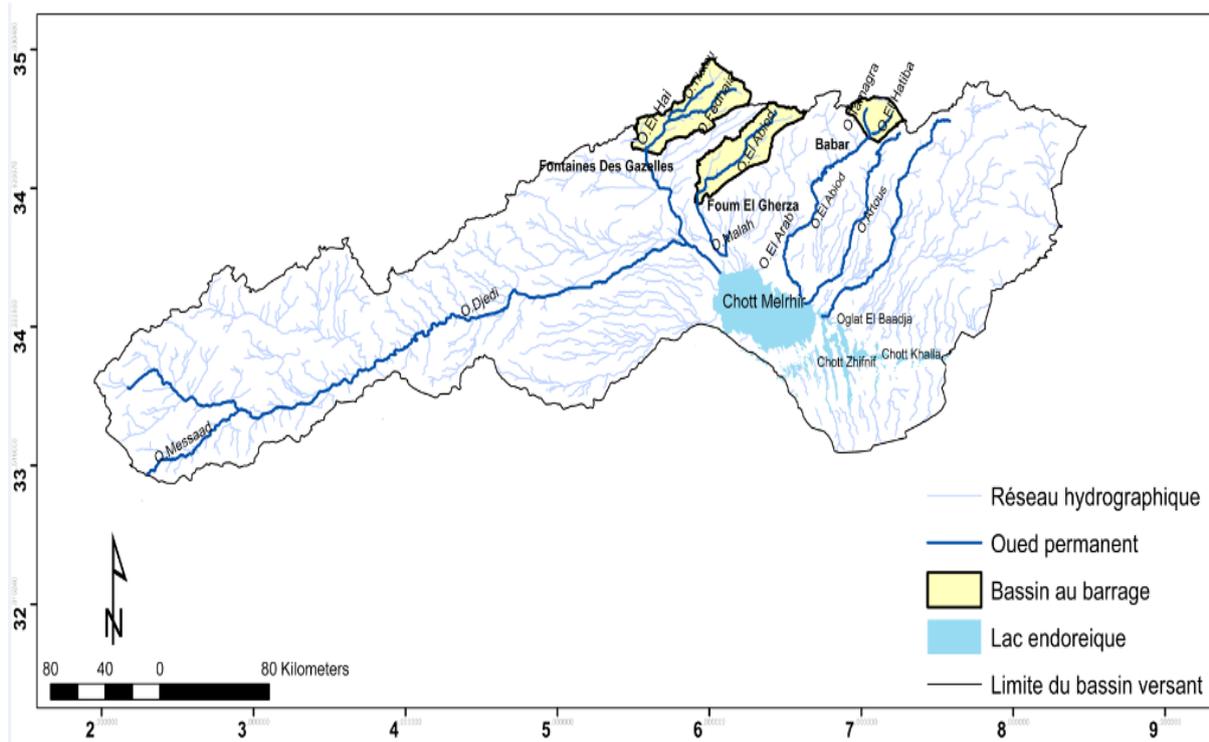


Figure 11 : Le bassin de Chott Melrhir et localisation des barrages Babar, Foug El Gherza et Fontaines des Gazelles

1.3. Contexte géologique des bassins d'alimentation des barrages

Les grands ensembles structuraux en Algérie sont divisés en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud atlasique : au Nord, les domaines de l'Atlas tellien, les Hautes Plaines et l'Atlas saharien portent l'empreinte de la tectonique alpine. C'est le domaine de la Berbérie (**Busson et Cornée, 1989**), et au Sud, la plateforme saharienne où la tectonique est moins prononcée.

La partie Nord-Est de l'Algérie (l'Algérie alpine) est caractérisée par des reliefs jeunes modelés, formés au cours du Tertiaire (figure 12). Elle est délimitée au Nord par l'Atlas, au Sud par l'Atlas saharien et au centre par des plateformes (môle d'Ain Regada). Cette région est recouverte par les séries allochtone et autochtone (**Savornin, 1920; Laffitte, 1939; Bertraneu, 1955; Caire, 1965; Guiraud, 1973; Sary, 1976; Vila, 1977, 1980; Wildi, 1983; Kieken, 1983; Chabour, 2006**).

Nous nous intéressons dans ce qui suit à l'étude des aspects géologiques des bassins d'alimentation de barrages, chaque bassin étant décrit séparément afin de faire ressortir ses spécificités structurales (figure 12).

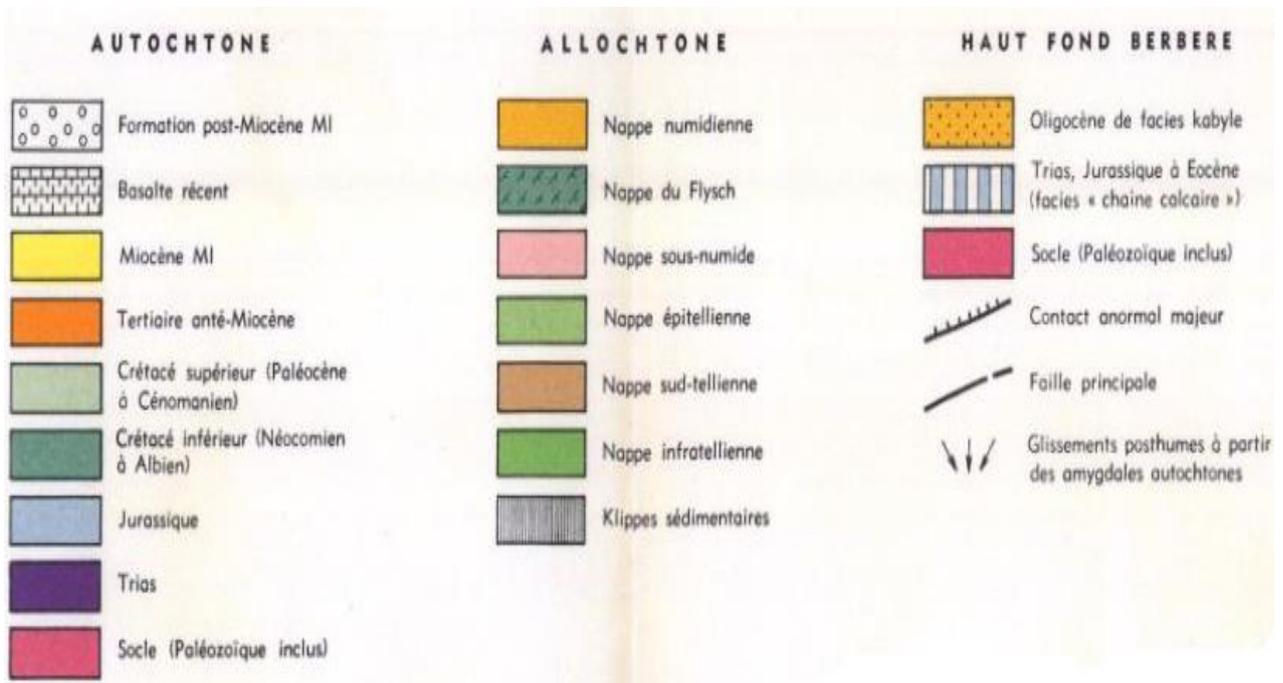
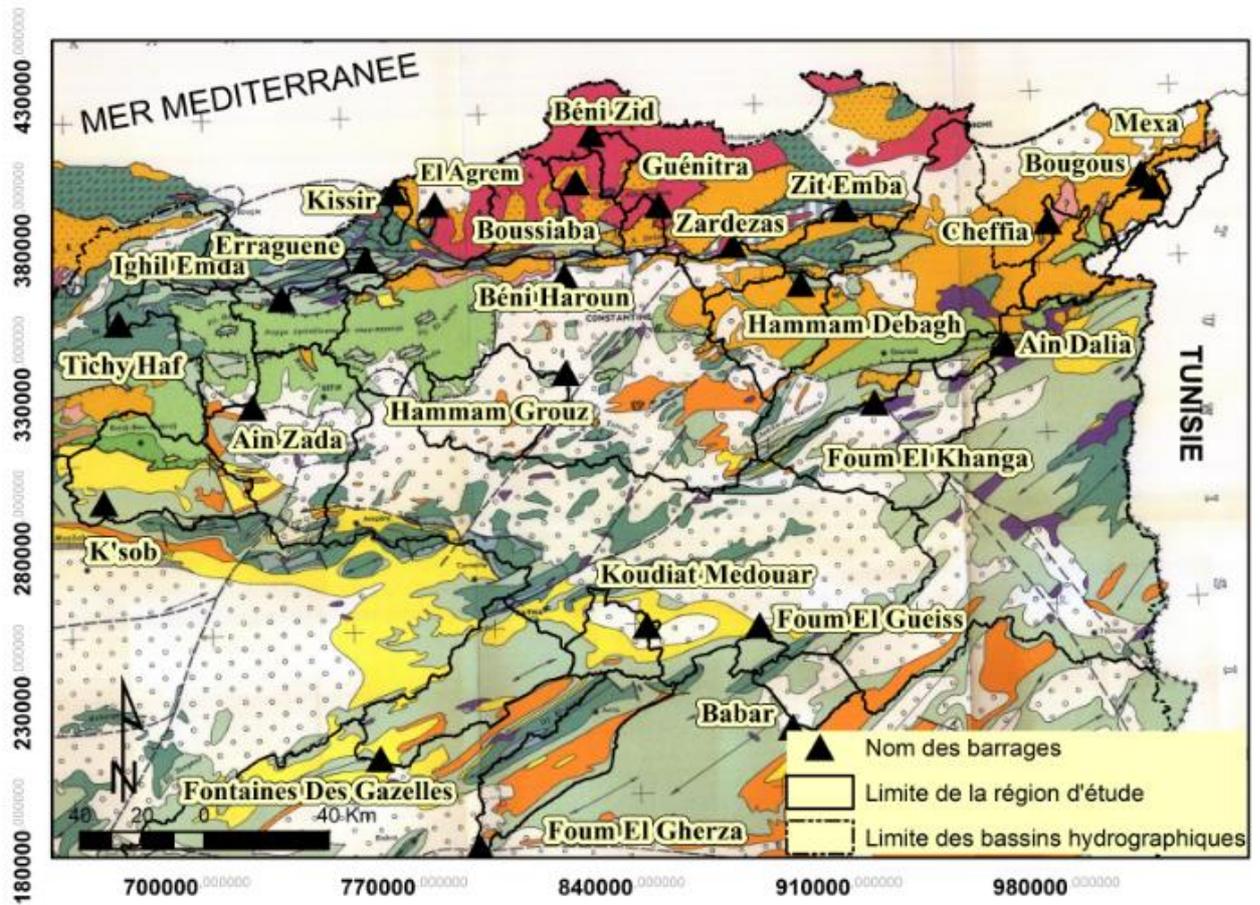


Figure 12 : Esquisse géologique et structurale de la région d'étude (échelle 1/1 000 000) (Kieken, 1983)

1.3.1 Les bassins de l'Atlas tellien

L'Atlas tellien est un domaine des nappes constitué des séries sédimentaires allant du Jurassique au Miocène.

Le bassin du barrage **Mexa**, près de la frontière algéro-tunisienne, est composé de formations sédimentaires, d'âge allant du Trias au Quaternaire, du complexe de roches crétacées, de la série numidienne et de la série miocène (figure 13). Au niveau du site du barrage, l'oued a emprunté son lit sur deux directions de failles, la direction Nord-Ouest à Sud-Est et la direction Est-Ouest (figure 14). Les failles mises en évidence sur les rives sont principalement de direction subparallèle à l'oued Bougous (**Handouzi, 2011**).

Dans le bassin de **Bougous** qui fait partie du bassin de Mexa, plus de la moitié de la superficie est recouverte par la nappe numidienne.

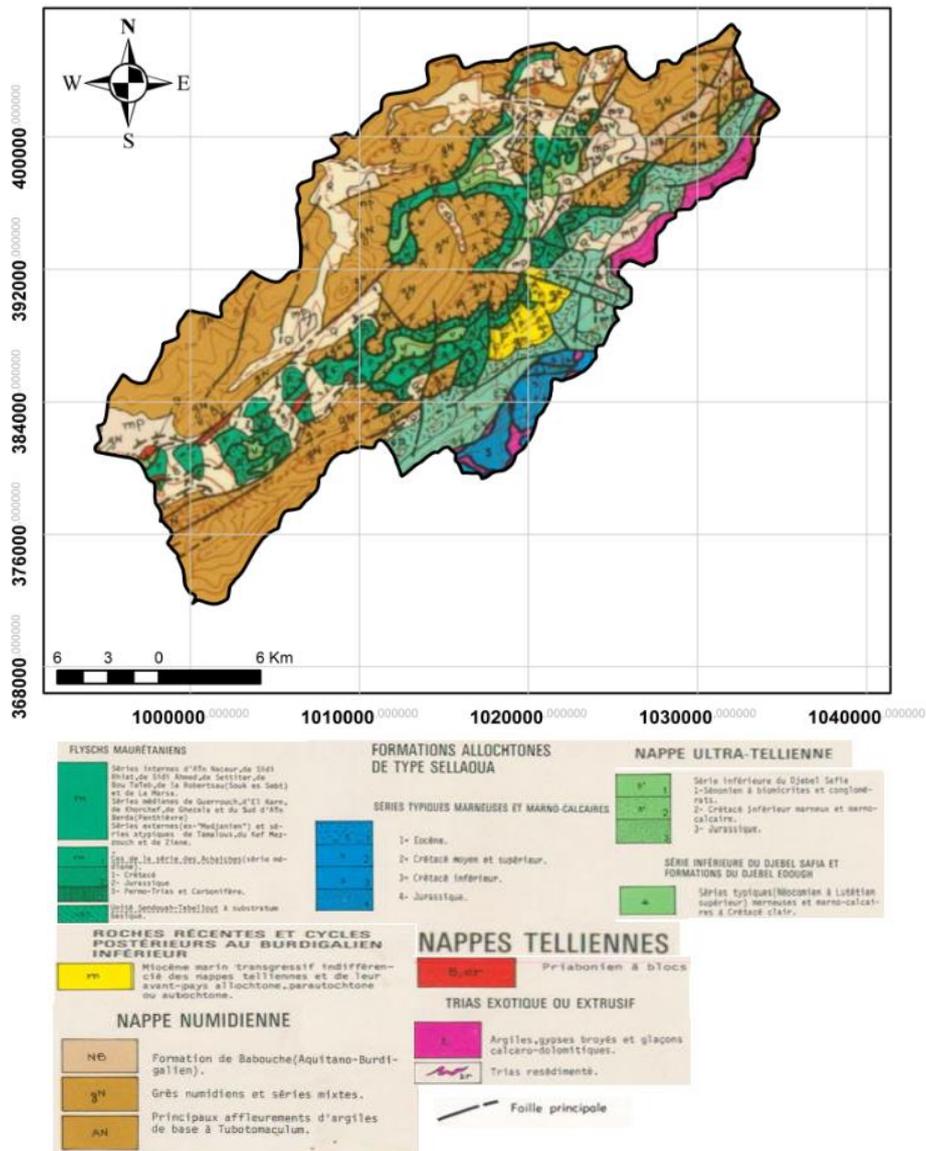


Figure 13 : Esquisse géologique et structurale du bassin de Mexa (échelle 1/500 000) (Vila, 1978)

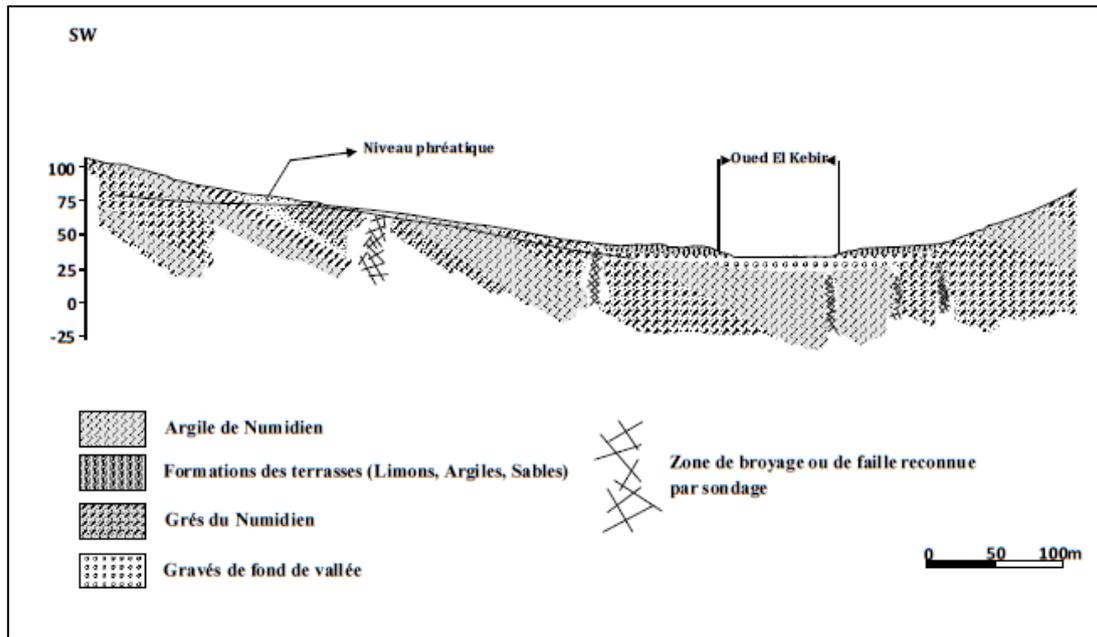


Figure 14 : Coupe géologique dans l'axe du barrage de Mexa (ANBT, 2014).

Le bassin du barrage **Cheffia** est constitué essentiellement de formations de la nappe tellienne. Le site de l'ouvrage est traversé par une faille sub-v verticale. En amont de la faille, le substratum est constitué par des marnes très compactes mais altérées en surface. La fondation de la digue et de l'évacuateur de crue est constituée d'un substratum schisteux et schisto-gréseux.

L'édifice structural du bassin au barrage **Zit Emba** est caractérisé par un empilement de nappes de charriage appartenant à la dorsale kabyle, au domaine des flyschs et au domaine épi-tellien (Lahondere, 1987). En allant du Nord vers le Sud, on rencontre les formations de la nappe numidienne (Djebel Menchoura, Djebel Bou Aslouge), la nappe de flysch, les nappes de la dorsale kabyle, la nappe épi-tellienne et les formations de la plateforme néritique constantinoise (Belhadj, 2017).

Le bassin du barrage **Zardez** fait partie de la chaîne des Maghrébies, il est composé à 70 % de formations tendres : argiles, flyschs grés-micacés, marnes et marno-calcaires. Le reste est constitué de grès dans le bassin supérieur, aux monts du djebel Ouahch, Béni Médjalel, et de calcaire à sa pointe nord, aux djebels Bouaded et Teffaha (Amirèche, 2009). Le site du barrage présente une géologie complexe avec la superposition de plusieurs phases tectoniques et de nombreux accidents d'importance inégale. La rive droite est essentiellement constituée de calcaire lutétien inférieur, de poudingues lutétiens supérieurs et de flysch priabon-oligocène (ANBT, 2014).

Le bassin du barrage **Guenitra** est, en général, constitué de formations du socle paléozoïque au Nord et de la nappe numidienne au Sud. La retenue repose sur des terrains cristallophylliens comprenant des gneiss, granulites, phyllades et calcaires métamorphiques précambriens entièrement charriés vers le Sud sur des terrains sédimentaires.

La rive gauche de site est constituée des gneiss tectonisés et recristallisés en granulites. En rive droite, une succession de terrains d'origine détritiques inclinant des conglomérats, argiles consolidés (marnes) bigarrées et grés.

Le bassin de **Beni Zid** comprend dans sa partie septentrionale, la prédominance des massifs d'Oligo- Miocène Kabyle, olistostromes et les séries de flysch Kabyles, la partie méridionale est caractérisée par les unités intra-Kabyles. L'assise du barrage repose sur des roches gneissiques assez solides et parfaitement résistantes. Au droit du barrage, l'oued du même nom traverse le massif Gneissique. En amont, dans le bord droit de la vallée, on observe une faille qui se manifeste par la zone bréchique et les plans de glissement suivant les fissures, l'épaisseur de la zone bréchique de la faille atteint 0.5 m. En aval, toujours dans le bord droit, un affleurement révèle une brèche tectonique d'une épaisseur apparente de 30 m aux côtes absolues de 50 m et 5 m au pied de la pente (**Mecibah, 2008**)

La structure géologique du bassin d'**El Agrem** est caractérisée par la dominance de la nappe de flysch et les formations d'Oligocène. Le site du barrage est marqué par le contact brutal entre les roches marneuses en rive gauche et les roches du granit en rive droite.

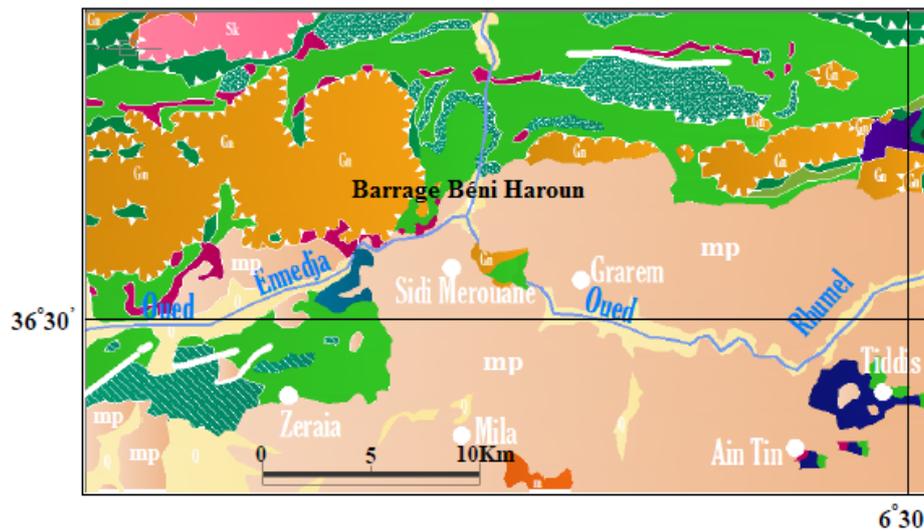
Le bassin de **Kissir** comprend deux ensembles structurales du Nord au Sud ; les formations d'Oligocène et la nappe de flysch. Le site se trouve à la limite de deux domaines géologiques principaux ; au Nord, le domaine des flyschs dit numidiens est essentiellement composé de grés massifs, au Sud celui des flyschs dit dissociés est composé de marnes et d'alternances marno-gréseuses.

Le bassin d'**Erraguene** est dominé par les formations du Crétacé. La cuvette et le site du barrage sont reposit sur des schistes siliceux du Crétacé de qualité satisfaisante.

Le bassin d'**Ighil Emda** est appartient à la zone nord sétifienne définie par (**Glaçon, 1967**) et correspond à un ensemble de terrains déplacés et des unités chevauchées, constituées par des sédiments Triasiques, Jurasiques et Tertiaires. L'ensemble structural auquel appartient notre bassin est l'ensemble sétifien qui est représenté dans sa grande partie par des sédiments marno-calcaires du crétacé supérieur. La structure géologique globale de ce domaine est marquée par de nombreux anticlinaux et synclinaux (Djbel Helel, Djbel Meghris, Djbel Chenator ... etc). Le site du barrage d'ighil Emda comprend la prédominance des roches sédimentaires de pliocène marin et de jurassique supérieur et moyen.

Le bassin de **Boussiaba** situé dans l'extrémité occidentale de la zone cristallophyllienne de la Kabylie de Collo, qui fait intimement partie de la petite Kabylie. Il est essentiellement formé par une géologie contrastée. En aval, les roches du socle sont métamorphiques avec intrusions granitiques récentes, ces roches sont altérées sur une grande épaisseur. En amont, les roches sédimentaires sont essentiellement des argiles et grés. L'axe du barrage se trouve dans un massif cristallin essentiellement composé de microgranites. Ces microgranites, dans leur matrice, sont durs, compacts et très résistants (**ANBT, 2014**).

L'histoire géologique du bassin de **Beni Haroun** est particulièrement mouvementée, marquée par un empilement d'unités structurales du Nord au Sud, essentiellement les nappes numidiennes, telliennes et néritiques. Ce cadre géologique complexe est caractérisé par la présence de nappes de charriage (figure 15). Le barrage est fondé sur une barre calcaire éocène d'orientation globale Est-Ouest, reposant sur des marnes noires paléocènes à l'aval et surmonté par des marnes éocènes à l'amont. En rive gauche, cette barre s'incurve vers le Nord et remonte parallèlement au versant (ANBT, 2014).



Roches récentes et cycles postérieurs au Burdigalien inférieur

- Q Quaternaire indifférencié (villafranchien à actuel)
- mp mio-pliocène continental
- m' Burdigalien supérieur- langhien de la marge littorale

Nappe Numidienne

- Gn Grès numidiens et séries mixtes

Nappe telliennes s.s

- Yprésien à priabonien basal
- Crétacé inférieur
- Crétacé moyen à paléocène

Nappe de flyschs Kabyles

- Flyschs mauritanien et flyschs massilien

Nappe ultra- tellienne

- Séries typique (néocomien à lutétien Supérieur) marneuses et marno- calcaire à crétacé claire

Nappe péni- tellienne et unité méridionales à nummulites

- Cénomaniens à sénoniens

Nappe néritique constantinoise

- Série entièrement carbonatées à sénonien transgressif réduit
- Cénomaniens, turonien et sénonien transgressif

Socle Kabyles, chaîne calcaire

- Sk Socle métamorphique de petite kabylie et du Bouhatem (phyllades micaschistes, porphyroïdes, gneis et marbres)

Trias exotique du extrusif

- l Argiles, gypse broyés et glaçons calcaro-dolomitiques, trias résédimenté

Figure 15 : Extrait de la carte structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale (Benchabane, 2015)

Le bassin du barrage **Ain Dalia** est marqué par la dominance des dépôts de la nappe épitéllienne et les formations du Crétacé. Le site du barrage est formé de roches très différentes du point de vue de la perméabilité et de la résistance ; la rive gauche est caractérisée par un ensemble de roches (les marnes schisteuses et l'alternance des marnes calcaires et des marnes feuilletées très plissées), le fond de la vallée est marqué par la série mylonitisée (les grès gris-vert, les sables et les argiles schisteuses), la rive droite est essentiellement constituée d'alternances de calcaires fossilifères et de marnes à glauconie (ANBT, 2014)

Le bassin du barrage **Hammam Debagh** est constitué essentiellement de formations quaternaires, formations argilo-gréseuses, formations de la nappe épitéllienne (au Sud d'oued Zenati) et formations post-miocènes. Le substratum de la retenue correspond à une alternance de grés et de schistes dans la rive gauche et une structure qui dessine une voûte anticlinale plus complexe dans la rive droite (ANBT, 2014).

Le bassin du barrage **Tichy Haf** fait partie de la région de la petite Kabylie, et est constitué essentiellement par la nappe épitéllienne et les formations du Crétacé inférieur. La géologie du site est caractérisée par le contraste lithologique entre le massif carbonaté jurassique de la gorge de Tichy Haf et le complexe marneux crétacé qui se développe surtout en amont de la gorge. Le massif carbonaté jurassique est représenté par deux lithofaciès, un faciès calcaire-dolomitique et un autre calcaire-calcaire marneux (figure 16).



Figure 16 : Les fondations du barrage de Tichy Haf (Frossard, 2015)

1.3.2 Les bassins des Hautes plaines

On distingue quatre barrages dont les bassins d'alimentation se répartissent du Nord au Sud du domaine des Hautes Plaines.

Le bassin du barrage **Hammam Grouz** est essentiellement constitué de trois principales formations : la nappe superficielle du Mio-plio-quaternaire qui occupe un grand espace, les formations quaternaires et les aquifères karstiques. La cuvette repose sur des argiles pliocènes et miocènes avec une couverture généralement mince de dépôts quaternaires. Le site du barrage est situé dans un massif calcaire (cénomaniens) et marneux fortement tectonisé et moyennement karstique (figure 17).

L'existence d'un paléokarst et de sources thermales a posé le problème d'étanchéité de ce barrage. Plusieurs expertises accompagnées de compagnes d'investigations ont été lancées pendant les travaux ; un mur para-fouille en béton (longueur : 1 505 m, épaisseur : 600 mm), un tapis argileux (superficie : 3 105 m²) et un tapis en béton projeté (superficie : 13 000 m²) (ANBT, 2014).

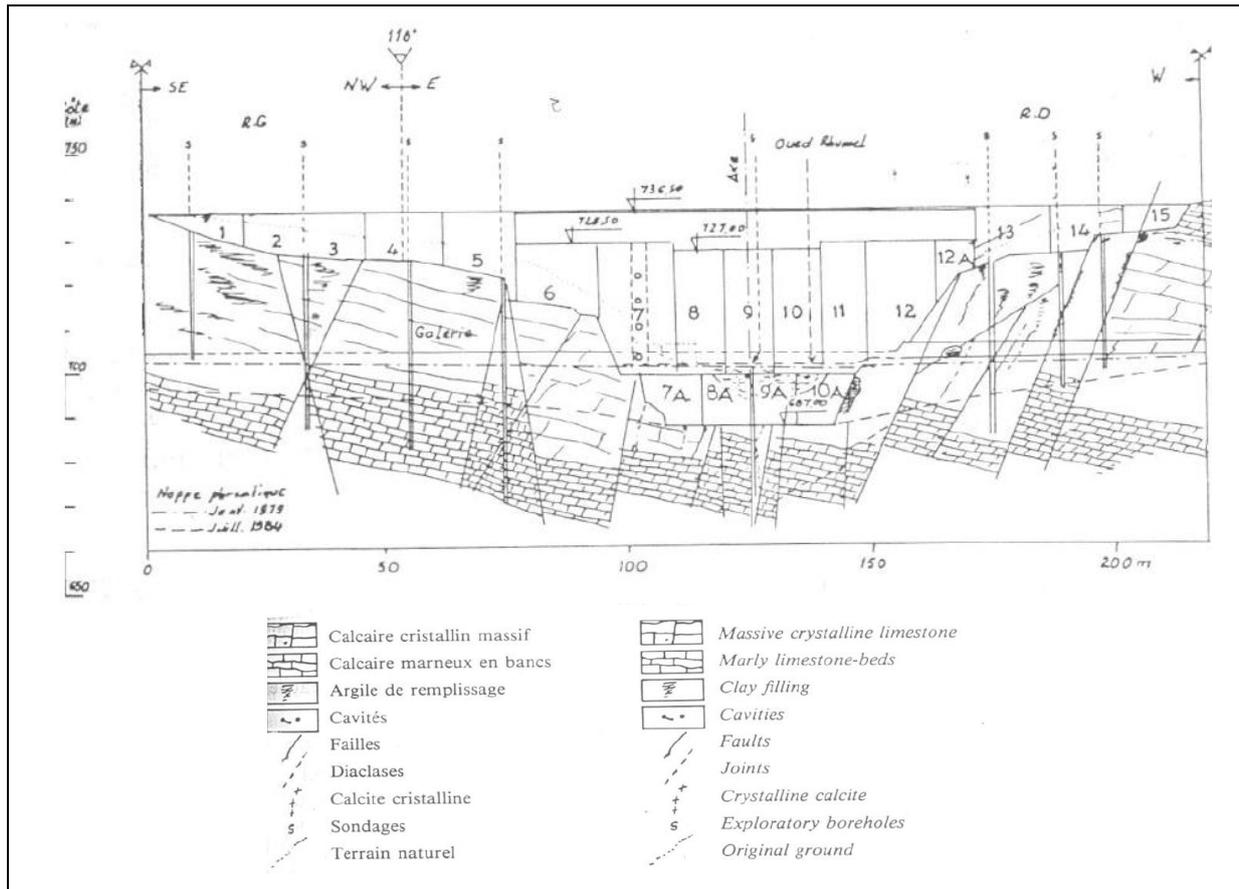


Figure 17 : Coupe transversale du site du barrage Hammam Grouz (ANBT, 2014)

Le bassin du barrage **Ain Zada** appartient aux hautes plaines sétifiennes. Il comporte, d'après les résultats des travaux de **Savornin (1920)** et **Guiraud (1973)**, trois types de formations : les formations du Quaternaire (les alluvions, les croutes calcaires), les formations du Mio-Pliocène continental et les formations tectonisées (du Nord au Sud, les nappes de flyschs, les nappes telliennes et la nappe du djebel Sattor). Le site du barrage comprend trois strates géologiques marquées : le socle rocheux de l'Eocène (calcaires argileux et schistes calcaires), les dépôts du Pliocène (argile sableuse, sable limoneux et argileux, gravier sableux et argileux) et les dépôts quaternaires (alluvions récentes et dépôts colluvionnaires).

Le bassin du barrage **K'sob** se trouve principalement dans une zone composée de formations géologiques tendres (les argiles, marnes et grés). Une autre zone, occupant les reliefs du Nord et Sud, comporte des formations dures comme les calcaires, dolomies et calcaires dolomitiques (**Benkadja et al, 2014**). Le site du barrage est caractérisé par des alternances de calcaires et de marnoschistoïdes.

Le bassin du barrage **Foum El Khanga** est, selon les travaux de **Voûte (1967)** et de **Vila (1977, 1980 et 1994)** caractérisé par une composition géologique très complexe (figure 18). Il est une zone de contact de deux grands domaines structuraux, le domaine néritique sud-constantinois (à dominance marneuse ou marno-calcaire de type Sellaoua) et le domaine para-autochtone et autochtone nord-aurésien (formations gréseuses surmontées par des calcaires

lacustres). Le substratum de la cuvette est composé principalement par des terrains du Miocène (dominance marneuse).

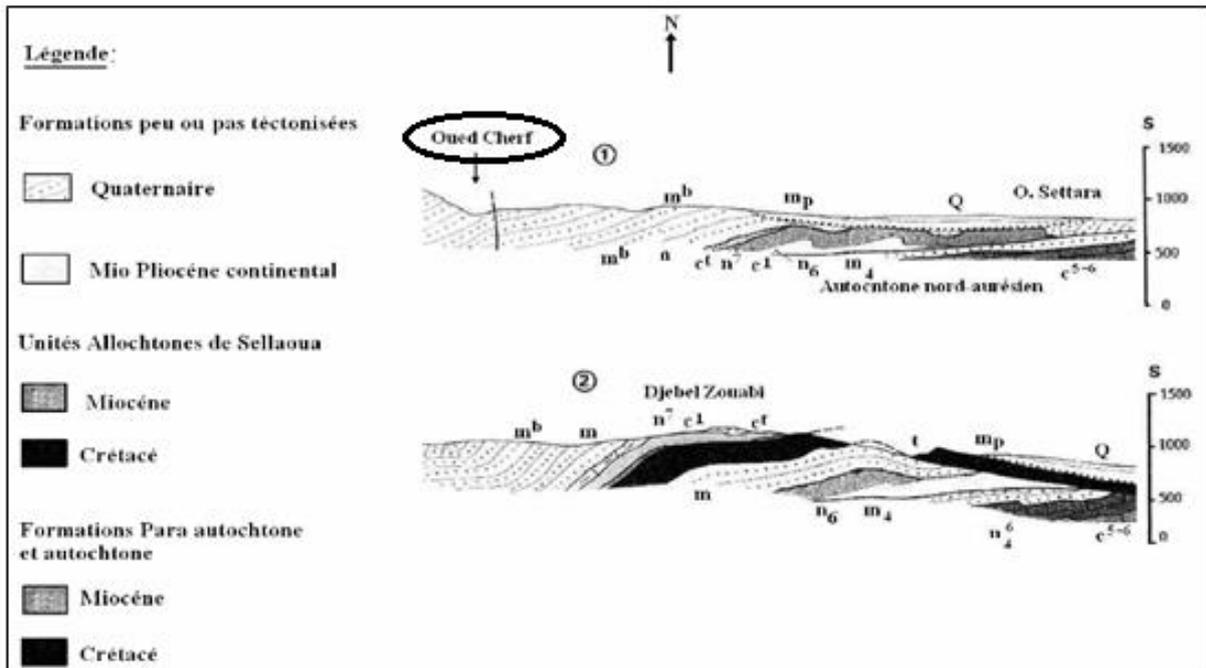


Figure 18 : Coupe géologique du bassin de Foug El Khanga (carte géologique au 1/50000 de Sedrata) (Vila, 1980)

1.3.3. Les bassins des piémonts Nord et Sud de l'Atlas saharien :

L'atlas saharien est constitué de montagnes anciennes d'âge éocène, fragmentées d'Ouest en Est par l'érosion suivant une direction générale NE-SO. On distingue cinq barrages dont les bassins respectifs se répartissent du Nord au Sud.

Le bassin du barrage **Koudiat Medouar** : ses zones basses constituent le prolongement vers l'Est du bassin miocène de Timgad à Kais et les montagnes du Sud-Ouest constituent l'angle Nord-Est du quadrilatère plissé Aurésien avec deux structures principales, l'anticlinal du Djebel Chélia et le synclinal de Khenchela (Menchar, 2013). Le barrage principal et la digue de col sont fondées sur des argilites greso-marneuses, dans la zone centrale du barrage, les argilites marneuses et gréseuses sont en proportion presque égales. Les compartiments sont délimités par des failles et des fractures (figure 19).

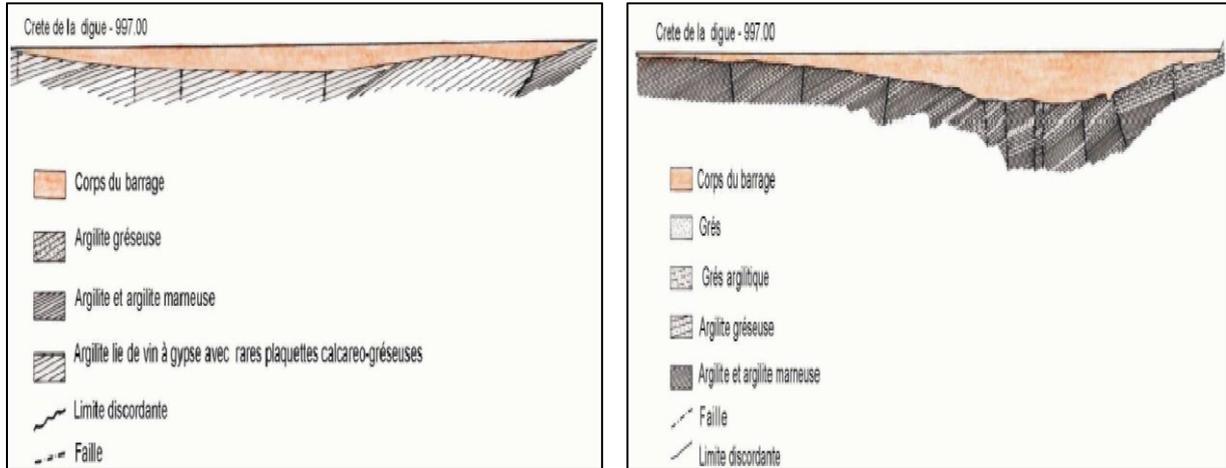


Figure 19 : Coupe géologique longitudinale du barrage principal (à droite) et de la digue de col (à gauche) d'après ANBT, 2014.

Le bassin de **Foum El Gueiss** s'étend sur trois unités structurales bien définies : l'anticlinal de Khenchela, le synclinal de Dj .Aurès et la terminaison Nord-Est de l'anticlinal de L'Ichmoul- Chelia (**Lessard, 1952**). Le barrage et ses ouvrages annexes reposent sur les marnes, les marno-calcaires du Turonien, les grès et les schistes du Burdigalien (figure 20).

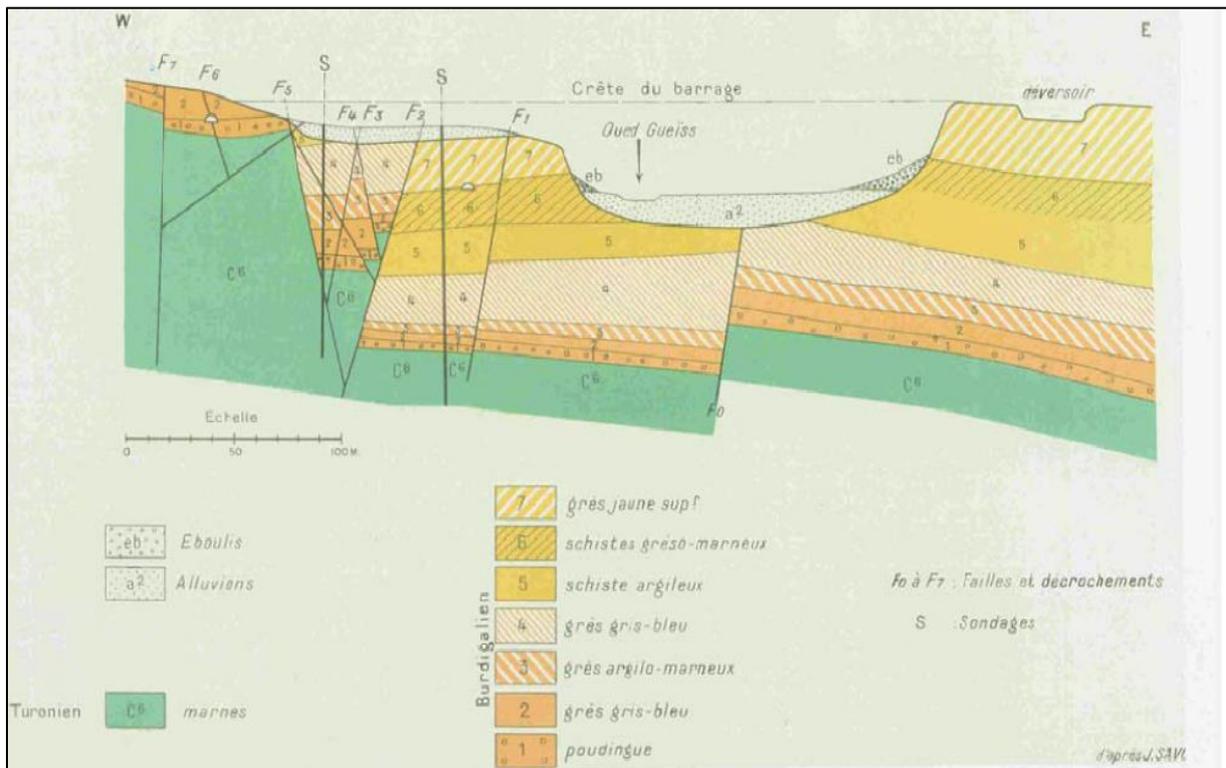


Figure 20 : Coupe géologique à l'emplacement de site du barrage Foum El Gueiss (**Savornin, 1941**).

Le bassin du barrage **Babar**, en zone présaharienne, est composé par des formations du Crétacé supérieur (Maestrichtien supérieur et inférieur, Campanien Santonien et Coniacien), du Crétacé inférieur (Barrémien, Albien et Aptien) et des formations post-miocènes. La cuvette est constituée par des formations marno-calcaires du Crétacé supérieur. Ces formations sont recouvertes au niveau de la vallée par des dépôts quaternaires d'une épaisseur de 3 à 6 m (ANBT, 2014).

Le bassin du barrage **Fontaines des Gazelles** est composé dans sa majorité par des formations du Crétacé supérieur. Le site de la digue est constitué par des formations marno-calcaires du Crétacé supérieur présentant une structure anticlinale dans la vallée ; ces formations sont recouvertes par des dépôts superficiels (alluvions et conglomérats) d'âge quaternaire.

Le bassin du barrage **Foum El Gherza**, l'un des plus grands bassins du massif des Aurès, est constitué par des séries autochtones (les formations du Tertiaire anté miocène, les formations du Crétacé supérieur et inférieur et les formations post miocènes). Le site du barrage est directement fondé sur les calcaires cristallins du Maëstrichtien (figure 21). Il est caractérisé par différentes couches géologiques, le Campanien inférieur (alternance de dalles de calcaire et de marne), le Campanien supérieur (marne schisteuse entre 100 et 150 m) et le Maëstrichtien (calcaire cristallin fortement fissuré de 200 m) (ANBT, 2014).

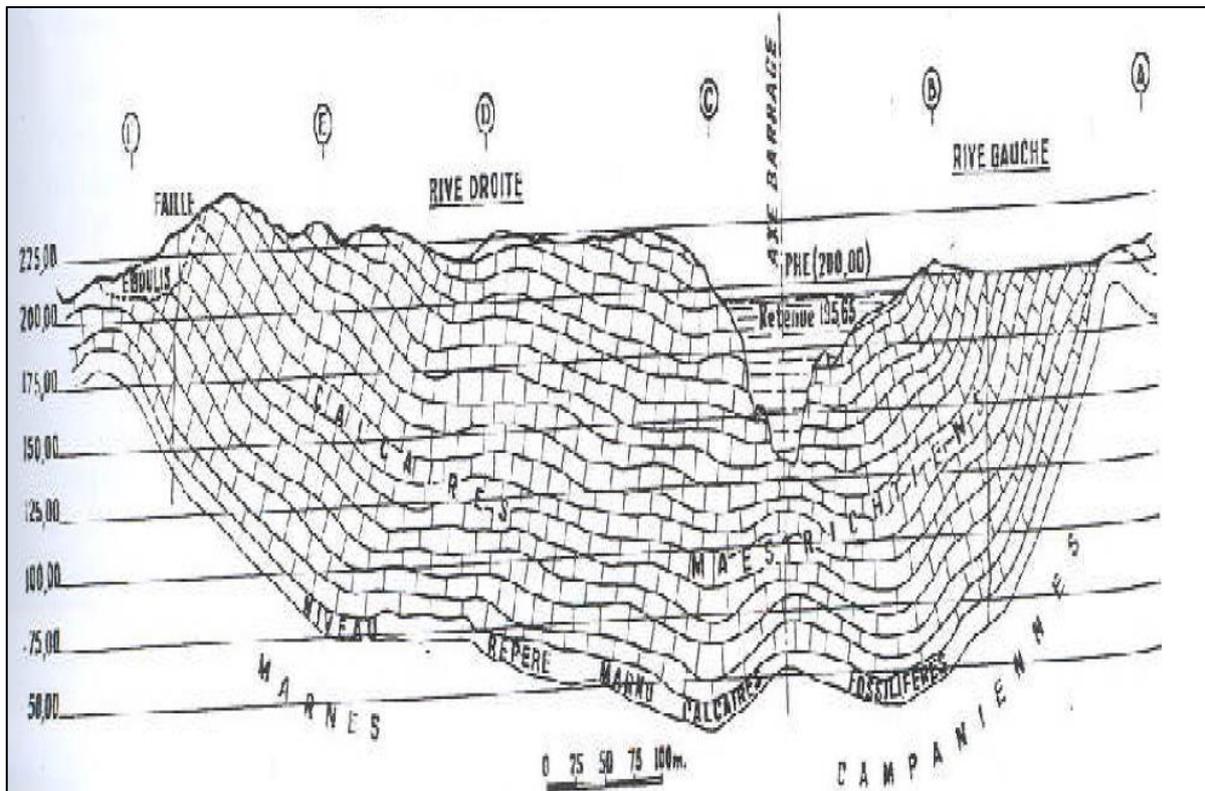


Figure 21 : Coupe géologique à l'emplacement de site du barrage Foum El Gherza (ANBT, 2014)

1.4. Contexte climatique des bassins d'alimentation des barrages

Le climat, en particulier le facteur pluviométrique, constitue en domaine méditerranéen et semi-aride, le facteur le plus influent sur le phénomène d'écoulement.

La forte extension continentale de la zone d'étude et la proximité de sa partie Nord à la mer, donnent naissance à un climat très varié selon une direction Nord-Sud : climat tempéré humide de type méditerranéen dans le Tell, climat semi-aride de type continental dans les Hautes Plaines et climat aride et sec dans le piémont de l'Atlas Saharien (bandes zonales bioclimatiques, d'après la carte de **Côte, 1998**).

1.4.1 Distribution spatiale des précipitations

En Algérie, les précipitations se caractérisent par une forte variabilité spatiale ; elles augmentent d'Ouest en Est et diminuent du Nord au Sud (**Mebarki, 1982 ; Ghachi, 1986 ; Meddi, 1995 ; Assaba, 2004**). Cette variation peut être expliquée par deux facteurs déterminants, la circulation atmosphérique générale (l'oscillation nord atlantique) et le relief qui joue un rôle important dans la répartition des précipitations, du fait qu'il varie considérablement d'Ouest en Est et du Nord au Sud.

L'étude de régime pluviométrique de l'Algérie a fait l'objet de plusieurs travaux qui ont porté sur la distribution spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle ainsi que sur l'évolution temporelle de la pluviosité (**Queney, 1937 ; Seltzer, 1946 ; Pedelaborde et Delannoy, 1958 ; Chaumont et Paquin, 1971 ; Djellouli, 1981 ; Djemai, 1985 ; Kettab, 2001 ; Talia, 2002 ; Meddi et al, 2003, 2007 et 2010 ; Medjerab, 2005 ; Hirche et al, 2007 ; Bekkoussa et al, 2008**).

La carte des précipitations moyennes annuelles de l'Est algérien (figure 22), est extraite de la carte du Nord algérien, réalisée par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.) suivant une méthodologie proposée par J-P. Laborde (**ANRH, 1993 ; Laborde, 1995**). Elle s'appuie sur une série de données de 60 ans (du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989).

Schématiquement, les quantités de précipitations décroissent du littoral vers l'Atlas saharien. La petite Kabylie est la région la plus arrosée dont la pluie atteint plus de 1 400 mm sur les hauteurs d'Erraguène. Les mesures aux stations pluviométriques des barrages donnent ce qui suit : 1268 mm/an à la station du barrage El Agrem (moyenne de 14 ans : 2002/03 -2015/16) ; 829 mm/an à la station du barrage Ighil Emda (moyenne de 52 ans : 1963/2015).

Sur la carte, les iso-valeurs de 600 à 800 mm balayent tout le reste de l'Atlas tellien avec cependant des contrées beaucoup plus pluvieuses dans les régions de Collo et dans la zone extrême Nord-Est d'El Kala. Les récentes mesures donnent 1089 mm/an à la station du barrage de Béni Zid (période 2000/01-2015/16) et 808 mm/an à la station du barrage de Cheffia (période 1970/71-2015/16).

Les Hautes Plaines sont quant à elles entourées au Nord par l'isohyète 500 mm. La pluviométrie décroît vers le Sud jusqu'à 350 mm dans la majeure partie des bassins de Fom El Khanga, Hammam Grouz, Ain Zada, K'sob et Koudiat Medouar.

Au-delà des Hauts Plateaux, l'Atlas Saharien et l'Aurès sont plus profondément influencés par le climat saharien. Toutefois, à cause de leur altitude (2 008 m au dj. Ksel dans le dj. Amour, 2 160 m dans les Monts des Ksour, 2 328 m au dj. Chelia). Les versants Nord reçoivent des précipitations moyennes comprises entre 400 et 800 mm/an (Meharzi, 1994). Ces précipitations diminuent sur le piémont Sud de l'Atlas où les isohyètes varient entre 200 et 150 mm.

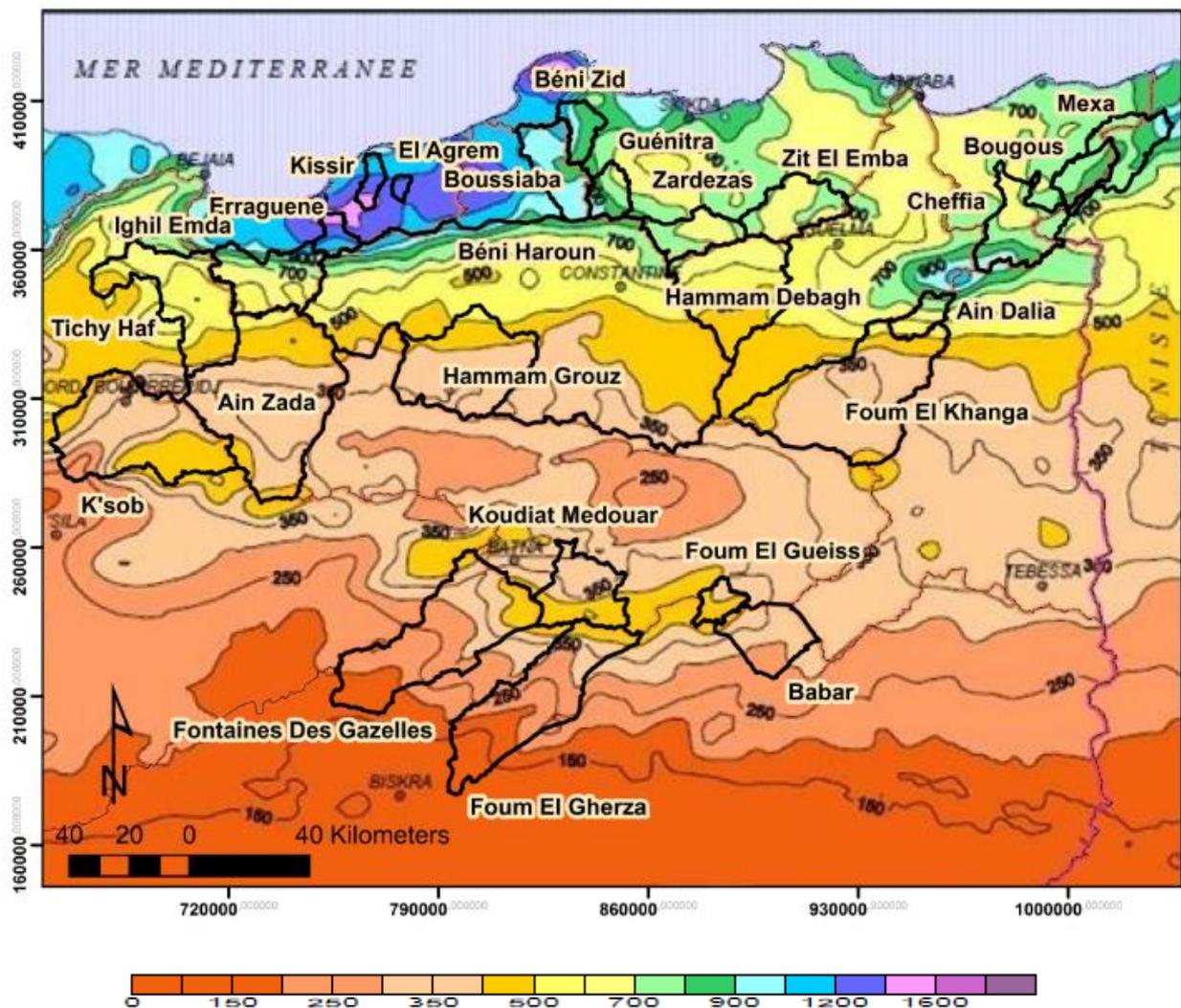


Figure 22 : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (établie d'après A.N.R.H., 1993 in MEBARKI, 2005: données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989)

1.4.2 Distribution spatiale des températures et des évapotranspirations potentielles

La température de l'air est un paramètre primordial qui régit les déperditions d'eau qui s'opèrent par le phénomène de l'évapotranspiration. Les cartes des températures et des évapotranspirations moyennes annuelles sont illustrées par les figures 23 et 24 (ANRH, 2002). Les deux variables ne sont pas homogènes et varient fortement d'un bassin à l'autre de l'Est algérien.

Les courbes d'iso-valeurs des lames d'évapotranspirations comprises entre 900 et 1200 mm pour les massifs humides du Tell.

Les courbes de température annuelle moyenne oscillant entre 13, 14 et 15 °C et les courbes d'ETP comprises entre 1300,1400 et 1500 mm correspondant aux bassins des Hautes Plaines, à l'exception du bassin de K'sob (température : 18°C, ETP : 1600 mm). Le piémont sud de l'Atlas Saharien est balayé par les courbes de température de 16 à 21 °C et par les courbes l'ETP de 1600 à 2200 mm.

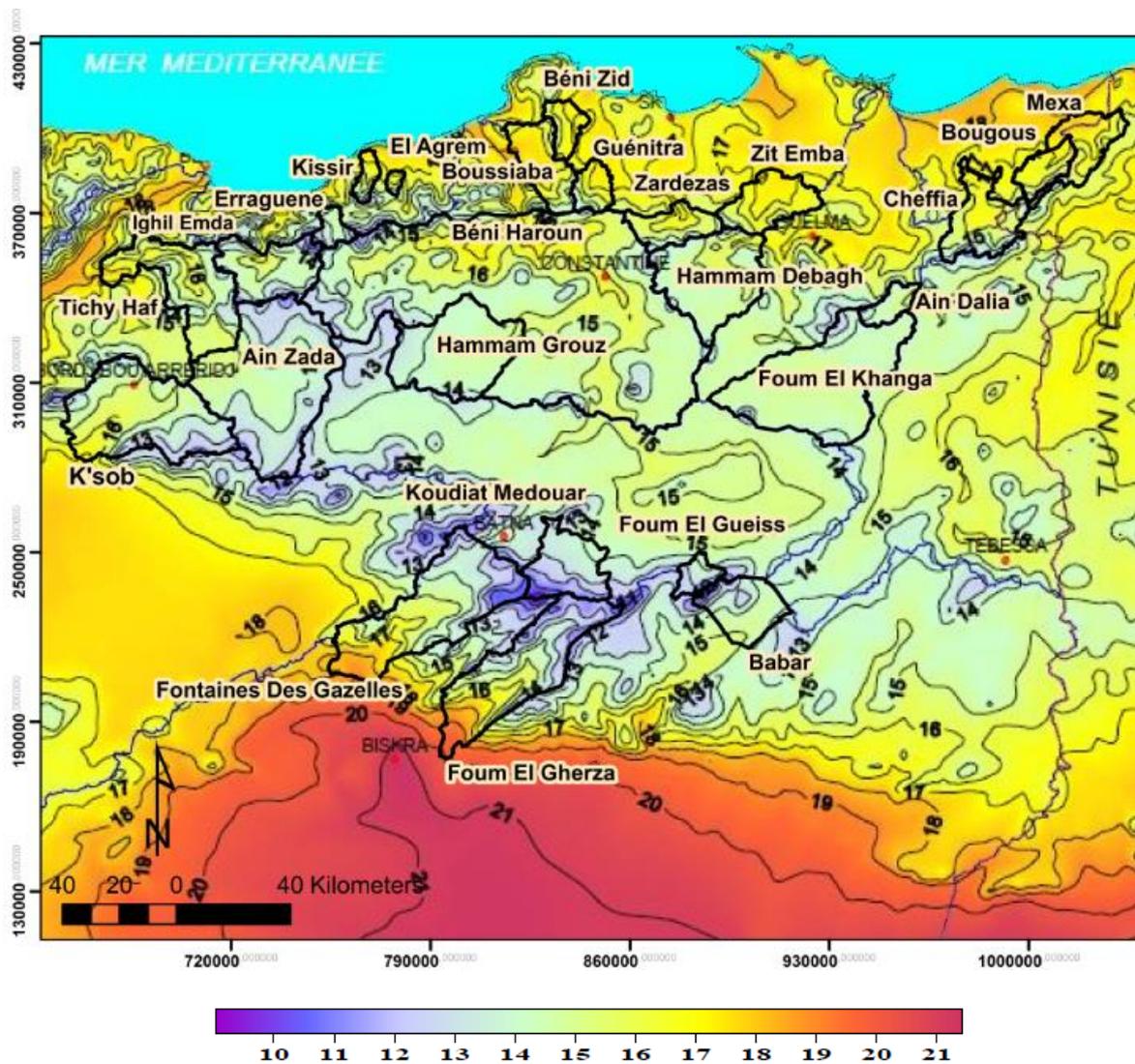


Figure 23 : Températures moyennes annuelles (°C) de l'Est algérien (ANRH, 2002)

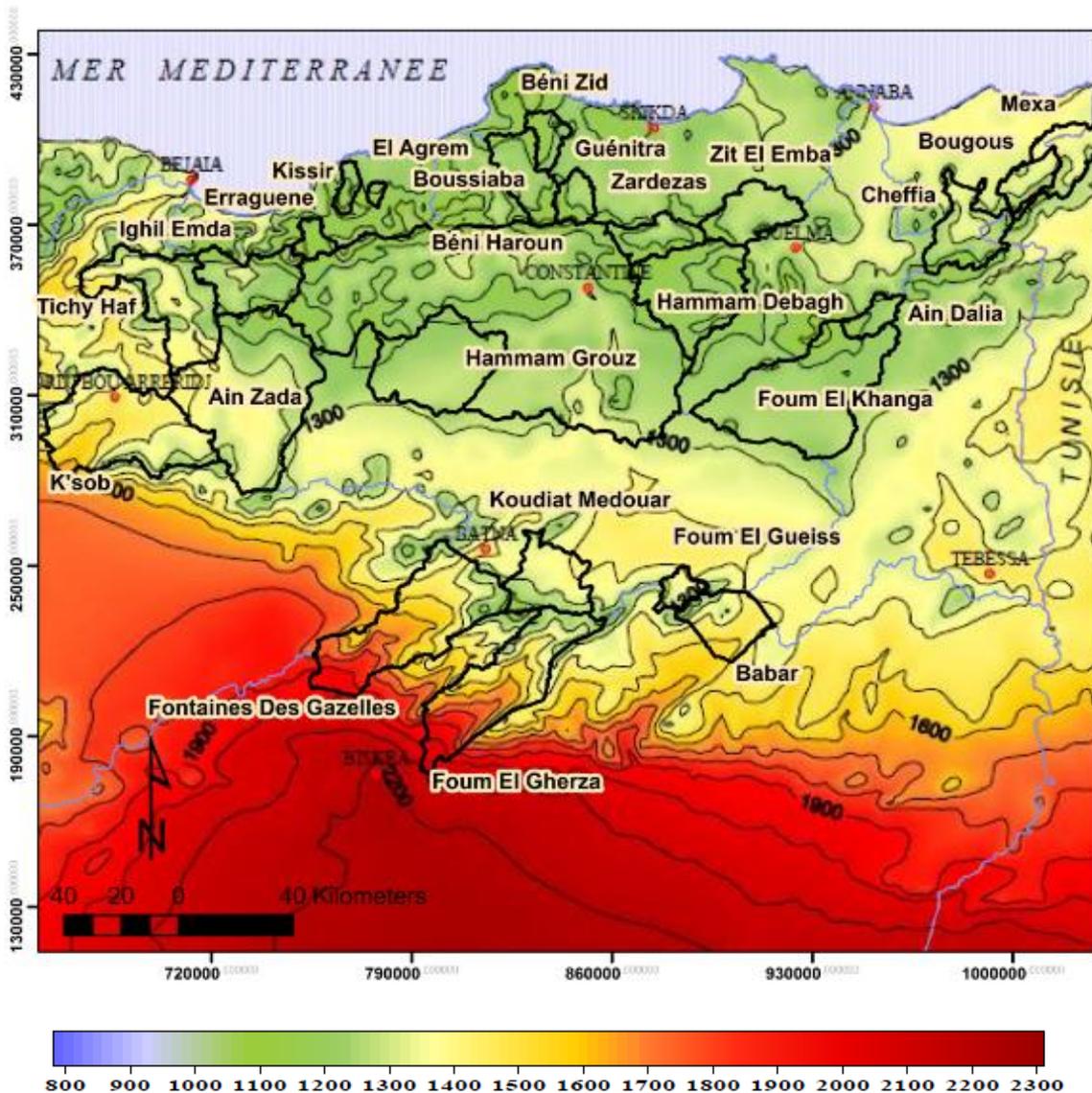


Figure 24 : Evapotranspiration potentielle annuelle moyenne (mm) de l'Est algérien (ANRH, 2002)

1.4.3 Les zones bioclimatiques

La combinaison pluies-températures est utilisée pour définir les étages bioclimatiques. L'objet de la cartographie des zones bioclimatiques étant de permettre la comparaison des bioclimats et d'étudier les transitions qu'ils comportent vers les autres types climatiques (FAO, 1993). S'étalant de l'étage humide à l'étage aride, l'Est algérien couvre une gamme étendue de bioclimats (figure 25) (Côte, 1998).

- le domaine humide est caractéristique les bassins Erraguene, Kissir, El Agrem ;
- le domaine subhumide est caractéristique les bassins de Mexa, Bougous, Zardezas, Zit El Emba et Ain Dalia ;
- les bassins de Cheffia, Guenitra, Béni Zid, Ighil Emda et Boussiaba se distinguent par la présence de deux domaines, humide et subhumide ;

- Le bioclimat semi-aride à subhumide règne dans les bassins de Béni Haroun, Hammam Grouz, K'sob, Tichy Haf, Koudiat Medoaur, Foum El Gueiss et Hammam Debagh ;
- Le domaine semi-aride concerne les bassins de Babar, Foum El Khanga et Ain Zada ;
- enfin, les bassins de piémont Sud de l'Atlas Saharien (Foum El Gherza et Fontaines des Gazelles) caractérisent par l'existence de domaines allant du subhumide au semi-aride et aride.

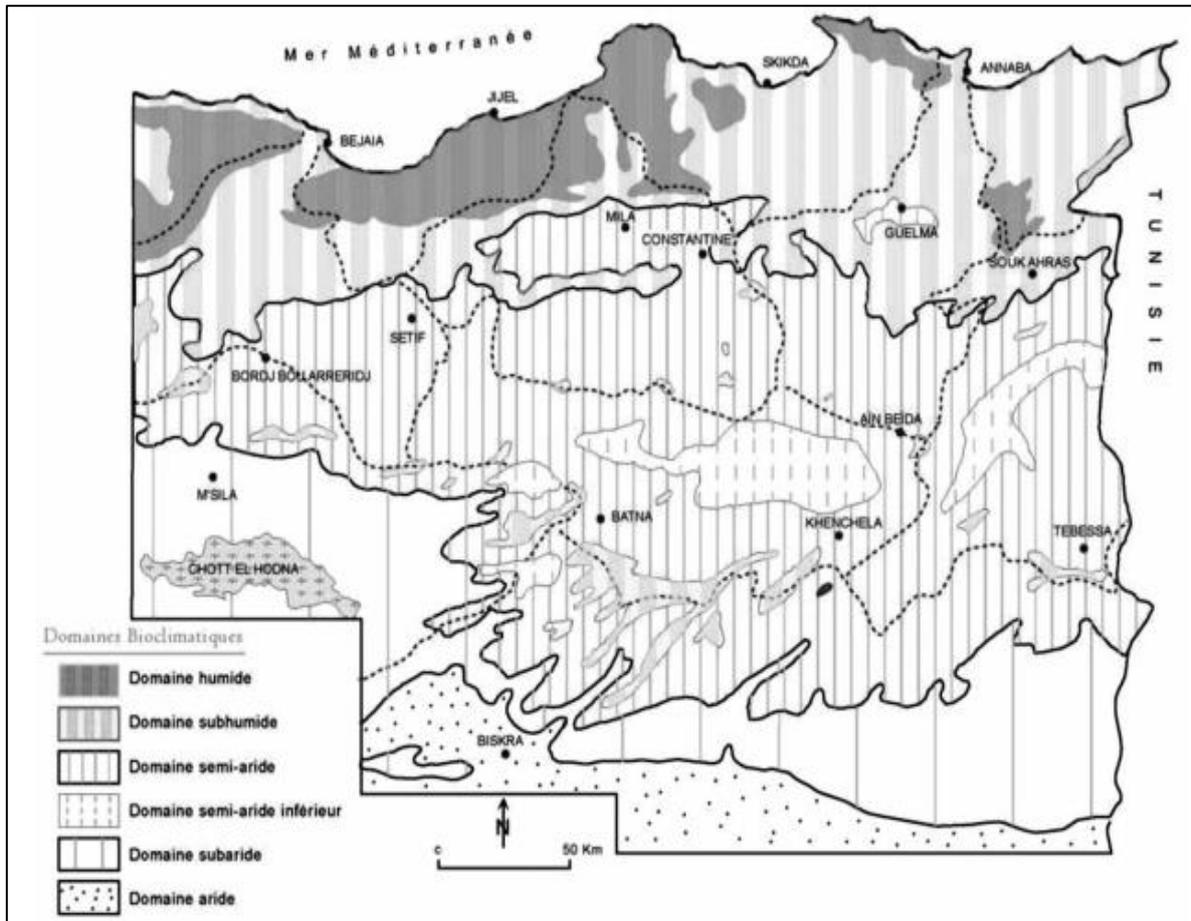


Figure 25 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (D'après Côte, 1998 in Mebarki, 2005)

2. HISTORIQUE : PERIODES D'IMPLANTATION DES BARRAGES

La figure 26 illustre l'évolution des barrages de 1938 (date marquant le début de construction de barrages par la colonisation) à 2015. La capacité globale des barrages s'élève à 3102 hm³ pour 25 barrages en situation d'exploitation en 2015. Ce volume a tendance à augmenter avec 31 barrages en construction et en projet.

Trois périodes marquent cette mutation hydraulique en termes de nombre et de capacité installée des barrages.

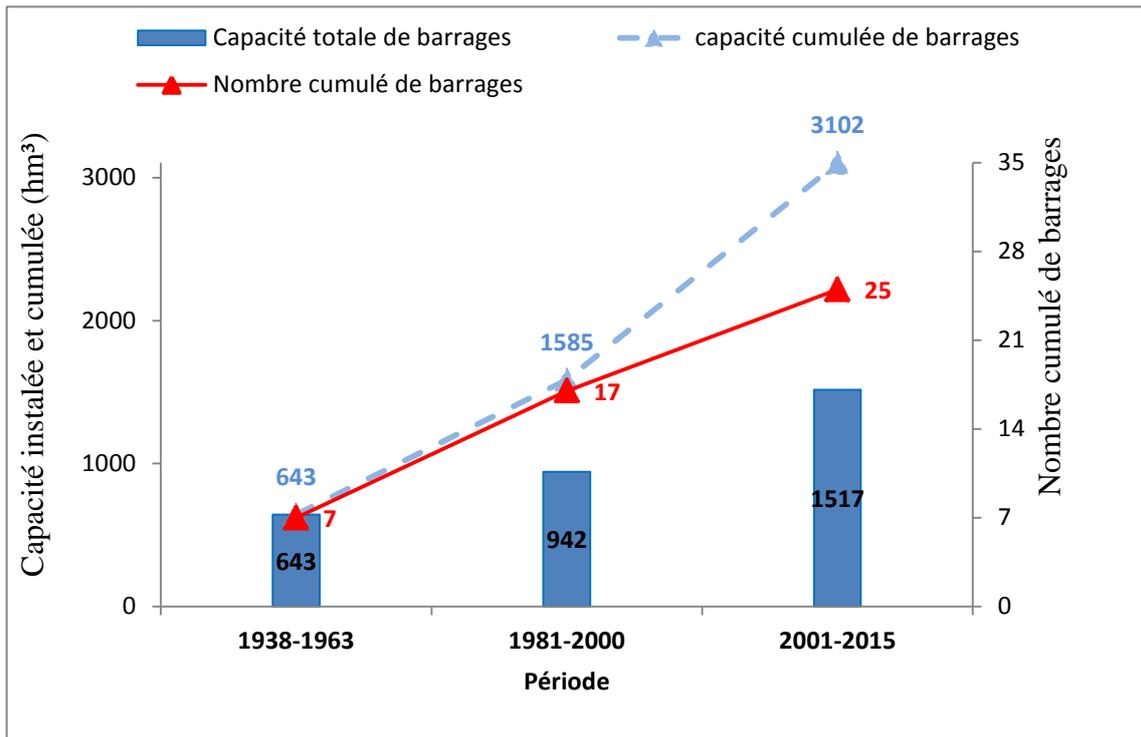


Figure 26 : Evolution de l'infrastructure de mobilisation des eaux superficielles dans l'Est algérien de 1938 à 2015.

Nous passons en revue la chronologie de ces réalisations en nous inspirant en partie de la présentation établie antérieurement par **Mebarki (2005)** concernant la mise en eau successive des barrages de l'Est algérien.

2.1. Les premières implantations de 1938 à 1963

L'Est algérien hérite, au lendemain de l'Indépendance, de sept (7) barrages d'une capacité cumulée se réduisant à 643 hm³ (figure 27).

Dans cette région, les quatre premiers barrages construits par la colonisation, **Foum El Gueiss** (1939), **K'sob** (1940), **Zardezas** (1945), et **Foum El Gherza** (1950), ont connu un envasement rapide. A cet effet, trois barrages ont été surélevés pendant la période post-indépendance (Foum El Gueiss en 1969, Zardezas en 1975 et K'sob en 1977).

Par ailleurs, les besoins en énergie amenèrent la colonisation à construire deux barrages hydroélectriques totalisant une capacité de 360 hm³ : **Ighil Emda** (production d'électricité de la commune de Draa el Gaïd) et **Erraguene** (alimentation de la centrale électrique de Ziam Mansouria), ont été mis en eau respectivement en 1954 et en 1963.

Enfin, la construction du barrage **Cheffia** (171.99 hm³), fût lancée en 1959 ; sa mise en exploitation est devenue effective en 1965 pour faire face à la pénurie chronique d'alimentation en eau potable et industrielle de la ville d'Annaba, l'irrigation du périmètre de la Bounamoussa (17000 ha) ainsi qu'à la régularisation des crues de l'oued Bounamoussa afin de réduire les inondations en aval.

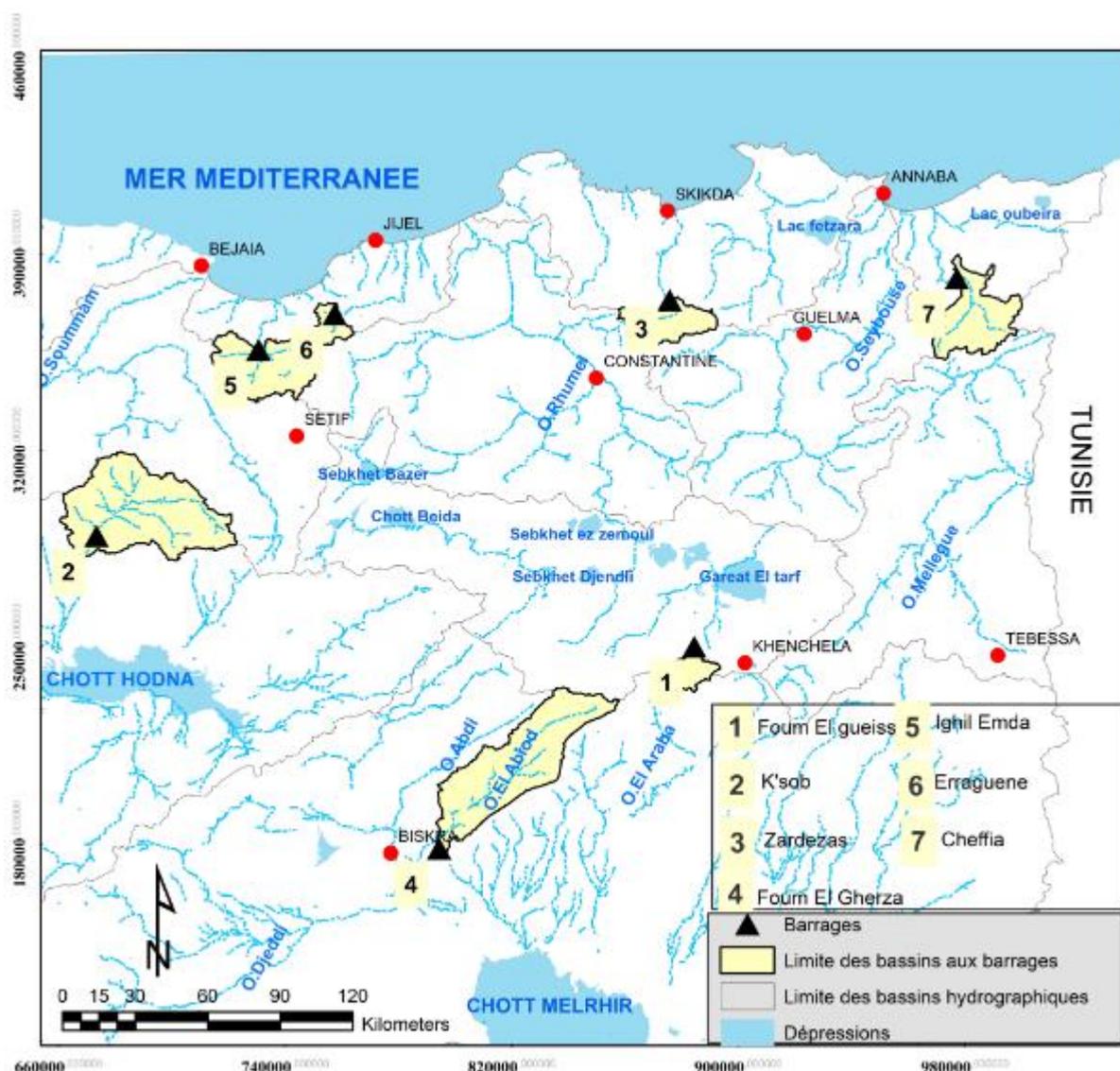


Figure 27 : Localisation des barrages de la période 1938 -1963

2.2. La relance hydraulique à partir des années 1980

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 hm³ furent mis en eau entre 1981 et 2000, leur capacité variant de 40 à 200 hm³ (figure 28).

Le barrage **Guenitra**, édifié sur l'oued Fessa (affluent de l'oued Guebli), a été réceptionné le 14 octobre 1984. Il est venu renforcer l'alimentation en eau de la ville de Skikda (ville subissant une forte urbanisation et pôle pétrochimique important) ainsi qu'à l'irrigation du périmètre de Safsaf d'une superficie de 5654 ha.

En 1986, est mis en eau le barrage **Ain Zada** sur l'oued Bousselem (affluent Est de l'oued Soummam) d'une capacité de 125 hm³. Il a été réalisé à des fins d'irrigation mais utilisé pour l'alimentation en eau potable des agglomérations de Bord-Bou-Arréridj, Bougaa, El Eulma et Sétif.

L'année suivante (1987), est achevé le barrage de **Hammam Grouz** sur le haut Rhumel. Après les études d'avant-projet détaillé assurées de 1978 à 1979 par un bureau d'étude anglais (BINNIE and PARTNERS), la présence du karst (cavités et fissures) sur le site de l'ouvrage a constitué un obstacle important pour le projet de réalisation confié à l'entreprise publique algérienne HYDROTECHNIQUE.

Le barrage **Hammam Debagh** a été mis en service en décembre 1987 sur l'oued Bouhamdane (affluent de la Seybouse), avec une capacité de 200 hm³ et un volume régularisé de 55 hm³/an. Il a permis la création d'un périmètre irrigué dans la vallée de Guelma Bouchegouf (13000 ha). Ce périmètre ayant connu un retard dans sa réalisation, a été mis en exploitation au fur et à mesure de l'équipement des parcelles par l'Agence nationale de réalisation et de gestion des infrastructures hydrauliques pour l'irrigation et le drainage. À partir de l'an 1993, une partie de l'eau régularisée par cet ouvrage est destinée à l'alimentation en eau potable des petits centres proches du barrage et de l'agglomération de Guelma (**Louamri, 2013**).

L'année 1987 a vu la mise en eau du barrage **d'Ain Dalia** sur l'oued Medjerda, d'une capacité de 82 hm³ et d'un volume régularisé de 45 hm³/an. Ce volume est affecté à l'alimentation en eau potable et industrielle de la région de Souk-Ahras et aux transferts vers Ouenza et El Aouinet. Cet ouvrage a connu une résurgence en rive droite le 26 mars 1991, avec un accroissement du débit de 3 à 50 l/s. Ceci a conduit à réaliser en 1995 des travaux de stabilisation de la zone de captage et de drainage des résurgences (12 drains sub-horizontaux d'environ 30 m de longueur) (**ANBT, 2014**).

Le petit barrage de **Béni Zid** est érigé sur l'oued Guergoura, à une vingtaine de km de la ville de Collo. Les premières études de faisabilité ont débuté en 1966, le projet est laissé en suspens pendant un certain nombre d'années, la priorité étant donnée au projet hydraulique de Guenitra. En 1985, face aux besoins de plus en plus importants de la région de Collo, les travaux de construction ont été relancés au mois d'aout 1988 et la mise en eau s'est effectuée en juin 1993.

Le barrage **Foum El Khanga** (Oued Cherf) est construit sur l'oued Cherf (affluent de la Seybouse), à 20 km de Sedrata et à 15 km du confluent de l'oued Cherf avec l'oued Nil. L'étude d'avant-projet détaillé (APD) a été confiée au bureau d'études belge TRACTEBEL et les études d'exécution au bureau portugais COBA. Les travaux de réalisation par l'entreprise COSIDER ont débuté au mois de juin 1988, et la réception a été faite en novembre 1995.

En 1990, les travaux de construction du barrage **Babar** sur l'oued Arab (capacité : 41 hm³, volume régularisé : 12 hm³/an) ont été confiés à l'entreprise algérienne COSIDER. La mise en eau a débuté au mois de mai 1995. Les eaux captées par ce barrage sont destinées essentiellement à l'irrigation des terrains situés à l'aval du barrage (dotation annuelle en 2007 : 7 hm³) et également à l'AEP.

Le barrage de **Mexa**, construit sur l'oued Kébir-Est, est réceptionné au cours de l'année 1998. Suite à la crue du 13 janvier 2003 (débit maximum instantané : 800 m³/s), une réfection de la digue et un dégagement des drains en pied de l'ouvrage ont été mis en œuvre.

Le barrage **Fontaines des Gazelles (Manbaa El Ghazala)** sur l'oued El Hai (capacité : 55.5 hm³, volume régularisé : 14 hm³/an) est mis en eau au cours de l'année 2000 aux fins de l'irrigation de la plaine de Outaya (dotation annuelle en 2007 : 8.5 hm³). L'étude d'avant-projet détaillé a débuté en 1982. Les travaux de construction ont été confiés aux entreprises yougoslaves ENERGOPROJEKT (1986-1990) et algérienne HYDROTECHNIQUE (1992-2000).

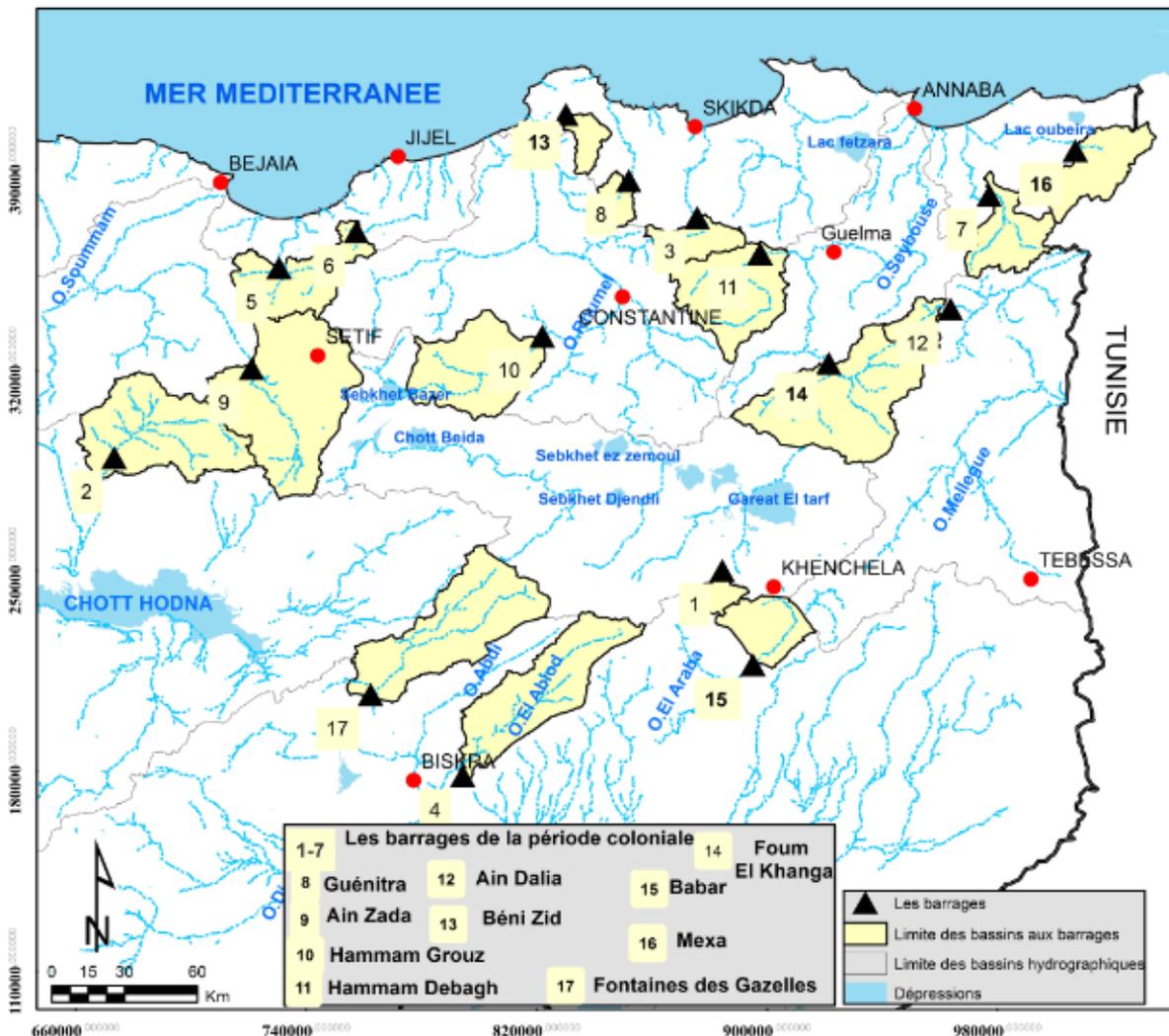


Figure 28 : Localisation des barrages mis en exploitation de 1938 à 2000

2.3. La poursuite du rythme de réalisation de 2001 à nos jours

La poursuite du rythme de réalisation de barrages s'est traduite par la mise en service de 8 ouvrages dont le volume régularisé théorique s'élève à 982.7 hm³/an (figure 29).

Le barrage de **Zit Emba** est érigé sur l'oued El Hammam (capacité : 117.39 hm³, volume régularisé : 43.2 hm³/an). La phase de construction s'est déroulée de 1989 à la fin de 2000 (date de mise en eau). En plus de l'irrigation, cet ouvrage permet de renforcer l'alimentation en eau potable de la ville de Skikda (dotation annuelle en 2007 : 10 hm³).

Le barrage **El Agrem**, édifié sur l'oued du même nom, dans les Côtiers de Jijel, a été inauguré en 2002. Ce barrage dont la réalisation a duré de 1993 à 1997, est destiné à l'irrigation de 5 000 ha de terres agricoles dans les plaines de Jijel-Taher ainsi qu'à l'alimentation en potable de la ville de Jijel et des localités environnantes.

La construction du barrage **Koudiat Medouar** sur l'oued El Reboa a commencé en 1995 par l'entreprise COSIDER, et la mise en eau a été effectuée au cours de l'année 2003. Cet ouvrage est surdimensionné en vue de stocker et régulariser les transferts en provenance du grand barrage de Beni Haroun (via le réservoir de Oued Athmania), en vue de l'alimentation en eau potable des villes de la région et de l'irrigation. Les apports de l'oued Chemora régularisés par cet ouvrage sont estimés à 18.5 hm³/an.

Toujours en 2003, est achevé le plus grand barrage d'Algérie, **Béni Haroun** (capacité : 963 hm³, volume régularisé : 435 hm³ par an). Construit sur l'oued Kébir-Rhumel à environ 40 km au Nord-Ouest de la ville de Constantine, il est à la tête d'un grand système de transfert hydraulique comportant une gigantesque station de pompage pour assurer le refoulement d'un débit de 21 m³/s sur 700 m de dénivelée (**Boulahbal et al, 2013**), et dont l'impact touchera six wilayas de l'Est (Batna, Khenchela, Mila, Oum El Bouaghi, Constantine et Jijel).

Le barrage **Kissir** implanté sur l'oued Kissir, dans le territoire de la wilaya de Jijel, a été construit par l'entreprise serbe HIDROTEHNIKA, entre juin 2006 et octobre 2009 (date de mise en eau). D'une capacité de 68 hm³, le barrage régularise un volume de 68 hm³/an, destiné à l'alimentation en eau potable de la ville de Jijel et des localités avoisinantes et l'irrigation des plaines côtières.

Le barrage **Tichy Haf**, implanté sur l'aval de l'oued Boussellam, a été réceptionné en 2007. Avec un volume régularisé de 150 hm³/an, cet ouvrage s'inscrit dans la planification des ressources en eau de la Soummam (AEP des agglomérations situées sur le couloir Akbou-Béjaia, irrigation du périmètre du Sahel et de la basse Soummam, écrêtement des crues de l'oued Boussellam).

Le barrage **Boussiaba**, situé près de la ville d'El Milia, a été construit par les entreprises ZAGOPE / ANDRADE GUTIERREZ (Portugal / Brésil). La mise en eau du barrage a été effectuée à la fin de l'année 2010. L'objectif est d'utiliser les eaux de l'Oued Boussiaba pour satisfaire les besoins en AEP de la région d'El Milia et de transférer par l'intermédiaire d'une station de pompage installée près d'El Milia, une partie des eaux vers la retenue de Beni Haroun.

Le barrage **Bougous** (oued Bougous) a été réceptionné en 2010. Son bassin couvre une superficie de 235 km². Avec un volume utile de 65 hm³, cet ouvrage régularise 49 hm³/an, destinés au soutien de Mexa pour l'alimentation en eau potable du couloir El Tarf– Bouteldja-Annaba, ainsi que l'agglomération d'El Kala. L'irrigation de la vallée du Kébir-Est, est l'autre principal objectif du système Mexa-Bougous.

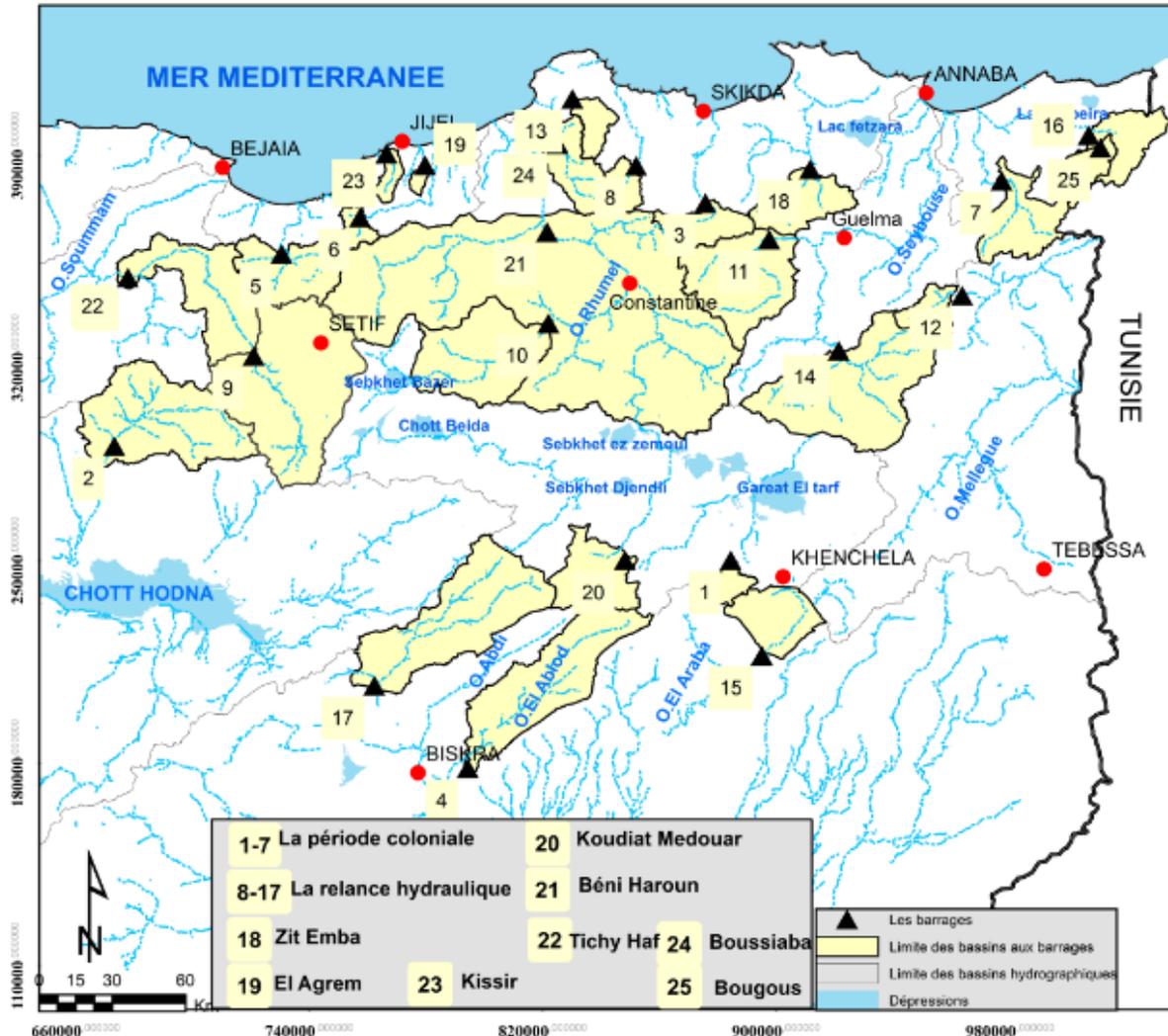


Figure 29 : Localisation des barrages de la période de 1938 à 2015

3. PRESENTATION DE LA BASE DE DONNEES

Dans le cadre de ce travail de thèse, différentes données statistiques et documents cartographiques sont utilisés : les données physiques et hydrotechniques caractérisant la variété des 25 barrages en cours d'exploitation (bassins d'alimentation des barrages, digues, ouvrages annexes et lacs de retenue), les données du bilan d'eau et de variation des réserves des retenues, les levés bathymétriques, les données des lâchers des barrages au profit des secteurs utilisateurs, les données climatiques (indice NAO en particulier) et les données spatialisées (cartes numérisées des précipitations et des écoulements, le MNT à maille de 100 m en coordonnées métriques Lambert Nord Algérie traité par **Rezak, 2014**). Nous présentons ci-après quatre principales bases de données, largement exploitées dans le cadre de ce travail.

3.1. Les données du bilan d'eau

Le fonctionnement des barrages est étudié au moyen des données du bilan d'eau. Ces données de mesures correspondent à des séries chronologiques journalières, 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 et alimentation en eau industrielle ou AEI) (tableau 1).

Tableau 1 : Coordonnées géographiques des barrages et séries des bilans d'eau journaliers disponibles

Barrage	Oued	Wilaya	X (km) Coordonnées Lambert	Y (km) Coordonnées Lambert	Année de mise en eau	Superficie bassin versant (km ²)	Séries de bilans journaliers disponibles	Durée (ans)
Mexa	Kébir-Est	El Tarf	1007.00	397.00	1998	650	Janvier 2003- 2015/16	13
Bougous	Bougous	El Tarf	1010.96	392.65	2010	235	/	/
Cheffia	Bounamoussa	El Tarf	977.17	381.32	1965	575	1980/81-2015/16	37
Zit Emba	El Hammam	Skikda	911.64	385.28	2001	488	2000/01-2007/08	8
Zardézas	Saf-Saf	Skikda	875.75	373.60	1945	345	1975/76-2012/13	38
Guenitra	Fessa	Skikda	851.99	386.49	1984	202	1987/88-2012/13	26
Béni Zid	Guergoura	Skikda	830.20	409.60	1993	58.6	2001/02-2015/16	15
El Agrem	El Agrem	Jijel	779.73	386.67	2002	39	2003/04-2015/16	13
Kissir	Kissir	Jijel	766.51	390.65	2009	107	2010/11-2015/2016	6
Erraguene	Djendjen	Jijel	757.45	368.60	1963	134	/	/
Ighil Emda	Agrioun	Bejaia	730.55	355.95	1954	646	/	/
K'sob	K'sob	M'sila	673.33	289.63	1940	1460	1990/91-2012/13	23
Babar	El Arab	Khenchela	895.10	217.25	1995	567	2002/03-2015/16	14
Fontaines des Gazelles	El Hai	Biskra	762.36	206.86	2000	1660	2000/01-2015/16	16
Foum El Gherza	El Abiod	Biskra	794.38	178.36	1950	1300	1967/68-2013/14	47
Koudiat Medaour	Reboa	Batna	848.18	250.17	2003	590	2004/05-2015/16	12
Foum El Gueiss	Gueiss	Khenchela	884.43	250.21	1939	154	1990/91-2015/16	26
Hammam Grouz	Rhumel	Mila	821.99	332.08	1987	1130	1988/89-2015/16	28
Beni Haroun	Kébir	Mila	821.53	363.57	2003	7725	2003/04-2014/15	12
Boussiaba	Boussiaba	Jijel	825.17	393.96	2010	379	2011/12-2015/16	5
Ain Dalia	Medjerda	Souk Ahras	963.63	341.62	1987	193	1990/91-2015/16	26
Hammam Debagh	Bouhamdane	Guelma	897.62	361.01	1987	1070	1990/91-2015/16	26
Foum El Khanga	El Cherf	Souk Ahras	921.42	322.60	1995	1710	2001/02-2015/16	15
Ain Zada	Boussellam	B.B.Arreridj	721.05	320.78	1986	2080	1987/88-2012/13	26
Tichy Haf	Boussellam	Bejaia	677.98	347.87	2007	1727	Avril 07-2014/15	8

Nous avons été confrontés à certaines contraintes concernant la longueur des séries et les périodes qu'elles couvrent, sachant que la période d'exploitation diffère d'un barrage à l'autre (figure 30). Afin de pouvoir comparer les bilans sur une période commune, le choix a porté sur dix (10) barrages dont les données couvrent une période hydrologique commune de 23 ans (de septembre 1990 à août 2013). Ces barrages sont bien répartis dans l'espace, entre l'Atlas tellien (**Cheffia, Zardezas, Guénitra, Hammam Debagh et Ain Dalia**), les Hautes Plaines (**Hammam Grouz, Ain Zada, K'sob**) et les piémonts Nord et Sud de l'Atlas saharien (**Foum El Gueiss et Foum El Gherza**) (figure 31).

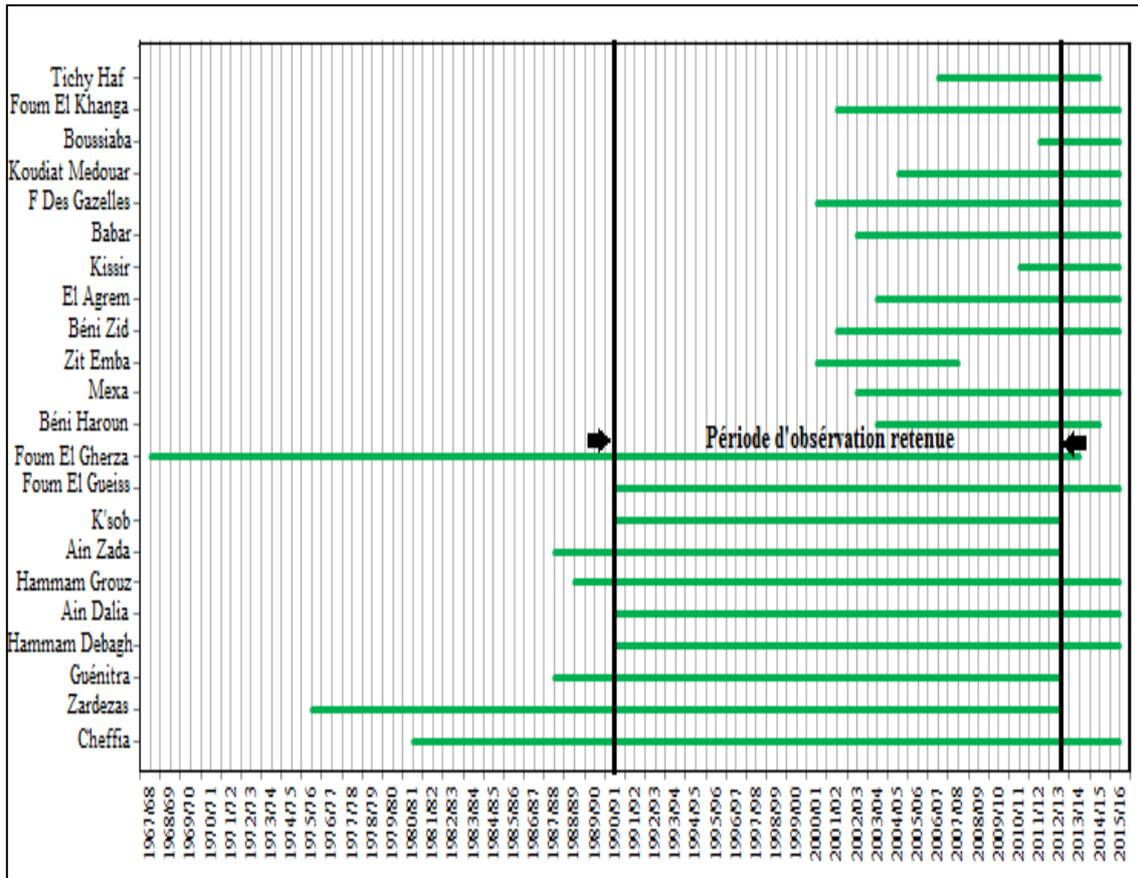


Figure 30 : Séries chronologiques des données de bilan d'eau des barrages

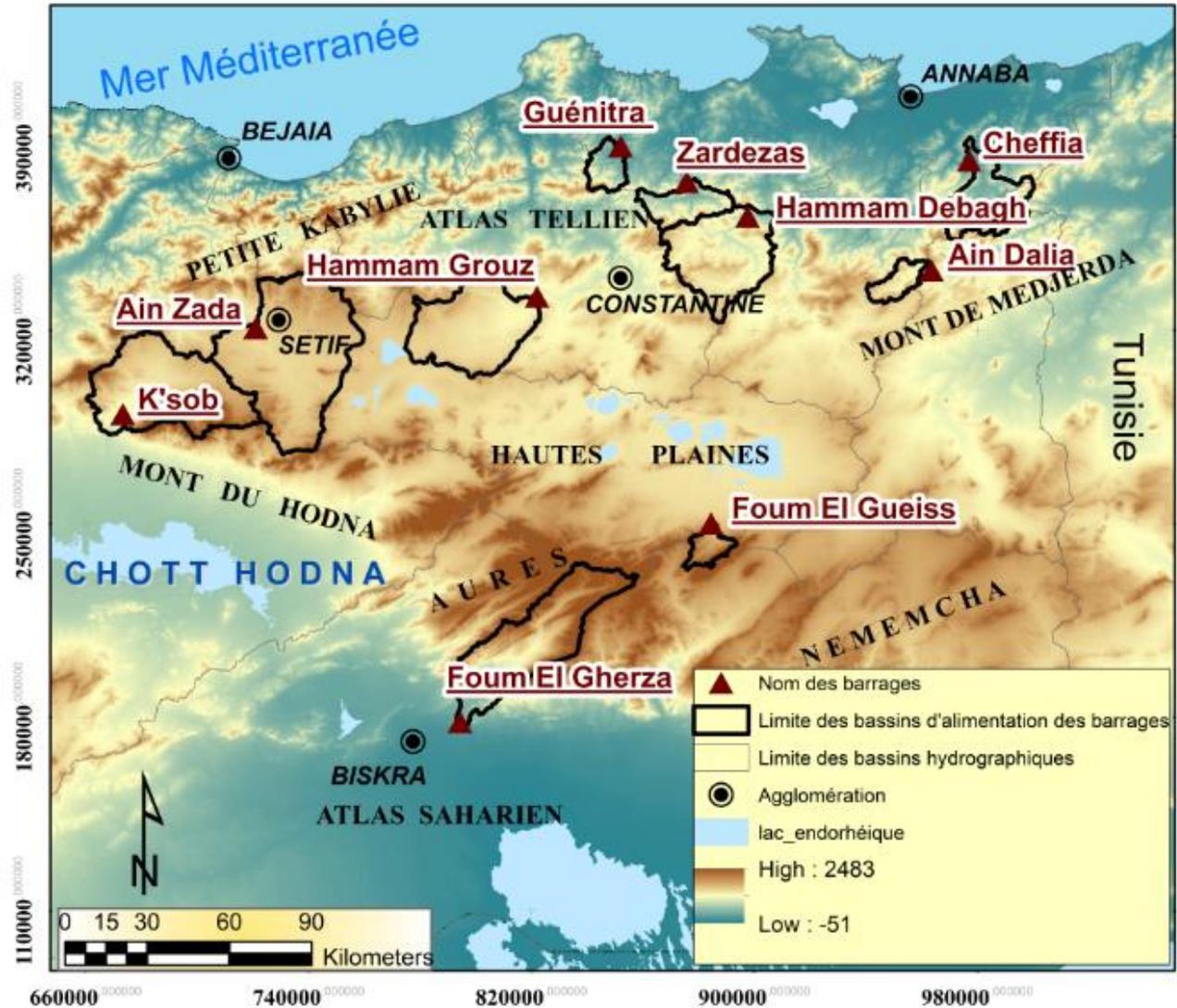


Figure 31 : Localisation de l'échantillon de dix barrages

3.2. Les données climatiques : Indice NAO

La variabilité des apports et des pluies mesurées aux barrages sera comparée aux modes de variabilité du climat connus pour influencer l'hydrologie de la Méditerranée et l'Océan Atlantique. Plusieurs études ont relié les variations hydrologiques (débits des rivières, précipitations) aux fluctuations du climat dans le but de comprendre les changements abrupts, les fluctuations et les tendances observées (Tootle et al, 2005 ; Coulibaly, 2006 ; Labat, 2006, 2008, 2010 ; Massei et al, 2007, 2009, 2010 ; Collins, 2009 ; Küçük et al, 2009). L'indice utilisé dans cette thèse est la NAO (North Atlantic Oscillation ou oscillation nord-atlantique), disponible sur le site du National Climate Data Center (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access>).

L'oscillation nord-atlantique représente la redistribution de masses atmosphériques entre les régions arctiques ou subarctiques et les régions subtropicales de l'atlantique. Elle correspond à la différence de la pression atmosphérique au niveau de la mer (SLP), mesurée au niveau de

deux stations météorologiques proches de l'anticyclone des Açores (Lisbonne ou Ponta ou Delgada ou Gibraltar, etc.) et d'une station proche de la dépression d'Islande (Reykjavik ou Stykkisholmur ou Akureyri, etc.) (Antoniado et al, 2001). La forte différence entre les deux centres d'action se traduit par des hautes pressions plus élevées que la normale au Sud et des basses pressions plus faibles que la normale au Nord, phénomène qui implique un déplacement du courant jet atmosphérique et du rail de dépression associé vers le Nord et inversement (figure 32) (Massei et al, 2011). Lorsque l'indice NAO est dans sa phase positive, il y a un renforcement des masses d'air frais et sec provenant du Nord à partir des régions arctiques. Ce dernier génère des conditions climatiques plus sévères (années sèches) au Nord-Est de la Méditerranée. Cependant, la phase négative de la NAO engendre un affaiblissement des vents d'Ouest sur l'Atlantique Nord vers l'Europe (Cañellas et al, 2010).

Cet indice a des impacts importants sur le climat de l'Europe et de l'Afrique de Nord (Perreault et al, 1999 ; Bonsal et al, 2001 ; Marshall et al, 2001 ; Anctil et al, 2004 ; Coulibaly et al, 2004 ; Coulibaly, 2006). Selon Saadaoui (2007), la région de la Méditerranée occidentale est fortement conditionnée par les phases de la NAO. Par exemple, Abdelali (2013) montre que l'effet combiné de l'oscillation Nord-Atlantique (ONA) au Nord et de la progression de la désertification par le Sud influence sans doute le régime pluviométrique au Maroc et par conséquent l'extension spatio-temporelle de la sécheresse. En Algérie, Nouaceur et al (2010) montrent que la période de forte sécheresse dans le littoral algérien correspond à des indices NAO positifs de forte intensité.

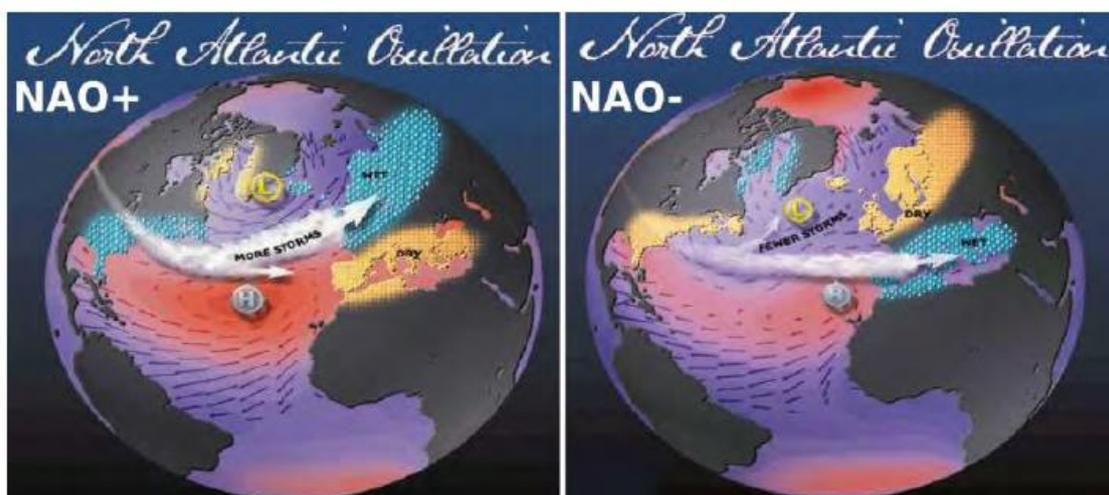


Figure 32 : L'oscillation Nord-Atlantique et son incidence sur les conditions hydrologiques en Europe (source : <https://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/NAO/>)

Cette oscillation a été utilisée dans plusieurs recherches (Rossi, 2010 ; Massei et al, 2010 ; Dieppois et al, 2013 ; Chevalier, 2014 ; Turki et al, 2016 ; Zamrane et al, 2016 ; Nahon, 2018).

3.3. Les données des apports simulés des bassins d'alimentation des barrages

La simulation des apports à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'aménagement et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages hydrauliques. Les apports des bassins algériens ont été simulés à l'aide du modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres) qui permet de reconstituer de façon satisfaisante les apports mensuels en eau de surface (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 ; Makhoul et Michel C, 1994).

Les données obtenues auprès de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (A.N.B.T) concernent un ensemble de 13 bassins dont les oueds sont régularisés par des barrages à travers l'Est algérien (tableau 2).

Tableau 2 : Les données disponibles des apports mensuels simulés (hm³)
(Période : 1965/66-2007/08)

Barrage	Oued	Superficie du bassin au barrage (km ²)	Période d'observation
Bougous	Bougous	235	1965/66-2007/08
Cheffia	Bouamoussa	575	1965/66-2007/08
Zardezas	Saf-Saf	345	1965/66-2007/08
Béni Zid	Guergoura	59	1965/66-2007/08
El Agrem	El Agrem	39	1965/66-2007/08
Kissir	Kissir	107	1965/66-2007/08
K'sob	K'sob	1460	1965/66-2007/08
Koudiat Medaour	Reboa	590	1965/66-2007/08
Foum El Gueiss	Gueiss	154	1965/66-2007/08
Hammam Grouz	Rhumel	1130	1965/66-2007/08
Beni Haroun	Kébir	7725	1965/66-2007/08
Ain Dalia	Medjerda	193	1965/66-2007/08
Ain Zada	Bousellam	2080	1965/66-2007/08

3.4. Les informations relatives aux levés bathymétriques

« Les techniques conventionnelles de quantification du dépôt sédimentaire dans un réservoir, comme les suivis hydrographiques et les méthodes de bilan entre flux entrant et sortant, sont lourdes, coûteuses et longues. De plus la prédiction des profils de dépôt sédimentaire, basée sur des méthodes empiriques et numériques, exige un grand nombre de données d'entrée, alors que les résultats ne sont toujours pas encourageants » (Goel et al, 2002). Cette remarque illustre parfaitement les problèmes qui se posent dans l'étude de la sédimentation dans les réservoirs de manière générale. Dans cette thèse, la quantification de l'envasement des barrages s'est appuyée sur les levés bathymétriques et topographiques réalisés par l'Agence

Nationale des Barrages et Transferts, issus de deux campagnes de mesures effectuées en 2004 et en 2014.

En plus de l'évaluation de l'envasement sur l'ensemble des barrages, nous avons procédé à une analyse sédimentaire détaillée sur les barrages Zardezas, Cheffia, K'sob et Béni Haroun. Les modifications de la courbe capacité -hauteur- surface renseignent sur l'évolution du volume utile influencé par l'augmentation de la tranche morte des barrages, au cours de leur période d'exploitation respective.

4. METHODES UTILISEES POUR LE TRAITEMENT DES DONNEES

Afin d'étudier le fonctionnement hydrologique des barrages, on utilise les méthodes statistiques descriptives (analyses des variables moyennes centrées réduites, caractérisation spatiotemporelle du comportement statistique des flux entrants ou apports et des flux sortants ou pertes et lâchers), ainsi que les méthodes spectrales pour caractériser et quantifier le contenu fréquentiel d'une part, et de visualiser les instationnarités au cours du temps d'autre part.

Ces méthodes permettent en hydrologie de traiter les séries chronologiques temporelles de façon à en extraire les structures, les ruptures, et la dépendance entre différents processus.

4.1. Traitement statistique

4.1.1 Bilan de régularisation des eaux

Comme le montre le schéma de la figure 33, 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, liés aussi bien au régime irrégulier des apports qu'à l'importance des pertes (évaporation et fuites).

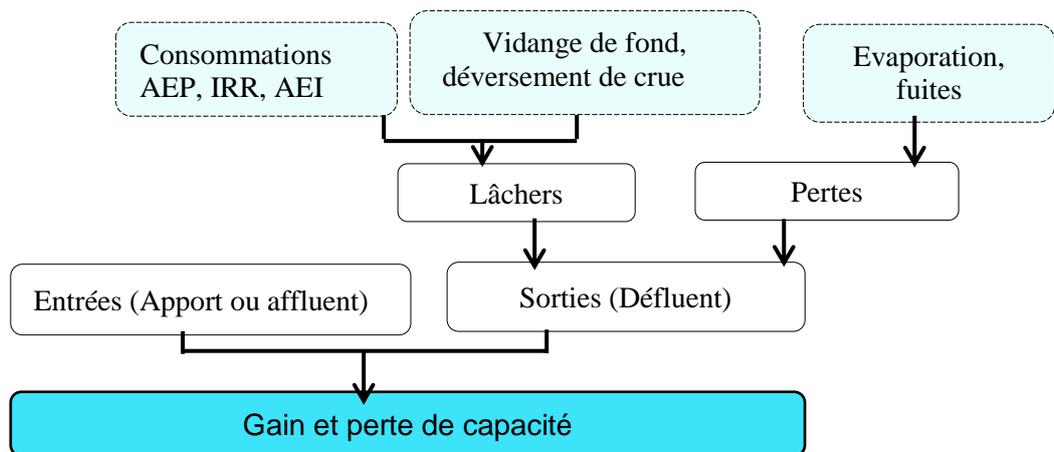


Figure 33 : Schéma théorique du bilan d'eau d'un barrage.

Les études sur les bilans d'eau des réservoirs se sont multipliées au cours de ces trois dernières décennies dans les domaines de l'hydrologie et de l'hydraulique (Kingumbi, 1999 ; Mihoubi, 2009 ; Amirèche, 2009 ; Abdellaoui et al, 2002 ; Touati, 2010 ; Mebarki, 2010 ; Boulahbal et al, 2013; Louamri, 2013 ; Benfetta et al, 2016).

Un exemple d'un bilan hydraulique du plus grand barrage de l'Algérie (Béni Haroun) est présenté dans le tableau 3.

Tableau 3 : Bilan hydraulique interannuel du barrage de Béni Haroun (2003/04 – 2014/15)

Année	Début d'année	Durant l'année						Fin d'année		Pluie (mm)
	Capacité (Hm ³)	Lâchers			Pertes	Défluents	Affluents (apports)	Capacité (Hm ³)	Gain / perte de capacité (Hm ³)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6) = (2+3+4+5)	(7) = (8-1) + 6	(8)	(9) = 8 - 1	(10)
03/04	11.21	0.00	0.00	1080.56	4.60	1085.16	1125.80	51.85	40.64	661.90
04/05	51.85	0.00	0.00	2110.37	14.70	2125.08	2261.04	187.81	135.96	924.60
05/06	187.81	0.00	0.00	251.37	28.11	279.48	487.81	396.14	208.33	479.60
06/07	396.14	10.88	0.00	373.47	32.29	416.64	435.19	414.69	18.55	577.90
07/08	414.69	60.42	0.00	233.75	35.17	329.35	423.82	509.16	94.47	573.90
08/09	509.16	88.34	0.00	640.98	39.70	769.01	822.54	562.69	53.53	694.20
09/10	562.69	96.98	0.00	479.85	40.66	617.49	653.10	598.30	35.61	701.20
10/11	598.30	105.85	0.00	263.07	46.18	415.10	649.94	833.14	234.84	612.90
11/12	833.14	108.99	877.10	194.96	52.54	1233.58	1300.19	899.75	66.61	659.50
12/13	899.75	122.00	613.97	0.00	51.21	787.18	856.94	969.51	69.76	610.50
13/14	969.51	140.02	1165.02	0.00	50.58	1355.63	1351.77	965.65	-3.86	832.50
14/15	965.65	140.80	2271.01	8.27	58.89	2478.97	2505.96	992.64	26.99	830.10

- le barrage de Béni Haroun reçoit durant douze années d'exploitation (2003/04- 2014/15) un apport moyen annuel de 1072.8 hm³/an soit plus du double du volume régularisé théorique (435 hm³/an). Il a connu des fluctuations importantes à mettre en relation directe avec la variabilité des précipitations. Les épisodes pluvieux exceptionnels des années 2004/05 et 2014/15 (924.6 et 830.1 mm) ont engendré des apports exceptionnels (2 261 et 2 506 hm³).

- En raison des retards de réalisation des systèmes de transfert et d'adduction (en plus des mesures de sécurité de l'ouvrage lors des premières années de remplissage), une proportion importante des apports (plus de 80 %) a été évacuée par le déversoir de crues et par la vidange de fond; la part affectée à l'AEP s'est limitée à 6.8 % (72.8 hm³/an en moyenne).

4.1.2 Méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI)

Pour appréhender la variabilité hydroclimatique, nous utilisons la méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI) de type « Matrice Bertin », qui permet d'analyser dans un premier temps la répartition spatiotemporelle du paramètre climatologique puis de déterminer dans un deuxième temps les dates de changements de cycle, s'il y a des cyclicités manifestes grâce à l'analyse régionale (**Nouaceur et al, 2013; Laignel et al, 2014**). Cette méthode combine deux types de traitement, statistique et graphique :

- Classer les données annuelles de l'ensemble des barrages sur toute la série d'étude en fonction des quintiles (Q1, Q2, Médiane, Q3 et Q4), les années sont considérées comme :
 - très sèches ou très fraîches, en dessous du premier quintile Q1 ;
 - sèches ou fraîches entre le premier et le deuxième quintile ;
 - normales à tendance sèche où à tendance fraîche entre le deuxième et le troisième quintile (la médiane) ;
 - normales à tendance humide ou à tendance chaude, entre la médiane et le troisième quintile ;
 - humides ou chaudes entre le troisième et le quatrième quintile ;
 - enfin. très humides ou très chaudes, au-dessus de quatrième quintile.
- Remplacer les valeurs codées par des trames des couleurs allant du clair au foncé (les classes visuelles). Afin d'examiner les relations entre les lignes et les relations entre les colonnes, on va transformer le tableau numérique en tableau graphique. On repère ainsi des corrélations positives, des corrélations négatives et des absences de corrélation.

Ce traitement graphique permet de visualiser l'évolution du paramètre climatique selon deux dimensions (temps et espace). Il est suivi d'une procédure de détermination des dates de rupture et de changement de tendance, qui consiste à affecter un nombre variant de 1 (année très sèche) à 5 (année très humide) à chaque année suivant les caractères déjà déterminés. Pour chaque année, la somme des nombres obtenue sur tous les barrages est centrée réduite, ce qui permet d'obtenir 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, puis de déterminer les ruptures et les périodes caractéristiques.

4.1.3 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 hydroclimatiques obtenues pour une longue série de mesures de mettre en évidence les tendances hydroclimatiques et de différencier les périodes sèches et les périodes humides (**Soro et al,**

2011). Cet indice est défini comme une variable centrée réduite (**Lamb, 1982 ; Ali et al, 2008**), il est donné par l'équation suivante :

$$V_{cr} = (X_i - X_m) / \sigma$$

Avec ;

V_{cr} : Indice de Nicholson (pluviométrique ou hydrologique).

X_i : Hauteur de pluie ou Apport hydrologique pour un barrage pendant une année i ;

X_m : Moyenne interannuelle de la pluie ou de l'Apport au barrage pendant la période de référence ;

σ : Ecart type de la pluie ou de l'Apport sur la période de référence.

Cet indice a été utilisé dans plusieurs domaines notamment en géographie (**Goula et al, 2006 ; Niang, 2008 ; Hallouze et al, 2013 ; Fossou et al, 2015**).

4.2. Traitement spectral

L'analyse spectrale permet d'utiliser une représentation en fonction de la fréquence, elle demande donc la conversion des données du domaine temporel au domaine fréquentiel. Le but étant de déterminer les tendances dominantes de la série temporelle afin d'en déduire ses caractéristiques cycliques. Pour cela, nous avons utilisé le programme informatique R.

4.2.1 Analyse en ondelettes continues

Plusieurs méthodes permettent d'étudier la variabilité de séries temporelles. La transformée de Fourier repose sur l'hypothèse de la stationnarité de la série. Comme beaucoup de séries environnementales sont non stationnaires dont les séries d'indices climatiques, un des principaux arguments en faveur de l'analyse en ondelettes relève du fait que la stationnarité de la série temporelle n'est pas un pré-requis (**Nakken, 1999**). Aussi, contrairement à la transformée de Fourier, l'analyse en ondelettes propose une représentation temps-période de la variance de la série temporelle, de sorte que toute discontinuité dans la variabilité peut être identifiée (**Tremblay, 2009**). Elle s'avère très intéressante pour la discrimination des ruptures temporelles contenues au sein d'une série.

Le choix de l'utilisation d'un type d'ondelettes est dépendant de l'objectif à atteindre, et du confort de l'utilisateur (**Torrence et Compo, 1998**). Dans le cadre de notre étude, seule une ondelette a été utilisée : l'ondelette continue (CWT : Continuous Wavelet Transform). C'est une ondelette qui permet d'obtenir à la fois les précisions pour les hautes et les basses fréquences.

L'analyse en ondelettes continues vise à identifier les principales modes de variabilité et la caractérisation non stationnaire de chaque série chronologique. Elle décompose le signal en ondelettes filles à partir d'une référence fonction d'onde (ondelette mère). L'ondelette mère comprend deux paramètres pour l'exploration en temps fréquence : un paramètre d'échelle a et un paramètre de localisation temporelle b (1) :

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

Soit :

$\psi_{a,b}(t)$: ondelette analysante ou ondelette fille

a : paramètre d'échelle

b : paramètre de position

Le paramétrage en échelles et la translation des ondelettes filles permet la détection des différentes fréquences composant le signal (Rossi, 2012). 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, comme définit par (2) :

$$S(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt \quad (2)$$

Il existe différents types de transformation en ondelettes : Morlet, dérivées d'ondelettes gaussiennes et Paul. Nous utilisons pour notre étude l'ondelette de Morlet car elle fournit des résultats d'une bonne qualité sur ces types de données (Torrence and Compo, 1998 ; Perrier et al, 2005) (figure 34).

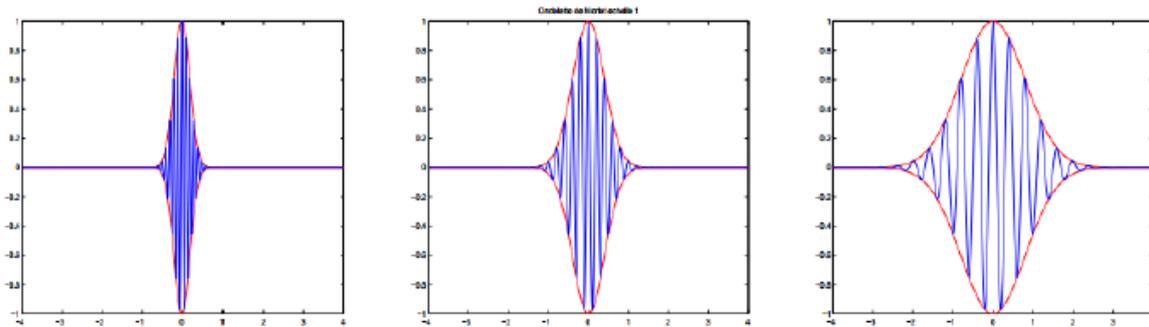


Figure 34 : Ondelettes de Morlet à l'échelle $a = 1/2, 1, 2$ (partie réelle) où a est le paramètre de forme. (Perrier et al, 2005)

La transformation en ondelettes a été utilisée dans de nombreuses études de séries hydrologiques et météorologiques pour analyser la stationnarité ainsi que les variabilités présentes dans les signaux étudiés, tels que le débit, la pluviométrie, l'humidité des sols et la température (Labat et al, 1999 ; Coulibaly et al, 2004 ; Anctil et al, 2004 ; Anctil et al, 2006 ; Mesquita, 2009 ; Rossi, 2010 ; Massei et al, 2011 ; Fritier et al, 2012 ; Zamrane, 2016).

Un exemple d'analyse en ondelettes sur les apports du barrage de Hammam Grouz est présenté sur la figure 35. Aux couleurs rouges correspondent les fortes valeurs de puissance par contre les couleurs bleues et vertes représentent les faibles valeurs. Le spectre local

(scalogramme) indique l'existence de plusieurs fluctuations, identifiées sur plusieurs échelles du temps : à l'échelle annuelle (fluctuation d' 1 an : cycle hydrologique) et à l'échelle interannuelle sous forme des spots (fluctuations observées à 2- 4 ans, 4-8 ans et 8-12 ans).

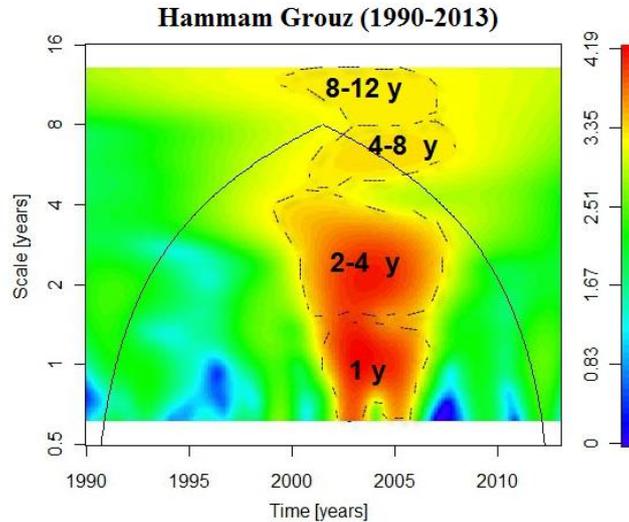


Figure 35 : Exemple de transformée en ondelettes continue obtenue pour les apports du barrage Hammam Grouz

4.2.2 Analyse de la cohérence en ondelettes

La fonction de cohérence est assimilée à une interrelation entre les événements à l'entrée et à la sortie dans un domaine fréquentiel (**Riad, 2003**), ce qui permet de fournir une valeur comprise entre 0 et 1 suivant le degré de corrélation linéaire des variables comparées (**Mesquita, 2009**). Une valeur de 1 signifie une corrélation linéaire entre les deux signaux à un instant T à l'échelle a et une valeur de 0 indique une corrélation nulle (**Maraun et al, 2004 ; Labat, 2010**).

Cette fonction exprime la liaison entrée-sortie ainsi que la linéarité de cette relation. En hydrologie, une bonne linéarité d'un système hydrologique est expliquée par le fait qu'une forte pluie engendre une forte crue à l'inverse d'un système non linéaire ou une forte pluie ne se manifeste pas par une forte crue mais par une importante mise en réserve. Elle est définie par la formule suivante :

$$CO_{xy}(f) = S_{xy}(f) / \sqrt{S_x(f)S_y(f)}$$

$S_{xy}(f)$: 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.

Le spectre par ondelettes croisées WXY (a, τ) entre deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ est calculé suivant l'équation (1), où $CX(a, \tau)$ et $C^*Y(a, \tau)$ sont respectivement le coefficient d'ondelette du signal continu $x(t)$ et le conjugué du coefficient d'ondelette de $y(t)$ (**Rossi, 2010**):

$$(a, \tau) = (a,) C_y * (a,) \quad (1)$$

Le spectre de cohérence par ondelettes permet d'observer par niveau d'échelle le lien statistique entre deux signaux. Les fortes valeurs de cohérence sont caractérisées par des couleurs rouges et les faibles valeurs sont représentées par des couleurs bleues (figure 36). Le spectre nous permet également d'observer la discontinuité de la valeur de cohérence pour une bande de fréquence caractéristique, traduisant la complexité de la relation entre les deux signaux étudiés.

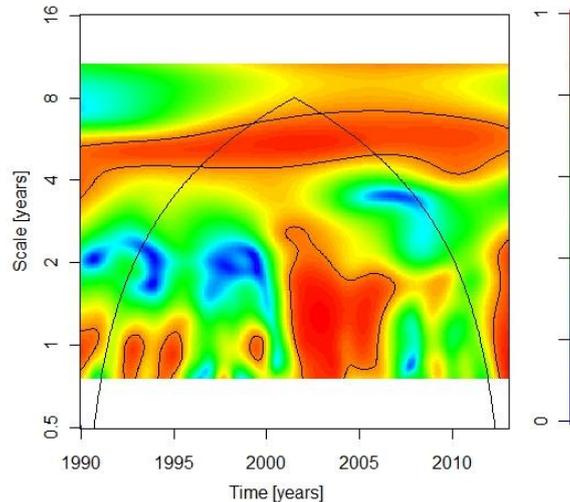


Figure 36 : Exemple d'analyse de la cohérence par ondelettes entre apport et pluie du barrage Hammam Grouz (1990-2013)

4.3. Traitement géo-spatial

4.3.1 Modèle Numérique de terrain (M.N.T) et Système d'Information Géographique (S.I.G.)

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé le Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.) de l'Algérie du Nord, à la maille de 100 m, traité par **Rezak et al (2014)**. Il est manifestement de qualité adaptée à des applications hydrologiques sur des bassins allant de quelques km² à plusieurs milliers de km², il est librement disponible sur le site internet : http://hydroinformatique.polytechnice.fr/hydrologie_algérie. Le système de projection est de type géographique, Lambert Nord Algérie, bien adapté aux besoins de l'hydrologie algérienne.

Par ailleurs, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont des outils permettant de gérer et de traiter les données d'une localisation spatiale, notamment, en ce qui nous concerne, ceux qui sont liés à l'hydrologie. Des logiciels de type « **Arc Gis** » fournissent des outils intéressants de calculs et de mesures.

L'exploitation des données dérivées du MNT sur la zone d'étude et leur intégration dans un SIG , a permis d'en réaliser les différentes cartes sous forme numérique, présentées dans ce travail et d'en déduire les caractéristiques physiques des bassins d'alimentation des barrages (la superficie, la pente, la définition du réseau hydrographique etc.).

4.3.2 La cartographie hydroclimatique

Dans cette étude, nous avons utilisé les cartes des précipitations de 1965 à 1995 (**ANRH, 1993**), les cartes des températures et des évapotranspirations (**ANRH, 2002**). Aussi, nous avons exploité la carte des écoulements moyens du Nord algérien, concernant une période allant de septembre 1965 à août 1995 (**ANRH, 2003**). Elle est basée sur l'utilisation du modèle hydrologique LOIEAU, calé sur les observations de 70 stations de jaugeage.

CONCLUSION

Tout au long de ce chapitre, nous avons présenté la région d'étude dans son contexte général, fortement varié. La variété des bassins d'alimentation des barrages s'insère dans trois grandes unités physiques disposées du Nord au Sud de l'Est algérien : l'Atlas tellien, les Hautes Plaines et l'Atlas Saharien. Cette région juxtapose deux grands types de bassins hydrographiques : à l'amont des barrages, 19 bassins sont à écoulement exoréique et 6 bassins sont à écoulement endoréique.

S'agissant de l'organisation de l'édifice structural, les bassins étudiés sont caractérisés par la complexité et la diversité des matériaux qui les composent.

Il ressort également de l'étude climatique que les bassins d'alimentation sont marqués par de forts contrastes, avec un climat méditerranéen au Nord et continental subdésertique au Sud. L'examen des cartes des isohyètes, des températures et des évapotranspirations permet de saisir cette répartition irrégulière, de la mer vers l'intérieur.

Par ailleurs, l'Est algérien a connu un programme ambitieux de construction de barrages hydrauliques : 25 barrages inégalement répartis à travers les grands bassins hydrographiques, et chaque bassin versant possède au minimum une retenue. Mais, les Côtiers constantinois, les plus pourvues en eaux de surface, regroupent à eux seuls 11 barrages (soit 44 % du nombre total des retenues).

Les barrages ont été mis en eau entre 1938 et 2015, totalisant une capacité de 3102 hm³. Trois périodes marquent cette mutation hydraulique : les premières implantations de la période coloniale (sept ouvrages d'une capacité cumulée de 643 hm³), la relance hydraulique à partir des années 1980 (dix barrages d'une capacité cumulée de 1585 hm³) et la poursuite du rythme des réalisations de 2001 à nos jours (8 barrages totalisant une capacité de 1517 hm³).

L'étude de fonctionnement de ces barrages est basée sur l'exploitation de plusieurs séries de données ainsi que l'utilisation d'approches méthodologiques différentes, permettant le développement des chapitres qui vont suivre.

CHAPITRE 2

**CARACTERISATION HYDROLOGIQUE ET HYDROTECHNIQUE
DES BARRAGES (BASSINS D'ALIMENTATION, LACS DE
RETENUE, DIGUES ET OUVRAGES ANNEXES)**

INTRODUCTION AU CHAPITRE

Le deuxième chapitre de ce travail présente, dans un premier temps, les principales caractéristiques morphométriques et hydrologiques des bassins d'alimentation des barrages (en particulier superficie, pente, apport des oueds) qui justifient leurs forts contrastes du point de vue aire de drainage, relief et débit d'écoulement.

Vu l'importance des barrages et les contraintes qui ont accompagné leur conception, leur construction et leur fonctionnement, nous allons, dans un second temps, à partir des données mises à notre disposition par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (A.N.B.T), faire le point sur les caractéristiques hydrotechniques caractérisant la variété des 25 barrages en exploitation.

1. CARACTERISATION HYDROLOGIQUE DES BASSINS D'ALIMENTATION DES BARRAGES

1.1. Les superficies des bassins

La superficie d'un bassin, base de tous les calculs hydrologiques, est une dimension importante à connaître au vu de l'importance de l'aire drainée contrôlée par chacun des barrages. La répartition par classes et le rangement par ordre croissant de la superficie des 25 bassins étudiés sont donnés dans les figures 37 et 38.

La taille des bassins contrôlés par les barrages varie de 39 km² pour le plus petit bassin de l'oued El Agrem (Côtiers de Jijel) à 7725 km² pour le grand bassin de Béni Haroun (oued Kébir-Rhumel). La superficie moyenne est de l'ordre de 1009 km² et 44 % des bassins ont une superficie inférieure à 500 km².

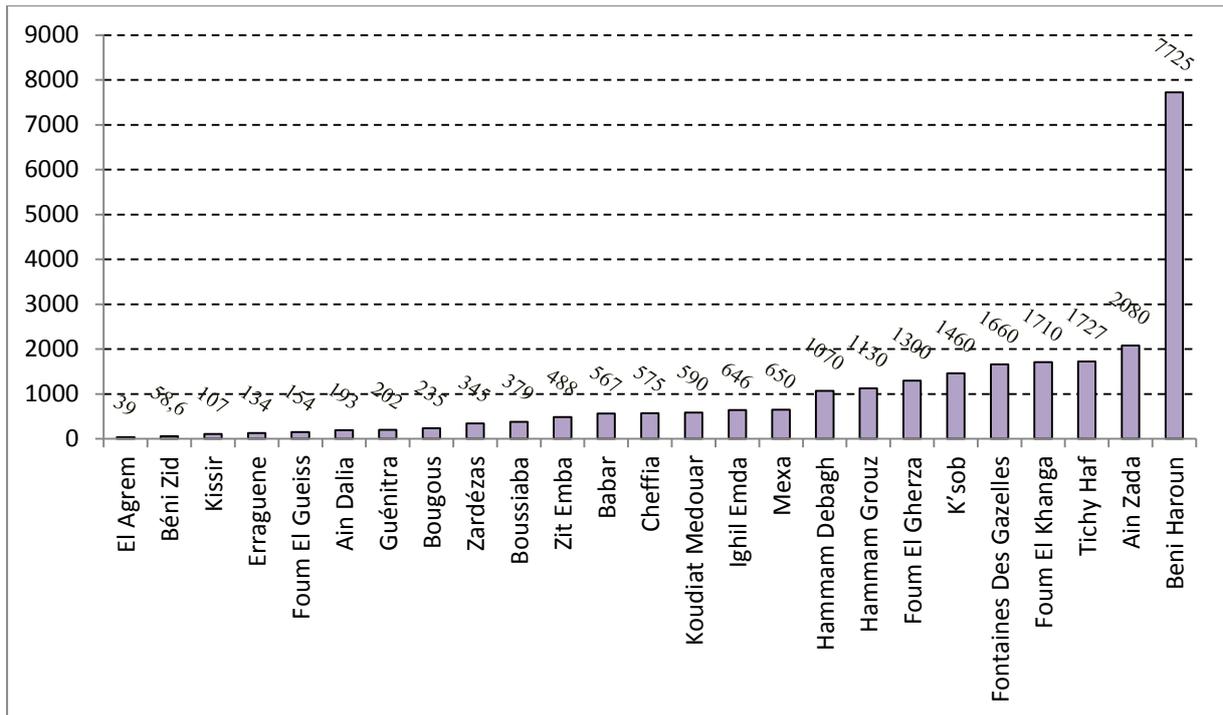


Figure 37 : Rangement par ordre croissant des superficies des bassins de 25 barrages de l'Est algérien

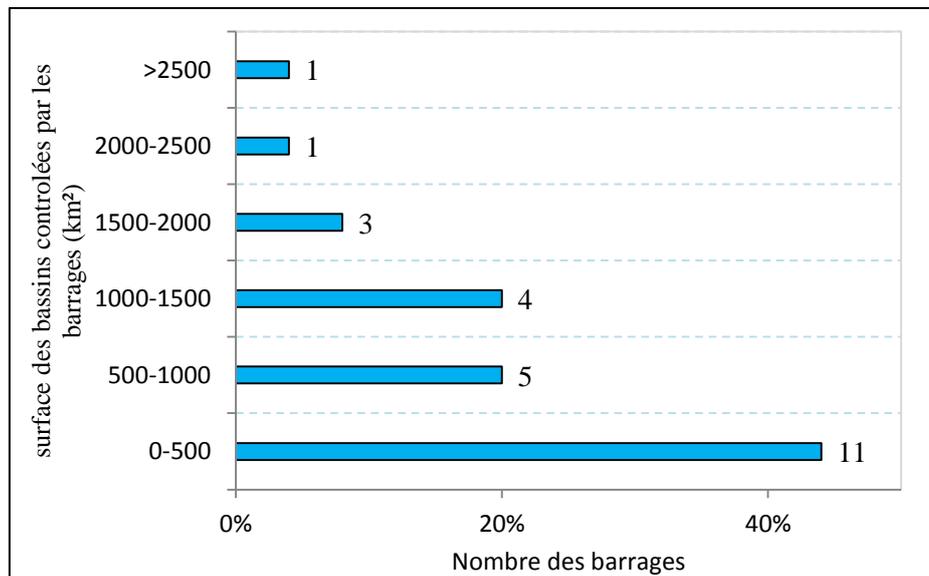


Figure 38 : Répartition par classes de superficies des bassins aux barrages

1.2. Les pentes des bassins

Les pentes déterminent la vitesse d'écoulement et donc en partie l'érosion et l'apport sédimentaire (Qadem, 2015). En combinaison avec d'autres éléments physiques tels que la géologie, l'hydrogéologie, la pédologie et le climat (les pluies en particulier), les pentes conditionnent la stabilité des formes de reliefs vis-à-vis des agents d'érosion de tous types, la

hiérarchie du réseau hydrographique, l'écoulement des eaux ruisselées ainsi que les implantations humaines et les aménagements.

La carte des pentes établie sur la base de Modèle Numérique de Terrain (MNT à maille de 100 m, coordonnées métriques Lambert Nord Algérie, traité par **Rezak, 2014**), a permis de définir cinq classes de pentes (exprimées en pourcentage), représentées par des plages de couleur (figure 39).

D'une manière générale, les pentes les plus abruptes, très fortes à fortes, se concentrent dans les bassins septentrionaux (la prédominance des classes des pentes de 9 à 14 %, 15 à 25 % et supérieure à 25 %). Le domaine des Hautes Plaines se démarque par des pentes globalement assez douces (prédominance de la classe de 0 à 4 %) avec l'existence de la classe supérieure à 25 % dans les monts du Hodna. L'Atlas saharien est fortement escarpé dans la zone septentrionale (les piémonts Nord et Sud : bassin de Foum El Gueiss, la partie sud du bassin de Koudiat Medouar, le bassin de Foum El Gherza, le bassin de Fontaines des Gazelles et la partie nord-ouest du bassin de Babar), alors qu'il présente des pentes faibles (entre 0 et 4 %) dans sa partie méridionale.

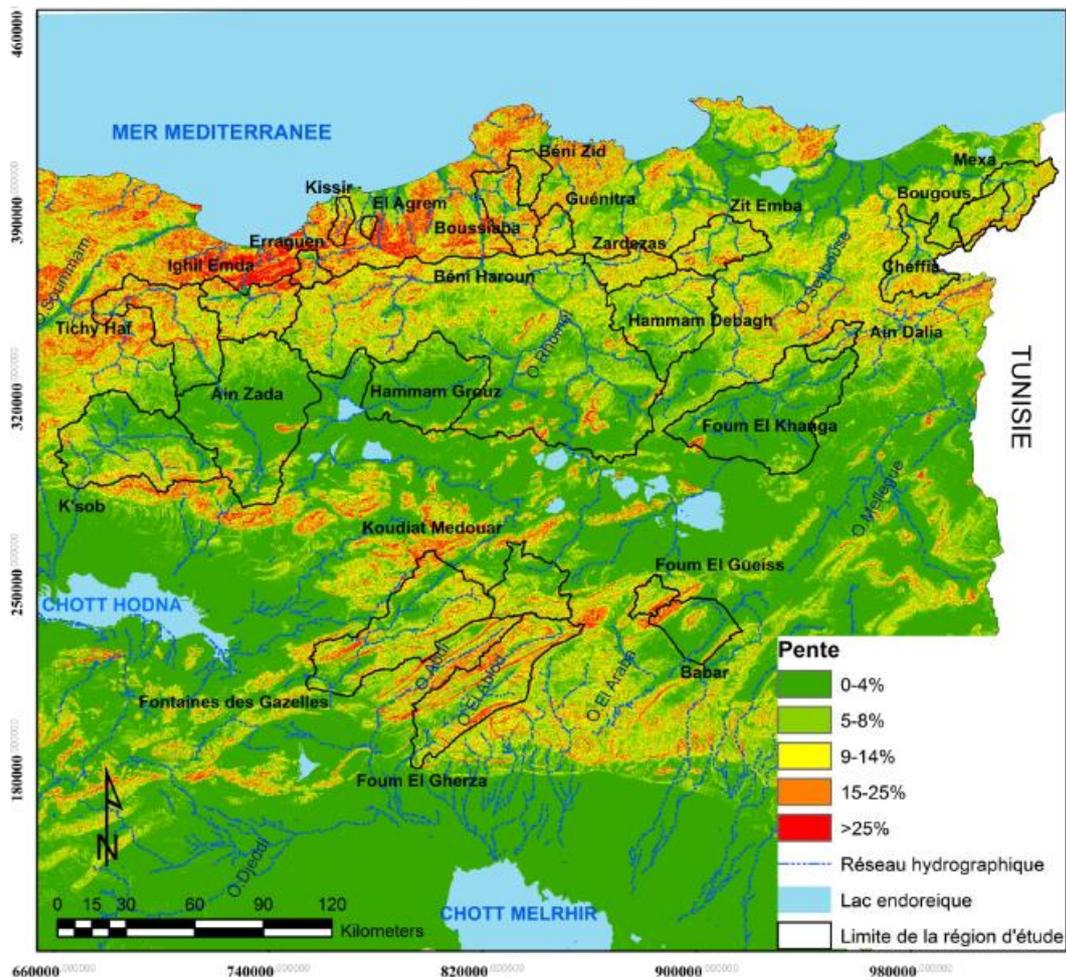


Figure 39 : Carte des pentes de la zone d'étude (Est algérien)

1.3. L'écoulement moyen annuel

La connaissance de l'écoulement est indéniablement d'une grande importance pour la mobilisation et la gestion des ressources en eau à l'échelle d'un bassin. Sa variation est régie par une multitude de facteurs à caractère climatique (les précipitations, et l'évapotranspiration) et physique (les pentes, les caractéristiques des sols et la végétation).

En Algérie, l'écoulement moyen annuel croît d'Ouest en Est et décroît du Nord au Sud en concordance totale avec la répartition spatiale des pluies moyennes annuelles. Les travaux de recherches universitaires se sont multipliés autour de ce facteur, parmi eux nous citons les travaux de **Pardé (1946), Mebarki (1982, 2005), Ghachi (1986), Kabouya (1990), Taibi (1993), Bourouba (1996), Meddi et al (2000), Touaibia et al (2001), Laborde et al (2003), ANRH (2003), Mebarki et al (2013).**

La cartographie de l'écoulement moyen annuel s'est basée sur le modèle global à réservoirs dit LOIEAU, dérivé de GR2M (**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**).

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 5 mm au Sud et 500 mm au Nord (figure 40) :

- la courbe maximale de 500 mm est légèrement représentée dans le bassin d'El Agrem, bassin d'Erraguene, bassin de Kissir et bassin d'Ighil Emda ;
- la courbe de 200 mm couvre tout le bassin de Boussiaba et le bassin de Béni Zid, une bonne partie des bassins de Mexa et de Bougous, ainsi que la partie Nord des bassins de Béni Haroun, de Kissir, d'Ighil Emda, d'El Agrem et la partie Sud des bassins de Cheffia et d'Erraguene ;
- au-dessous de la courbe de 200 mm, les zones d'écoulement sont organisées en bandes sensiblement latitudinales, cernées par les courbes 100, 50, 20 jusqu'à 5 mm dans la partie Sud des bassins de Foum el Gherza et de Fontaines des Gazelles.

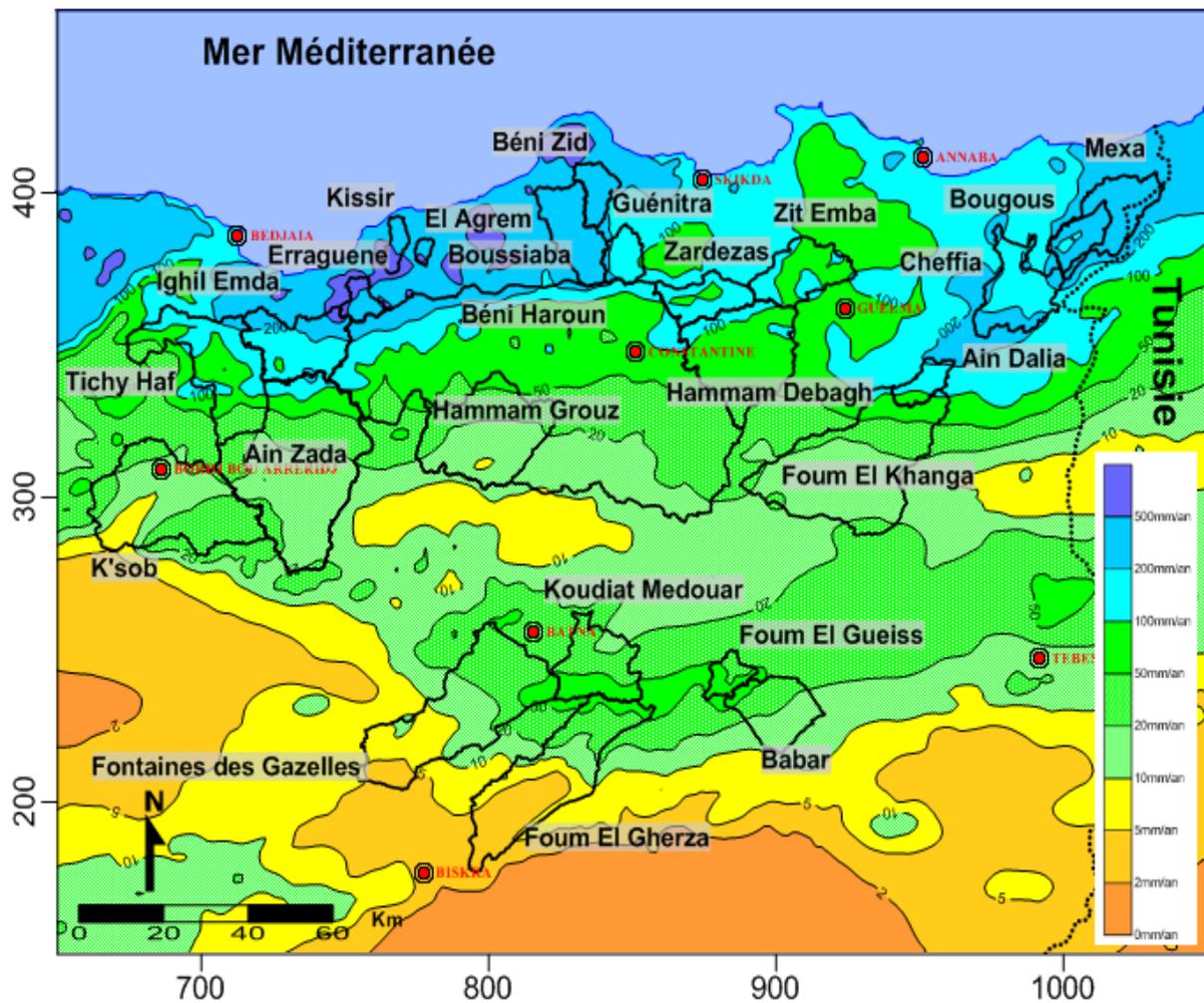


Figure 40 : Carte des écoulements moyens annuels de l'Est algérien et répartition des bassins aux barrages (apports simulés à l'aide de LOIEAU, période : 1965/66 - 1994/95, « étude de synthèse ANRH, 2003)

L'estimation de l'écoulement moyen annuel écoulé est établie dans les limites de chaque bassin (figure 41). Après le calcul du volume écoulé à l'aide du logiciel SURFER (Grid : Blank puis calcul du volume écoulé Grid : Volume), il devient alors possible de convertir ce volume V en lame écoulée Ec ($E_c = \text{Volume écoulé dans le bassin} / \text{superficie du bassin}$).

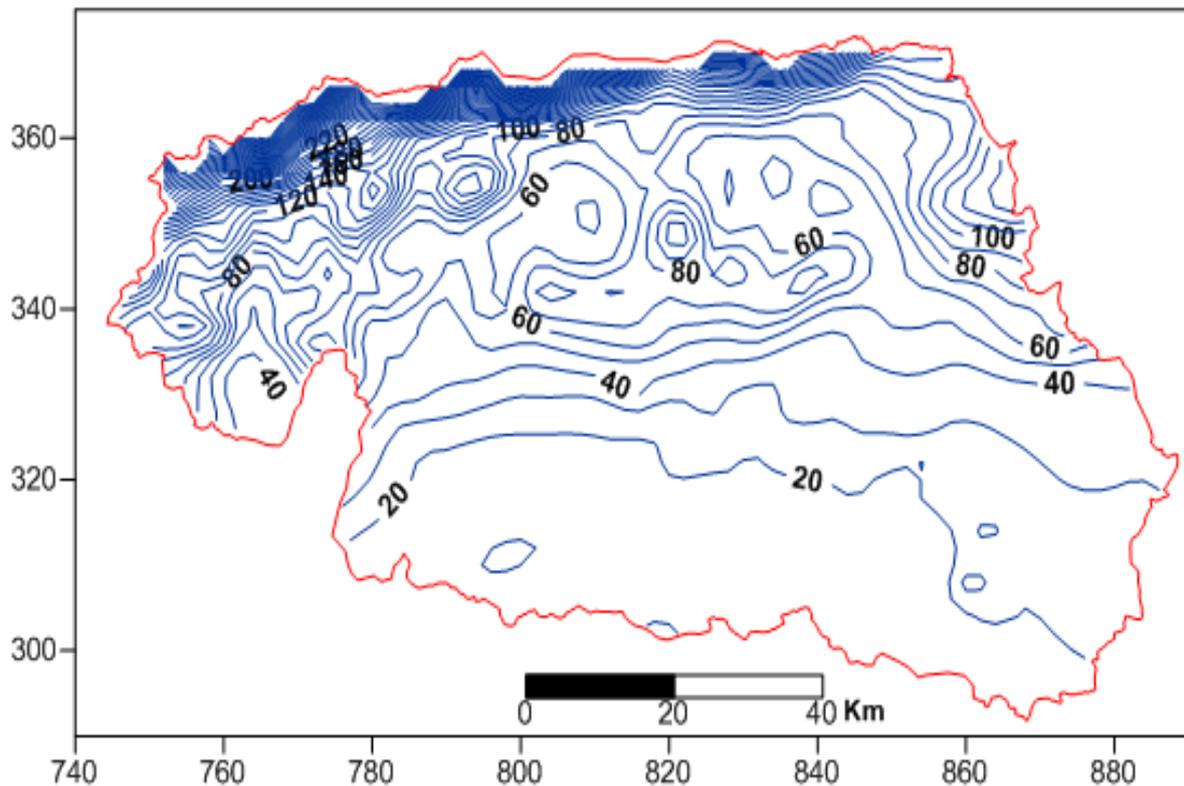


Figure 41 : Exemple de tracé cartographique sous Surfer des lignes d'iso-écoulement (en mm/an). Bassin du barrage Béni Haroun.

La figure 42 montre la forte variabilité spatiale des lames d'eau écoulées annuellement, à travers les 25 bassins d'alimentation. Les écoulements sont très forts dans les bassins situés au Nord (de 63 mm au bassin de Béni Haroun dans le Nord constantinois jusqu'à 501 mm au bassin d'Erraguene dans la petite kabylie). Les bassins des Hautes Plaines et de l'Atlas saharien sont marqués par des écoulements faibles, descendant jusqu'à 15 mm au bassin de Foug El Gherza (piémont Sud de l'Atlas saharien).

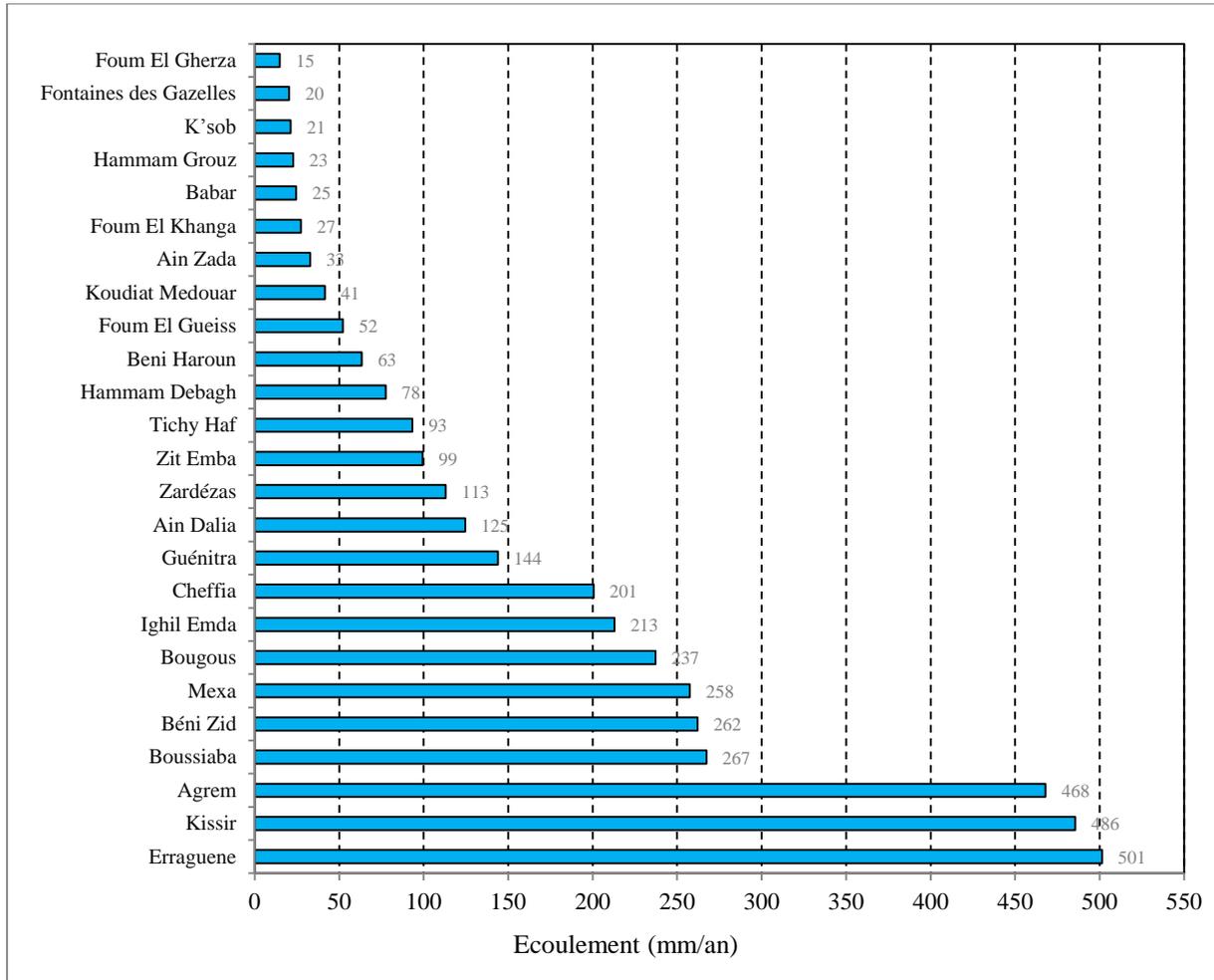


Figure 42 : Rangement par ordre croissant des lames d'eau écoulée dans 25 bassins (modèle LOIEAU : période 1965/66 à 1994/95)

L'estimation des ressources en eau de surface des 25 bassins montre l'intérêt de la cartographie automatique. Les bassins étudiés recèlent un potentiel annuel total en eaux de surface de l'ordre de 2 milliards de m³. Aussi, la comparaison des apports en eau de surface calculés à l'aide du modèle LOIEAU avec ceux obtenus par les études d'avant-projet détaillé (APD) des barrages, montre que des écarts importants sont constatés pour certains barrages, pouvant aller du simple au double comme dans le cas du barrage K'sob dans le Hodna, région subaride aux écoulements aléatoires où l'incertitude dans les mesures hydrologiques est indéniable (figure 43). L'écart relatif entre apports LOIEAU et apports APD varie de - 42.49 hm³/an pour le barrage de Ighil Emda à 63.75 hm³/an pour le barrage de Mexa.

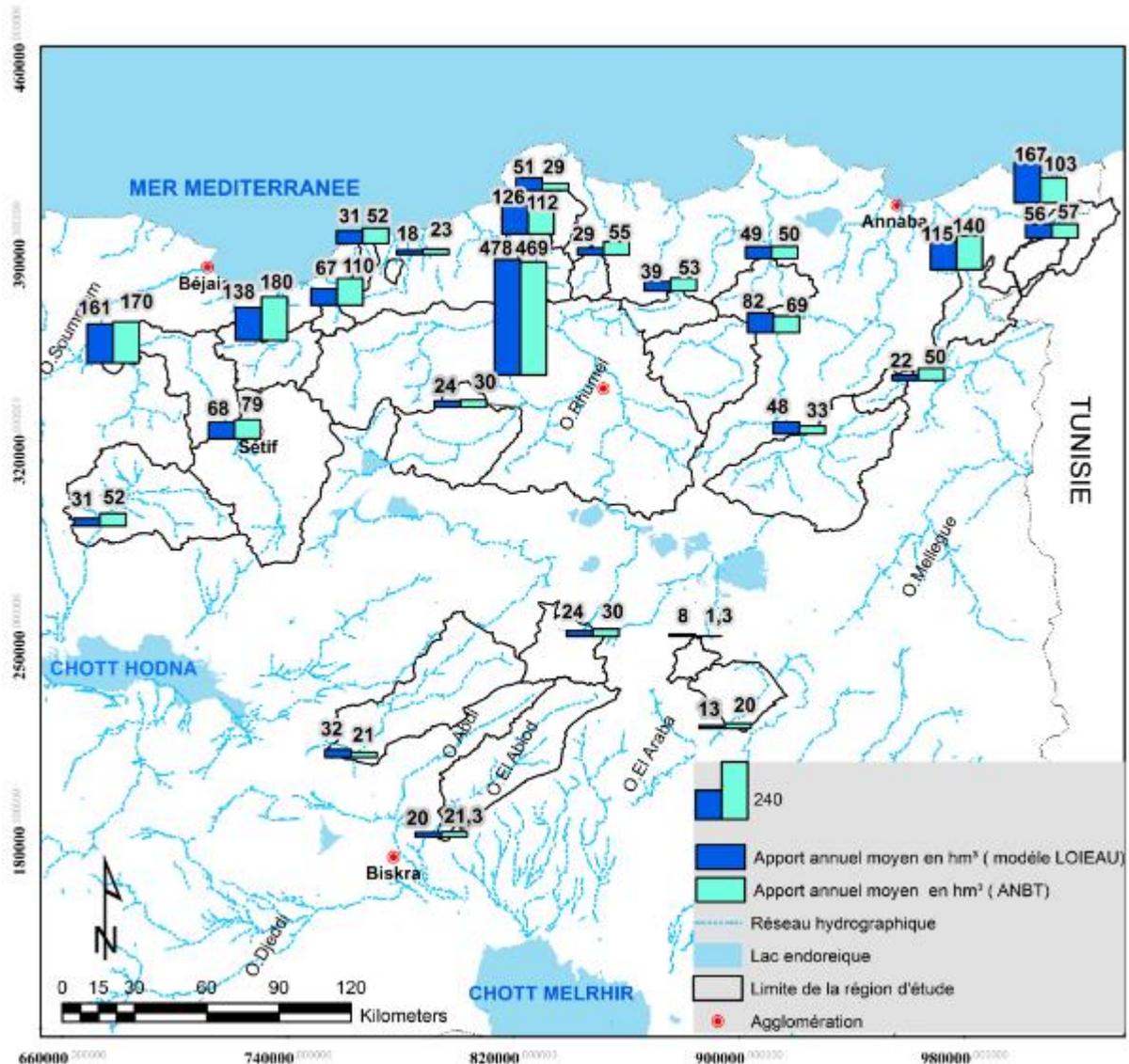


Figure 43 : Répartition comparative des apports simulés aux barrages (ANRH) et des apports calculés par les études d'APD (ANBT).

1.4. Analyse descriptive des apports simulés par la variable centrée réduite

Les apports moyens annuels ont été calculés à partir des données mensuelles puis les indices centrés réduits ont été calculés de 1965/1966 à 2007/2008.

Les indices centrés réduits ont permis ainsi de dégager différentes périodes humides ($V_{cr} \geq 0$) et sèches ($V_{cr} < 0$) à l'échelle de chaque bassin (figure 44) :

Les bassins Ain Zada, K'sob et Koudiat Medouar : l'étude de la variabilité interannuelle des apports des bassins met en évidence trois périodes organisées d'une façon similaire, avec un décalage pour quelques années. La première période concerne les années 1965/66 et 1976/77 pour Koudiat Medouar et K'sob, les années 1965/66 et 1975/76 pour Ain Zada. Elle est marquée par une alternance d'années humides et sèches. La deuxième période a été déficitaire, avec cependant quelques années excédentaires, elle commence en 1977/78 pour Koudiat Medouar et K'sob, et en 1976/77 pour Ain Zada, elle se termine en 2001/02 pour les

trois bassins. La troisième phase humide concerne les années entre 2002/03 et 2007/08 pour les trois bassins.

Le bassin Béni Haroun : trois phases principales sont mises en évidence : une phase de 1965/66 à 1972/73 qui se distingue par une alternance d'années humides et sèches ; une phase de 1973/74 à 2001/02, indiquant une phase sèche qui est interrompue par quelques années humides ; une phase humide concernant les années entre 2002/03 et 2007/08, interrompue par deux années sèches (2006/07 et 2007/08).

Le bassin Kissir : il en ressort une phase plus sèche entre 1965/66 et 1971/72, interrompue par l'année humide de 1967/68. La deuxième phase 1972/73 – 2001/02 est caractérisée par une alternance d'années sèches et d'années humides. L'année 2002/03 semble être le début d'une phase humide.

Le bassin Hammam grouz se caractérise par deux phases : la première phase concerne les années entre 1965/66 et 2001/02, elle a été fortement déficitaire, avec cependant huit années excédentaires ; la deuxième phase concerne les années entre 2002/03 et 2007/08, indiquant une phase humide qui est interrompue par deux années sèches (2006/07 et 2007/08).

Le bassin Béni Zid se distingue par trois périodes : une période humide est visible entre les années 1965/66 et 1986/87, avec cependant quelques années sèches; une période sèche concerne les années entre 1987/88 et 2001/02, cette période est interrompue par trois années excédentaires (1990/91, 1995/96 et 1998/99) ; enfin, une période humide concerne les années entre 2002/03 et 2007/08, avec la présence de deux années déficitaires (2006/07 et 2007/08).

Le bassin Ain Dalia a connu trois phases : une phase humide comprise entre 1965/66 et 1972/73 (seules les années 1965/66, 1966/67 et 1968/1969 sont sèches) ; une phase sèche concerne les années entre 1973/74 et 2001/02, avec quelques années excédentaires ; une dernière phase humide commence en 2002/03 et se termine en 2007/08 (seules les deux années sont sèches 2006/07 et 2007/08).

Le bassin El Agrem se caractérise par la succession de quatre phases. Une courte phase de 1965/66 à 1971/72, indiquant une phase sèche (seule l'année 1967/68 est humide). Une phase humide débutant en 1972/73 et s'arrêtant en 1986/87, elle est interrompue par cinq années déficitaires. Une troisième phase comprise entre les années 1987/88 et 2001/02 marque le retour des années déficitaires. Enfin, une quatrième phase qui montre une augmentation remarquable des apports (seules les deux années 2003/04 et 2006/07 sont sèches).

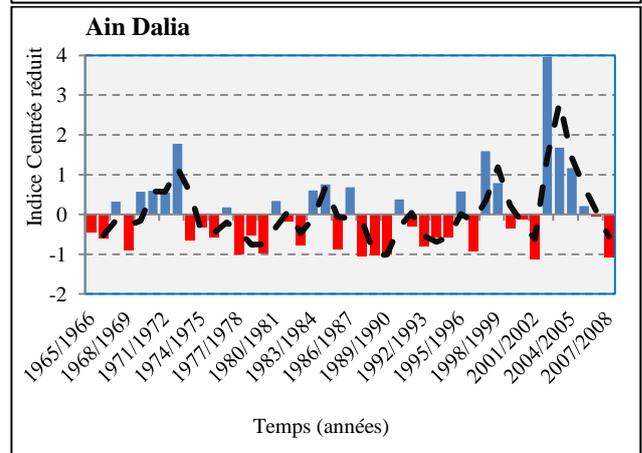
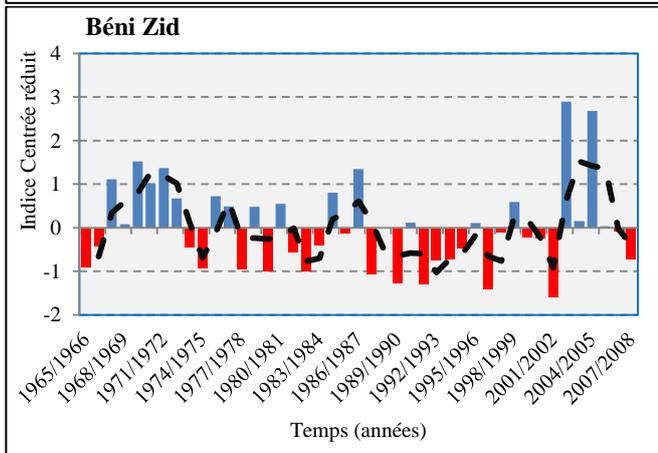
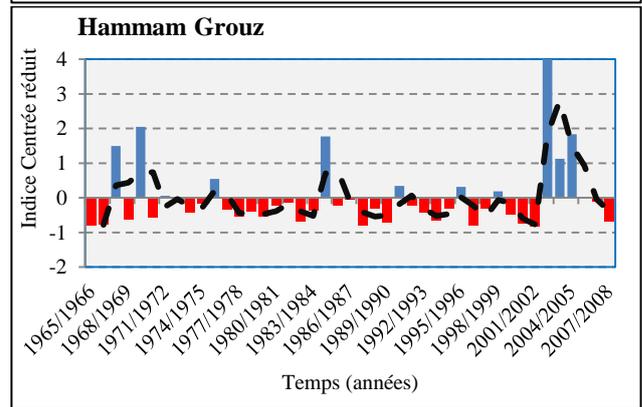
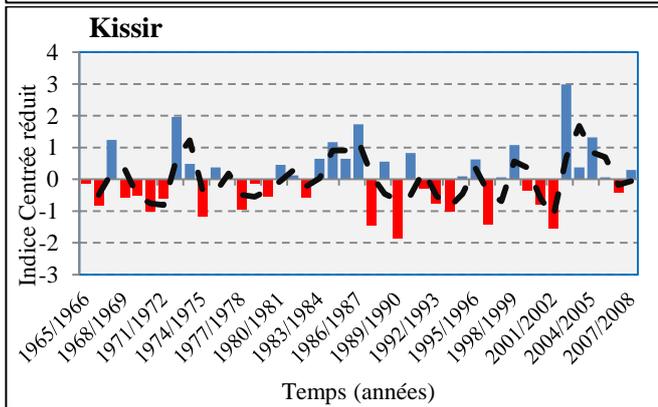
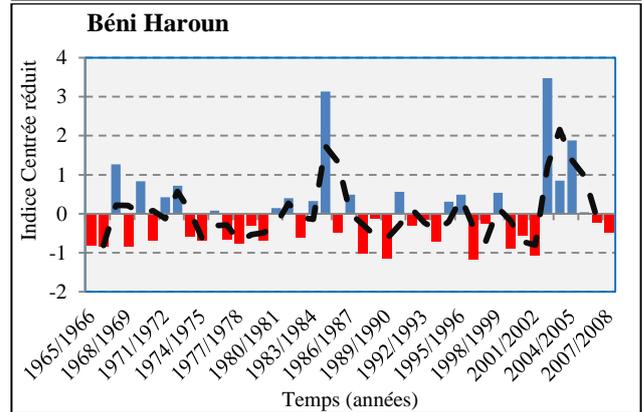
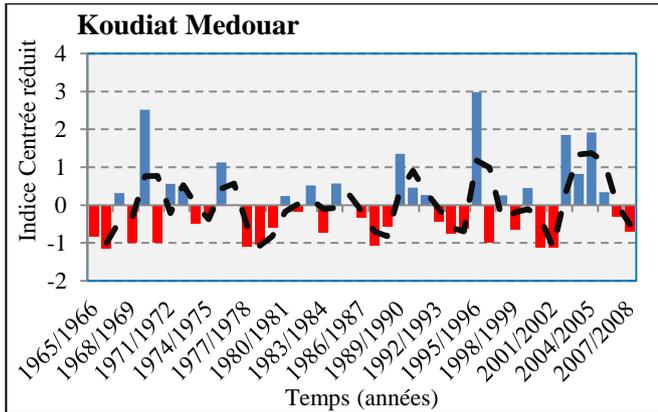
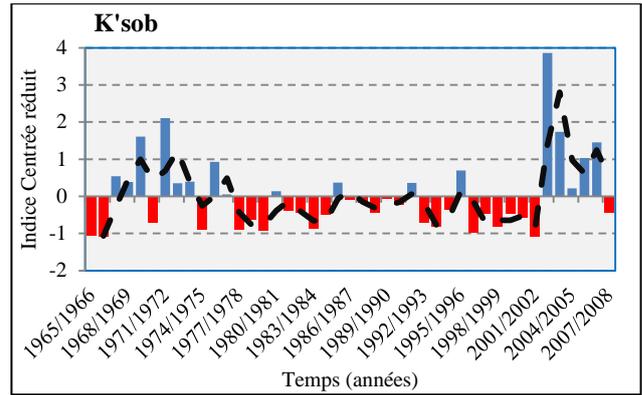
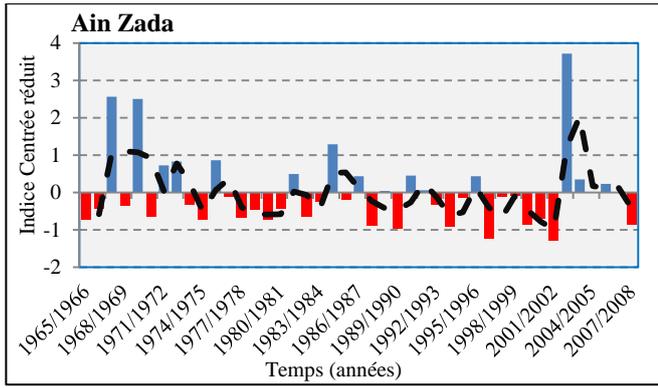
Le bassin Foum El Gueiss se caractérise par une première période comprise entre 1965/66 et 1975/76, marquée par une alternance d'années excédentaires et déficitaires. Une deuxième période extrêmement sèche débutant en 1976/77 et s'arrêtant en 1988/89 (seules les deux années 1980/81 et 1981/82 sont humides). Une troisième période qui montre un retour de l'alternance d'années excédentaires et déficitaires apparaît entre les années 1989/90 et 2007/08.

Le bassin Zardezas se caractérise par une phase sèche entre 1965/66 et 1979/80 (la majorité des indices sont négatifs), une phase de 1980/81 à 2001/02 marquée par l'alternance d'années humides et sèches et une phase humide entre 2002/03 et 2007/08.

Le bassin Bougous se distingue par trois périodes distinctes : une période humide commençant à partir des années 1965 et s'arrêtant au cours des années 1979. Une période à tendance sèche commence par l'année 1979/88 et va jusqu'à l'année 1989/90. Enfin, une période d'alternance d'années humides et sèches a été observée entre les années 1990/91 et 2007/08.

Le bassin Cheffia : une phase à tendance sèche apparaît entre 1965/66 -1994/95 et une phase d'alternance d'années excédentaires et déficitaires est constatée à partir de 1995/96.

Chapitre 2 : Caractérisation hydrologique et hydrotechnique des barrages (bassins d'alimentation, lacs de retenue, digues et ouvrages annexes)



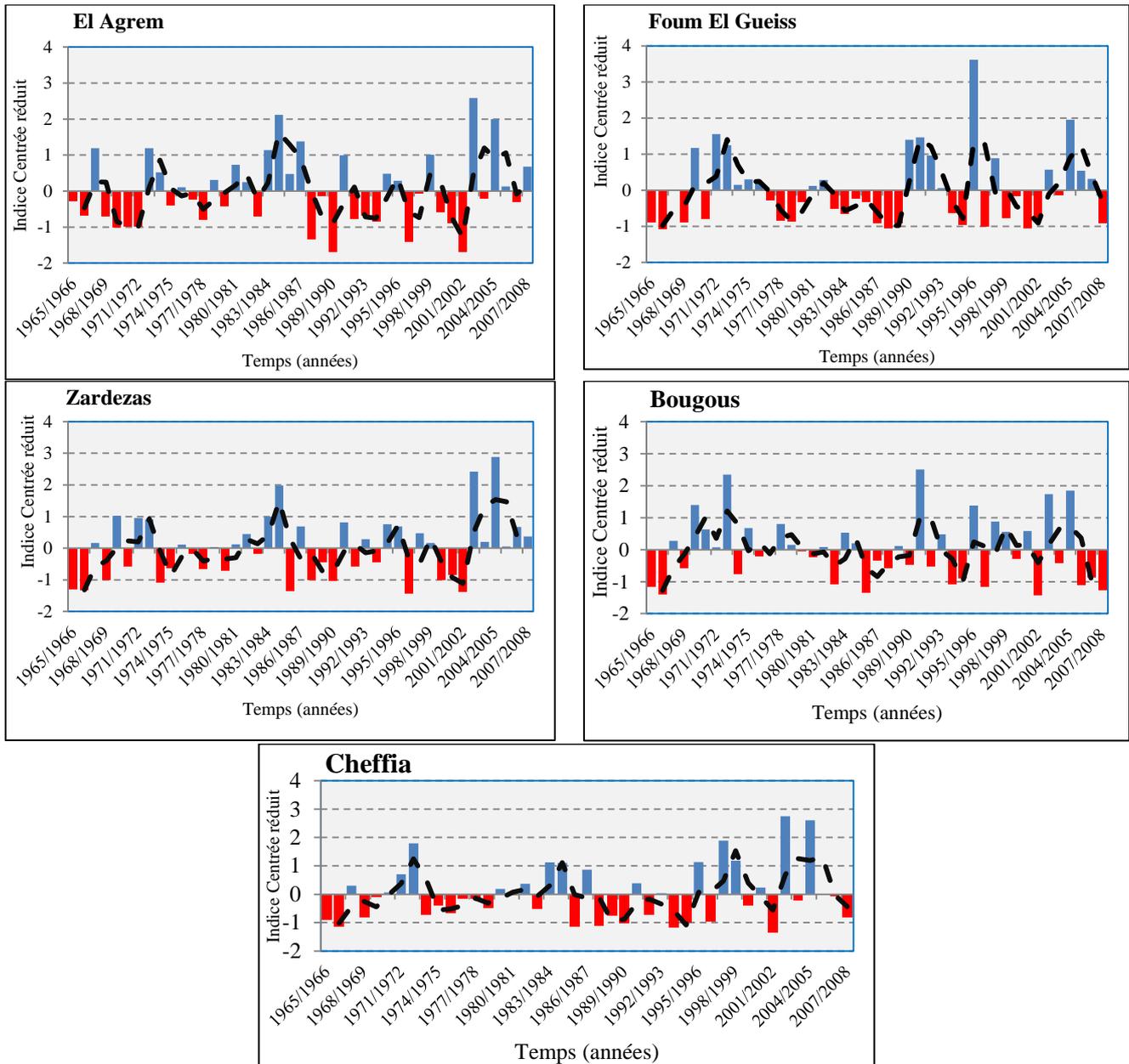


Figure 44 : Indices centrés réduits des apports moyens simulés à l'échelle des bassins aux barrages

A partir du tableau de synthèse des centrées réduites des apports simulés (tableau 4), on notera que la période de 2002/03-2007/08 est humide pour tous les bassins, à l'exception des bassins Fougou El Gueiss, Bougous et Cheffia. Concernant la période sèche, plusieurs périodes ont été identifiées : la période 1977/78-2001/02 (les bassins K'sob et Koudiat Medouar), la période 1973/74-2001/02 (les bassins Béni Haroun et Ain Dalia), la période 1965/66 -1971/72 (les bassins Kissir et El Agrem), la période 1976/77-2001/02 (bassin de Ain Zada), la période 1965/66 - 2001/02 (bassin de Hammam Grouz), la période 1976/77-1988/89 (bassin de Fougou El Gueiss), la période 1965/66-1979/80 (bassin de Zardezas), la période 1979/88-1989/90 (bassin Bougous) et la période 1965/66-1994/95 (bassin de Cheffia).

L'alternance des années humides et sèches est visible au cours des périodes 1965/66-1975/76 (bassins Ain Zada, K'sob, Koudiat Medouar et Fom El Gueiss), 1965/66-1972/73 (bassin de Béni Haroun), 1972/73-2001/02 (bassin de Kissir), 1980/81-2001/02 (bassin de Zardezas), 1990/91-2007/08 (bassin de Bougous), et enfin 1995/96-2007/08 (bassin de Cheffia) .

Tableau 4 : synthèse de la variabilité des apports simulés des bassins d'alimentation (Période commune : 1965/66-2007/08)

Barrage	Phase humide	Phase sèche	Phase d'alternance
Ain Zada	2002/03-2007/08	1976/77-2001/02	1965/66-1975/76
K'sob	2002/03-2007/08	1977/78-2001/02	1965/66-1976/77
Koudita Medouar	2002/03-2007/08	1977/78-2001/02	1965/66-1976/77
Béni Haroun	2002/03-2007/08	1973/74-2001/02	1965/66-1972/73
Kissir	2002/03-2007/08	1965/66 -1971/72	1972/73 – 2001/02
Hammam Grouz	2002/03 - 2007/08	1965/66 - 2001/02	/
Béni Zid	1965/66 - 1986/87	1987/88 -2001/02	/
	2002/03-2007/08		
Ain Dalia	1965/66 -1972/73	1973/74 - 2001/02	/
	2002/03-2007/08		
El Agrem	1972/73 - 1986/87	1965/66 - 1971/72	/
	2002/03-2007/08	1987/88 - 2001/02	
Fom El Gueiss	/	1976/77 - 1988/89	1965/66 -1975/76
			1989/90 - 2007/08
Zardezas	2002/03-2007/08	1965/66 - 1979/80	1980/81 -2001/02
Bougous	1965/66 – 1979/80	1980/81 - 1989/90	1990/91 -2007/08
Cheffia	/	1965/66 - 1994/95	1995/96-2007/08

2. CARACTERISATION HYDRO-TECHNIQUE : DIGUES, OUVRAGES ANNEXES ET LACS DE RETENUE

2.1. Conception et dimensionnement des digues des barrages

La digue est une section souvent relativement épaisse, dont la propre masse suffit à résister à la pression exercée par l'eau et sa forme est dans la plupart des cas simple (triangle-rectangle).

Avant de présenter les caractéristiques hydrotechniques des digues, nous précisons quelques définitions qui permettent de comprendre ce que nous entendons par les termes "barrage", "digue ou barrage principal" et "typologie des digues".

2.1.1 Définition et typologie des barrages

On peut définir un barrage comme un ouvrage artificiel qui s'oppose au cours naturel de l'eau afin d'en réguler le débit et/ou de créer un stock d'eau exploitable, appelé retenue.

Il existe différents types de barrages. Le choix dépend de décisions techniques et pratiques qui considèrent des critères comme le site d'implantation et les matériaux disponibles ou les

fonctions que l'ouvrage devra assurer (Larouzee, 2015). Ces types sont caractérisés par leurs techniques de construction, réparties en deux catégories principales : les barrages souples, en terre ou en enrochement (ou les deux à la fois) et les barrages rigides, en béton ou en maçonnerie (Durand et al, 1998 ; Royet, 2006 ; Djemili, 2006 ; Boleve, 2009 ; Cunat, 2012 ; Derdous, 2016 ; Belhaddad, 2018).

a/ Les barrages souples (en remblai)

Les barrages en remblai sont constitués d'un matériau meuble, qu'il soit très fin (argile) ou très grossier (enrochement). Les différents types de barrage en remblai proviennent des types de matériaux utilisés et de la méthode employée pour l'étanchéité. Ces différents types se regroupent en deux catégories : les barrages en terre et les barrages en enrochement.

- Il existe deux schémas principaux de structure de barrage en terre :
 - les barrages homogènes, dont le massif est composé d'une seule catégorie de matériau, ces barrages sont le plus souvent réalisés en argile dont les caractéristiques tant hydrauliques que mécaniques permettent en toute sécurité d'adopter des pentes de talus de $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{2,5}$ en amont et en aval, moyennant le respect des spécifications de compactage. Ce type de barrages est bien adapté aux sites ayant une fondation déformable car ils peuvent accepter des tassements de la fondation, par contre ils ne supportent pas bien les variations rapides du plan d'eau et ne supportent pas ou très peu la submersion sur la crête (figure 45) ;
 - les barrages à zones, constitués d'un noyau étanche au centre et de deux recharges en matériau plus grossier dont le rôle essentiel est d'assurer la stabilité de l'ensemble du massif, ce massif est donc divisé en plusieurs zones, chacune étant constituée d'un matériau différent, en fonction du rôle qu'elle joue. L'étanchéité est assurée par un noyau d'argile très imperméable, qui peut être central ou incliné vers l'amont. Le plus souvent il se poursuit en fondation pour former une tranchée étanche. Le noyau est stabilisé en amont et en aval par une zone en matériau plus perméable (figure 46) .

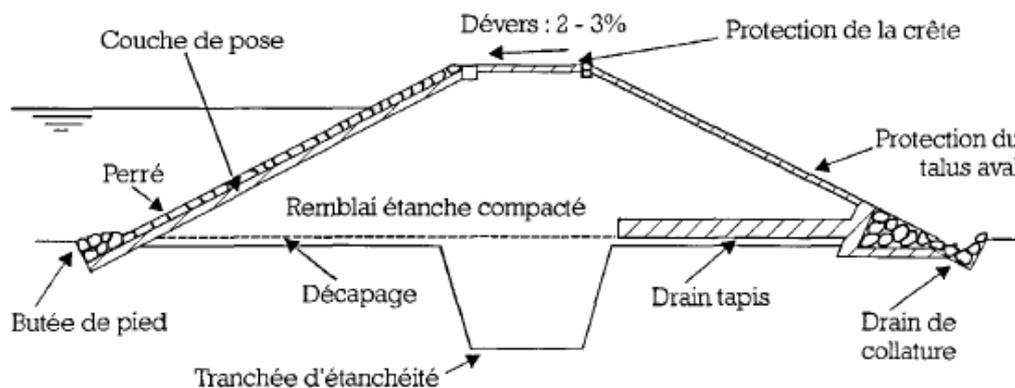


Figure 45 : Exemple de profil de petit barrage en remblai étanche homogène (Durand, 1998).

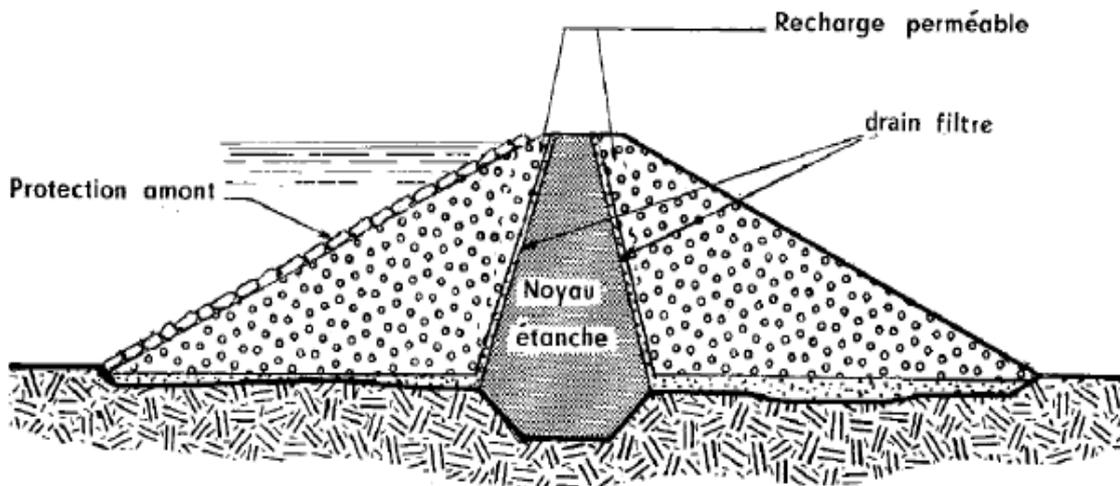


Figure 46 : Exemple de profil d'un barrage à zones (Lepetit, 2002)

- Pour les barrages en enrochement, l'étanchéité est obtenue soit par un noyau central, soit par un masque amont. Morphologiquement, un barrage en enrochement est un prisme de cailloux de section trapézoïdale. C'est un ouvrage-poids car la résistance à la poussée de l'eau est assurée par le poids du massif. De facture rustique, il supporte assez bien les tassements et ne soumet sa fondation qu'à des pressions modérées. Les types de barrages en enrochement les plus courants sont schématisés sur les figures 47 et 48 :
 - un barrage dont le masque amont est en béton ou en géomembrane ;
 - un barrage à noyau interne en béton bitumineux cyclopéen; un noyau en argile est également envisageable.

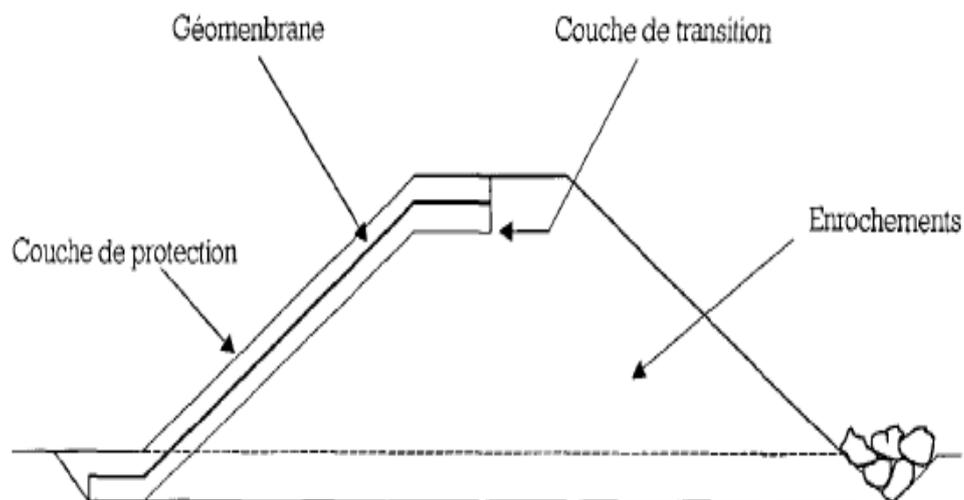


Figure 47 : Barrage en enrochements à masque amont (Durand, 1998).

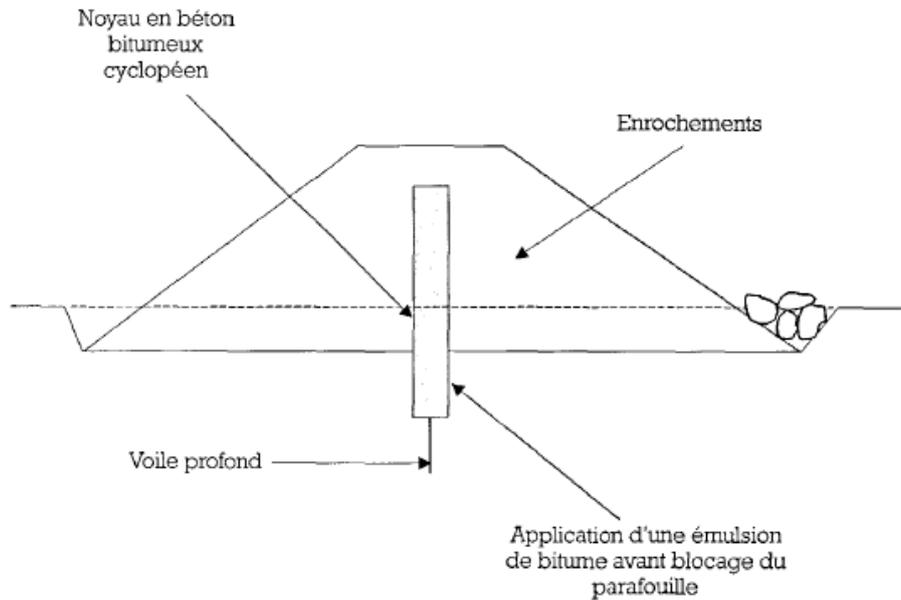


Figure 48 : Barrage en enrochement à noyau interne en béton bitumineux cyclopéen (Durand, 1998).

b / Les barrages rigides

Les barrages rigides en béton ou en maçonnerie se regroupent principalement en trois types: les barrages poids, les barrages à contrefort et les barrages voûtes (figure 49).

- Les barrages poids en maçonnerie ou en béton assurent la stabilité vis à vis de la poussée hydrostatique et des sous pressions. Ils sont des ouvrages rigides construits sur un substratum rocheux (calcaire par exemple) et leur conception est aussi conditionnée par la qualité des fondations. Les barrages poids en béton sont réalisés soit en béton conventionnel vibré, soit en béton compacté au rouleau (BCR).
- Les barrages à contrefort ou multivoûtes sont constitués d'un voile d'étanchéité en béton armé, souvent incliné vers l'aval, qui s'appuie sur des contreforts de forme triangulaire qui assurent la stabilité. Ce sont des ouvrages qui nécessitent de faibles volumes de béton, par contre les coffrages doivent être réalisés avec soin. Comme pour les barrages poids, la fondation doit être de bonne qualité et traitée au besoin.
- Les barrages voûtes sont à réserver à des vallées rocheuses étroites, avec des fondations présentant de bonnes qualités mécaniques, moyennant quoi ils peuvent alors constituer des solutions relativement économiques par rapport à des barrages poids par exemple. Cependant, ils sont très rarement utilisés pour de petites hauteurs de retenue.

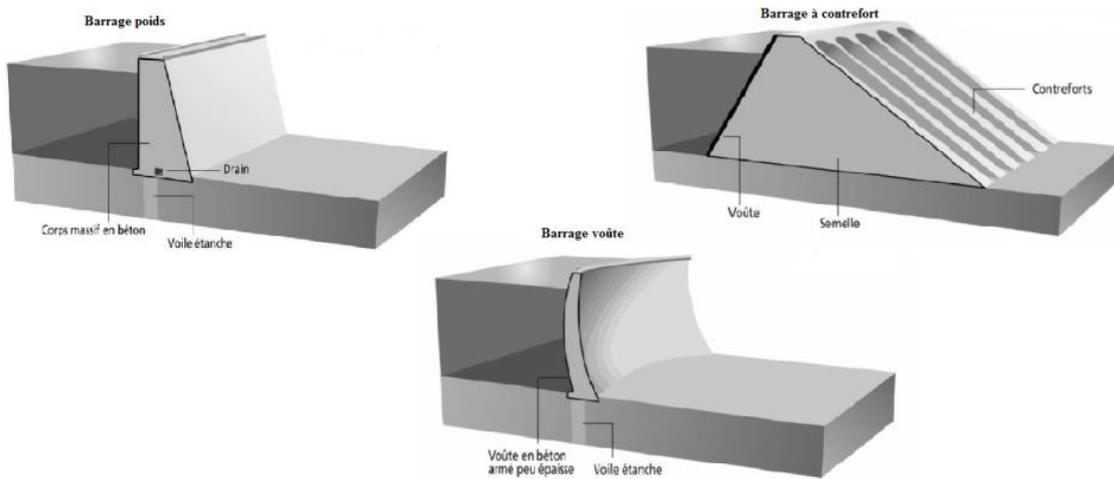


Figure 49 : Les trois principaux types de barrages rigides (Derdous, 2016)

2.1.2 Répartition des barrages de l'Est algérien selon la nature de leur digue

Ils se répartissent selon la nature de leur digue principale, en deux grands types comme indiqué sur la figure 50 : 18 barrages souples (72 % du total de barrages en exploitation), répartis entre barrages en terre (15) et barrages en enrochement (3); 7 barrages rigides, en béton ou en maçonnerie (28 % du total), répartis entre barrages de type poids (5) et barrages à multivoûtes (2). Le caractère de dissymétrie de la répartition géographique des barrages selon la nature de leurs digues est illustré par la figure 51.

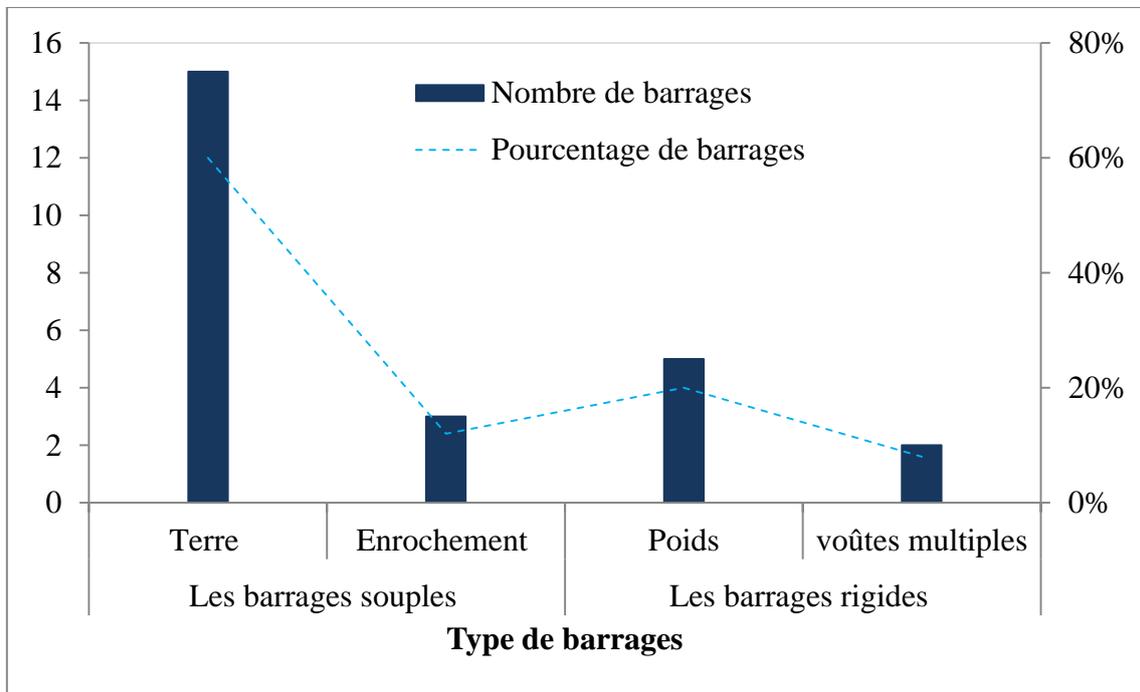


Figure 50 : Répartition des barrages de l'Est algérien selon la nature de leur digue.

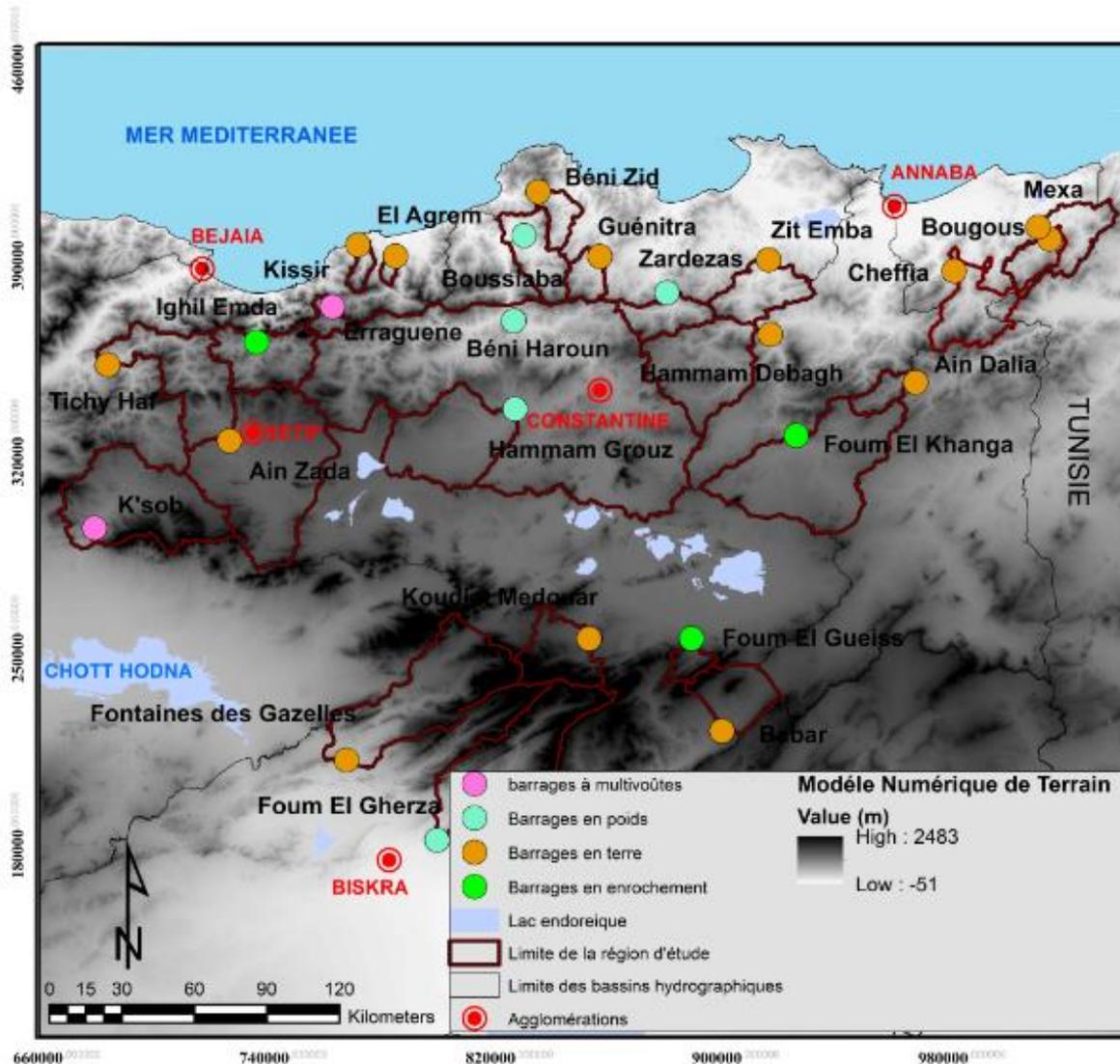


Figure 51 : Répartition des barrages de l'Est algérien selon la nature de leur digue.

a/ Les barrages en terre

Cette catégorie est souvent la mieux adaptée au contexte algérien ; elle regroupe 15 barrages décrits ci-après sur la base des fiches techniques fournies par l'ANBT, 2014 (excepté les deux barrages Bougous et Tichy Haf dont les informations sur les digues ne sont pas disponibles).

Le barrage de **Mexa** est constitué d'une digue en terre à noyau imperméable argileux, de forme conique. Il est décomposé de trois zones: un batardeau est composé d'une couche d'enrochement surmonté d'une couche d'alluvion ; le corps principal a été réalisé sur le batardeau existant, et une recharge située à l'aval du filtre à la côte de 45 m.

Le barrage principal de **Cheffia** est composé d'un noyau sablo-argileux incliné vers l'aval avec un talus en amont protégé par des enrochements séparés de la recharge, et un talus en aval protégé en partie supérieure par des enrochements et par une couche végétale en partie

inférieure (figure 52). Il possède une hauteur maximale au-dessus des fondations de 58 m et une hauteur au-dessus du lit de 51 m.

Le barrage de **Zit Emba**, sa digue est en terre hétérogène. La hauteur au-dessus des fondations et le terrain naturel est respectivement de 52 m et 47.5 m. Le corps du barrage, est construit par deux principaux matériaux : les argiles et les galets graviers.

Le barrage principal de **Guenitra** est protégé par une couche d'encroûtement de 1 m d'épaisseur ; les remblais de la digue sont constitués des matériaux suivants: silt argileux contenant des graviers épars et une fraction peu importante de sable (noyau central étanche) ; graves argileuses à une perméabilité très faible (les recharges aval et amont) et les graves dans le lit majeur.

Le barrage principal de **Beni Zid**, est composé d'un noyau central argileux, avec une hauteur maximale au-dessus des fondations de 52.6 m. Le corps du barrage est constitué de prismes de butée qui sont raccordés avec le noyau par l'intermédiaire de zones de transition en galets à remplissage sableux de 3 m d'épaisseur.

La digue du barrage **El Agrem** est constituée d'un massif en remblai compacté, la crête de l'ouvrage est arasée à la cote de 147 m soit 4 m au-dessus du niveau de la retenue normale et 1.5 m au-dessus du niveau de la crue de projet. La hauteur au-dessus de la fondation est de 70 m et la hauteur au-dessus de lit naturel est de 63 m.

Le barrage de **Kissir** est constitué d'un noyau central avec des matériaux alluvionnaires généralement fins, dont l'épaisseur peut atteindre 40 m. La longueur de l'ouvrage en crête est de 580 m, pour une hauteur maximale au-dessus de fondation de 55 m alors que la hauteur maximale hors sol est de 49.5 m.

La digue du barrage **Babar** est construite en terre à recharge aval en matériaux détritiques. Elle a une longueur en crête de 673 m. Le drainage du corps du barrage est assuré par un drain central vertical et 5 bretelles drainantes horizontales. Un voile d'injection assure l'étanchéité des fondations d'une longueur totale de 1143 m.

Le barrage de **Fontaines des Gazelles** est composé d'une digue en terre à noyau central argileux avec une hauteur maximale au-dessus de fondation de 52 m. La longueur et la largeur en crête sont respectivement de 370 m et 8.5 m.

Le barrage principal de **Koudiat Medouar** a une digue en terre compactée. Les remblais de la digue sont constitués des matériaux suivants : les argiles (noyau central étanche) ; les alluvions en terre (batardeau), compactés avec une pente amont de 1/3.5 et une pente aval de 1/3. La crête de la digue est arasée à la cote de 997 m soit 4.5 m au-dessus de la cote de retenue normale de 992.5 m. Une digue de col, en remblai, est située en rive gauche, d'une hauteur maximale de 25 m et d'une longueur d'environ de 1 km.

La digue du barrage d'**Ain Dalia**, construite d'un remblai en terre avec un noyau en silt argileux. Cet ouvrage a une longueur en crête de 300 m. La section non déversante a une crête d'une largeur de 9 m, arasée à la cote de 715.5 m (figure 52).

Le barrage principal de **Hammam Debagh** est en terre, avec un noyau central en argiles et des recharges en alluvions. La hauteur maximale au-dessus des fondations est de 95 m, la longueur et la largeur de l'ouvrage en crête sont respectivement de 430 m et de 10 m (figure 52).

Le barrage principal d'**Ain Zada** est composé de recharge en enrochement compacté supportant un noyau en argile incliné, les deux matériaux étant séparés par un filtre à deux zones. Le talus amont du remblai est protégé contre le batillage par un rip-rap. Le rideau d'injection a été exécuté le long de l'axe de la fondation du noyau d'argile et sur toute la longueur du barrage. L'ouvrage rectiligne a une longueur en crête de 688 m. La hauteur maximale au-dessus des fondations est de 74 m.

b/ Les barrages en enrochement

Le barrage hydroélectrique d'**Ighil Emda** est un ouvrage de type souple en enrochement (masque amont), en raison du terrain sur lequel il est fondé (schistes s'altérant superficiellement et ayant tendance au gonflement). L'inclinaison des talus amont et aval est respectivement de 1/1.6 et 1/1.5. Sur le parement amont, est appliqué un masque d'étanchéité en béton bitumineux, protégé par un revêtement en béton armé. Ce masque se prolonge sur les berges et en amont du barrage sous forme de tapis.

Le barrage de **Foum El Khanga** est en remblai compacté, avec un noyau central étanche constitués de matériaux silto-argileux. Les matériaux provenaient de deux dépôts bien distincts : la carrière du Kef El Bellel à 5 km du site et les terrassements de l'oued Cherf (plus particulièrement ceux de rive gauche). La hauteur au-dessus du fond de vallée est de 60 m et la longueur en crête de 397 m (figure 52).

La digue principale du barrage de **Foum El Gueiss** est en enrochement à masque amont en béton armé d'épaisseur de 0.2 m au sommet et de 0.36 m à la base. Le masque amont est drainé par une série de petites conduites en poterie noyées dans la maçonnerie cyclopéenne située immédiatement à l'aval du mur. Cet ouvrage possède un mur para-fouille en béton qui s'ancre dans le sol, jusqu'à atteindre les couches grés-marneuses plus ou moins imperméables. La hauteur maximale au-dessus des fondations est de 23 m et la longueur en crête est de 250 m.

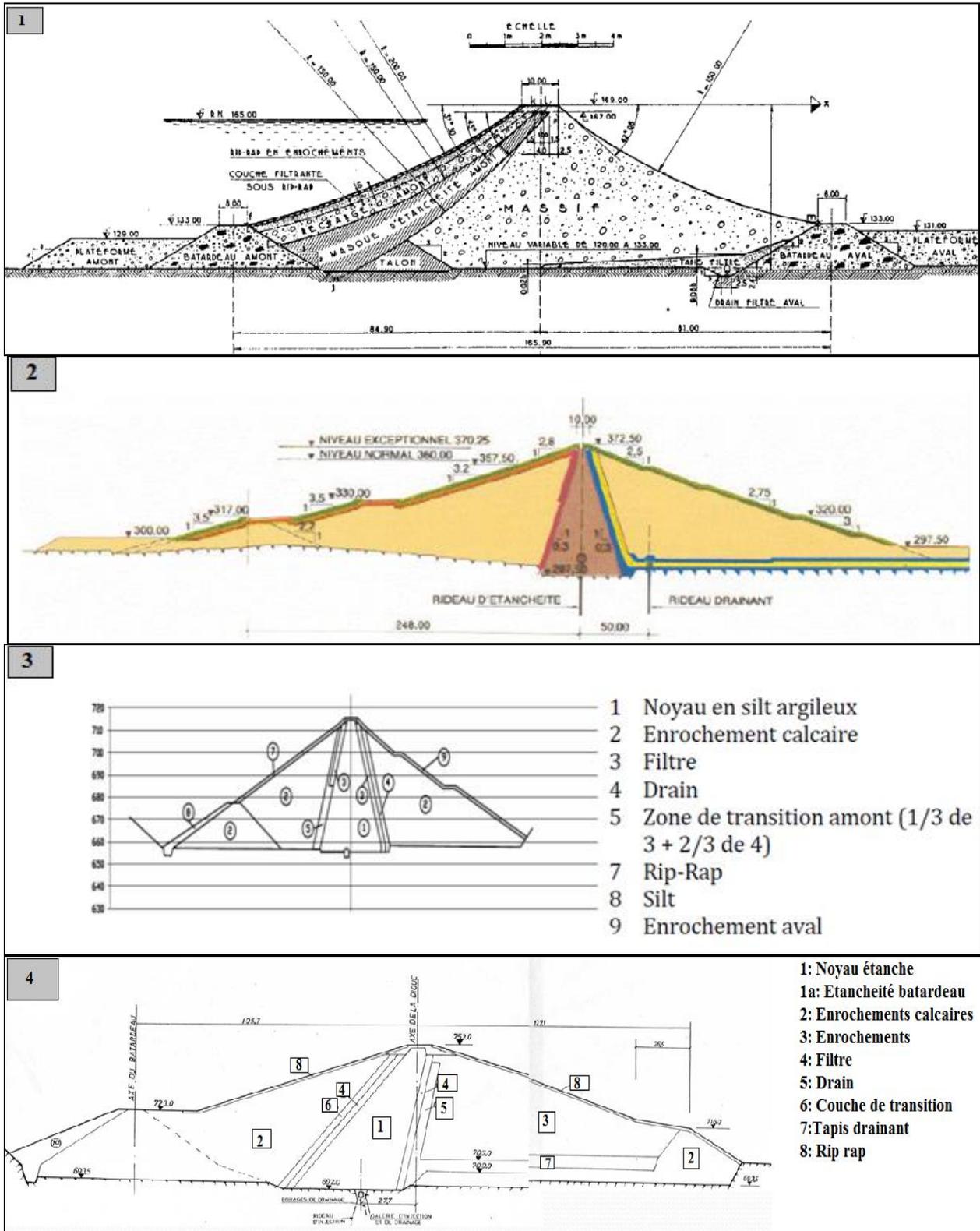


Figure 52 : Exemples de barrages en terre et en enrochement dans l'Est algérien (d'après ANBT, 2014)

1 : Barrage de Cheffia 2 : Barrage de Hammam Debagh 3 : Barrage d'Ain Dalia
4 : Barrage Fom El Khanga

c/ Les barrages poids

Le barrage principal de **Zardezas** est de type poids. La hauteur au-dessus des fondations est de 72.3 m, la longueur et la largeur en crête sont respectivement de 242 m et 6.3 m.

Le barrage de **Foum El Gherza** est constitué d'une digue poids voûte et culée poids (une voûte à double courbure s'appuyant en rive gauche sur une culée poids). Les plots de construction de la voûte sont délimités par des joints munis de boîtes de cisaillement. L'étanchéité est assurée par une lame en cuivre à l'amont. La voûte comporte une galerie de visite arasée à la cote de 154.7 m. En rive gauche, la culée est rectiligne, dans le prolongement du dernier plot de la voûte (figure 53). Sa longueur en crête est de 186 m. La hauteur maximale au-dessus de la fondation est de 21.6 m.

La digue en béton-poids du barrage **Hamma Grouz**, caractérisé par une hauteur au-dessus de la fondation de 49.5 m et une longueur en crête de 217 m (figure 53). Une digue subsidiaire en remblai (longueur en crête : 200 m) se trouve sur un col à l'Est du barrage principal où la cote du terrain naturelle est de 729 m. Elle permet d'éviter les dommages lorsque les eaux de crue dépassent le niveau de la retenue normale.

Le barrage principal de **Béni Haroun** est un barrage poids, en béton compacté au rouleau (BCR) s'appuyant sur une fondation rocheuse calcaire. Le profil type du barrage est triangulaire avec un parement amont vertical et un parement aval. 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 cote de 216.3 m soit 1.5 m au-dessus des plus hautes eaux.

Le barrage de **Boussiaba** est également un barrage poids, en béton compacté au rouleau (BCR) qui intègre du béton conventionnel vibré (BCV) pour les ouvrages particuliers inclus dans le corps du barrage comme les structures de la vidange de fond et du circuit de transfert. La hauteur maximale au-dessus de la fondation est de 50.6 m et la hauteur au-dessus de terrain naturel est de 44.6 m (figure 53).

Chapitre 2 : Caractérisation hydrologique et hydrotechnique des barrages (bassins d'alimentation, lacs de retenue, digues et ouvrages annexes)

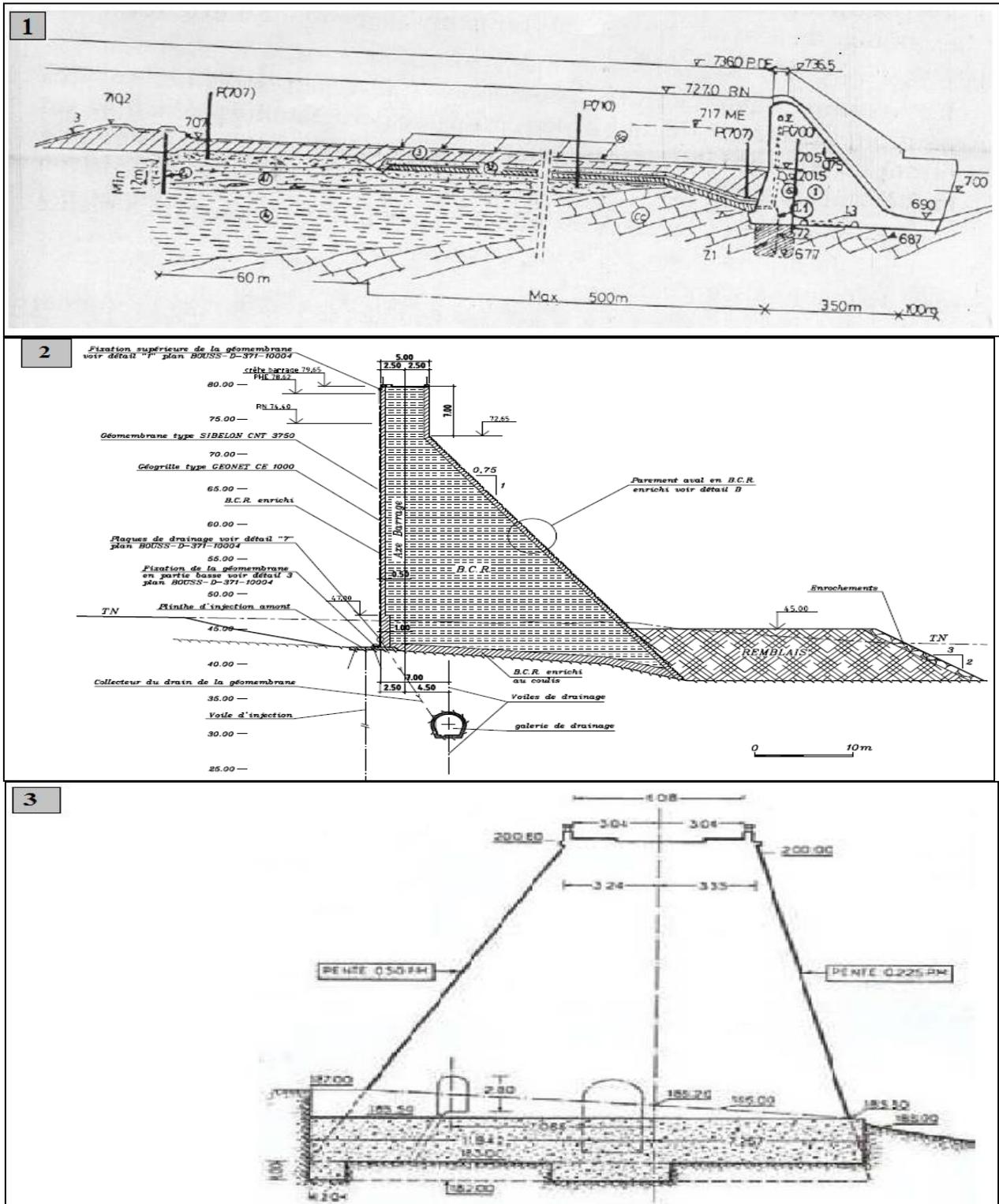


Figure 53 : Exemples de barrages- poids dans l'Est algérien (d'après ANBT, 2014)
 1 : Barrage de Hammam Grouz 2 : Barrage de Boussiaba 3 : Barrage de Foug El Gherza

d/ Les barrages à multivoûtes

Le barrage d'**Erraguene** est de type voûtes multiples avec butées actives. La digue est formée de voûtes de 35 mètres de portée, reposant sur des contreforts et appuyés eux-mêmes sur des butées dites actives (photo 1a).

Le barrage à voûtes multiple de **K'sob**, repose sur deux culées poids en rive et 41 contreforts en béton armé avec précontrainte additionnelle sur les 30 contreforts centraux. L'inclinaison des parements amont et aval est respectivement de 0.9/1 et 0.4/1. La longueur de l'ouvrage en crête est de 280 m et la hauteur maximale au-dessus de la fondation est de 54 m (photo 1b).

a. Barrage d'Erraguene



b. Barrage de K'sob



Photo 1 : Les barrages à multivoûtes (d'après ANBT, 2014)

a: barrage d'Erraguene b : barrage de K'sob

2.2. Les ouvrages annexes : une grande diversité

Un barrage est toujours accompagné d'ouvrages annexes ou d'organes nécessaires à sa sécurité et à son fonctionnement productif. On distingue les ouvrages de l'évacuation des crues, la vidange et la prise d'eau. La disposition et la forme de ces ouvrages varient en fonction du site (géologie, topographie) et du type de barrage, ils peuvent se situer à même l'ouvrage ou être séparés de celui-ci.

2.2.1 Type et fonctionnement des évacuateurs de crues

L'évacuateur de crue est un ouvrage vital pour la sécurité du barrage. Il peut avoir des fonctions d'évacuation de débit liquide, de débit solide, de corps flottants (**Meilland et Jehanno 1992**). Il peut s'agir d'un déversoir à seuil libre (à seuil déversant, à seuil latéral et tulipe) ou d'un organe vanné (de surface, de fond ou de demi- fond) (**Piquemal, 1991**).

Le choix du type d'évacuateur, de son emplacement et son dimensionnement sont des questions essentielles dans la conception d'un barrage, car sa sécurité et sa longévité en dépendent.

Dans l'Est algérien, la majorité des ouvrages comprennent un déversoir à seuil libre. Les déversoirs sont dimensionnés pour évacuer des débits maximaux allant de 142 m³/s (barrage El Agrem) à 13 700 m³/s (barrage Béni Haroun). Nous nous limiterons ci-dessous à la présentation d'exemples de déversoirs à seuil libre.

Le déversoir du barrage **Guenitra**, dimensionné pour évacuer un débit maximum de 757 m³/s, est implanté sur la rive gauche de la digue. Il comporte un seuil déversant d'une largeur de 47.5 m, arasé à la cote de 164 m. Ce déversoir est prolongé par un coursier raccordé à un saut de ski.

Pour le barrage de **Kissir**, l'évacuateur de crue à seuil latéral (rive droite), est prolongé par un coursier et un bassin de dissipation (photo 2 a). La restitution des débits à l'oued Kissir se fait par l'intermédiaire d'une cuillère et d'une fosse de réception aval. Cet organe est d'une capacité de 545 m³/s pour la cote des plus hautes eaux de 47.9 m.

L'évacuateur de crue du barrage **Boussiaba**, à seuil libre, est intégré au barrage dont la crête de déversoir est calée à la cote de la retenue normale de 74.4 m. Dans sa partie aval, le déversoir est composé de marches d'escalier de hauteurs croissantes (photo 2 b). Le coursier de l'évacuateur, réalisé en béton conventionnel, et prolongé dans l'extrémité aval par un bassin de dissipation, présente une passe unique de 100 m de largeur et épouse le parement aval du barrage jusqu'à son pied aval.

L'évacuateur de crue du barrage **d'Ain Dalia**, implanté sur la rive droite de la digue, est équipé par un coursier, une cuillère de dissipation et un bassin de dissipation. Le coursier est caractérisé par une largeur de 35 m à l'aval du seuil déversant pour un niveau de 707 m, largeur se réduisant progressivement à 20 m pour un niveau de 701 m avant d'aborder la cuillère. La cuillère de dissipation, d'une largeur de 16.7 m, est constituée par un déflecteur destiné à écarter le jet de la rive rocheuse. Le bassin de dissipation (ou bassin amortisseur) assure l'amortissement de l'énergie de l'eau avant qu'elle ne regagne l'oued (photo 2 c).

Le déversoir de surface du barrage **d'Ain Zada**, d'une largeur de 75 m sous le niveau de la crête de 45 m, est composé d'un coursier (longueur : 180 m, pente : 8.4 %) et se termine par un saut de ski dont le rôle est de projeter le jet à grande vitesse loin de l'ouvrage (photo 2 d) ;

Pour le barrage hydroélectrique **d'Ighil Emda**, l'ouvrage d'évacuation de crue, situé dans la partie centrale du barrage principal, est dimensionné pour évacuer un débit de 2500 m³/s. Il est constitué dans sa partie amont par trois pertuis de déversement (largeur: 10 m, hauteur : 12 m) se prolongeant par trois galeries et une chambre des vannes.

L'évacuateur de crue du barrage de **Foum El Gherza** calé à la cote de 198.9 m, est d'une capacité de 730 m³/s, il est implanté sur la partie centrale du barrage principal, avec deux passes d'une longueur de 18 m (photo 2 e).

Le barrage de **Hammam Debagh** est équipé de deux évacuateurs de crues en puits de section circulaire (en forme de tulipe ou de corolle), conçus pour laminier un débit global de 2068 m³/s pour une crue décennale de 3810 m³/s (photo 2 f).

L'évacuateur de crue du barrage **Fontaines des Gazelles** est implanté sur la rive droite de la digue, il comporte un seuil labyrinthe calé à la cote de 384 m, un coursier, un saut de ski et un bassin de dissipation (photo 2 g).

Pour le barrage de **K'sob**, l'évacuateur de crue est d'une capacité de 1950 m³/s pour une cote de plus hautes eaux de 605.5 m. Il est composé de deux pertuis équipés de vannes de demi-fond branchées sur l'ancienne galerie de dérivation provisoire (A) ; trois passes équipées de vannes de surface et branchées sur l'ancienne galerie de dérivation provisoire (B).

L'évacuateur du barrage de **Béni Haroun**, à seuil libre, est aménagé dans la partie centrale du barrage. Il est d'une capacité de 13 700 m³/s pour un niveau de plus hautes eaux de 214,8 m. Il est prolongé par un coursier raccordé à un saut de ski;

- Les barrages sont dotés de types différents d'évacuateurs, comme celui du barrage **Cheffia** équipé d'un évacuateur principal de type vanné (vanne cylindrique), d'une capacité maximum d'évacuation de 1800 m³/s ; un évacuateur secondaire du même type, calé à la cote de 165 m, est capable d'évacuer un débit de 780 m³/s pour un niveau de plus hautes eaux de 167 m.

a. Barrage de Kissir



b. Barrage de Boussiaba



c. Barrage de Ain Dalia



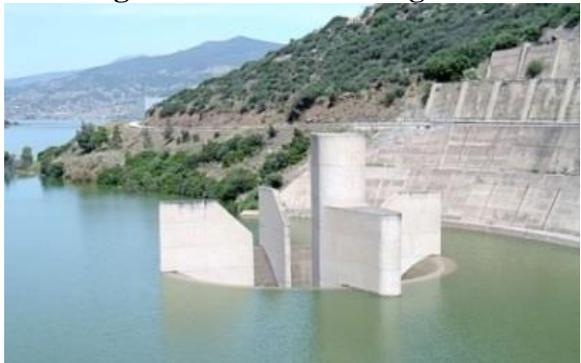
d. Barrage de Ain Zada



e. Barrage de Foug El Gherza



f. Barrage de Hammam Debagh



g. Barrage de Fontaines Des Gazelles



Photo 2 : Exemples d'évacuateurs de crues des barrages de l'Est algérien (ANBT, 2014)

a : Barrage de Kissir **b**: Barrage de Boussiaba **c** : Barrage d'Ain Dalia **d** : Barrage d'Ain Zada **e** : Barrage de Foug El Gherza **f** : Barrage de Hammam Debagh **g** : Barrage de Fontaines des Gazelles

2.2.2 Systèmes de vidange de fond

Le système de vidange de fond des barrages permet de vidanger partiellement ou entièrement la retenue en cas du passage d'une onde de crue conséquente ou en cas de maintenance de l'ouvrage ou chasse de sédiments en période de crue. Dans notre région, les ouvrages de vidange sont dimensionnés pour des débits très variables, de 21 m³/s (barrage Fontaines des Gazelles) à 700 m³/s (barrage Béni Haroun) en passant par des valeurs moyennes de 300 m³/s (Foum El Khanga).

La vidange de fond du barrage de **Boussiaba**, dimensionnée pour un débit de 102 m³/s sous le niveau de retenue, est équipée d'une conduite blindée et d'un système de vannes.

La vidange de fond du barrage ancien de **Foum El Gherza** est implantée dans le plot central du barrage au niveau de 149.3 m (photo 3 a). Elle est composée d'une vanne batardeau de type wagon (hauteur : 3.3 m) et d'une vanne secteur de réglage (hauteur : 2.4 m), permettant d'évacuer, sous le niveau de retenue normale, un débit total de 110 m³/s.

La vidange de fond du barrage de **Kissir** est localisée dans la rive gauche du barrage, pouvant évacuer un débit de 48 m³/s pour un niveau de retenue normale de 44.5 m. Elle comporte : une conduite d'un diamètre de 2 m et d'un système de vannes.

Pour le cas du barrage de **Koudiat Medouar**, la vidange de fond, d'une longueur totale de 324.5 m, est implantée sur la rive droite. Elle est constituée d'une large galerie en béton armé (longueur : 222 m, hauteur : 8.8 m) et d'une chambre des vannes en tête amont de la galerie.

La vidange de fond du barrage de **Hammam Grouz**, d'un diamètre de 1.6 m, est située dans le corps du barrage principal (photo 3 b). Elle est composée d'une chambre de contrôle des vannes.

Dans le cas du barrage de **Foum El Gueiss**, la vidange de fond est constituée par : une conduite (diamètre : 1.6 m, longueur : 16.7 m), traversant le bouchon en béton de la dérivation provisoire, une vanne de garde et une vanne de réglage (de type papillon) d'un diamètre de 1.6 m.

La vidange de fond du barrage de **Babar**, dimensionnée pour un débit total de 59 m³/s, se fait par un pertuis aménagé à la base de la tour de prise d'une hauteur de 47.6 m.

La vidange de demi-fond du barrage de **Béni Haroun** est intégrée dans le corps du barrage en rive droite, elle est constituée de deux pertuis blindés dimensionnés pour évacuer un débit de 700 m³/s sous le niveau normal de retenue de 200 m soit 350 m³/s pour chaque pertuis (photo 3 c).

a. Barrage de Foug El Gherza



b. Barrage de Hammam Grouz



c. Barrage de Béni Haroun



Photo 3 : Exemples de vidanges de fond des barrages de l'Est algérien (d'après l'ANBT, 2014).

a : Barrage de Foug El Gherza **b** : Barrage de Hammam Grouz **c** : Barrage de Béni Haroun

2.2.3 Ouvrages de prise d'eau

La prise d'eau est un ouvrage annexe de grande importance. Elle se situe à plusieurs niveaux, ce qui permet de pouvoir capter et fournir l'eau de la qualité souhaitée. La plupart des ouvrages réalisés dans la région comporte trois niveaux de prise d'eau. Les caractéristiques en sont données pour les exemples énumérés ci-dessous.

Le barrage de **Babar** comprend une tour de prise d'une hauteur de 47.6 m et d'un diamètre de 6 m. Les prises d'eau sont localisées dans la tour de prise à laquelle on accède par la chambre des vannes de la vidange de fond au pied (photo 4 a).

Pour le barrage de **Foum El Gueiss**, les prises d'eau, d'un débit de 1.5 m³/s, réparties sur trois niveaux 946 m, 952 m et 957 m. Compte tenu de l'envasement rapide du barrage, les deux premières prises sont désormais non fonctionnelles.

La tour de prise du barrage de **Guenitra** a une hauteur de 71.8 m et un diamètre de 9.6-11.2 m. Les prises d'eau sont d'un diamètre de 1000 mm, situées à trois niveaux 134.15 m, 144.6 m et 154.5 m.

La tour de prise du barrage de **Hammam Debagh** est composée par : une prise haute (niveau 340.5 m) ; une prise moyenne (niveau : 322.5 m) est raccordée à la tour de prise par une conduite en béton d'un diamètre de 1.8 m et d'une longueur de 49 m ; une prise basse (niveau : 308 m) se situe à l'entonnement de la dérivation provisoire (photo 4 b).

Les trois barrages **Fontaines des Gazelles**, **Koudiat Medouar** et **Cheffia**, comptent chacun 4 niveaux de prise d'eau. La tour de prise du barrage de **Fontaines des Gazelles**, d'une hauteur de 51 m et d'un diamètre de 11 m, est implantée sur la rive gauche du barrage principal (photo 4 c), et se situe à quatre niveaux : 361 m, 367 m, 373 m et 379 m. Les prises sont équipées d'une grille, de deux batardeau de type wagon et de quatre vannes papillon. La tour de prise du barrage de **koudiat Medouar**, est située à quatre niveaux (966 m, 974 m, 984 m et 966 m), elle est localisée dans la rive droite du barrage (hauteur : 49 m, diamètre : 6,5 m) (photo 4 d). Pour le cas du barrage de **Cheffia**, la tour de prise est localisée dans l'évacuateur de crue à quatre niveaux 138 m, 146 m, 153 m et 161 m. Elle est équipée d'une vanne cylindrique (hauteur : 7.90 m, diamètre : 16.5 m) prolongée par une galerie sous remblai et un bassin de dissipation à ressaut (photo 4 e).

Dernier exemple, le barrage de **Boussiaba** comporte un nombre plus important de niveaux de prise (6 niveaux), permettant de transférer un débit maximal de 3.5 m³/s dont une partie de ce débit est destinée à renforcer les apports du barrage Beni Haroun, situé à l'amont.

a : Barrage Babar



b : Barrage Hammam Debagh



c : Barrage Fontaines des Gazelles



d : Barrage Koudiat Medouar



e: Barrage Cheffia



Photo 4 : Exemples des prises d'eau (d'après ANBT, 2014)

a : Barrage Babar **b:** Barrage Hammam Debagh **c :** Barrage Fontaines des Gazelles **d :**
Barrage Koudiat Medouar **e :** Barrage Cheffia

Chapitre 2 : Caractérisation hydrologique et hydrotechnique des barrages (bassins d'alimentation, lacs de retenue, digues et ouvrages annexes)

Le tableau 5 résume, selon les informations disponibles, les principales caractéristiques des digues et des ouvrages annexes.

Tableau 5 : Récapitulatif des principales caractéristiques des digues et des ouvrages annexes

Barrage	wilaya	Digue				Ouvrages annexes			
		Type	Longueur en crête (m)	Largeur en crête (m)	Cote de la crête (m)	Evacuateur de crue		Vidange de fond Q max (m ³ /s)	Prise d'eau Nombre de niveaux
						Type	Q max (m ³ /s)		
Mexa	El Tarf	Terre	402	7	62	Seuil libre	1 800	75	-
Bougous	El Tarf	Terre	635,61	-	71	-	-	-	-
Cheffia	El Tarf	Terre	650	10	169	Organe vanné	1800	225	4
Zit Emba	Skikda	Terre	640	10	92	Seuil libre	1094	68	-
Zardézas	Skikda	Béton Poids	242	6.3	72.25	Seuil libre	2000	70	3
Guenitra	Skikda	Terre	515	9	69	Seuil libre	757	211	3
Béni Zid	Skikda	Terre	149	7	52.6	Seuil libre	-	110	3
El Agrem	Jijel	Terre	395	8	147	Seuil libre	142	96	-
Kissir	Jijel	Terre	580	8.5	49.5	Seuil latéral	545	48	3
Erraguene	Jijel	Voûtes Multiples	510	-	672	Seuil libre	1500	100	-
Ighil Emda	Bejaia	Enrochement	710	9	535.5	Seuil libre	2500	450	-
K'sob	M'sila	Voûtes multiples	280	-	606	Seuil libre	850	130	2
Babar	Khenchela	Terre	673	8	37	Seuil libre	1310	59	3
Fontaines des Gazelles	Biskra	Terre	370	8.5	52	Seuil libre	3000	21	4
Foum El Gherza	Biskra	Béton Poids Voûte	186	-	203.85	Seuil libre	730	110	3
Koudiat Medaour	Batna	Terre	-	10	997	Seuil libre	867	204	4
Foum El Gueiss	Khenchela	Enrochement	250	-	23	Seuil libre	600	25	3
Hammam Grouz	Mila	Béton Poids	217	-	736.5	Seuil libre	4150	40	3
Beni Haroun	Mila	Béton Poids BCR	710	8	216.3	Seuil libre	13700	700	-
Boussiaba	Jijel	Poids	295	5	79.65	Seuil libre	1843	-	6
Ain Dalia	Souk Ahras	Terre	300	9	715.5	Seuil libre	365	190	3
Hammam Debagh	Guelma	Terre	430	10	95	Puits de section circulaire	2240	218	3
Foum El Khanga	Souk Ahras	Enrochement	397	9	752	Seuil libre	2253	300	3
Ain Zada	B.B.Arreidj	Terre	688	7	47	Seuil libre	4320	25	2
Tichy Haf	Bejaia	Terre	-	-	84	Seuil libre	6500	-	-

- : information non disponible

2.3. Les lacs de retenue

Une retenue désigne l'étendue d'eau formée par accumulation à l'amont du barrage et utilisée pour le stockage, la régularisation et le contrôle des ressources en eau (**Payane, 2007**). Nous analysons ici le dimensionnement des lacs de barrages qui renseigne sur les spécificités hydrologiques de ces réservoirs par rapport au bassin d'alimentation, à la topographie de la cuvette mais aussi à la hauteur de la digue. Plusieurs travaux ont été menés sur la description des spécificités hydrologiques des lacs de retenues dans le monde, nous citons les travaux de **Piquemal (1991)**, **Lemoalle et Magrin (2014)** et **Belhadaad (2018)**.

2.3.1 Superficie des retenues

La superficie des retenues, à la cote de retenue normale, est calculée sous Arc Gis. Elle varie de 33 ha (Foum El Gueiss) à 3799 ha (Béni Haroun). La superficie moyenne est de l'ordre de 786 ha et 92 % des retenues ont une superficie supérieure à 100 ha.

Après rangement par ordre croissant des surfaces (figure 54), on peut procéder à un regroupement de retenues suivant des classes de superficies, qui peut s'expliquer par des facteurs à la fois géographiques (nature du relief où est délimitée la retenue) et hydrotechniques (hauteur de la digue, importance de l'apport du bassin hydrologique).

Le premier groupe (de 33 à 380 ha) concerne les retenues qui ont des petites tailles (Foum El Gueiss, Babar, Zardezas, El Agrem, Erraguene, Kissir, K'sob, Bougous, Béni Zid, et Foum El Gherza). Le deuxième groupe (de 486 ha à 812 ha) concerne les retenues qui ont de moyennes tailles (Hammam Grouz, Mexa, Tichy Haf, Koudiat Medouar, Ain Dalia, Hammam Debagh, Guénitra, Zit Emba, et Fontaines des Gazelles) et enfin, le troisième groupe (de 926 ha à 3799 ha) concerne les retenues qui ont des grandes tailles (Cheffia, Ain Zada, Foum El Khanga, Boussiaba, Ighil Emda, et Béni haroun).

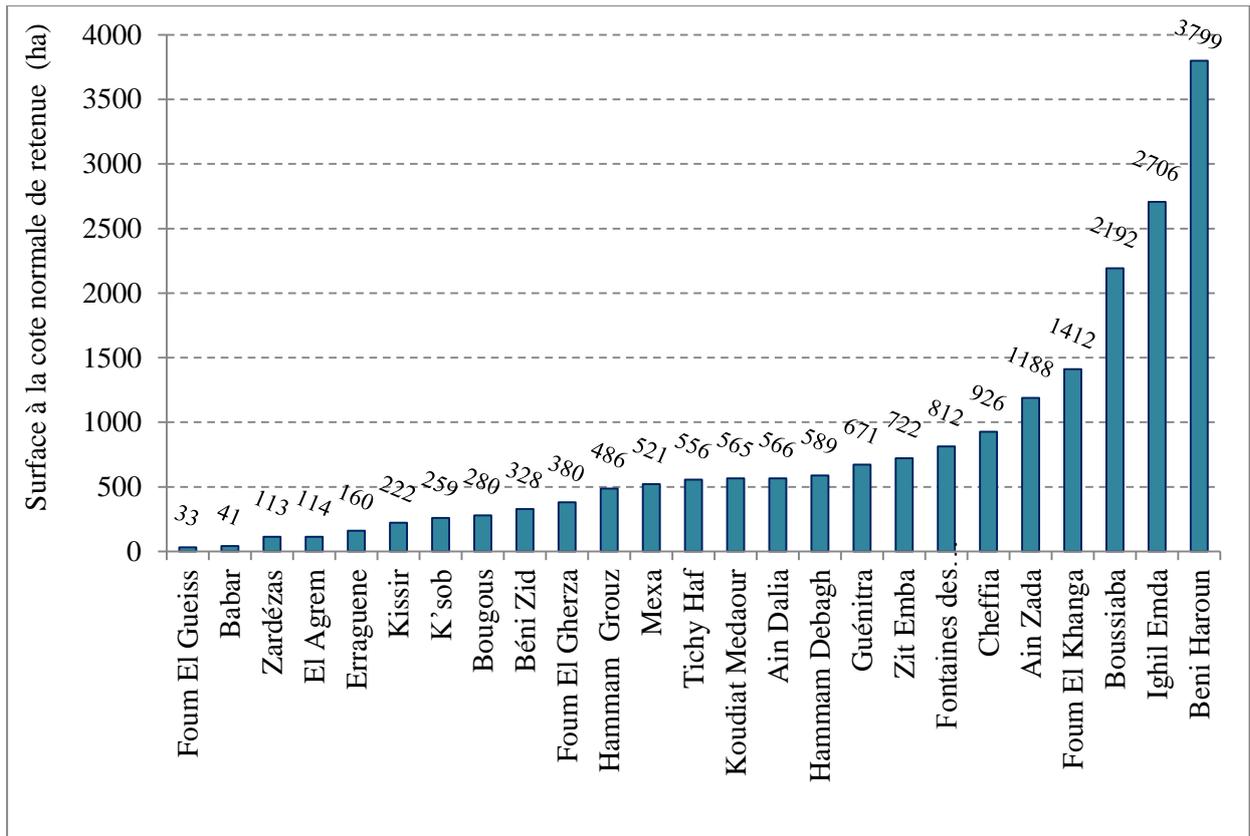


Figure 54 : Variation des superficies à la cote normale de retenues (RN)

La figure 55 montre, à titre d'exemple, la retenue de Béni Haroun, cartographiée sous Arc Gis à la cote normale de 200 m.

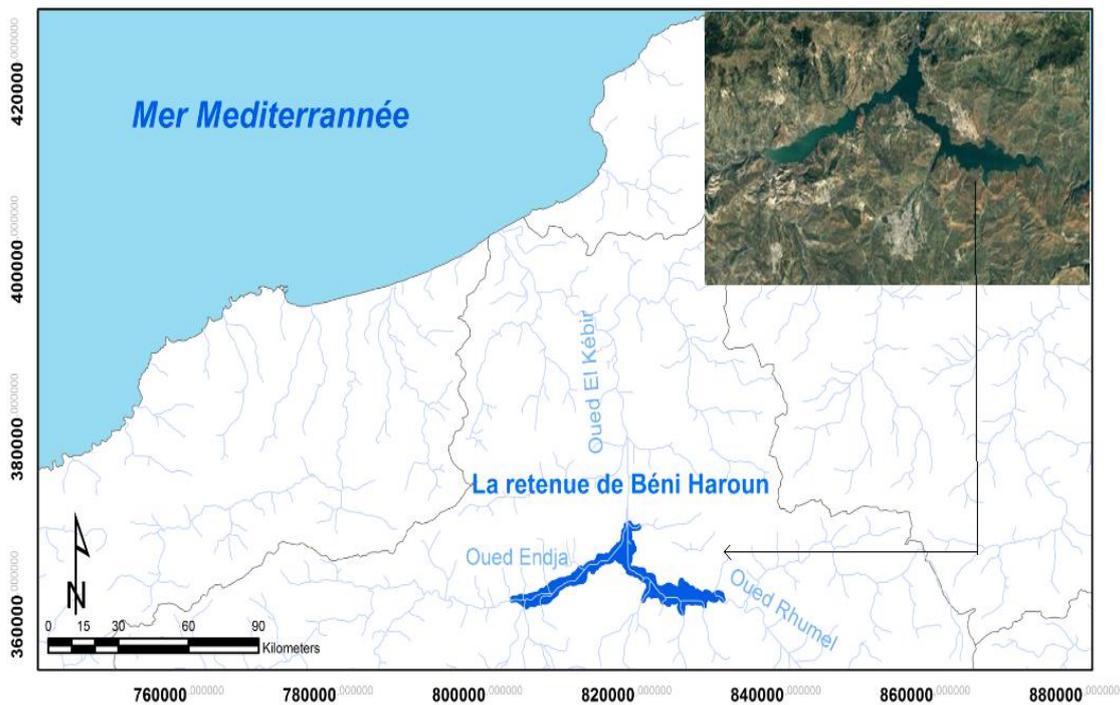


Figure 55 : Exemple du lac de retenue de Béni Haroun

2.3.2 Capacité des retenues

- Les capacités installées

Compte tenu de la variété de la morphologie et de l'apport hydrologique des bassins d'alimentation, les barrages ont des capacités très différenciées. On distingue une gamme de capacités variant entre 3 hm³ au petit barrage de Foum El Gueiss dans le Piémont Nord des Aurès (bassin des Hauts Plateaux) et 963 hm³ au grand barrage de Béni Haroun, dans le Nord Constantinois (bassin du Kébir-Rhumel). A noter que 15 barrages sur 25 ont une capacité inférieure à 100 hm³ (figure 56). Le rapport entre la capacité à la cote normale de chaque retenue et sa surface à cette même cote, donne une lame d'eau moyenne qui varie entre 6 m au barrage de Boussiaba, dans le Tell maritime (bassin inférieur du Kébir-Rhumel) et 125 m au barrage d'Erraguene en Petite Kabylie (bassin des Côtiers Constantinois Ouest, région de Jijel).

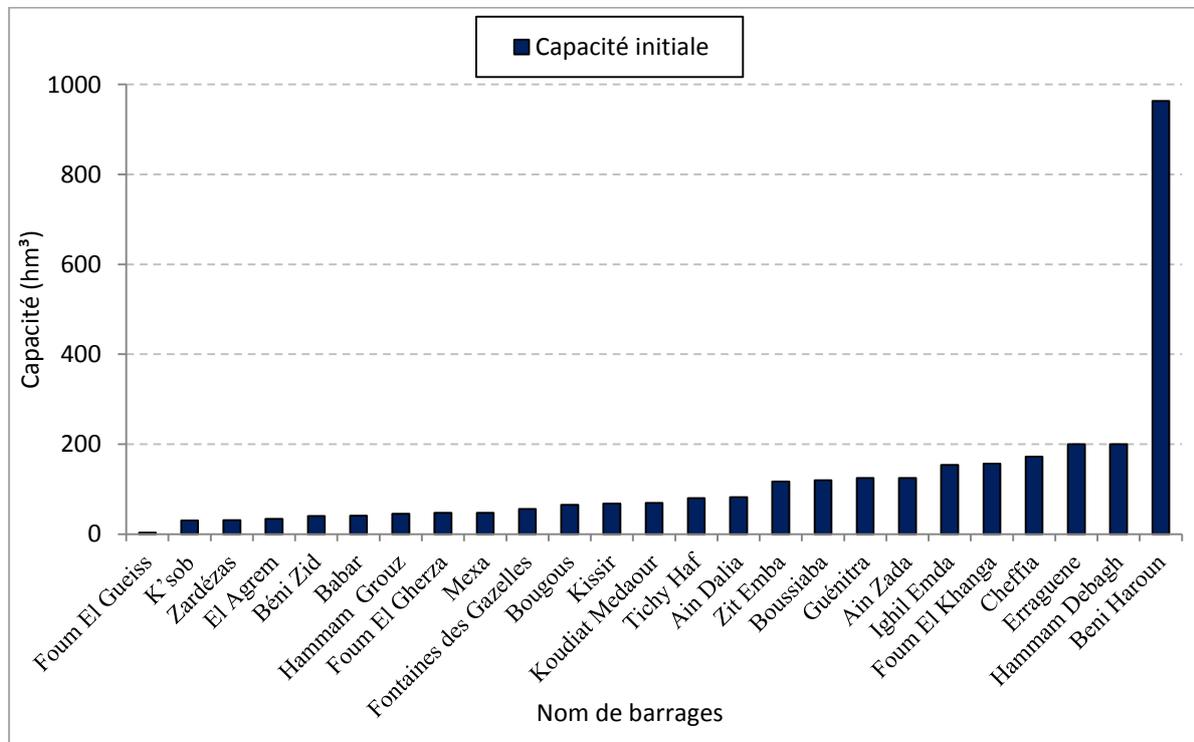


Figure 56 : Rangement par ordre croissant de la capacité de 25 barrages.

- Volume régularisable et ratio capacité / volume régularisé

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 (Laborde et al, 2013).

Le volume régularisable (théorique) des barrages de l'Est algérien est très variable, allant de 3.2 hm³ par an (Foum El Gueiss) à 435 hm³ par an (Béni Haroun), ce dernier barrage détient à lui seul environ 26 % de volume régularisable théorique de l'ensemble des barrages en exploitation dans la région.

Excepté les barrages de Zardezas, Foum El Gueiss et Tichy Haf dont le rapport est inférieur à 1, le ratio capacité/volume régularisé se distingue par des valeurs supérieures à 1, culminant à 5.23 (barrage Foum El Khanga) (figure 57).

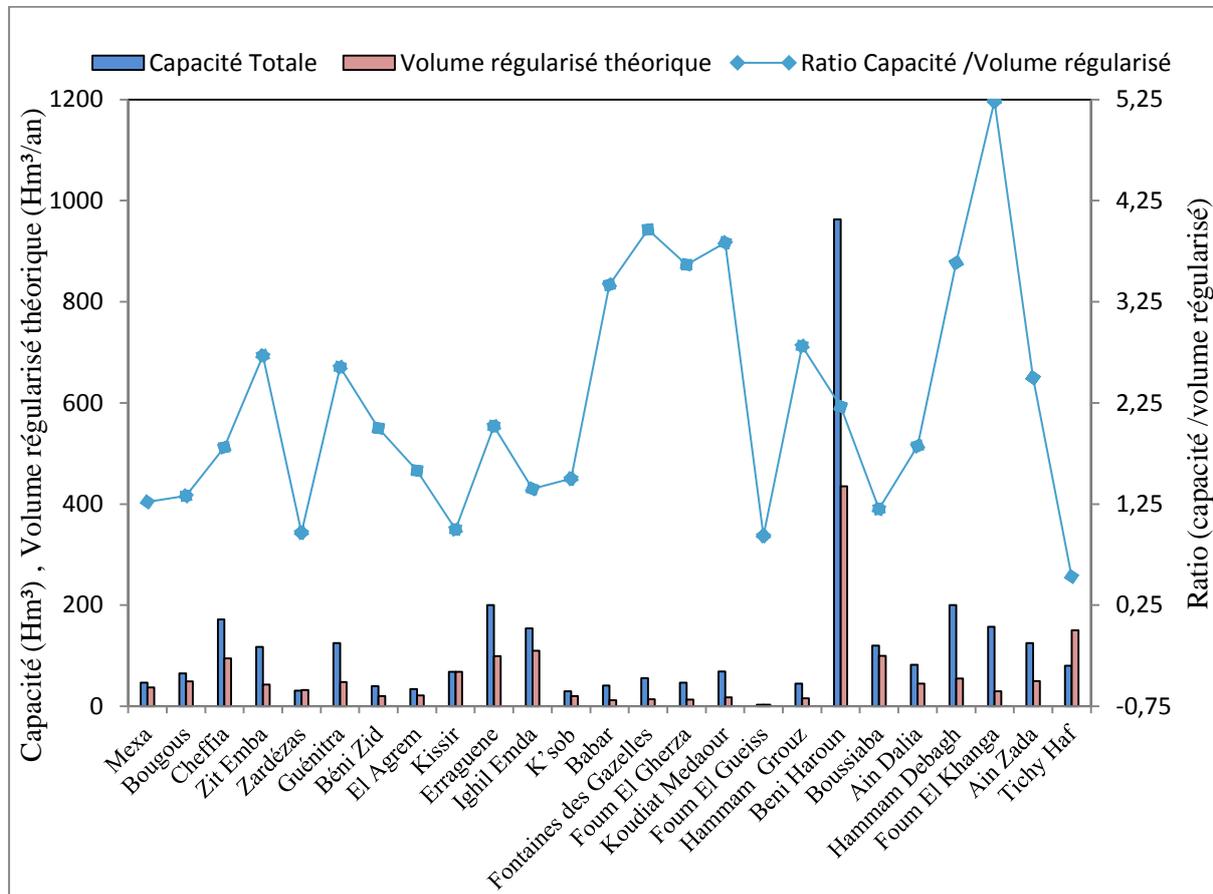


Figure 57 : Capacité et volume régularisable des barrages en exploitation dans l'Est algérien.

2.3.3 Relations surface- volume-hauteur des retenues : les courbes de remplissage

Tracées à partir du plan topographique de la cuvette et de la digue, les courbes de remplissage permettent d'évaluer facilement les surfaces noyées et les volumes correspondants pour différentes cotes. La connaissance précise de la capacité d'un barrage en fonction de la cote du plan d'eau est un élément essentiel pour sa conception, son contrôle et sa gestion. De nombreuses études hydrologiques montrent l'importance de ces courbes (Seguis et al, 1993 ; Durand et al, 1998 ; Parent, 1991 ; Arnaud et al, 2016).

L'analyse ci-après porte sur les courbes de remplissage de quelques barrages. L'influence de l'envasement sur la modification de ces courbes est le principal facteur explicatif (cf. le cinquième chapitre dédié à l'envasement des barrages).

Le barrage **Cheffia** d'une capacité initiale de 171.9 hm³, a perdu pendant 39 ans d'exploitation (de 1965 à 2004) un volume de 13.16 hm³. La surface inondable à la cote

normale 165 m est passée de 987 ha en 1965 à 1003 ha en 2004 soit une augmentation de 15.7 ha (figure 58).

Le barrage de **Zardezas**, a perdu depuis la surélévation de la digue (1975) jusqu'à l'année 2004, un volume de 12.32 hm³ (figure 59). La superficie à la cote normale de la retenue a diminué de 175 ha (1975) à 145 ha (2004). La capacité à la cote normale est de 31 hm³ en 1975 et de 18.68 hm³ en 2004.

La cote normale de la retenue du barrage **Guenitra** est de 164 m, ce qui correspondre un volume environ de 125 millions de m³ et une superficie de 694 ha (figure 60).

Pour le cas du barrage de **Hammam Grouz**, la capacité et la superficie à la cote normale sont respectivement de 45 hm³ et 4.9 km² (figure 61).

Le barrage **Ain Zada** a une capacité initiale de 125 hm³, mais la campagne bathymétrique réalisée en 2004 par l'A.N.B.T a abouti à un volume de sédimentation de 3.6 hm³ (volume à la cote normale : 121.4 hm³, surface à la cote normale : 1152 ha), soit un envasement moyen de 0.2 hm³ an⁻¹ (figure 62). Pour une densité de 1.6, la dégradation spécifique s'élève à 154 t.km⁻² an⁻¹ (cf. cinquième chapitre).

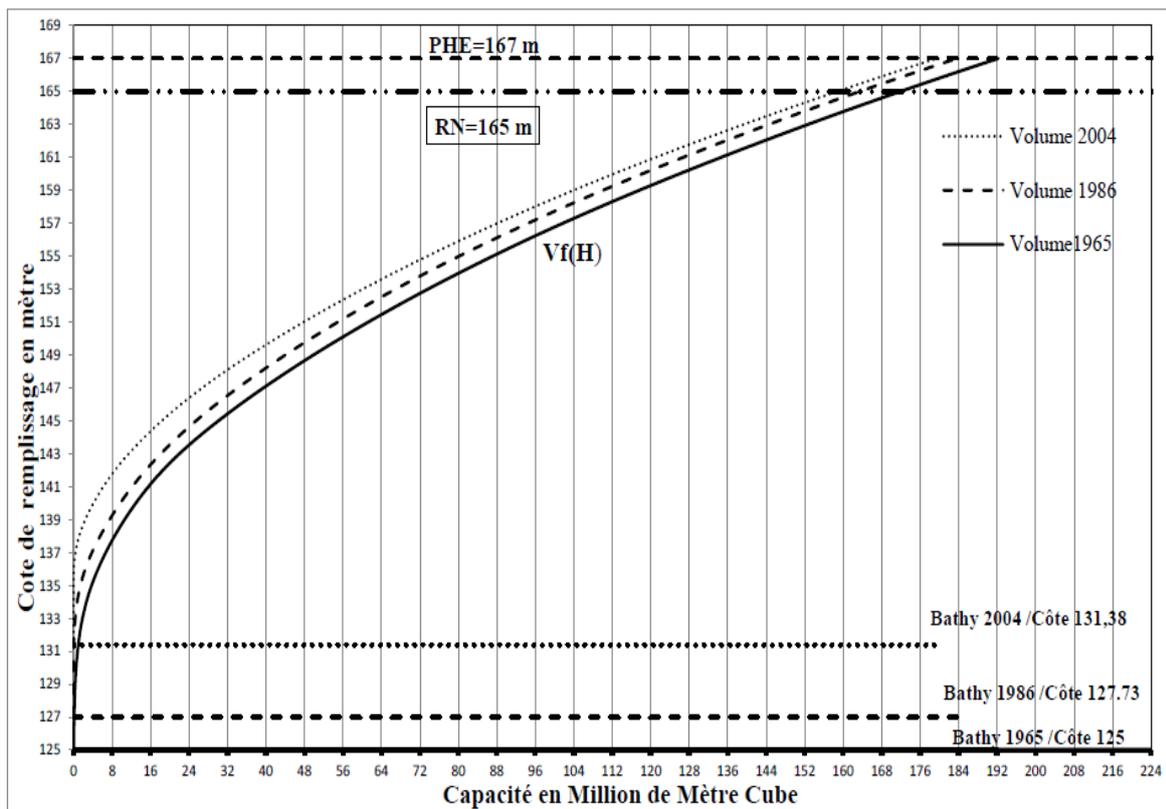


Figure 58 : Relations surface-volume-hauteur de la retenue de Cheffia

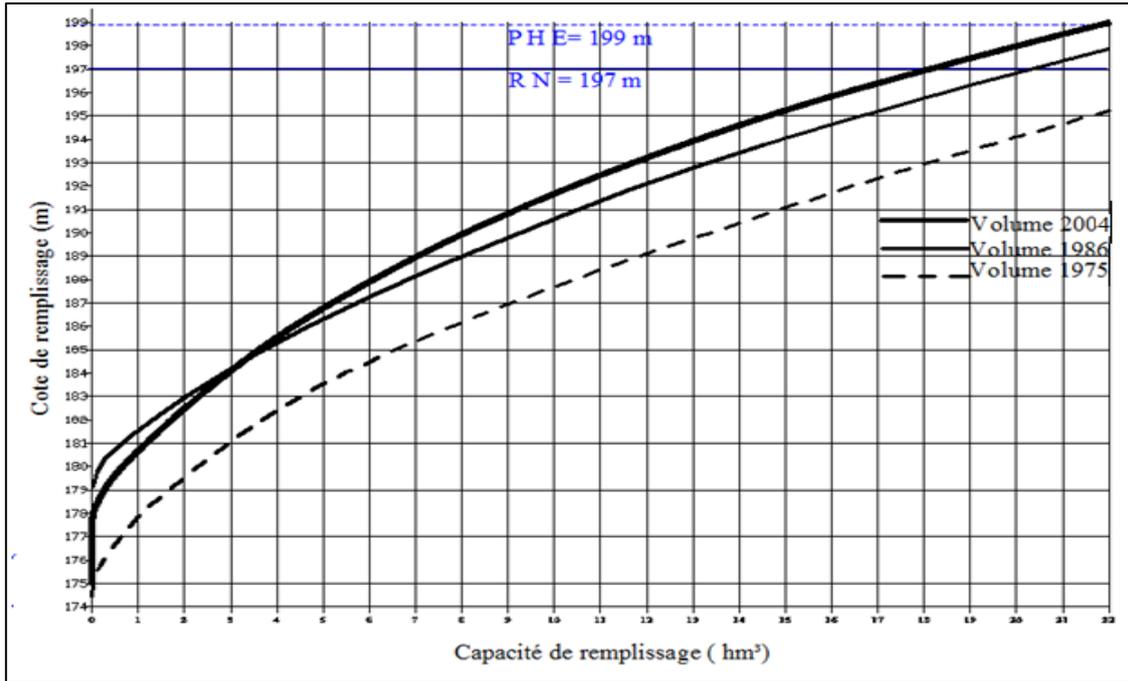


Figure 59 : Relations surface-volume-hauteur de la retenue de Zardezas

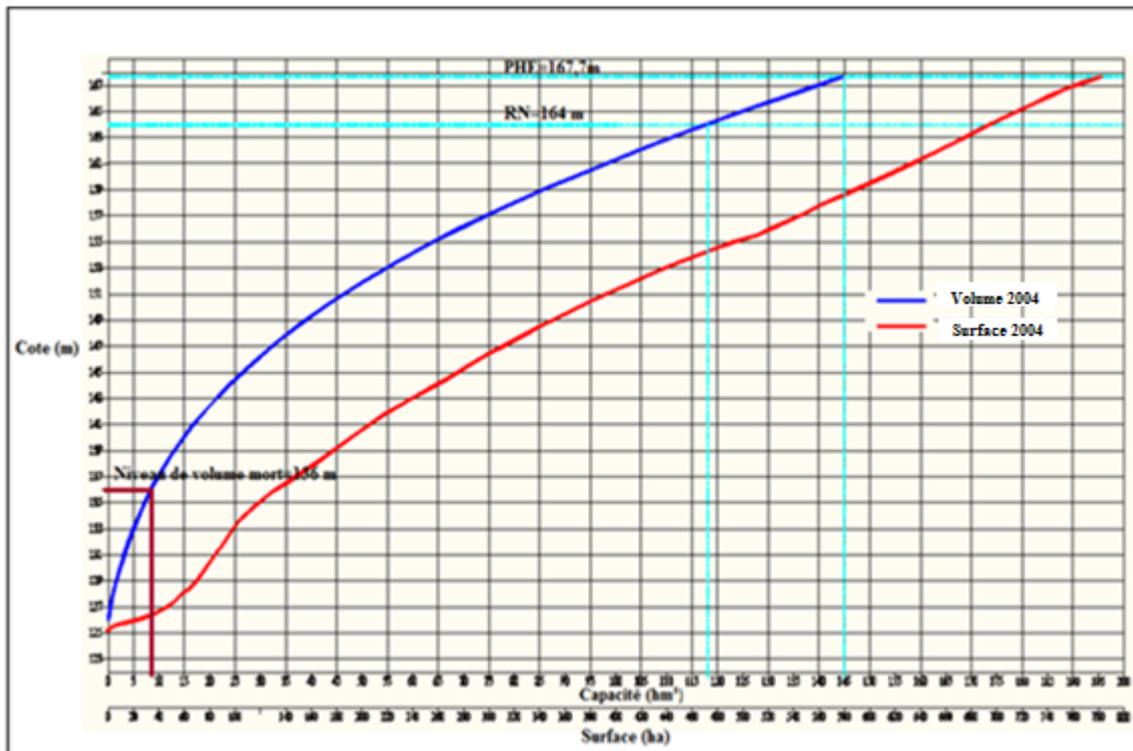


Figure 60 : Relations surface-volume-hauteur de la retenue de Guenitra

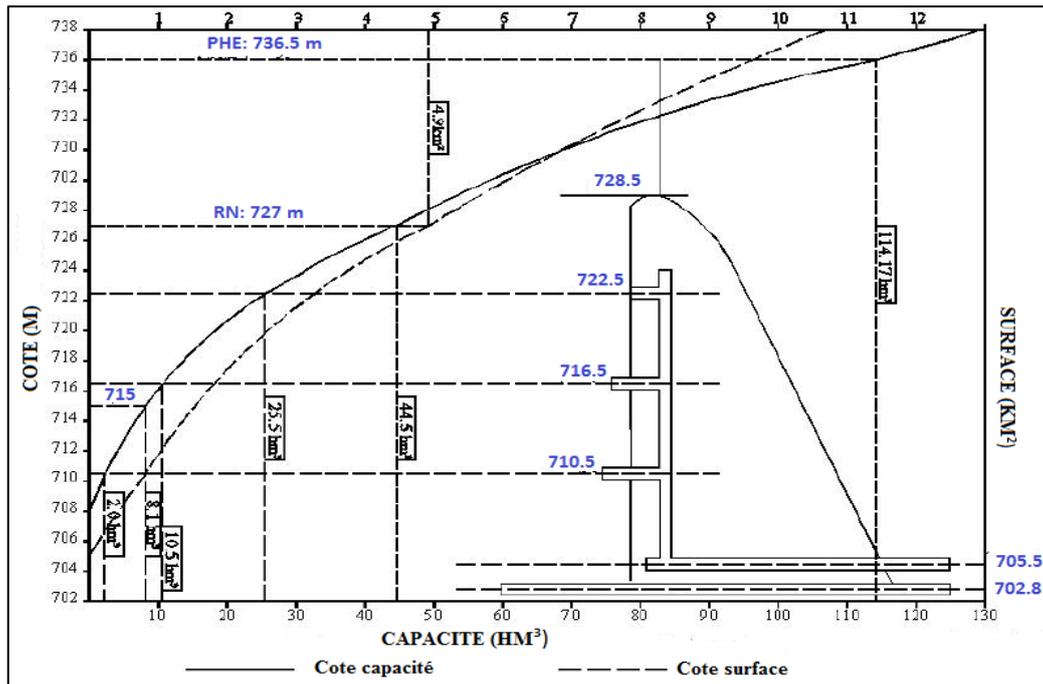


Figure 61 : Relations surface-volume-hauteur de la retenue de Hammam Grouz

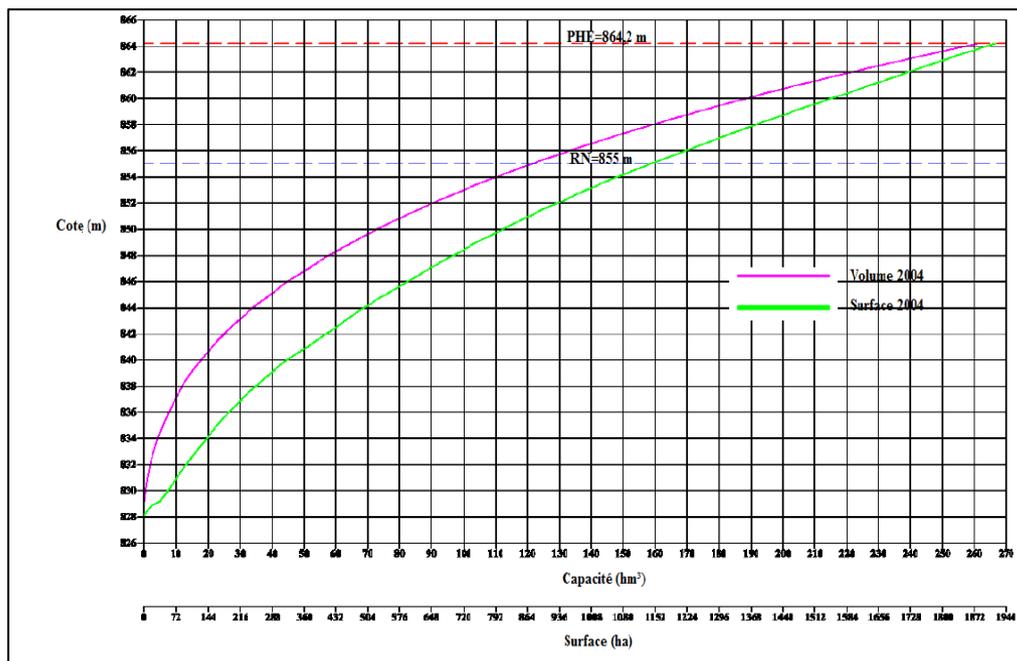


Figure 62 : Relations surface-volume-hauteur de la retenue d'Ain Zada

2.3.4 Niveau normal de retenue (NNR) et Niveau des plus hautes eaux (PHE)

Le niveau normal de la retenue, cote « habituelle » ou « normale » de remplissage du barrage ; correspond au niveau au-delà duquel se fait le déversement de crue. C'est lui qui permet de déterminer le volume de la retenue (Royet et al, 2009).

le niveau normal des retenues (en référence à l'altitude par rapport au niveau de la mer ou niveau géodésique algérien « NGA »), varie géographiquement entre 44.5 m (barrage de Kissir dans les Côtiers de Jijel) et 992.5 m (barrage de Koudiat Medour dans la partie méridionale de Hautes Plaines) (figure 63).

Le niveau des plus hautes eaux (PHE) correspond à la cote de la retenue lors des crues exceptionnelles. Dans l'Est algérien, il oscille entre 47.9 m au barrage Kissir (Côtiers de Jijel) et 996.6 m au barrage Koudiat Medour (Hautes Plaines) (figure 64).

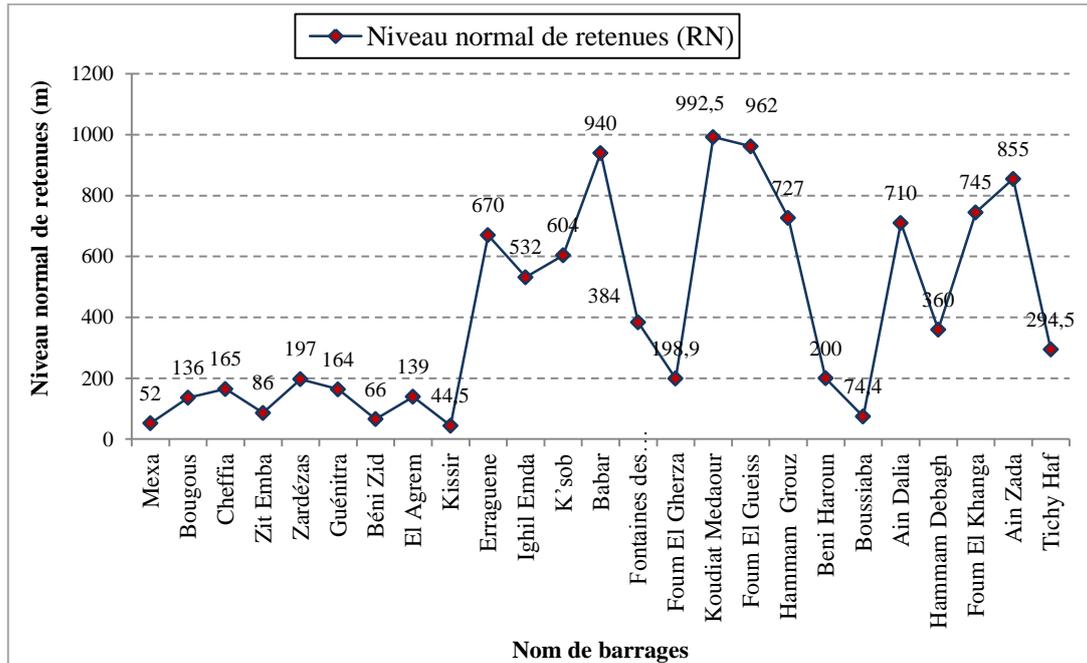


Figure 63 : Variation du niveau normal de retenues

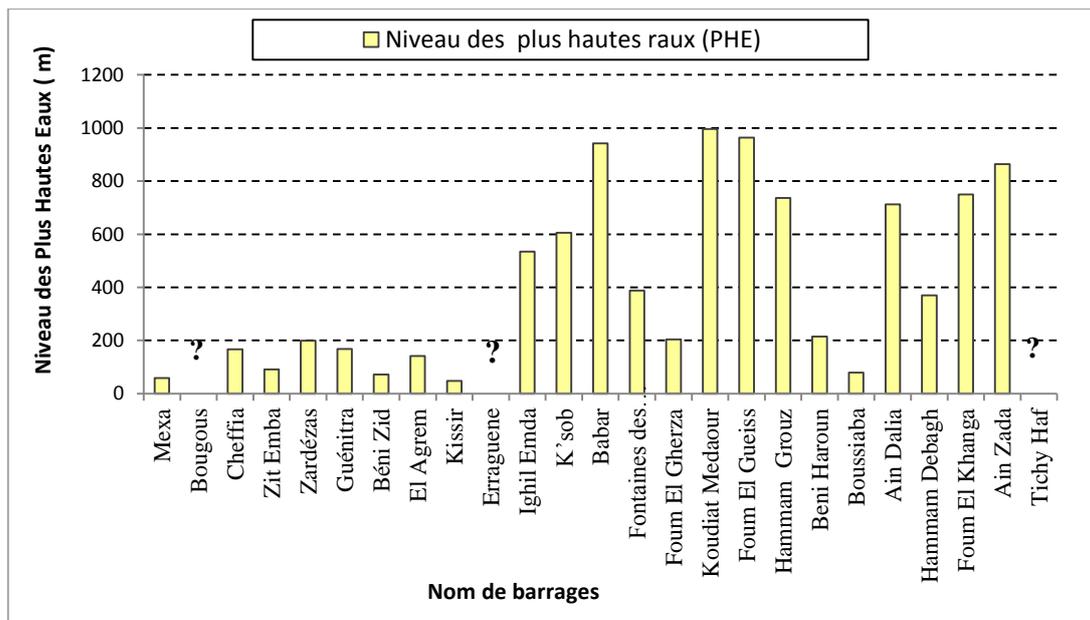


Figure 64 : Variation du niveau des plus hautes eaux de retenues

Chapitre 2 : Caractérisation hydrologique et hydrotechnique des barrages (bassins d'alimentation, lacs de retenue, digues et ouvrages annexes)

Le tableau 6 récapitule les principales caractéristiques des lacs de retenue.

Tableau 6 : Récapitulatif des principales caractéristiques des lacs de retenue

Barrage,	Oued	Wilaya	Niveau normal de retenue (m)	Niveau des plus hautes eaux (PHE) (m)	Surface de la retenue (ha)	Capacité initiale (hm ³)	Volume régularisable (hm ³ /an)	Ratio Capacité /volume régularisé
Mexa	Kébir-Est	El Tarf	52	58.33	521	47 (51.5)	37	1.27
Bougous	Bougous	El Tarf	136	-	280.3	65	49	1.33
Cheffia	Bouamoussa	El Tarf	165	167	926.7	171.99	95	1.81
Zit Emba	El Hammam	Skikda	86	91	722	117.39	43.2	2.72
Zardézas	Saf-Saf	Skikda	197	199.2	113.5	31	32	0.97
Guenitra	Fessa	Skikda	164	167.7	671,4	125	48	2.60
Béni Zid	Guergoura	Skikda	66	71.6	328.6	40	20	2.00
El Agrem	El Agrem	Jijel	139	141.5	114.1	34	21.5	1.58
Kissir	Kissir	Jijel	44.5	47.92	222.5	68	68	1
Erraguene	Djendjen	Jijel	670	-	160	200	99	2.02
Ighil Emda	Agrioun	Bejaia	532	535	2706	154 (160)	110	1.4
K'sob	K'sob	M'sila	604	605.5	259.1	30	20	1.5
Babar	Babar	Khenchela	940	942.5	41.28	41	12	3.42
Fontaines des Gazelles	El Hai	Biskra	384	388	812.1	55.5	14	3.96
Foum El Gherza	El Abiod	Biskra	198.9	203.85	380	47	13	3.62
Koudiat Medaour	Reboa	Batna	992.5	996.65	565.2	69	18	3.83
Foum El Gueiss	Gueiss	Khenchela	961.9	964	33.1	3	3.2	0.94
Hammam Grouz	Rhumel	Mila	727	736	486	45	16	2.81
Beni Haroun	Kébir	Mila	200	214.8	3799	963	435	2.21
Boussiaba	Boussiaba	Jijel	74.4	78.62	2192	120	100	1.20
Ain Dalia	Medjerda	Souk Ahras	710	712	566.2	82	45	1.82
Hammam Debagh	Bouhamdane	Guelma	360	370.24	589.3	200 (220)	55	3.64
Foum El Khanga	Cherf	Souk Ahras	745	750	1412	157	30	5.23
Ain Zada	Boussellam	Bordj Bou Arreridj	855	864.2	1188	125	50	2.50
Tichy Haf	Boussellam	Bejaia	294.5	-	556	80	150	0.53

- : absence des données

CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, nous sommes parvenus à mettre en évidence les caractéristiques des bassins d'alimentation des barrages, où les superficies, les pentes ainsi que les écoulements montrent une grande diversité. Les bassins d'alimentation des 25 ouvrages contrôlent une surface drainée globale de 25 224 km², variant entre 39 km² (bassin El Agrem) et 7725 km² (bassin de Béni Haroun). Ces bassins présentent des pentes qui les différencient nettement, de l'Atlas tellien (prédominance des classes de pentes de 9 à 14 %, 15 à 25 % et supérieure à 25 %), aux bassins des Hautes Plaines (prédominance de la classe 0 à 4 % ; la classe supérieure à 25 % apparaît seulement dans les monts du Hodna pour le barrage K'sob), et enfin les bassins de l'Atlas saharien aux pentes fortes. L'estimation des débits écoulés par le modèle « LOIEAU » a permis de faire ressortir une gamme très étendue de lames d'eau d'écoulement, variant entre 15 mm/an au bassin de Foug El Gherza (Piémont Sud des Aurès) à 501 mm/an au bassin d'Erraguene (Petite Kabylie). Les ressources potentielles en eau de surface de 25 bassins sont quantifiées autour de 2 milliards de m³ par an. Aussi, les résultats d'analyse des écoulements annuels par la variable centrée réduite ont permis de dégager différentes périodes humides et sèches et leur alternance n'est pas homogène partout.

Par ailleurs, la présentation des caractéristiques hydrotechniques des barrages, a montré une grande variété d'ouvrages hydrauliques, du point de vue des digues et ouvrages annexes et des lacs de retenue. Deux grands types de digues dominent : les barrages souples (18), répartis entre barrages en terre (15) et barrages en enrochement (3), et les barrages rigides (7), en béton ou en maçonnerie, répartis entre barrages de type poids (5) et barrages à multivoûtes (2). Ces barrages sont dotés d'ouvrages annexes nécessaires à leur sécurité et à leur fonctionnement productif. La majorité de barrages comprennent un déversoir à seuil libre, des barrages sont équipés de types différents d'évacuateurs, comme celui du barrage Cheffia et du barrage Hammam Debagh. Par ailleurs, les ouvrages de vidange sont dimensionnés pour des débits très variables, de 21 m³/s (barrage Fontaines des Gazelles) à 700 m³/s (barrage Béni Haroun). Enfin, pour les lâchers d'eau de consommation, les prises d'eau comportent trois niveaux pour la plupart des ouvrages. L'analyse des caractéristiques de lacs de retenues révèle que les barrages ont des capacités très différenciées, variant entre 3 hm³ au petit barrage de Foug El Gueiss et 963 hm³ au grand barrage de Béni Haroun. Aussi, le volume régularisable (théorique) des barrages est très variable, allant de 3.2 hm³ par an (Foug El Gueiss) à 435 hm³ par an (Béni Haroun). Les valeurs du ratio capacité /volume régularisable passent de 0.5 au barrage Tichy Haf (oued Bousselem) à 5.2 au barrage Foug El Khanga (oued Cherf). En outre, la présentation des courbes de remplissage pour quelques barrages permet d'évaluer les surfaces de lacs de retenue et les volumes correspondants pour différentes cotes.

Les caractéristiques morphologiques, hydrologiques et hydrotechniques nous permettent de procéder à l'analyse de la variabilité des différents termes du bilan d'eau des barrages, objet du chapitre qui suit.

CHAPITRE 3

**VARIABILITE TEMPORELLE ET SPATIALE DU BILAN D'EAU DES
BARRAGES (APPORT, RESERVE ET PRECIPITATIONS) ET LIEN
AVEC LES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES**

INTRODUCTION AU CHAPITRE

Ce chapitre vise à étudier et caractériser la variabilité des apports, des réserves et des pluies à différentes échelles de temps sur un échantillon de dix barrages. Le choix de ces barrages répond à deux principaux critères : leurs données disponibles et leurs répartitions géographiques dans l'Est algérien. En effet, comme indiqué au chapitre 1, la disposition de séries chronologiques de données communes suffisamment longues (23 ans au minimum), avec un pas d'échantillonnage suffisamment court (journalier), est un critère primordial (cf. chapitre 1). Aussi, les bassins d'alimentation des dix barrages retenus sont répartis à travers des contextes physiques très contrastés (l'Atlas tellien au Nord et les Piémonts de l'Atlas saharien au Sud), où le régime climatique est très varié (du climat humide au climat aride) (figure 65). En outre, la capacité des retenues varie de 3 à 200 hm³ (barrage Foum El Gueiss : 3 hm³, barrage K'sob : 30 hm³, barrage Zardezas : 31 hm³, barrage Hammam Grouz : 45 hm³, barrage Foum El Gherza : 47 hm³, barrage Ain Dalia : 82 hm³, barrage Guénitra et Ain Zada : 125 hm³, barrage Cheffia : 171 hm³, et barrage Hammam Debagh : 200 hm³).

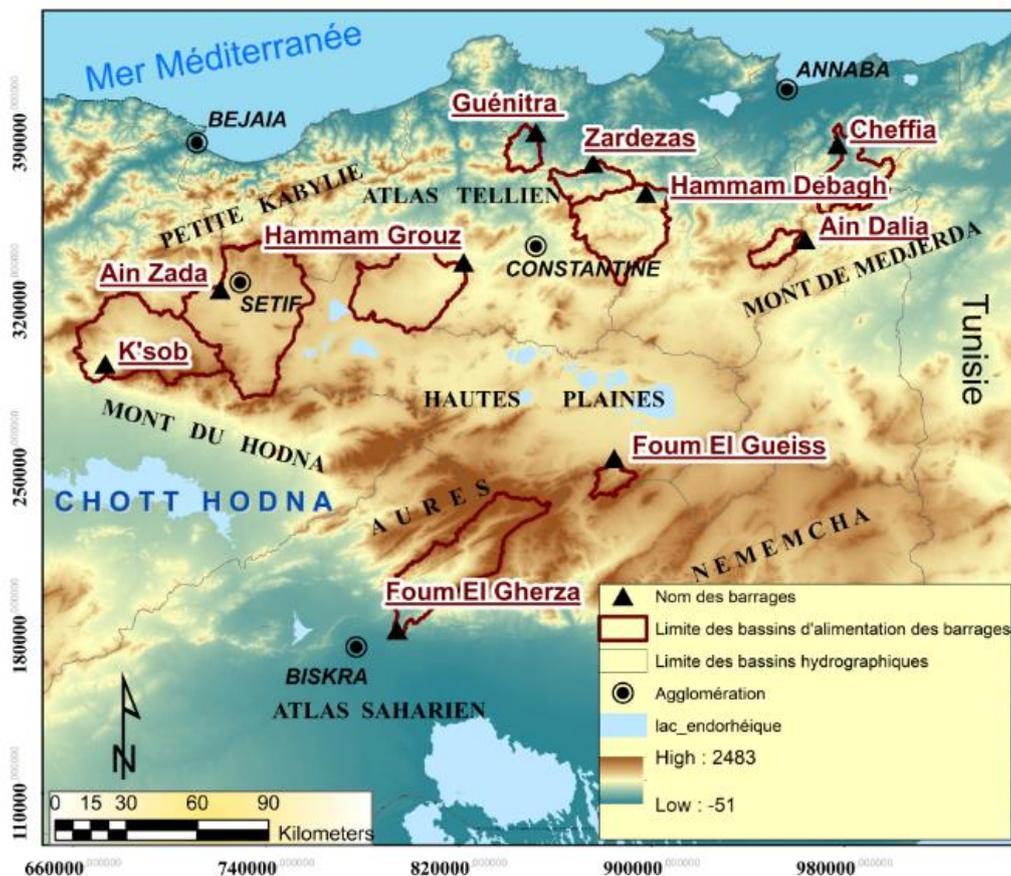


Figure 65 : Répartition spatiale des dix barrages aux séries de mesures communes (23 ans)

Les séries chronologiques du bilan d'eau permettent de suivre l'évolution du gain et perte de capacité d'une retenue (figure 66). 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, dévasement et consommation).

ΔV ou variation de stock : volume qui reste dans la cuvette (réserve finale – réserve initiale).

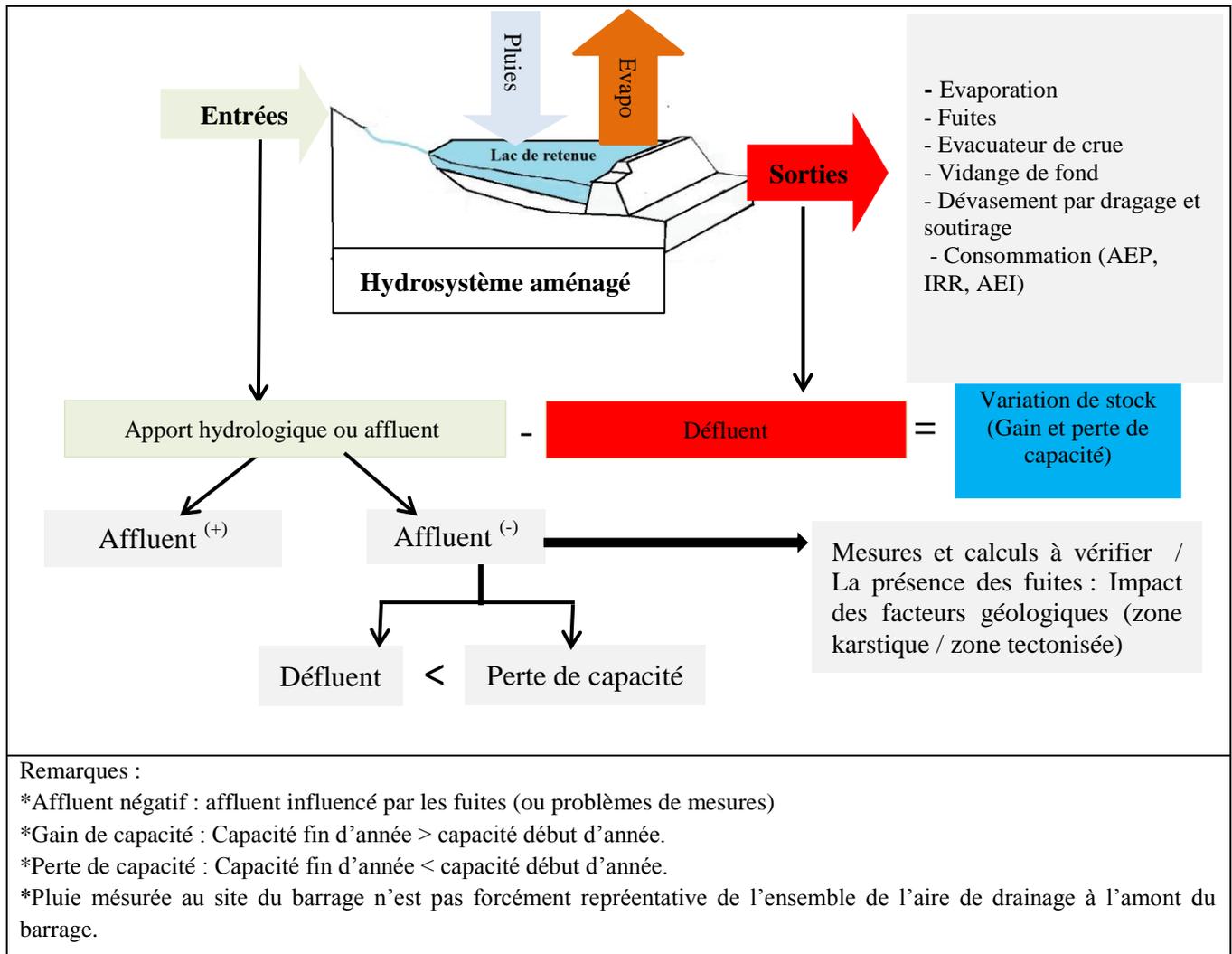


Figure 66 : Présentation schématique des termes du bilan d'eau d'un barrage

Les questions scientifiques abordées dans ce chapitre se rapportent au régime de fonctionnement hydrologique des barrages à partir des données de calcul de leurs bilans d'eau :

- Quels caractères particuliers décrivent-ils la variabilité du fonctionnement hydrologique des lacs des barrages?
- Peut-on différencier de façon significative la variabilité des principaux termes du bilan d'eau (apport, pluie et réserve) entre les dix barrages ? Les fluctuations climatiques contrôlent-elles les modes de variabilité hydrologique de façon prédominante ?

Dans un premier volet, nous nous intéressons à l'étude descriptive de l'évolution interannuelle et mensuelle du bilan hydrologique des barrages pour différentes périodes d'exploitation.

Le deuxième volet est basé sur la détermination des discontinuités et des périodes caractéristiques dans les séries des apports, pluies et réserves. L'approche statistique de la méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTT) de type matrice Bertin (Nouaceur et al, 2013; Laignel et al, 2014) est mise en œuvre pour déterminer les dates de changement du cycle. Aussi, les analyses spectrales (analyses par la transformation en ondelettes continues, cohérence en ondelettes), permettent de détecter les structures (périodicités, fluctuations) et leur évolution au cours du temps (discontinuités) des signaux instationnaires. Ces méthodes ont été déjà appliquées sur des bassins versants situés en Afrique du Nord (Chettih et al, 2011 ; Zamrane, 2016 ; Turki et al, 2016a, 2016b), aux Etats unis (Mesquita, 2009 ; Rossi, 2010 ; Massi et al, 2010 ; Lins et Slack, 1999 ; Mauget, 2004 ; Novotny et Stefan, 2007) ou sur les grands fleuves français (Chevalier et al, 2014, 2017; Chevalier, 2014 ; Massei et al, 2007, 2010; Dieppois et al, 2013; Fritier et al, 2012).

Enfin, un troisième volet sera consacré plus spécifiquement à la définition des relations potentielles entre l'oscillation d'origine climatique (NAO) et la variabilité hydrologique (apport et pluie).

1. VARIATIONS INTERANNUELLES ET MENSUELLES DES APPORTS, RESERVES ET PRECIPITATIONS

1.1. Variations interannuelles

La figure 67 donne un aperçu des variations interannuelles des apports aux barrages, des réserves (enregistrées en fin d'année) et des pluies sur des périodes d'exploitation égales ou supérieures à 23 ans.

- **Le barrage Cheffia (figure 67 a).** Ce barrage a enregistré durant 36 ans d'exploitation un apport moyen annuel de 122 hm³. Il a connu une augmentation très importante des apports durant les années 1986/87, 2002/03 et 2004/05 avec un volume de remplissage de l'ordre de 100.48 hm³, 111.85 hm³ et 103.82 hm³, et une diminution remarquable durant les années 1987/88, 1988/89, 1989/90, 1996/97 et 2001/02 où le volume de remplissage a atteint son minimum (9.08 hm³ en 1988/89). Le barrage se distingue par un affluent négatif de -0.81 hm³ en 2001/02 avec une perte de capacité de 49.23 hm³ plus importante que les défluent (48.42 hm³). Il convient de noter que ces fluctuations sont liées directement avec la variabilité des précipitations. L'année 1986/87 se distingue par une très forte pluviosité (1261.4 mm) alors que l'année 1996/97 est marquée par une très faible pluviosité (439.2 mm).

- **Le barrage Ain Dalia (figure 67 b) :** depuis l'année 1990/91 jusqu'à l'année 2015/16, son volume de remplissage n'a jamais atteint le volume normal de retenue (VNR) qui est de l'ordre de 82 hm³. L'apport moyen annuel est de 39.98 hm³, variant entre 1.11 hm³ en 1996/97 et 104.43 hm³ en 2002/03, année correspondant au premier déversement de crue du

barrage (cf. chapitre 4). Les précipitations peuvent atteindre des niveaux considérables culminant à 1222.8 en 2002/03. La moyenne a été de 729.4 mm et l'écart-type de 221.9 mm.

- **Le barrage Hammam Debagh (figure 67 c)** : sur une période d'exploitation de 26 ans, les apports moyens annuels varient entre 409.5 hm³ en 2004/05 (avec un volume de remplissage en fin d'année de 166.68 hm³) et 3.13 hm³ en 1996/97 (avec un volume de remplissage en fin d'année de 100.13 hm³). Les années 2002/03, 2004/05 et 2014/15 ont présenté une hydraulité particulièrement forte, alors que trois années ont été particulièrement très faibles (1996/97, 1999/2000 et 2001/2002). Les cumuls des précipitations ont fluctué entre 314.8 mm en 1996/97 et 845.2 mm en 2002/03.

- Les apports au **barrage Zardezas (figure 67 d)** enregistrent pendant une période d'exploitation de 38 ans (de 1975/76 à 2012/13) une moyenne de 47.24 hm³, et une très forte variabilité interannuelle (Cv : 83 %). Les apports maximums se situent dans les années 1983/84 (93.30 hm³), 1984/85 (202.18 hm³), 1986/87 (96.36 hm³), 2002/03 (116.73 hm³) et 2004/05 (135.04 hm³), alors que les apports minimums se situent dans les années 1979/80 (13.38 hm³), 1985/86 (8.38 hm³), 1987/88 (7.68 hm³), 1989/90 (7.45 hm³), 1996/97 (-0.04 hm³) et 2001/02 (4.09 hm³). Pour une capacité de retenue de 31 hm³, le volume de la réserve oscille entre 1.05 hm³ en 1996/97 et 22.02 hm³ en 1978/79. L'irrégularité de remplissage est liée directement aux précipitations, les valeurs les plus importantes des apports et des réserves mentionnées précédemment correspondent aux années les plus pluvieuses, alors que la faible pluviosité coïncide avec les années où la capacité a eu un abaissement critique (année 1987/88, 1996/97, 2000/01 et 2001/02).

- **Le barrage Guenitra (figure 67 e)** a réceptionné un apport moyen annuel de 35.05 hm³ au cours d'une période de 26 ans (de 1987/88 à 2012/13). L'année exceptionnelle hyperhumide de 2004/05, se distingue par un apport annuel de 114.12 hm³ et par un volume de réserve qui dépasse 100 hm³. L'année très sèche de 2001/02 est marquée par un apport de 2.88 hm³ et un volume de réserve de 0.14 hm³. Les précipitations moyennes annuelles enregistrées au site du barrage sont de l'ordre de 664.7 mm, avec une faible variabilité interannuelle (cv : 20 %). La hauteur annuelle maximale est de 1000.1 mm (2002/03), alors que la hauteur minimale est de 455.2 mm (1987/88).

- Les apports annuels du barrage **Hammam Grouz (figure 67 f)**, ont fluctué sur la période d'exploitation de 1988/89 à mars 2016, entre 57.61 hm³ (2002/03) et -12.93 hm³ (apport négatif de 2005/06, fortement impacté par les fuites karstiques). Trois années ont enregistré des apports annuels très importants : 2002/03 (57.61 hm³), 2004/05 (35.93 hm³) et enfin 2014/15 (36.11 hm³). La réserve en fin d'année était respectivement de 23.79 hm³, 27.36 hm³ et 27.28 hm³. La variation annuelle des apports et des volumes de remplissage concorde en général avec celle des pluies, excepté les années 2003/04, 2005/06, 2006/07 et 2015/16 qui enregistrent des apports négatifs et une tendance à la baisse des réserves, malgré les valeurs importantes des précipitations. La présence du phénomène de fuites en est l'explication (cf. chapitre 4).

- Au barrage **Ain Zada (figure 67 g)**, les variations annuelles du volume de remplissage, suivent étroitement celles des apports (apport moyen annuel : 36.32 hm³ ; volume de réserve moyen en fin d'année : 87.64 hm³). Un évènement majeur lié aux apports pluvieux exceptionnels de l'année hydrologique 2002/03 a marqué le fonctionnement de l'ouvrage : l'apport annuel est de 128.67 hm³ et le volume de la réserve a atteint en fin d'année les 116.3 hm³ alors qu'il était de 23.1 hm³ pendant l'année précédente (2001/02). Les cumuls annuels des précipitations au site du barrage Ain Zada correspondent à deux phases distinctes : une phase à tendance sèche s'étalant de 1987/88 à 2001/02 (seules trois années sont humides : 1988/89, 1994/95 et 1995/96) et une phase pluvieuse qui survient à partir de 2002/03 jusqu'à l'année 2012/13 (seule l'année sèche de 2011/12 s'y intercale).

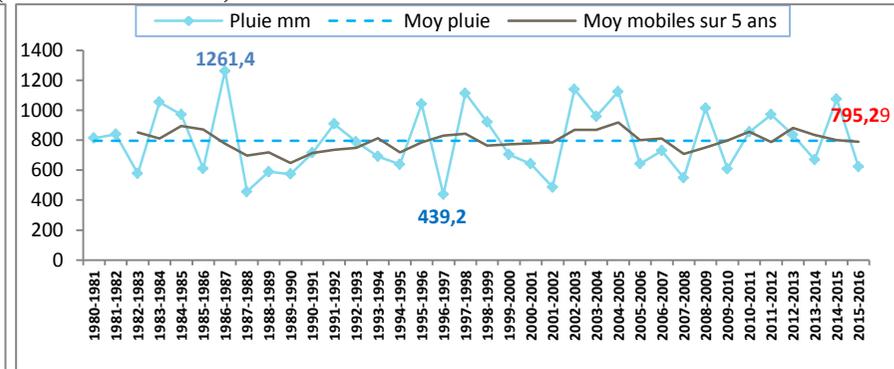
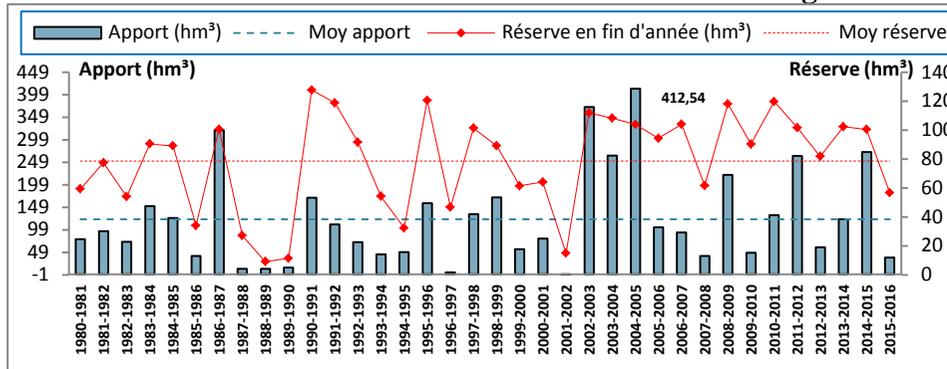
- L'apport moyen annuel au barrage **K'sob** est de l'ordre de 43.4 hm³ (période : 1990/91 - 2012/13). L'année exceptionnelle 1994/95 se distingue par un apport de 102.3 hm³ engendrant un volume de remplissage en fin d'année de l'ordre de 17.5 hm³, ce qui a mis en fonction l'évacuateur des crues et la vidange de fond (volume total annuel évacué : 58.5 hm³) (cf quatrième chapitre). Les variations annuelles des apports et des volumes de remplissage reflètent l'allure de la courbe des précipitations annuelles dont la moyenne est de 226.24 mm et l'écart-type de 71.56 mm (**figure 67 h**).

- Pour le petit barrage envasé de **Foum El Gueiss (figure 67 i)**, la moyenne interannuelle (1990/91 - 2015/16) des apports est de l'ordre de 14.56 hm³, avec une forte variabilité (Cv : 87.36 %). Onze valeurs annuelles sont supérieures à la moyenne dont trois valeurs particulièrement fortes, observées en 1990/91 (36.15 hm³), en 2002/03 (52.86 hm³) et en 2003/04 (35.69 hm³), alors que quinze valeurs annuelles sont inférieures à la moyenne. L'élément à retenir est le faible volume de réserve de cette retenue (volume normal se réduisant à 3 hm³ auquel il faut soustraire la tranche morte), qui déverse en général plusieurs fois dans l'année vu l'importance des apports du bassin. Le volume de remplissage en fin d'année montre une augmentation pour les deux années 1991/92 (1.14 hm³) et 1999/00 (1.04 hm³), et un abaissement du stock durant les années 2003/04 (0.04 hm³), 2009/10 (0.07 hm³), 2011/12 (0.03 hm³), 2012/13 (0.02 hm³) et 2015/16 (0.01 hm³).

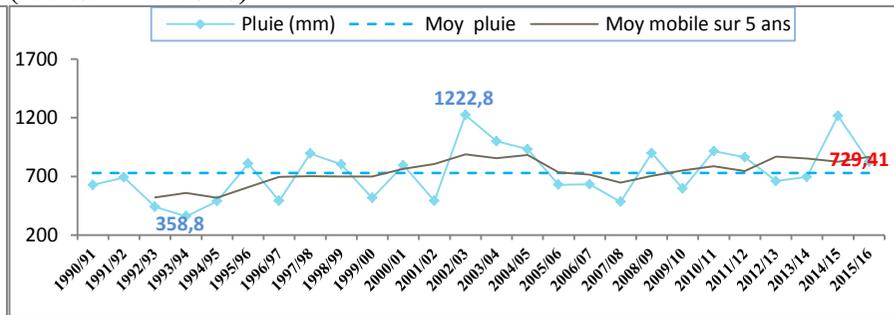
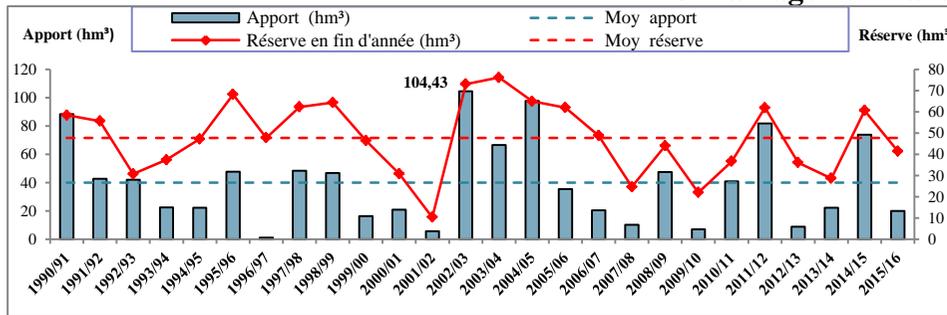
- Le réservoir de **Foum El Gherza** a connu durant les 47 ans d'exploitation (1967/68- 2013/14) un apport interannuel de 26.56 hm³ (pour un apport estimé à 21.3 hm³ dans l'étude d'APD), avec une très forte variabilité (Cv : 145 %). Deux phases ont marqué l'évolution des apports au barrage : une première phase entre 1967/68 et 2002/03 où les apports en écoulement n'ont pas atteint les 55 hm³ ; une seconde phase entre 2003/04 et 2013/14 où les apports ont dépassé les 100 hm³ (**figure 67 j**). Sur le plan pluviométrique, l'écart entre le maximum annuel (424.40 mm en 1969/70) et le minimum annuel (40.4 mm en 2000/01) atteint les 383.9 mm. La capacité en fin d'année varie de 0.06 hm³ (1978/79) à 22.83 hm³ (1989/90), le volume de remplissage, en raison de l'importance des déversements de crue, accentués par l'important rythme d'envasement, ne reflète pas les entrées que représentent les apports des oueds au barrage. Cas de l'année 2011/12 où le volume déversements a atteint 194.07hm³.

Chapitre 3 : Variabilité temporelle et spatiale du bilan d'eau des barrages (apport, réserve et précipitations) et lien avec les fluctuations climatiques

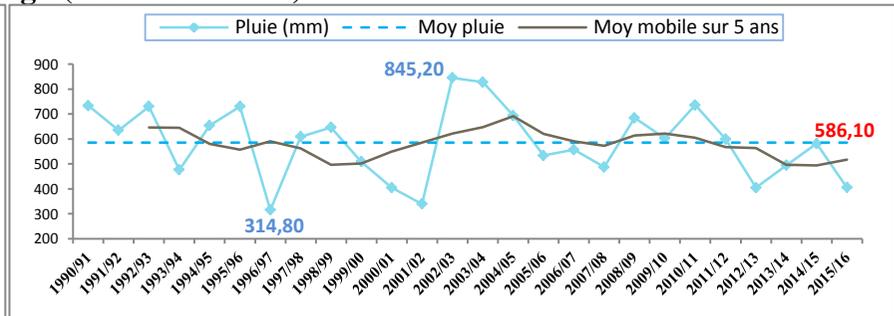
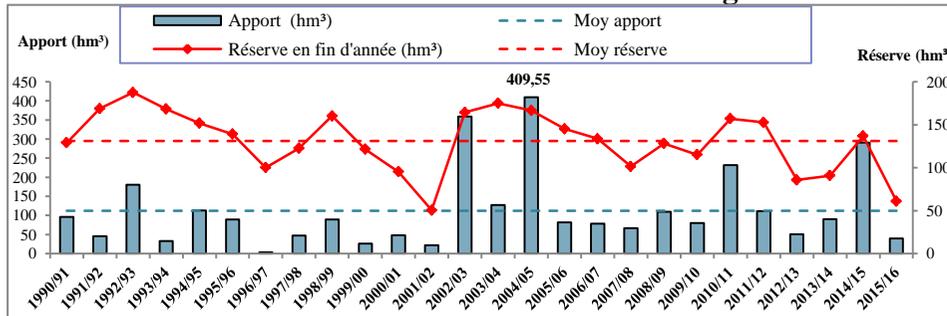
a. Barrage Cheffia (1980/81-2015/16)



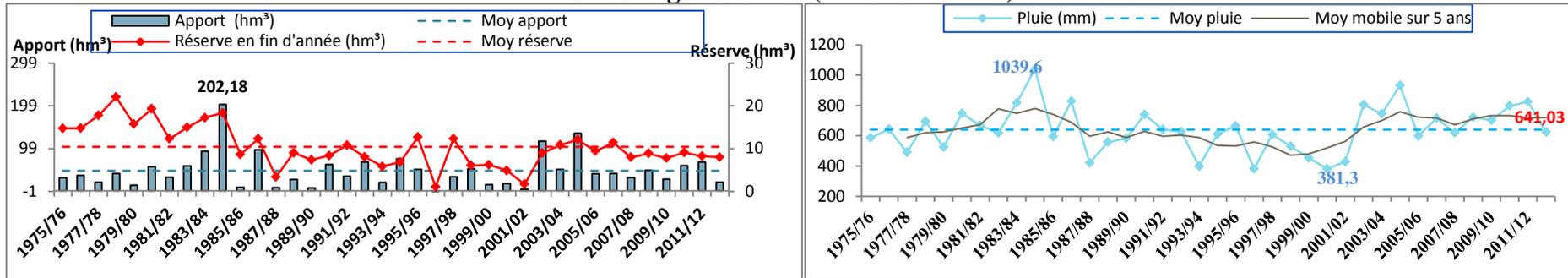
b. Barrage Ain Dalia (1990/91-2015/16)



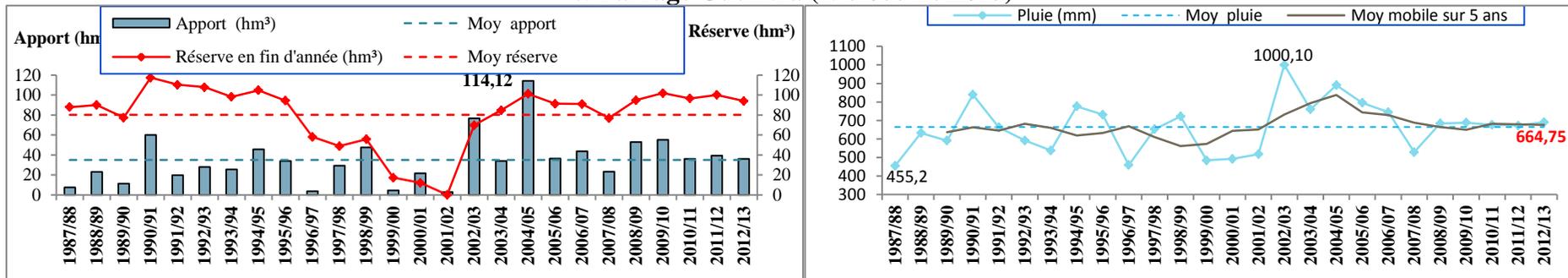
c. Barrage Hammam Debagh (1990/91-2015/16)



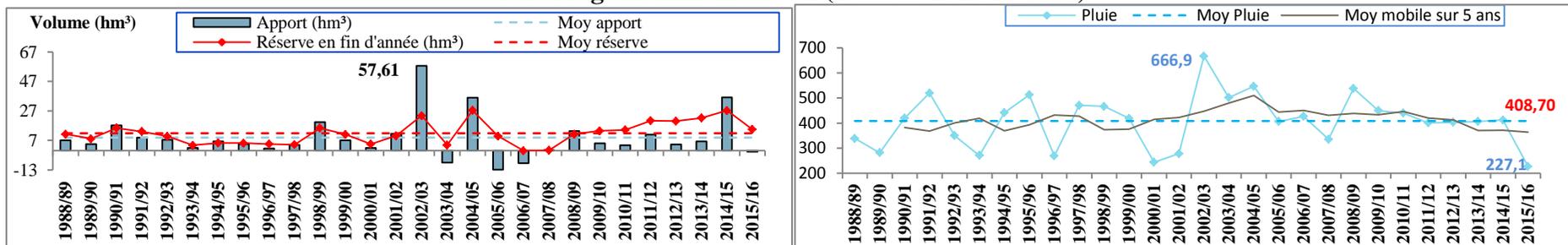
d. Barrage Zardezas (1975/76-2012/13)



e. Barrage Guénitra (1987/88-2012/13)

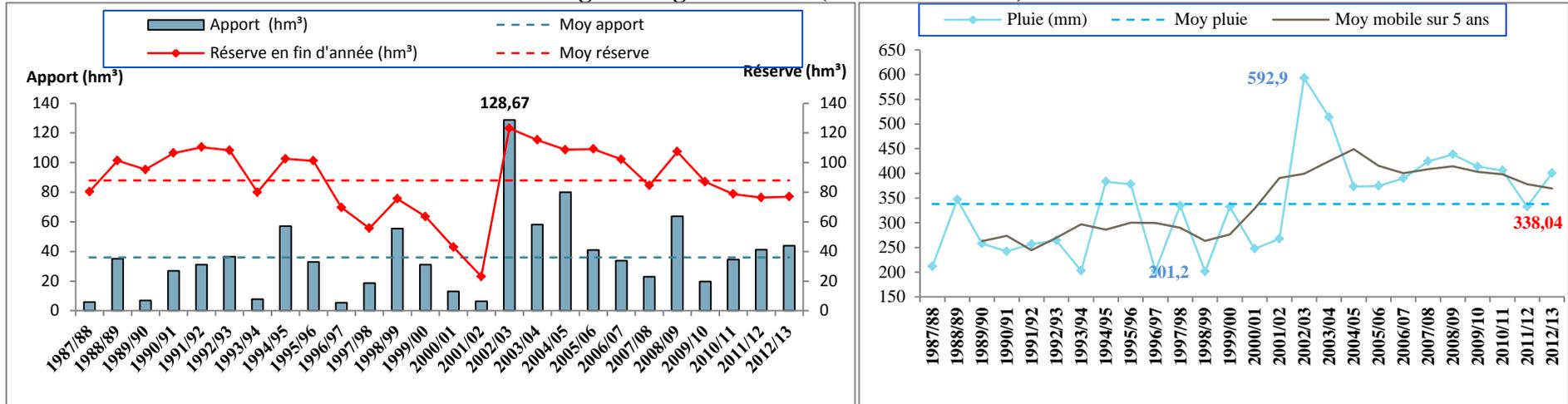


f. Barrage Hammam Grouz (1988/89-2015/mars16)

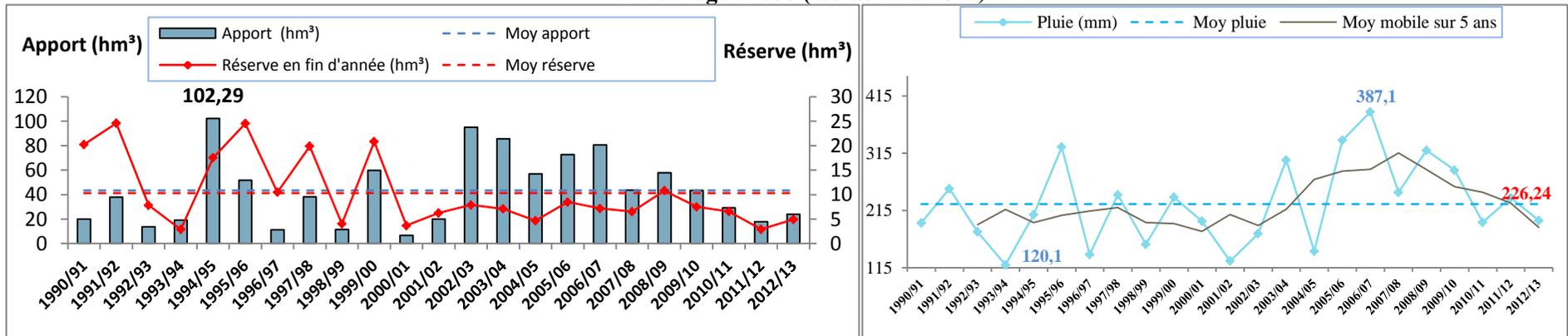


Chapitre 3 : Variabilité temporelle et spatiale du bilan d'eau des barrages (apport, réserve et précipitations) et lien avec les fluctuations climatiques

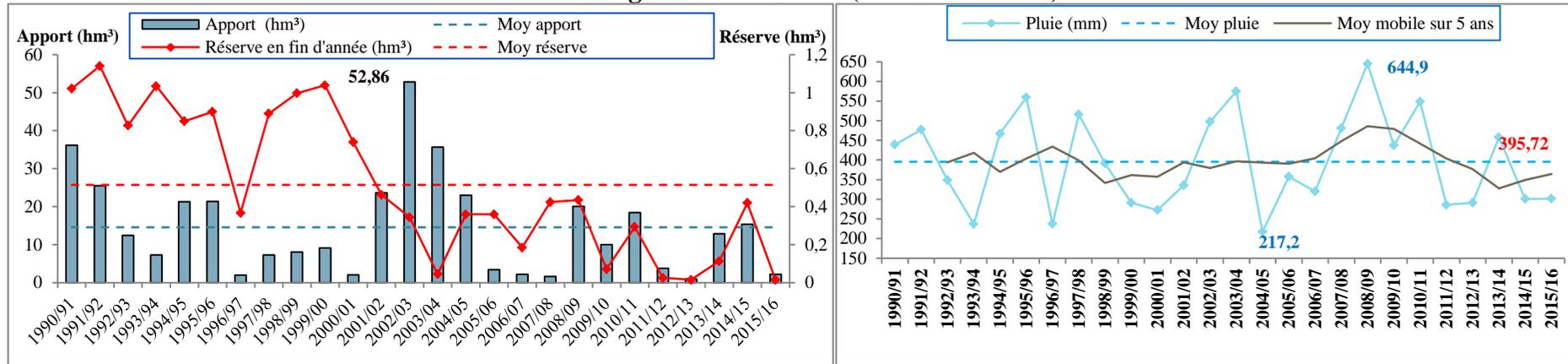
g. Barrage Ain Zada (1987/88-2012/13)



h. Barrage K'sob (1990/91-2012/13)



i. Barrage Foug El Gueiss (1990/91-2015/16)



j. Barrage Foug El Gherza (1967/68-2013/14)

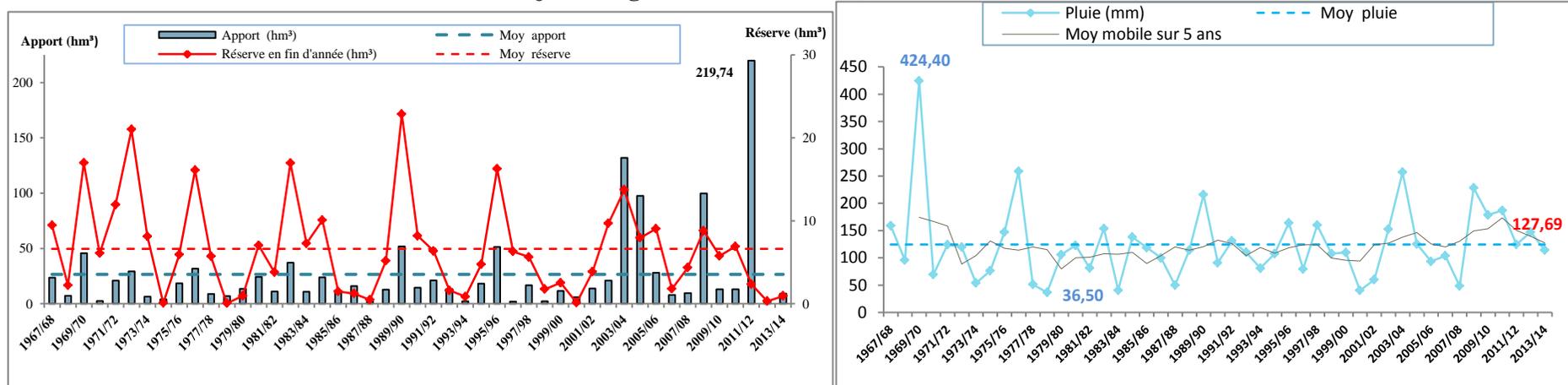


Figure 67 : Variations annuelles des apports, des réserves (en fin d'année) et des pluies sur dix barrages de l'Est algérien

1.2. Variations du régime hydro-pluviométrique mensuel en année déficitaire et en année excédentaire

La variation mensuelle permet d'apprécier le caractère variable du régime hydro-pluviométrique des barrages, en analysant les données de deux années extrêmes (année humide et année sèche) identifiées pour chaque barrage. Les graphes de la figure 68 renseignent sur la forte variabilité du régime mensuel et saisonnier.

Le barrage Cheffia (figure 68 a): pendant l'année sèche 2001/02, caractérisée par une réduction exceptionnelle de la réserve (diminution d'une valeur de 55.29 hm³ en septembre 2001 à une valeur de 14.85 hm³ en aout 2002), le barrage a enregistré l'apport moyen le plus faible (affluent négatif de -0.81 hm³). L'année 2004/05, la plus marquée par l'abondance hydrologique, se caractérise par une forte pluviosité (1124.50 mm), variant entre un maximum mensuel de 232.80 mm en novembre et un minimum de 7 mm en mai. L'importance de cette pluviométrie engendre des apports remarquables, par ordre d'importance : 83.79 hm³ (en avril), 74.65 hm³ (en décembre), 69.57 hm³ (en janvier), 49.83 hm³ (en novembre) et 35.78 hm³ (en mars). La réserve dans la retenue dépasse les 149 hm³ pendant les deux mois d'avril et de mai 2005, ce qui a mis en fonction la vidange de fond avec un volume de 75.02 hm³ (cf. quatrième chapitre).

Le barrage Ain Dalia (figure 68 b) : Deux années exceptionnelles ont marqué la vie de cet ouvrage 2001/02 et 2002/03. L'année 2001/02 est considérée comme une année sèche, du fait que les apports et les pluies sont très faibles ainsi que le volume de remplissage (ou la réserve) a diminué d'une valeur de 27.97 hm³ en septembre 2001 à une valeur de 10.31 hm³ en aout 2002.

Pendant l'année humide 2002/03, les apports et les pluies sont globalement forts, deux pics principaux (mois de janvier et avril) et trois pics secondaires (mois de décembre, février et mars). Le volume de remplissage montre également une augmentation importante de l'ordre de 82 hm³ (mois d'avril et mai).

Le barrage Hammam Debagh (figure 68 c) : en 2001/02, année très sèche, l'apport total annuel est de 22.31 hm³, variant entre un maximum de 4.12 (mois d'aout) et un minimum de 0.23 hm³ (mois de mars). La réserve a diminué d'une valeur de 94.92 hm³ au 1^{er} septembre 2001 à une valeur de 50.54 hm³ au 31^{er} aout 2002.

L'année 2004/05 étant considérée comme une année humide, le barrage a réceptionné un apport total de 409.55 hm³ avec un cumul de pluie de 693.6 mm. L'apport mensuel maximal est enregistré en novembre (109.83 hm³ pour une pluie mensuelle enregistrée au site du barrage de 165.9 mm), un deuxième pic est observé en février (103.37 hm³, 94.8 mm de pluie). Il est à noter que la réserve du barrage a dépassé 182 hm³ au cours des mois de novembre à avril.

Le barrage Zardezas (figure 68 d) : Son fonctionnement hydrologique a connu deux années exceptionnelles, 1984/85 et 1996/97. L'exemple de l'année hyper pluvieuse 1984/85 montre que la variation des apports suit globalement la même variation des précipitations. Un premier

pic principal en décembre (un apport de 87.18 hm³ et une pluie de 422.50 mm) est suivi d'un second pic moins important (un apport de 58.83 hm³ et une pluie de 125.50 mm). Le dernier pic apparaît en mars avec un apport de 40.56 hm³ et une pluie de 159 mm. L'année 1996/97 particulièrement sèche se caractérise par un affluent négatif, pendant presque tous les mois en raison des fuites. La capacité du barrage a diminué de 10.77 hm³ fin septembre 1996 à 1.05 hm³ fin août 1997.

Le barrage Guenitra (figure 68 e) : L'irrégularité du régime de remplissage de la retenue est montré par l'exemple de l'année hydrologique très sèche de 2001/02 où le maximum des apports enregistré au mois de novembre 2001 ne dépasse pas 1.35 hm³, par ailleurs le barrage est presque à sec en juin 2002 (la réserve : 0.07 hm³). En revanche, dans le cas de l'année très pluvieuse de 2004/05, la quantité de pluie tombée durant six mois, allant du mois de novembre jusqu'au mois d'avril, dépasse les 830 mm, et la réserve du barrage a dépassé les 119 hm³.

Le barrage Hammam Grouz (figure 68 f) : durant l'année particulièrement humide 2002/03, le cumul des pluies de novembre à janvier est de 422.3 mm, engendrant un apport qui est passé de 4.62 hm³ en novembre à 31.71 hm³ en janvier. Après une pluie moins importante enregistrée en avril 2003 (71.6 mm correspondant à un apport de 8.23 hm³), la capacité du barrage a dépassé les 43 hm³, ce qui a mis en fonction l'évacuateur de crues. Mais une perte de capacité plus importante que les défluent apparaît pendant les mois de mai à août (affluent négatif) en raison du phénomène de fuites (cf chapitre 4). L'année 2005/06, se distingue par un minimum de -1.75 hm³ (affluent négatif) observé au mois d'octobre et par un apport maximum de 0.06 hm³ au mois de mai ; cette constatation s'explique par les volumes considérables des fuites karstiques. Or, la courbe des pluies présente deux pics : un pic hivernal enregistré en janvier (83.70 mm) et un deuxième pic en mai (103.00 mm).

Le barrage Ain Zada (figure 68 g) : l'année hydrologiquement déficitaire de 2001/02 est suivie de l'année excédentaire de 2002/03. Au cours de 2001/02, les apports et les pluies sont très faibles et la réserve du barrage a diminué de 43 hm³ au 1^{er} septembre 2001 à 23.10 hm³ au 31 août 2002. L'année suivante 2002/03, se caractérise par une augmentation importante de la capacité (plus de 126 hm³ en avril 2003), car de fortes valeurs de pluie et de débit ont été enregistrées pendant la saison hivernale et printanière (un cumul de pluie de 474.60 mm et un apport de 119.47 hm³), alors que de faibles valeurs ont été observées durant les saisons automnale et estivale (118.3 mm et 6.99 hm³).

Le barrage K'sob (figure 68 h) : en 1994/95, année pluvieuse, deux pics (pluie et apport) ont été enregistré respectivement en septembre et octobre, avec un troisième pic reporté au mois de mars. Le stock d'eau du barrage a augmenté de 2.87 hm³ en début de septembre 1994 à 17.55 hm³ à la fin d'août 1995. La courbe des apports de l'année hypersèche 2000/01 se distingue par un affluent négatif de - 8.37 hm³ pendant le mois de septembre, accompagné d'une chute remarquable de la réserve (d'une valeur de 20.83 hm³ au 31^{er} août 2000 à une

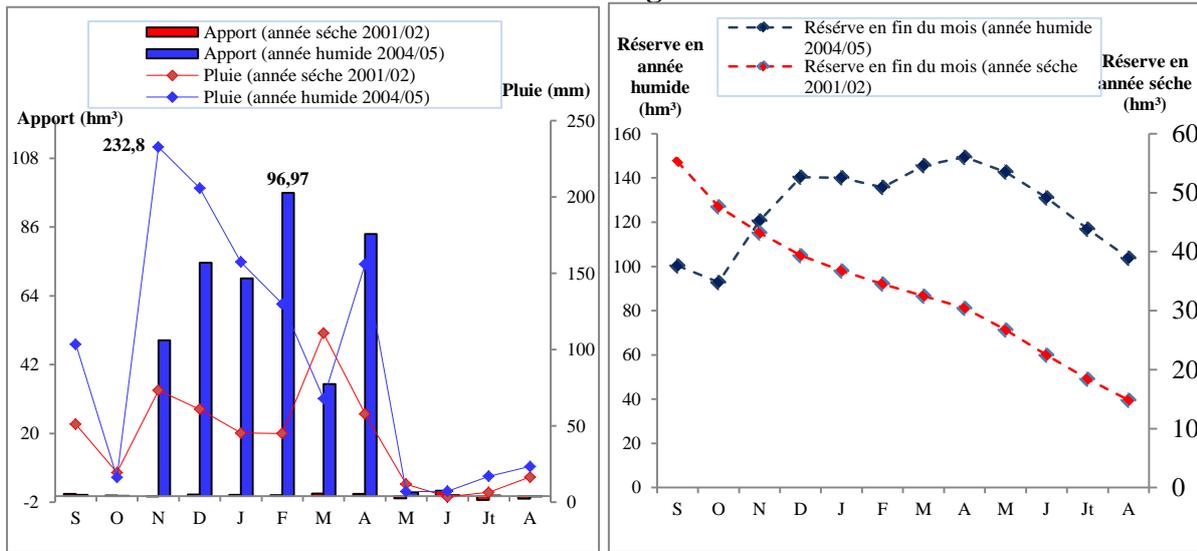
valeur de 10.90 hm³ au 31 septembre 2000), diminution pouvant s'expliquer par les quantités importantes des volumes évaporés (303.3 mm pendant le mois de septembre).

Le barrage Foum El Gherza (figure 68 i): deux années exceptionnelles très contrastées (1987/88 et 2011/12) sont retenues pour l'étude du régime du bilan d'eau de ce barrage. Le barrage est presque à sec durant l'année hypersèche de 1987/88 (la réserve a atteint 0.03 hm³ au mois de mai 1988). L'année humide 2011/12 se distingue par un pic principal automnal, enregistré en octobre avec une pluviosité de 107 mm, soit 85.87 % de la hauteur moyenne annuelle des précipitations. L'effet de cette importante pluviosité se traduit par un apport hydrologique qui a atteint 210.74 hm³ (soit 95.72 % à l'apport total de l'année).

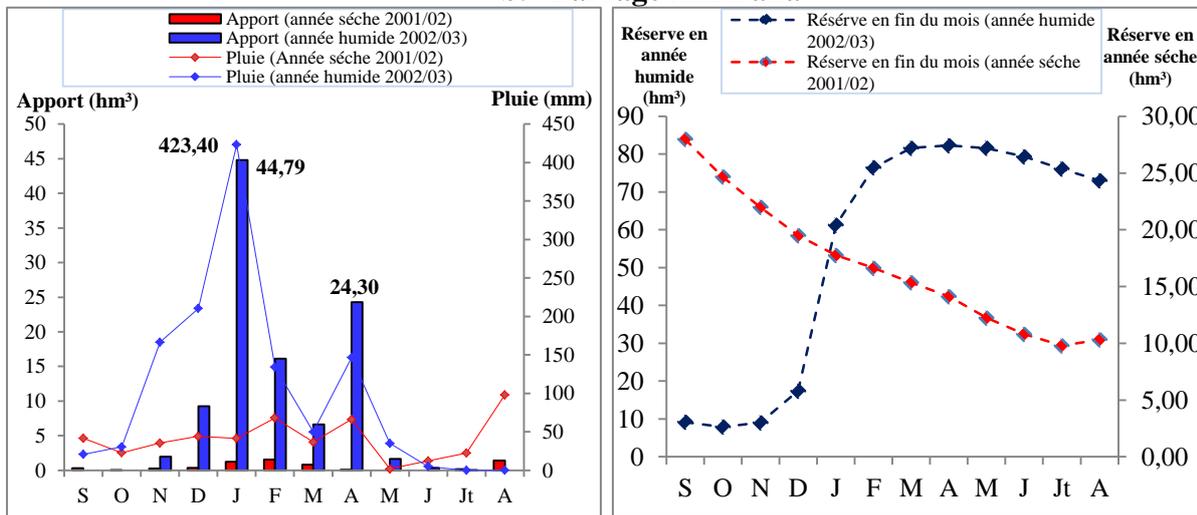
Le barrage Foum El Gueiss (figure 68 j): il se caractérise par une fréquence importante des années déficitaires par rapport aux autres barrages, du fait que la retenue est presque vide pendant les dernières années (envasement élevé). L'exemple de l'année hyper sèche 2012/13 montre que la quantité mensuelle de la pluie est faible, et l'apport hydrologique est presque nul pendant toute l'année.

En revanche, l'année 2002/2003 était excédentaire (un apport total annuel de 52.86 hm³). Un pic principal est enregistré en avril avec une pluie de 94.8 mm et un apport de 27.65 hm³ (contribuant à 52.31 % du total annuel). Il faut noter que la réserve au cours de cette année n'a pas dépassé 0.49 hm³, à cause des vidanges de fond et des déversements de crue d'un volume total de 51.44 hm³.

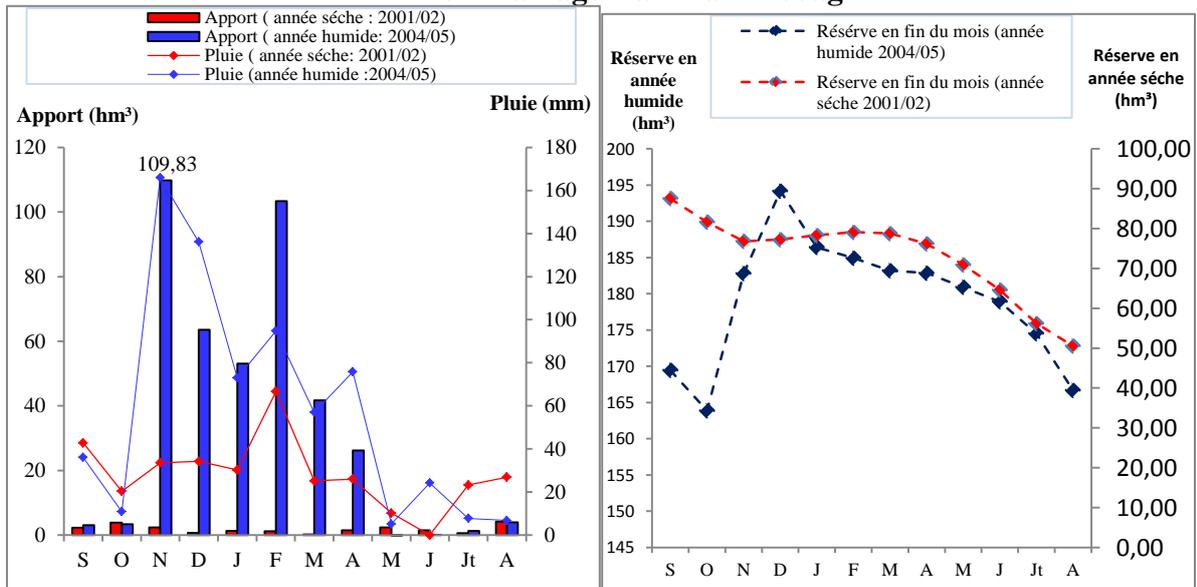
a. Barrage Cheffia



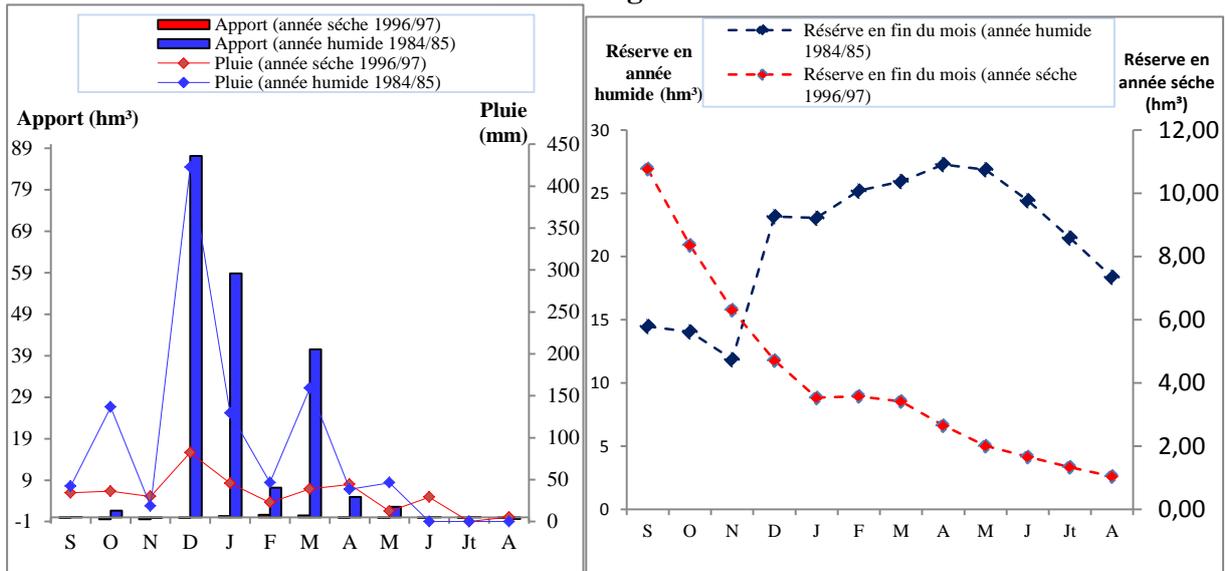
b. Barrage Ain Dalia



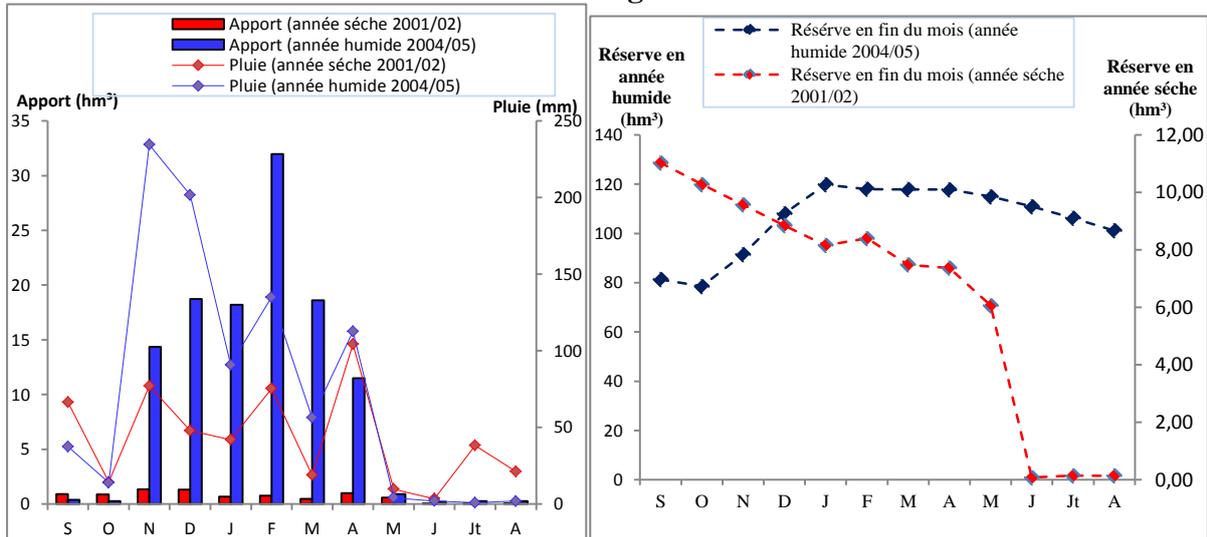
c. Barrage Hammam Debagh



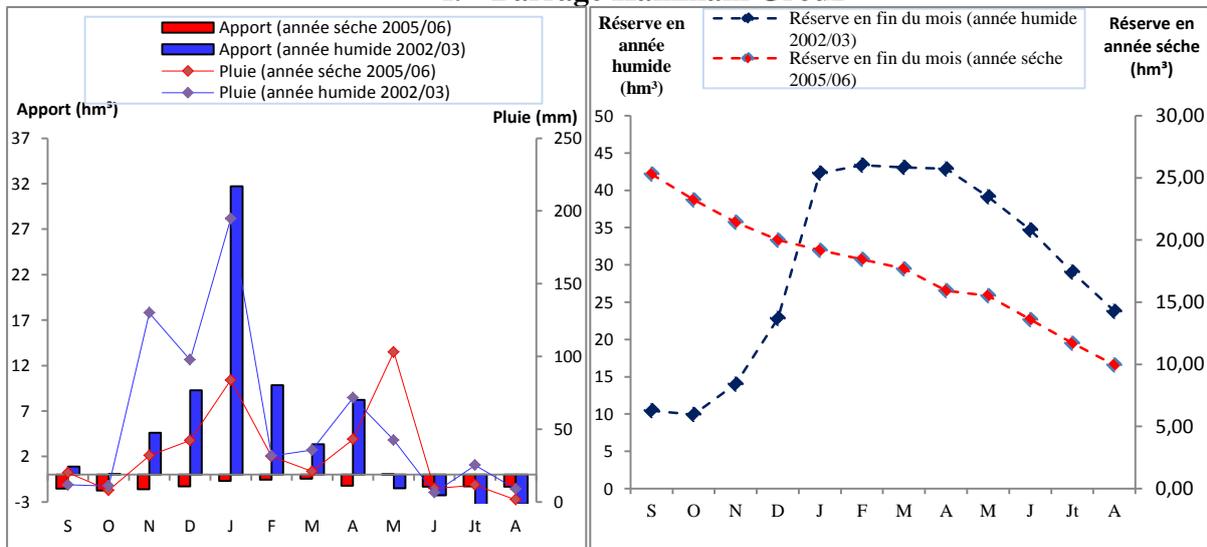
d. Barrage Zardezas



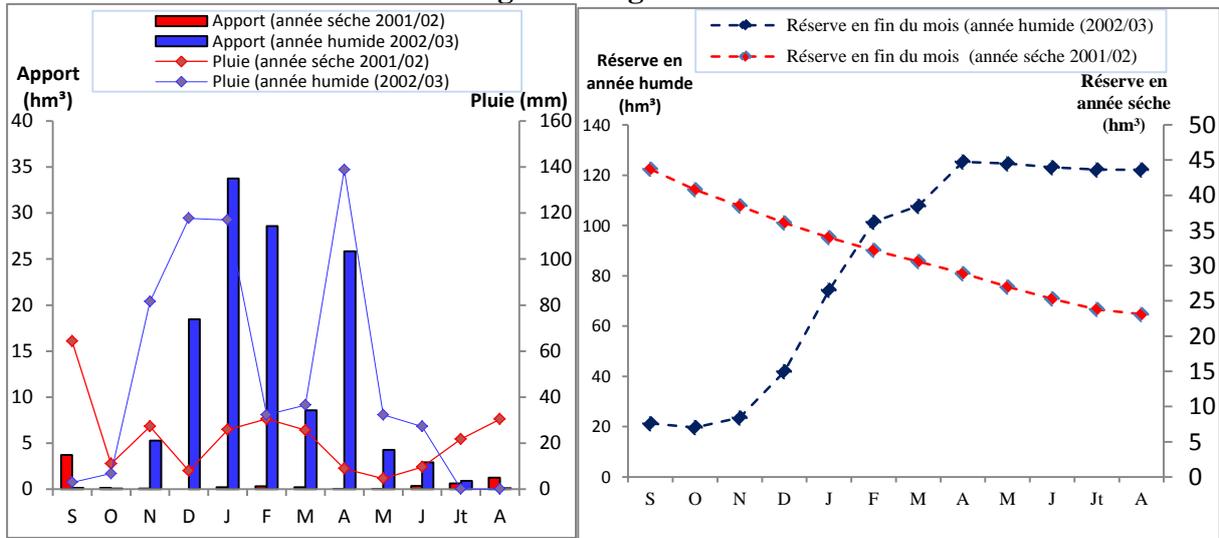
e. Barrage Guénitra



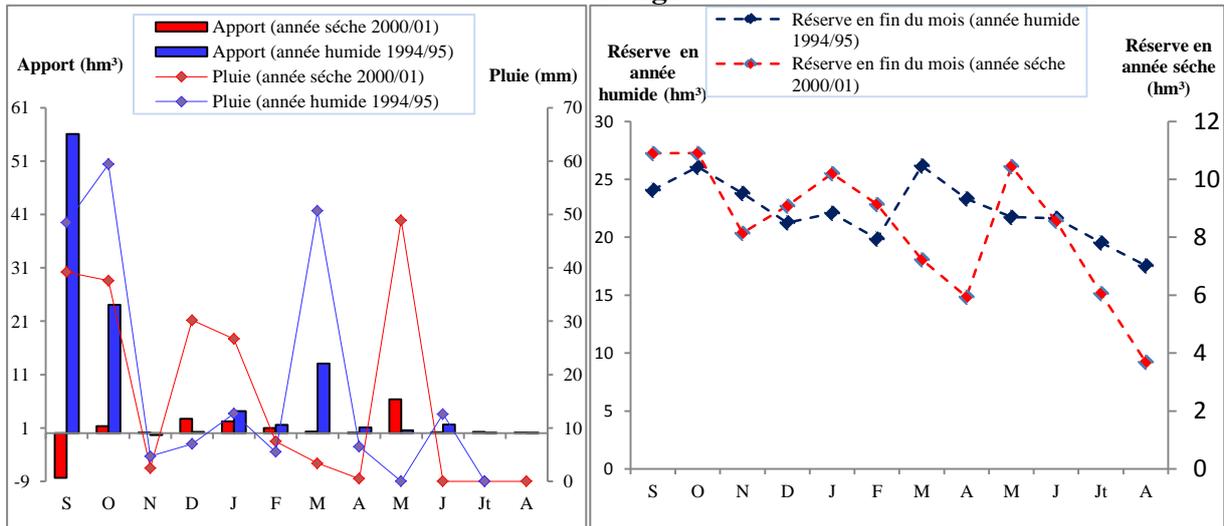
f. Barrage Hammam Grouz



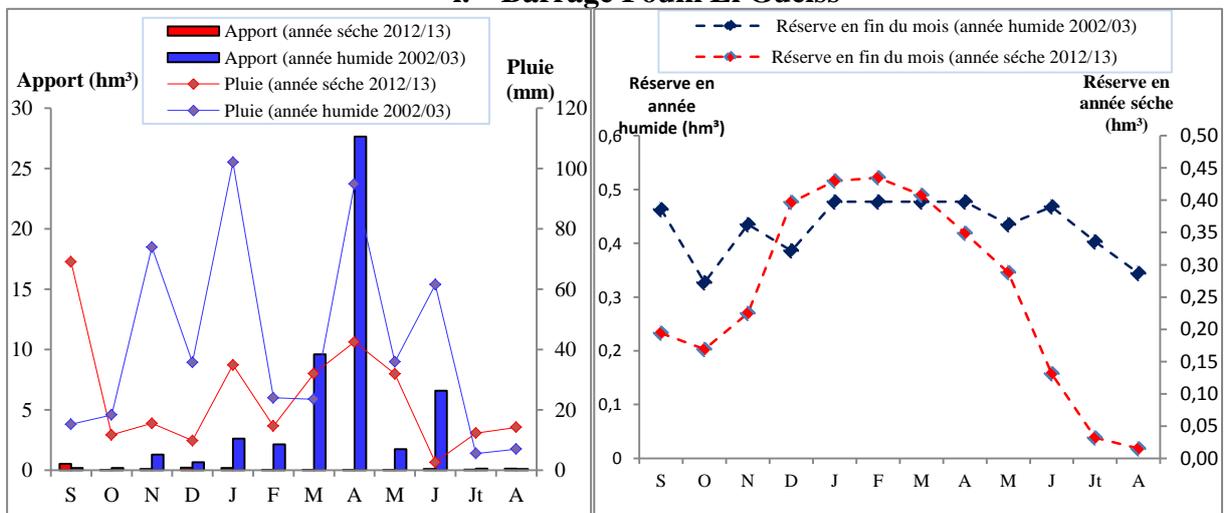
g. Barrage Ain Zada



h. Barrage K'sob



i. Barrage Foum El Guess



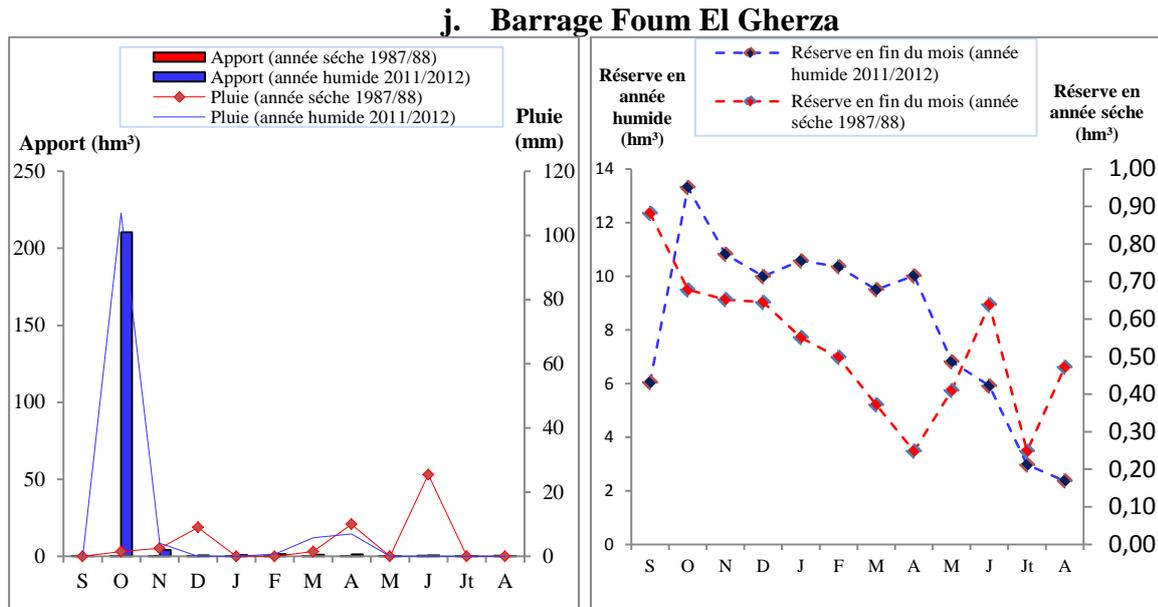


Figure 68 : Régime mensuel (apports, pluies et réserves) en année humide et sèche sur dix barrages de l'Est algérien

2. VARIABILITE INTERANNUELLE DES APPORTS, RESERVES ET PLUIES PAR LA MATRICE DE BERTIN

Pour avoir une compréhension plus précise de la variabilité des données hydroclimatiques à l'échelle des barrages, nous utilisons la méthode de la matrice qui permet de détecter les changements potentiels dans les enregistrements hydroclimatiques (voir la description détaillée de la méthode : chapitre 1,4.1.2) sur les 10 barrages choisis pour analyser l'évolution des apports, des pluies et des taux de remplissage, sur une période de 23 ans (1990/91-2012/13).

Les résultats ont été projetés sous forme de tableaux graphiques qui montrent les années sèches, normales et humides pour chaque barrage et pour chaque année. Les graphiques de l'indice régional permettent de voir les ruptures et leurs dates, ainsi que les périodes caractéristiques pour l'ensemble des barrages étudiés.

2.1. Irrégularité interannuelle des apports aux barrages

Les apports hydrologiques aux barrages sont la résultante de l'interaction complexe des facteurs climatiques et physiographiques régissant les bassins versants (Mebarki, 2005). Les résultats présentés sur la figure 69 mettent en évidence une forte variabilité temporelle des apports. L'alternance d'années humides, normales et sèches est saisissante :

- la phase de 1990/1991 à 2001/2002 est marquée par une diminution progressive des années humides. En conséquence, comme souligné plus haut, un très faible volume stocké dans les lacs de barrages est enregistré durant les trois années consécutives (1999/2000, 2000/2001 et 2001/2002).

- sur les quatre années de 2002/2003 à 2005/2006, on note une augmentation importante des apports, à l'exception de barrage Hammam Grouz qui se distingue par un affluent annuel négatif (2003/2004) engendré par un volume considérable de fuites karstiques (32.3 hm³).

-la période 2006/2007 – 2012/2013 se caractérise par une réduction généralisée des apports, en particulier pendant l'année 2007/2008 et 2012/2013 (la plus basse valeur des moyennes mobiles des indices centrés réduits atteint -1.13).

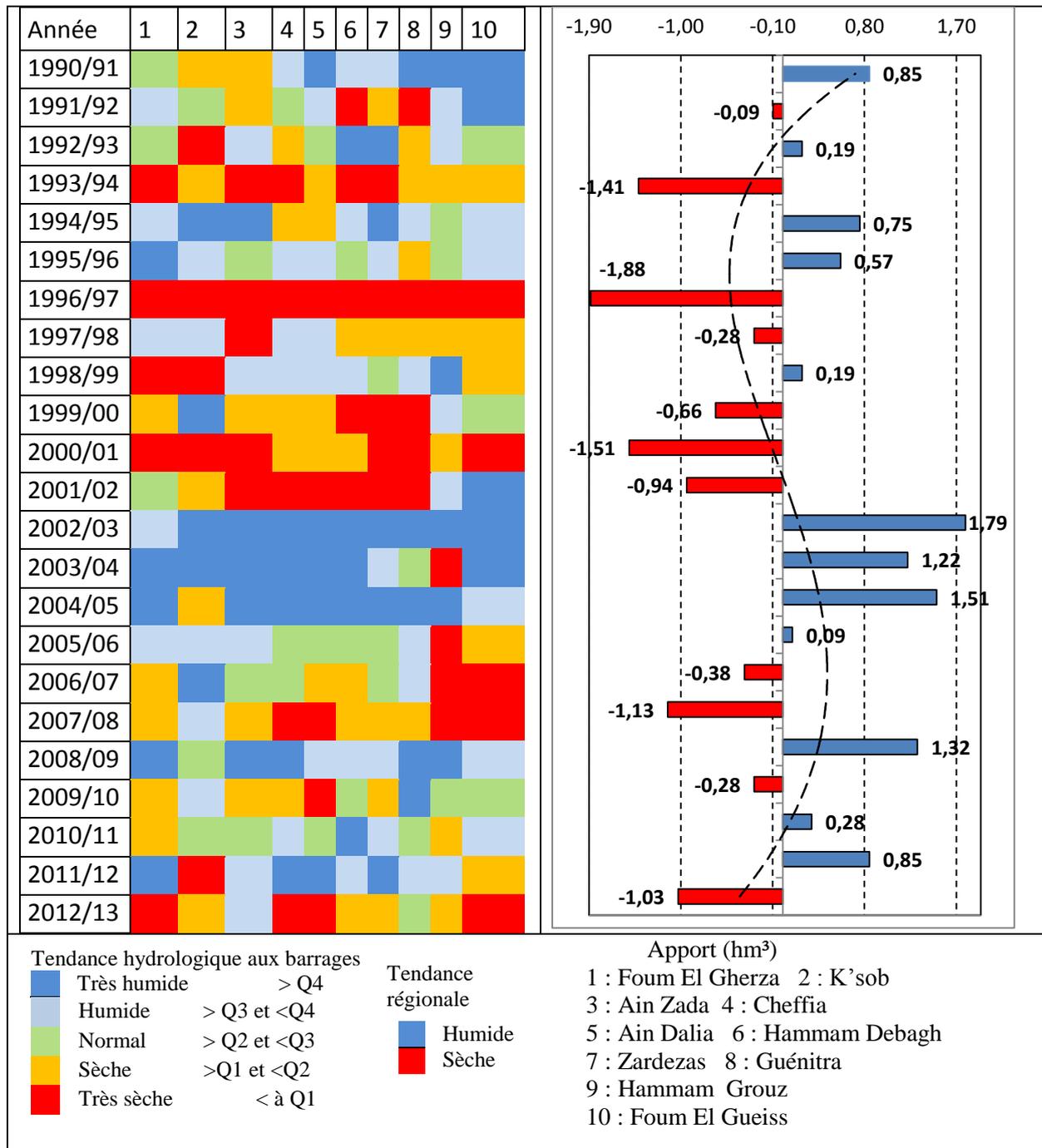


Figure 69 : Matrice MGCTI appliquée aux apports hydrologiques annuels observés dans les barrages (1990/91-2012/13).

2.2. Une reprise progressive des pluies sur la dernière décennie

La variation interannuelle de la pluviométrie enregistrée au site des barrages est caractérisée par une alternance d'années humides, normales et sèches (figure 70). Les résultats montrent l'existence de deux périodes distinctes :

- la première période débutant à partir des années 1990 et s'arrêtant au cours des années 2001 ; elle se démarque par une diminution généralement assez importante de la pluviométrie annuelle. Cette phase déficitaire présente 57 % d'années sèches et très sèches, 32% d'années humides et très humides et 11% d'années normales.
- une phase à tendance humide a commencé en 2002/2003 ; elle se caractérise par une forte augmentation globale des pluies (7 années sur 11 ont une moyenne mobile positive). Le maximum de précipitations est observé au cours de l'année 2003/2004 puisque l'indice régional atteint sa plus haute valeur (1.57).

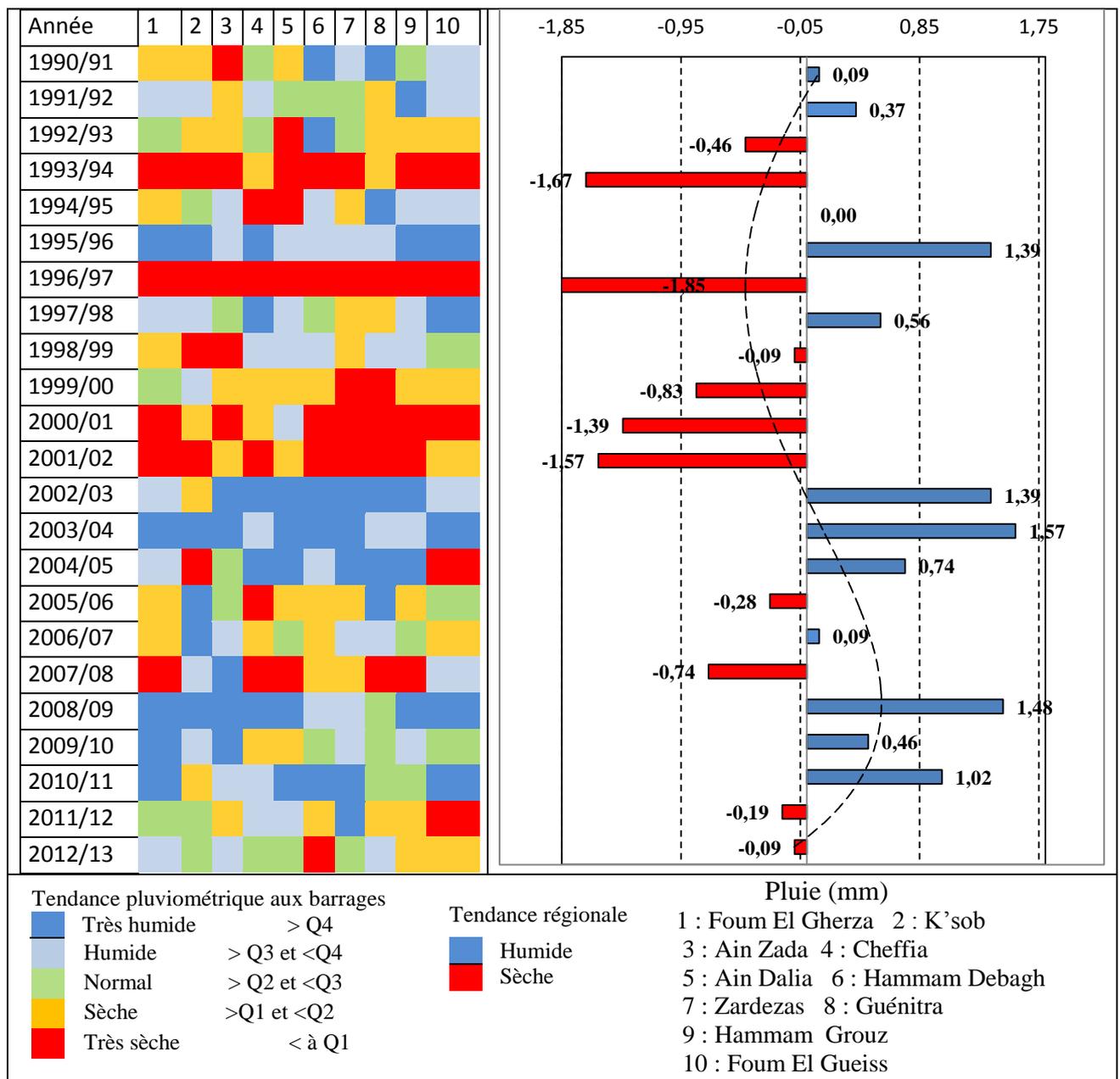


Figure 70 : Matrice MGCTI appliquée à la pluviométrie annuelle mesurée sur les sites des barrages [1990/91-2012/13]

2.3. Le niveau des réserves des barrages : une tendance à la hausse

Etant intimement liées à la pluviométrie et à l'apport hydrologique, les réserves en eau des barrages ont connu un rabatement important de leur niveau entre la période 1993 à 2002 (figure 71). Pour le barrage Guenitra, la matrice indique un fléchissement prolongé du niveau d'eau pendant 8 années successives. Ce barrage a atteint son plus bas niveau en 2001/2002 avec un taux de remplissage de 4.01 %.

Le remplissage sur l'ensemble des barrages connaît également une croissance évidente à partir des années 2003, suite aux augmentations sensibles des précipitations et des apports

hydrologiques : un taux de près de 100 % est enregistré aux barrages Ain Dalia et Ain Zada (2003/2004). Hammam Debagh (2004/2005) et K'sob (2008/2009).

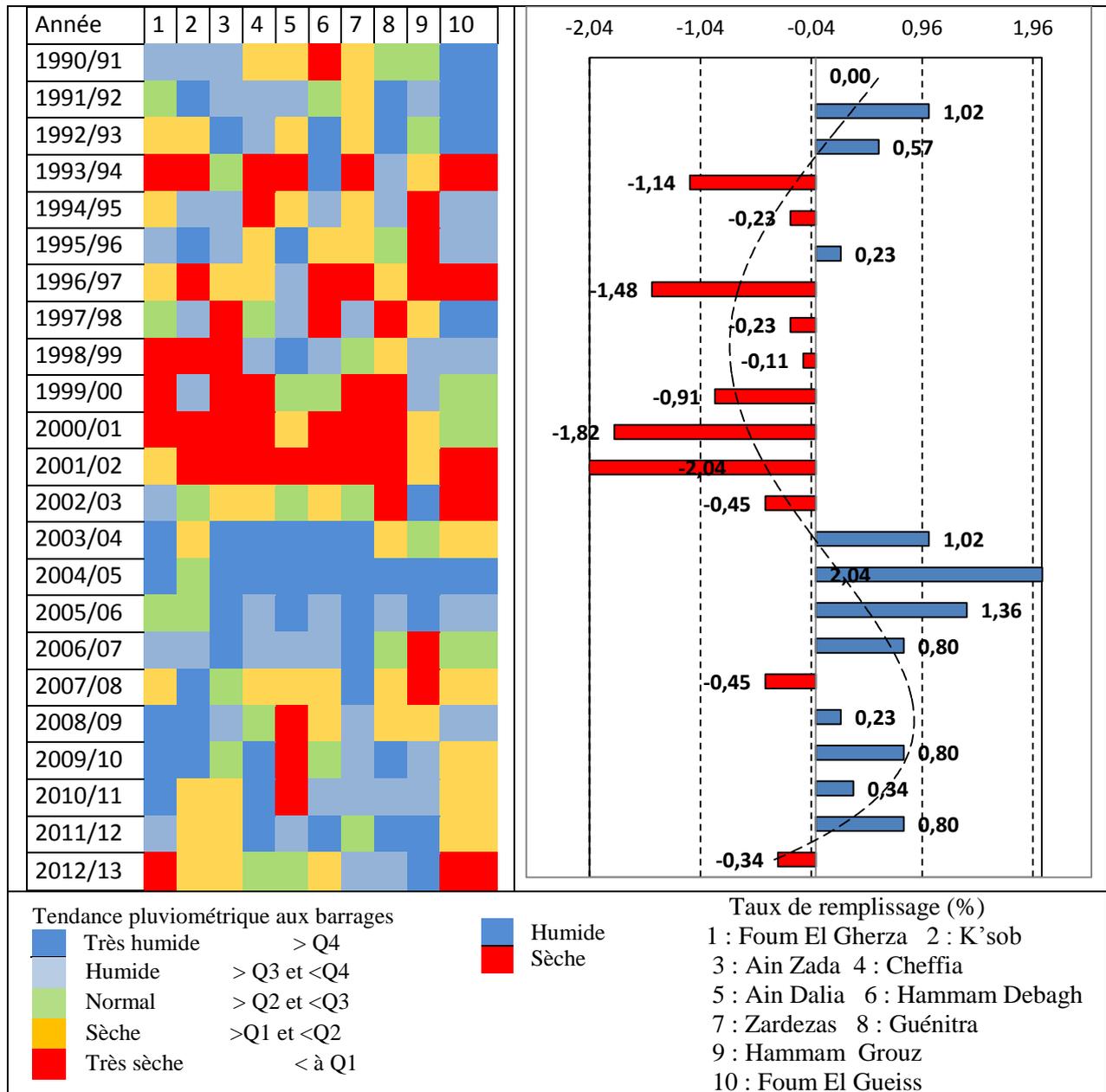


Figure 71 : Matrice MGCTI appliquée sur le taux de remplissage des barrages (1990/91-2012/13).

3. LES MODES DOMINANTS DE LA VARIABILITE DES PLUIES ET DES APPORTS AUX BARRAGES

Pour consolider et confirmer les résultats obtenus par la méthode de la matrice de Bertin, une analyse selon la méthode des ondelettes est appliquée aux données, au pas de temps mensuel, des pluies et des apports au niveau des dix barrages. La transformée en ondelettes continues a été utilisée en vue d'obtenir une vision plus approfondie du signal hydrologique, 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 barrage).

Les liens entre apport et pluie seront traités par la cohérence en ondelettes pour la vérification des modes communs déjà existants dans les deux signaux (apport et pluie). Plusieurs travaux soulignent l'importance de ces méthodes déterministes (analyse et cohérence en ondelettes) pour définir des modes de variabilité dans les signaux hydrologiques et déterminer des liens entre signaux et fluctuations d'indices climatiques (Coulibaly et Burn, 2004 ; Labat, 2006 ; Renard, 2006 ; Schaeffli et al, 2007 ; Massei et al, 2007 ; Anctile et Pellitier, 2010; Rossi, 2010).

3.1. Détermination des grands modes de variabilité hydropluviométriques par la méthode des ondelettes continues

Il s'agit d'identifier les principaux modes de variabilité des apports et des pluies au niveau des dix barrages dont la série commune s'étale sur 23 ans au pas de temps mensuel. Pour quelles échelles de temps caractéristiques les apports et les pluies évoluent-ils ? La structuration de la variabilité est-elle identique ou évolue-t-elle au cours du temps ?

3.1.1 Identification des principaux modes de variabilité des pluies

La réalisation des spectres en ondelettes continues des chroniques de pluies permet de déterminer l'organisation et la structure des signaux. Les spectres en ondelettes sont réalisés sur des signaux débarrassés de leur tendance, et montrent la distribution de la puissance du signal au cours de la période d'étude.

Les signaux pluviométriques bruts, par l'utilisation des transformées en ondelettes, peuvent être décomposés en plusieurs bandes fréquentielles variables dans le temps (figure 72). Ces bandes de fréquence sont de plusieurs types : annuelles à pluriannuelles et peuvent être discontinues au cours du temps. On relève ainsi principalement les bandes de **1 an, 2 ans, 2-4 ans, 4-8 ans, et 8-12 ans** :

La bande de **1 an** correspond au cycle hydrologique. Elle est identifiée pour tous les barrages pour différentes périodes. Ce cycle est très fortement marqué sur Guenitra, Zardezas, Hammam Debagh et Cheffia, beaucoup moins sur Hammam Grouz, Ain Zada, Ain Dalia, Foum El Gueiss, Foum el Gherza et K'sob.

La bande de fréquence de **1 à 2 ans**, est très discontinue pendant la période d'étude ; elle se présente surtout sous forme de spots de quelques années dans les dix barrages.

Le mode de variabilité de **2 à 4 ans** traduisant une assez grande d'énergie, caractérise distinctement le barrage Foum El Gueiss (autour de 1995). Elle se présente sous forme de spots peu marqués sur les trois barrages Hammam Grouz, K'sob et Ain Zada.

La bande de **4-8 ans**, caractérise clairement les barrages Hammam Debagh, Cheffia, Ain Dalia, Foum El Gherza et Hammam Grouz avec une structure puissante à partir des années 2000, et le barrage Foum El Gueiss à partir des années 1990.

La dernière bande de **8-12 ans** est identifiée uniquement dans le barrage K'sob .Cette bande se produit à partir des années 1993 jusqu'à la fin de la période d'étude.

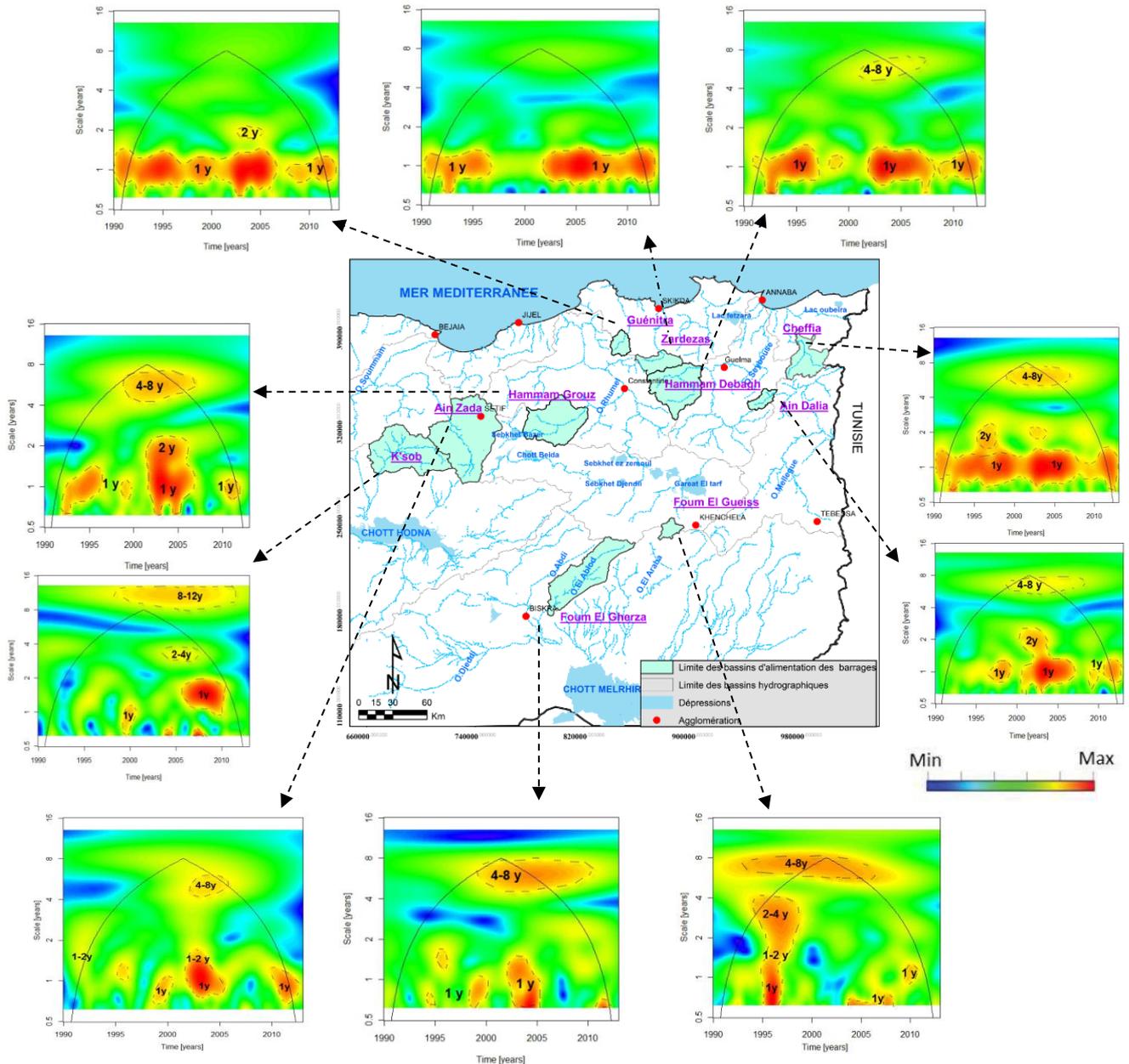


Figure 72 : Spectres locaux de l'analyse en ondelettes continues des précipitations sur les dix barrages (1990-2013).

Ces spectres en ondelettes nous ont permis d'identifier des périodes distinctes pour chaque barrage :

- **Les barrages Guenitra et Cheffia** : trois périodes ont été définies pour les pluies sur ces deux retenues. La première concerne les années avant 2000, caractérisée par une forte énergie sur la fluctuation de 1 an. L'apparition de la fluctuation de 1-2 ans après l'année 1995 pour le barrage de Cheffia est liée aux années humides qui sont observées dans la matrice de Bertin (les deux années 1995/96 et 1997/98). La seconde période est visible entre 2000 et autour de 2007 ; elle est caractérisée par une forte puissance d'énergie sur la fluctuation de période de 1 an, et l'apparition de la bande fréquentielle de 4-8 ans pour le barrage de Cheffia. Une troisième période concerne les années postérieures à 2007, pour lesquelles nous retrouvons le mode de variabilité 1 an avec une forte énergie.
- **Les barrages Zardezas et Hammam Debagh** : les spectres en ondelettes mettent en évidence trois phases principales. Une phase avant 1996 caractérisée par une forte énergie sur la fluctuation de périodes de 1 an. Une deuxième phase est visible entre 1996 et 2002, elle se distingue par une perte d'énergie. Une troisième phase concerne les années postérieures à 2002 ; elle est caractérisée par une forte énergie sur la fluctuation de la période de 1 an, et une faible énergie sur la fluctuation de 4 – 8 ans pour le barrage de Hammam Debagh.
- **Le barrage Ain Dalia** est caractérisé par deux périodes distinctes ; la première période concerne les années pluviométriques antérieures à 1996 ; elle est marquée par l'absence des bandes de fréquences (cette période correspond aux années sèches observées dans la matrice de Bertin) ; la deuxième période est visible après l'année 1996, se distinguant par une forte énergie sur les fluctuations de 1 an, 1-2 ans, et une faible énergie sur la fluctuation de 4-8 ans.
- **Le barrage Foum El Gueiss** se caractérise par trois périodes distinctes : la première concerne les années avant 1995, caractérisée par une faible énergie sur la fluctuation des périodes 1 an et 4-8 ans, et une perte d'énergie entre 1990 et 1994. La seconde période est visible entre 1995 et autour de l'année 2003 ; elle est caractérisée par une forte énergie sur la fluctuation de périodes de 4-8 ans. La troisième partie concerne les années après 2003, caractérisée par une faible énergie sur les fluctuations 1 an et 4 -8 ans.
- **Le barrage Hammam Grouz** : trois périodes sont visibles dans le spectre en ondelettes. Une première période est observée avant l'année 2002 avec une faible énergie sur la fluctuation de 1 an, et l'apparition de la bande de 4 -8 ans. Une deuxième période entre 2002 et autour de 2006 se caractérise par une forte énergie sur les fluctuations 1 an, 1-2 ans et 4-8 ans, qui sont liées aux années pluvieuses observées dans la matrice de Bertin. Enfin, une troisième période postérieure à 2006 se caractérise par une forte énergie sur la fluctuation 1 an en 2010.

- **Le barrage K'sob** : le spectre en ondelettes des pluies est caractérisé par l'existence de trois périodes ; la première période est observée avant la fin de l'année 1990, marquée par une perte d'énergie avant l'année 1995 (ce marqueur correspond aux années sèches observées dans la matrice de Bertin), et une faible énergie sur les fluctuations 1 an et 1-2 ans en 1995. La deuxième période, entre fin 1990 et 2010, se démarque par une forte énergie sur la fluctuation de 1 an, 2-4 ans et 8-12 ans en 2005-2010. La troisième période, visible après l'année 2010, est caractérisée par une perte totale d'énergie.
- **Les barrages Ain Zada et Foum El Gherza** : trois périodes distinctes sont identifiées pour les pluies concernnant ces deux retenues. La première est observée avant l'année 1996, se caractérisant par une faible énergie sur la fluctuation 1 an pour le barrage de Foum El Gherza , et la fluctuation 1-2 ans pour le barrage de Ain Zada . La deuxième période, entre 1996 et autour de 2006, est marquée par une forte énergie sur les fluctuations 1 an, 1-2 ans et 4-8 ans . La troisième période est identifiée postérieurement à 2010 , se distingue par une faible énergie sur les fluctuations 1 an et 1-2 ans pour les deux barrages, et une faible énergie sur la fluctuation 4-8 ans pour le barrage de Foum El Gherza.

3.1.2 Identification des principaux modes de variabilité des apports hydrologiques

Les spectres locaux des analyses en ondelettes des apports hydrologiques sont présentés sur la figure 73. Les dix barrages se caractérisent par la présence de plusieurs bandes avec des puissances de variances différentes, de l'échelle annuelle aux échelles pluriannuelles :

Les modes de variabilité de **1 an** à **2 ans** sont observés pour tous les barrages, avec une structure non continue (semblable aux précipitations). Cette structure est nettement mieux marquée par une forte fluctuation entre 2002 et 2006 (toutefois moins apparente dans le barrage Foum El Gherza et K'sob). Ce marqueur correspond à la phase excédentaire déjà évoquée par la méthode de la matrice de Bertin.

Une bande de fréquence pluriannuelle de **2-3 ans** apparaît dans la période de 2002 à 2006 sous forme quasiment continue dans les barrages Guenitra, Zardezas et Hammam Debagh, la variance de ce mode s'affaiblit au barrage Ain Zada.

Une bande d'énergie de **2-4 ans** est bien marquée dans le barrage Hammam Grouz (de 2000 à 2007) et Foum El Gherza (de 2007 à 2013) ; elle se présente sous forme de spots peu signalés sur les deux barrages K'sob et Ain Zada.

Une bande de fréquence de **4-8 ans** caractérisée par une forte puissance d'énergie est observée dans le cas du barrage Foum El Gueiss sur l'ensemble de la période d'étude ; elle ne semble pas présenter de discontinuités. Cette bande est également détectée dans les barrages Cheffia, Ain Dalia, Foum El Gherza, Hammam Grouz, mais faiblement exprimée et localisée après 1997.

Le mode de variabilité **8-12 ans** est observé aux barrages Foum El Gueiss (forte énergie), et Hammam Grouz (faible énergie), tout au long de la période commune 1990/91-2012/13. La bande de **5-12 ans** est identifiée dans les deux barrages de Hammam Debagh et Zardezas.

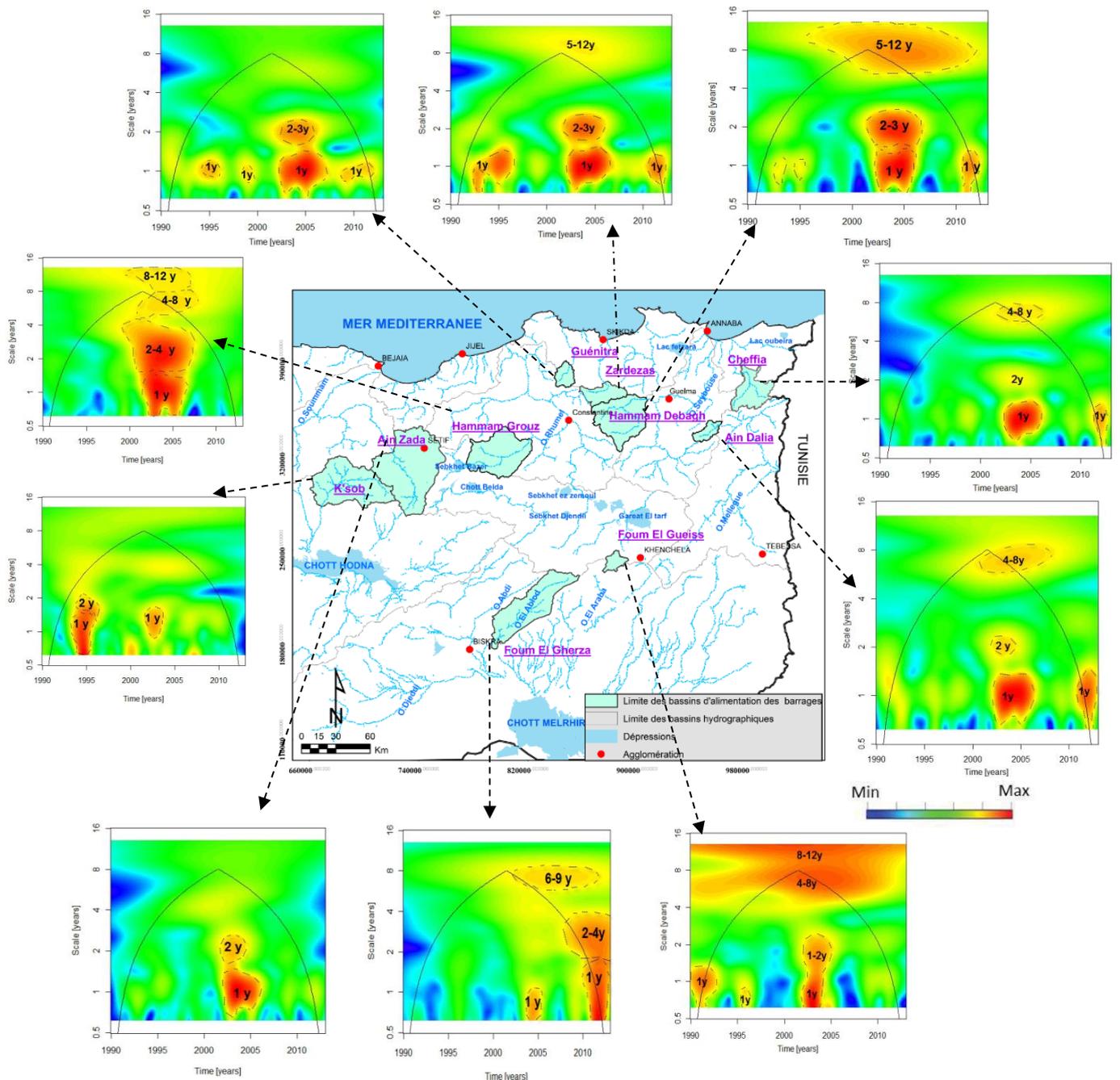


Figure 73 : Spectres locaux de l'analyse en ondelettes continues des apports hydrologiques sur les dix barrages (1990-2013).

A partir de la variabilité des apports, les principales périodes apparaissant sur le spectre d'ondelettes locales pour chaque barrage, sont énumérées comme suit :

- quatre périodes ont été distinguées pour les cinq barrages **Guénitra, Hammam Debagh, Cheffia, Zardezas et Ain Dalia**. Une première période antérieure à l'année 2002 se caractérisant par une diminution des bandes fréquentielles (1-2 ans pour les cinq barrages,

5-12 ans pour Hammam Debagh et Zardezas), et correspondant étroitement à la première période hydrologique sèche observée dans la matrice de Bertin. Une deuxième période commence vers 2002 et se termine autour de 2007 ; elle se caractérise par une forte puissance d'énergie sur les fluctuations 1-2 ans, 2-3 ans pour les cinq barrages, et également par une forte énergie sur les fluctuations 4-8 ans pour Cheffia et Ain Dalia, et 5-12 ans pour Hammam Debagh et Zardezas. Une troisième période, entre 2007 et 2010, se distingue par une absence de bandes fréquentielles pour Cheffia et Ain Dalia et par une faible énergie sur la fluctuation 1 an pour Guénitra et Zardezas. Enfin, une quatrième période, visible après l'année 2010, se distingue par une forte énergie sur la fluctuation 1 an pour les cinq barrages.

- deux périodes ont été observées dans le spectre en ondelette du barrage **Foum El Gherza** : la première visible avant l'année 2002, se distingue par une perte totale d'énergie ; la deuxième période, bien marquée après l'année 2002, est caractérisée par une forte puissance d'énergie sur les fluctuations 1 an, 1-2 ans, 2-4 ans et 6-9 ans.
- trois périodes principales sont mises en évidence par les spectres en ondelette pour les deux barrages **Hammam Grouz et Ain Zada** : la première est identifiée avant l'année 2000 pour Hammam Grouz, et avant 2002 pour Ain Zada ; elle se distingue par l'absence des bandes fréquentielles. La deuxième période est visible entre 2000 et autour 2006 pour Hammam Grouz, et entre 2002 et autour 2006 pour Ain Zada ; elle est caractérisée par une forte énergie sur les fluctuations 1 an, 1-2 ans, 2-4 ans, 4-8 ans et 8-12 ans pour Hammam Grouz (cette période correspond aux années humides observées dans la matrice de Bertin), et par une forte énergie seulement sur les fluctuations de 1 an et 1-2 ans pour Ain Zada. Enfin, la période après 2006 se caractérise par l'absence de bandes fréquentielles pour les deux barrages.
- trois périodes caractéristiques ont été observées dans le spectre en ondelettes du barrage **K'sob** : la première période, bien marquée avant l'année 2000, est caractérisée par une forte énergie sur les fluctuations 1 an et 1-2 ans, et une faible énergie sur la fluctuation 2-4 ans. La deuxième période est identifiée entre 2000 et 2005, et se distingue par une forte énergie sur la fluctuation 1 an. La troisième période commence après l'année 2005, et est caractérisée par une perte totale d'énergie.
- quatre périodes ont été définies pour le barrage **Foum El Gueiss** : la première avant 1996 se caractérise par une forte énergie sur la fluctuation 1 an. La deuxième est visible entre 1996 et avant 2002, elle est caractérisée par une perte d'énergie (ce marqueur correspond aux années sèches évoquées par la matrice de Bertin). La troisième période est observée entre 2002 et 2005, elle est distinguée par une forte puissance d'énergie sur les fluctuations de périodes 1 an, 1-2 ans, 4-8 ans et 8-12 ans. La dernière après l'année 2005, se caractérise par une perte d'énergie.

3.2. La cohérence en ondelettes continues : évolution de degré de corrélation entre apports et pluies au cours du temps

L'analyse de la cohérence par ondelette est appliquée pour caractériser la variabilité commune (ou différente) entre les deux signaux, pluie et apport, et surtout de pouvoir estimer l'impact des modes de variabilité des pluies sur la variabilité des apports. Cette méthode permet de caractériser le degré de linéarité entre deux processus à certaines échelles et pour certains intervalles de temps (Maraun and Kurths, 2004 ; Dieppois et al, 2010). Une valeur comprise entre 0 et 1 est proposée suivant le degré de corrélation linéaire des variables comparées (cf. chapitre 1,4.2.2 pour une description détaillée de la méthode).

Les résultats de la cohérence en ondelettes des apports et des pluies indiquent que la variabilité des apports a une forte relation avec les pluies, observées essentiellement dans les cinq barrages de l'Atlas tellien (Guenitra, Zardezas, Cheffia, Hammam Debagh et Ain Dalia) (figure 74). En effet, les pourcentages de la cohérence moyenne sur tous les modes de variabilité varient entre un minimum de 84.25 % (barrage Hammam Debagh) et un maximum de 92.60 % (barrage Cheffia).

En revanche, la corrélation est moins forte pour les autres barrages (Hammam Grouz, Ain Zada, K'sob, Foum El Gherza et Foum El Gueiss) mais les pourcentages de cohérence restent à un niveau > 50% (en vert sur les spectres). On notera aussi la présence des pertes de cohérence (en bleu sur les spectres) à différentes échelles interannuelles, observées particulièrement pour les barrages Ain Zada, K'sob, Foum El Gherza, Hammam Grouz (avant 2002) et pour le barrage Foum El Gueiss (après 1999). Ces pertes de cohérence sur quelques années peuvent être liées aux périodes sèches constatées déjà dans les spectres en ondelettes des pluies et des apports, ou à l'influence d'autres facteurs de nature diverse (la physiographie des bassins d'alimentation des barrages, le phénomène des fuites, les lâchers ... etc.).

La forte cohérence observée entre la variabilité des apports et des pluies suggère une influence de la variabilité du climat sur la réponse hydrologique des barrages. Cette influence peut être estimée globalement en calculant la cohérence apports/pluies pour chacune des bandes de fréquence sur la période d'étude (tableau 7). Nous pouvons remarquer que la cohérence totale entre la variabilité des apports et des pluies, pour les différentes échelles annuelles à pluriannuelles observées, est comprise entre 92.6 % au barrage Cheffia dans le Tell maritime (bassin des Côtiers constantinois) et 66.38 % au barrage K'sob dans les Hautes Plaines (bassin du Hodna). Cette cohérence est importante dans toutes les bandes fréquentielles de l'échelle annuelle à l'échelle pluriannuelle. Par exemple, la bande fréquentielle de l'échelle interannuelle de période 1-2 ans a été observée avec une forte cohérence pour tous les barrages, avec une cohérence moyenne allant de 67.22 % au minimum pour le barrage de Hammam Grouz (bassin du Kébir Rhumel) jusqu'à 96.7 % au maximum pour le barrage de Guenitra (bassin des Côtiers constantinois). Aussi, la bande fréquentielle de l'échelle pluriannuelle de période 4-8 ans montre une forte cohérence, avec une cohérence moyenne allant de 75.79 % au minimum pour le barrage de Foum El Gherza

(bassin du Chott Melrhir) jusqu'à 92.9 % au maximum pour le barrage de Cheffia (bassin des Côtiers constantinois).

Malgré les pertes de cohérence observées, il apparaît que la variabilité des apports aux barrages est très fortement influencée par la variabilité des précipitations. Il reste une part de 7.40 % à 33.62 % de la variabilité observée de ce paramètre hydrologique qui peut être attribuée aux autres facteurs cités précédemment.

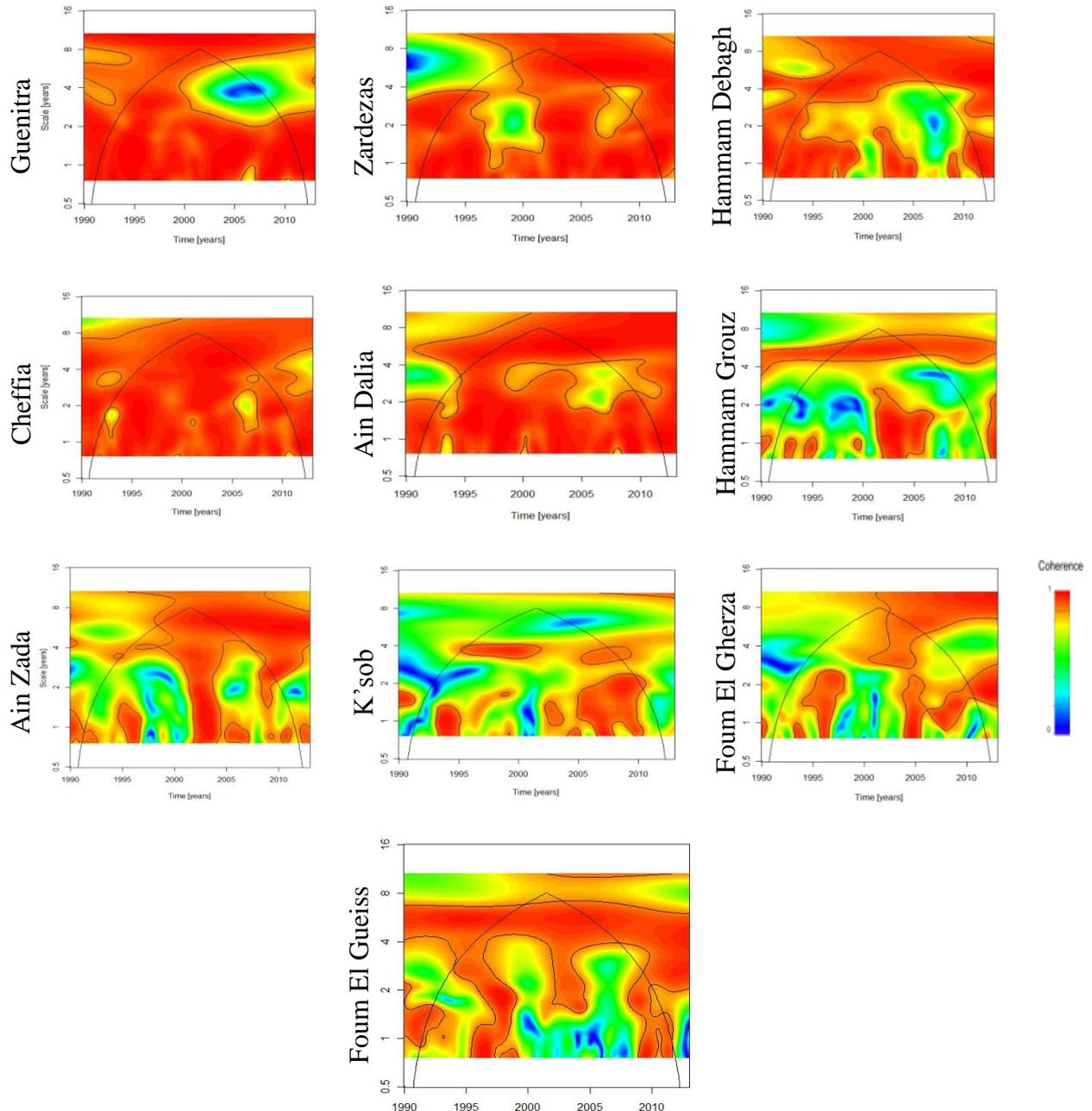


Figure 74 : Spectres locaux de l'analyse de la cohérence par ondelettes des apports/pluies sur les dix barrages.

Tableau 7 : Quantification des relations entre apports et pluies à l'échelle des barrages

Echelles du temps	Guenitra	Zardezaz	Hamman Debagh	Cheffia	Ain Dalia	Hamman Grouz	Ain Zada	K'sob	Foum El Gherza	Foum El Gueiss
Total	87.41%	87.37%	84.25%	92.6%	90.5%	69.65%	77.95%	66.38%	73.75%	78.3%
1 y	96.65%	95.30%	87.21%	94.45	94.70%	74.27%	78.54%	72.01%	66.81%	63.6%
1-2 y	96.70%	91.49%	81.88%	93.37	94.42%	67.22%	70.86%	70.71%	74.84%	71.7%
2-4 y	79.62%	87.61%	77.37%	92.32	83.69%	58.15%	72.94%	65.96%	68.78%	79.7%
4-8 y	80.24%	80.87	90.59%	92.92	92.65%	82.60%	87.44%	59.84%	75.79%	89.3%
8-10y	95.62%	86.25%	90.22%	88.82	89.15%	68.20%	85.25%	68.80%	85.89%	74.70%

D'après les valeurs de la cohérence totale, nous avons distingué trois groupes de barrages : le groupe 1 présente les barrages qui sont très fortement influencés par les précipitations (plus de 80 %), le groupe 2 les barrages fortement influencés (entre 70 et 80 %), et enfin le groupe 3 ceux assez fortement influencés par les précipitations (inférieur à 70 %).

4. LIENS POTENTIELS ENTRE L'OSCILLATION CLIMATIQUE NORD ATLANTIQUE (NAO) ET LA VARIABILITE HYDROLOGIQUE DES BARRAGES

Nous avons vu que la variabilité temporelle des apports aux barrages était fortement liée à la variabilité des précipitations. Cette variabilité des précipitations est elle-même liée aux fluctuations du climat. Dans le climat, on va distinguer deux types d'influence, une influence globale liée aux grands mouvements des masses d'air atmosphérique qui peuvent être schématisé par des indices climatiques tel que la NAO (North Atlantic Oscillation) et le climat local qui est en lien avec des paramètres tel que l'éloignement à la mer, l'altitude ... etc. Nous allons nous intéresser exclusivement aux relations entre la variabilité des apports et les fluctuations climatiques à large échelle en utilisant les fluctuations de l'indice de la NAO.

Le climat terrestre fluctue sur une très large gamme d'échelles temporelles, depuis les fluctuations à court terme, qui concernent la variabilité mensuelle et saisonnière, aux fluctuations pluri-annuelles. La variabilité du climat liée aux grands mouvements de masses d'air atmosphérique de différentes régions du globe peut être mesurée à l'aide d'indices climatiques comme l'ENSO ou PDO en lien avec le phénomène El Nino /Oscillation Australe, l'Oscillation Arctique (AO), l'Oscillation Pacifique Décennale et l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) (Rossi et al, 2011).

Ces indices sont utilisés dans le but de comprendre les fluctuations climatiques et leurs influences sur la variabilité hydrologique (Kahya et Dracup, 1993 ; Hurrell, 1995 ; Dai et al, 1997 ; Coulibaly et Burn, 2004 ; Tootle et al, 2005 ; Labat, 2006, 2008, 2010 ; Massei et al, 2007, 2009, 2010 ; Küçük et al, 2009).

Les chroniques des pluies et des apports sont structurées par des fluctuations annuelles et pluri-annuelles avec des discontinuités observables dans les résultats des analyses de la

matrice Bertin et les ondelettes continues. Puisque ces modes d'oscillations sont présents à la fois dans les apports et les pluies, ils peuvent être liés à des fluctuations climatiques. Nous choisissons d'envisager ces fluctuations au moyen de l'indice atmosphérique, la NAO ayant un impact sur l'Europe et les régions méditerranéennes (voir la description détaillée de cet indice dans le chapitre 1.3.2). Le choix de cet indice est basé sur son influence importante sur l'Afrique du Nord (Saadaoui, 2007 ; Abdelali, 2013 ; Laignel et al. 2010, Turki et al, 2016, Jelassi, 2014 ; Taibi et al 2013, 2015 ; Tarmoul, 2018).

En Tunisie, Jelassi et al (2014) montrent que la variabilité des pluies de la Medjerda était sous influence de la NAO pendant la période 1998-2003. Une forte relation entre la pluviométrie du Nord de la Tunisie et le phénomène de l'Oscillation Nord Atlantique a été démontrée (Dallel, 2011). Au Maroc, la cohérence moyenne entre l'indice NAO et les précipitations du bassin de Marrakech est estimée à 75 % (Turki et al, 2016). En Algérie, Tarmoul (2018) a récemment établi un lien entre les pluies, les débits des bassins des oueds L'ham, Lougmane, Soubella et Chemorah et l'indice NAO, et que l'indice climatique NAO explique la moitié de la variabilité hydrologique de ces bassins.

4.1. Identification des modes dominants de la variabilité de l'indice climatique NAO

L'analyse en ondelettes réalisée sur les données mensuelles de l'indice climatique NAO (1950-2018) montre très nettement que les bandes de fréquences les plus marquées correspondent à des bandes de 1 an et de 2-4 ans. Ces bandes d'échelle interannuelle s'organisent différemment au cours du temps, avec une forte énergie du signal durant la période 1960-1972 et après 1990 (figure 75). Le spectre d'énergie de la NAO est légèrement dominé par des fluctuations de basses fréquences, de l'échelle décennale 8-16 ans (après 1990).

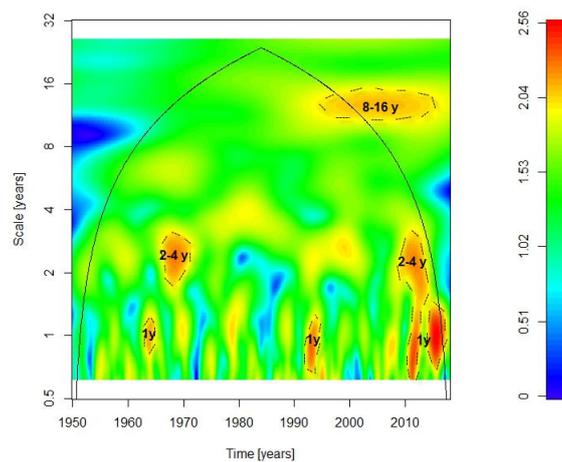


Figure 75 : Spectres locaux de l'analyse en ondelettes continues de l'indice climatique NAO (1950-2018)

4.2. Quantification de la relation entre l'indice climatique (NAO), les pluies et apports aux barrages

Pour chaque barrage, une description de la cohérence existante entre la variabilité des pluies et des apports, et l'indice climatique NAO est proposée dans le tableau 8 selon les différentes échelles de temps. La variabilité des apports et des pluies apparaît reliée pour moitié à la variabilité de l'indice climatique NAO, avec une cohérence totale allant d'un minimum observé à 44.32 % (barrage Foum El Gueiss), à un maximum de 56.97 % (barrage Ain Dalia) pour les apports et une cohérence totale allant d'un minimum observé à 51.53 % (barrage Ain Zada), à un maximum de 61.89 % (barrage Ain Dalia) pour les pluies . Cela confirme les travaux de **Tarmoul (2018)**, mais ici l'originalité concerne les barrages.

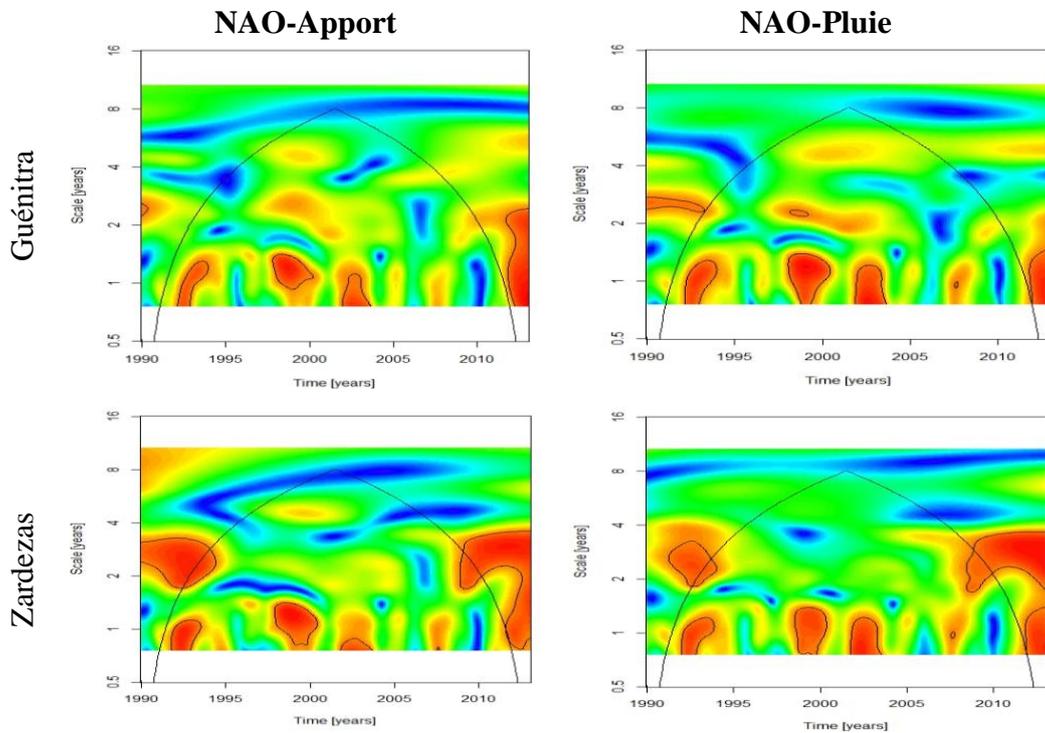
Cette cohérence est essentiellement distribuée de l'échelle interannuelle à pluriannuelle (figure 76). Globalement, la cohérence NAO/apport et NAO/pluie des barrages étudiés apparaît plus importante sur les bandes fréquentielles 1 an, 1-2 ans et 2-4 ans que pour les échelles de variabilité interannuelle de 2-4 ans, 4-8 ans et 8-10 ans, mais ceci est en partie lié à la durée des chroniques qui ne sont pas assez longues pour bien faire ressortir la cohérence avec les modes de variabilités pluri-annuels au-delà de 8 ans.

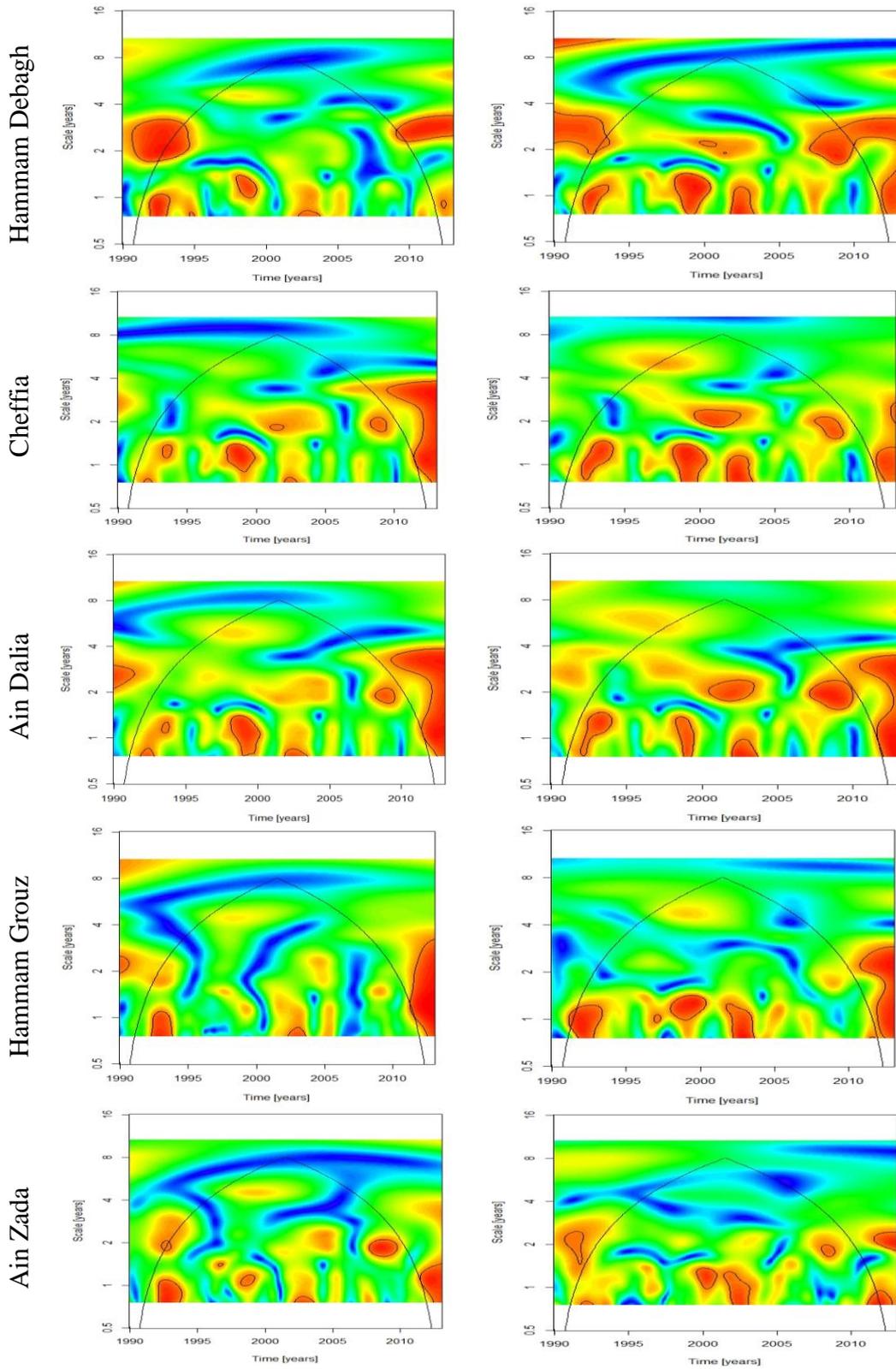
Une bande caractéristique 8-10 ans présente de fortes valeurs de cohérence quasiment sans discontinuité depuis les années 1990 pour toute la série des apports du barrage K'sob (88.89 %) ; cette bande est également identifiée (mais plus faiblement) avant l'année 1995 pour les barrages Hammam Grouz, Zardezas, Hammam Debagh, Ain Dalia.

Au final, la variabilité des apports est liée à environ 50-57 % aux fluctuations climatiques de la NAO qui explique également 50 à 60 % des précipitations. Le reste de la variabilité peut alors être liée à d'autres indices climatiques schématisant d'autres mouvements de masses d'air atmosphérique que la NAO, mais également à des variables climatiques locales qui sont aussi à l'origine de la variabilité observée dans les apports comme l'altitude, l'éloignement à la mer... et les paramètres physiographiques des bassins d'alimentation des barrages.

Tableau 8 : Quantification des relations entre la variabilité de l'indice climatique NAO et les apports/pluies de chaque barrage (données mensuelles).

Echelles du temps	Guénitra	Zardezaz	Hamman Debagh	Cheffia	Ain Dalia	Hamman Grouz	Ain Zada	K'sob	Foum Gherza	Foum Guess
Apport avec NAO										
Total	54.57%	55.67%	52.42%	53.22	56.97%	51.40%	49.27%	56.41%	48.35%	44.32%
1 y	66.08%	68.76%	62.21%	63.41%	65.02%	57.28%	60.59%	55.03%	53.00%	56.42%
1-2 y	61.74%	62.11%	53.77%	62.48%	63.73%	58.56%	59.31%	48.59%	48.85%	50.10%
2-4 y	58.21%	64.69%	59.94%	61.68%	66.38%	51.73%	51.09%	58.41%	57.73%	49.58%
4-8 y	46.77%	38.85%	43.49%	42.16%	43.54%	43.12%	36.23%	51.87%	40.28%	33.64%
Pluie avec NAO										
Total	54.57%	56.15%	55.93%	58.67%	61.89%	52.19%	51.34%	53.51%	54.94%	54.57%
1 y	69.16%	69.18%	66.84%	67.47%	62.73%	69.03%	62.65%	56.28%	56.40%	51.39%
1-2 y	61.11%	63.16%	64.60%	64.88%	65.56%	61.62%	61.02%	56.49%	58.80%	60.80%
2-4 y	53.81%	67.89%	65.38%	61.13%	66.36%	45.65%	53.80%	49.01%	53.59%	53.28%
4-8 y	50.11%	43.74%	41.47%	54.71%	56.15%	50.72%	38.61%	50.77%	52.15%	52.80%





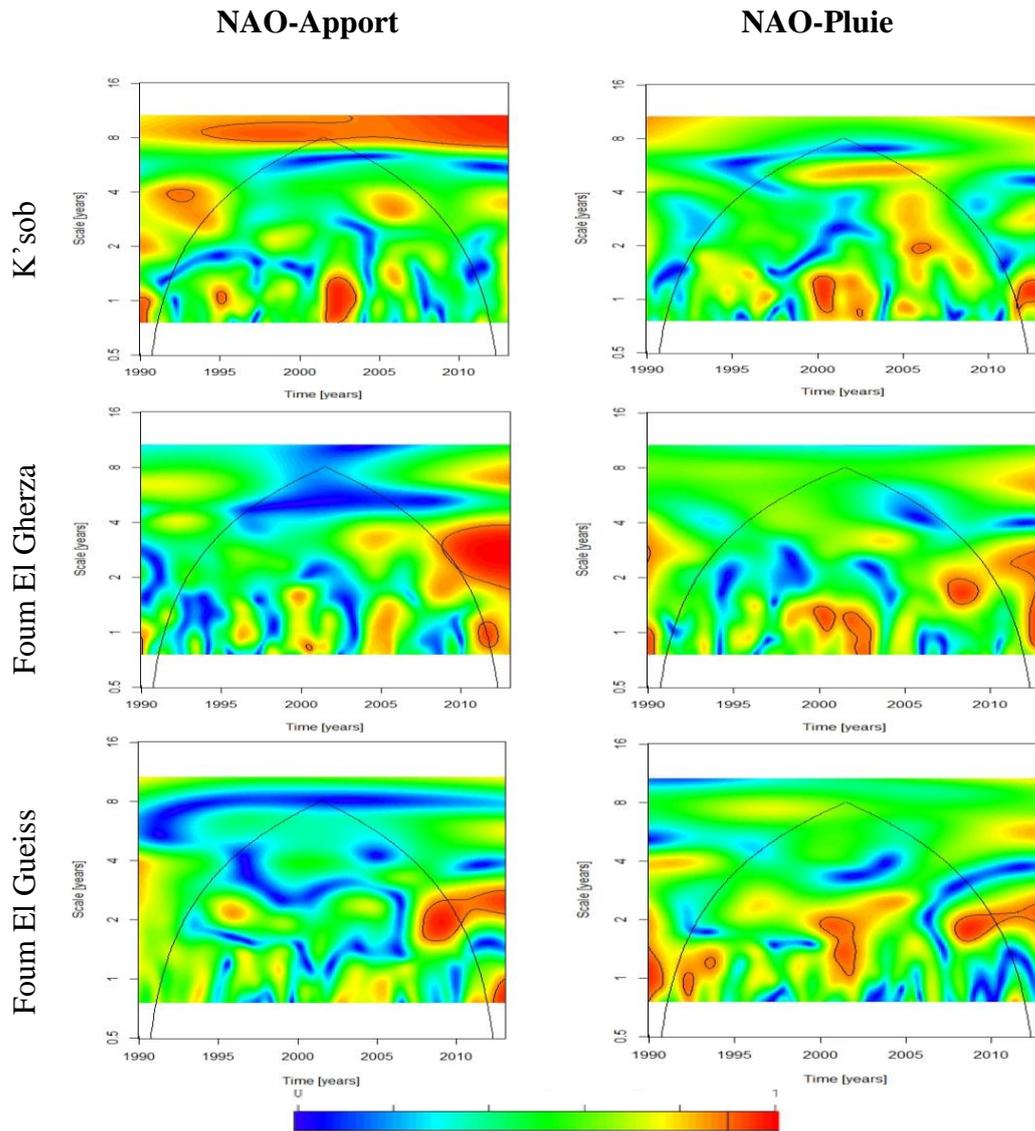


Figure 76 : Spectres de cohérence par ondelettes NAO- Apport et NAO-Pluie pour dix barrages

CONCLUSION

A partir de ces analyses, on constate que le fonctionnement des barrages se caractérise par une variabilité spatiale doublée d'une forte irrégularité interannuelle et mensuelle des bilans d'eau. En toute logique, les valeurs les plus importantes des apports, des réserves et des pluies sont enregistrées dans les barrages du Nord, alors que les faibles valeurs sont observées dans les barrages des Hautes Plaines et des piémonts Nord et Sud du massif de l'Aurès. Une grande étendue d'apports moyens annuels aux barrages est soulignée : entre 132.6 hm³ au barrage Cheffia (oued Bounamoussa) et 8.44 hm³ au barrage Hammam Grouz (le haut Rhumel). Les précipitations moyennes annuelles varient entre 805.8 mm au barrage Cheffia et 125.7 mm au barrage Foum El Gherza (oued El Abiod, piémont Sud de l'Aurès). Pour les valeurs moyennes de réserves en fin d'année, on distingue une gamme variant entre 135.64

hm³ au barrage Hammam Debagh (oued Bouhamdane) et 0.56 hm³ au barrage Foum El Gueiss (oued El Gueiss, piémont Nord de l'Aurès). En outre, le fonctionnement de certains barrages a été marqué par l'apparition d'affluents négatifs pendant quelques années, engendrant une perte de capacité plus importante que les volumes relatifs aux défluent. Ceci s'explique généralement par des phénomènes de fuites, dont les quantités sont considérables dans le cas de barrage Hammam Grouz.

Par ailleurs, l'analyse en année humide de la variation mensuelle des termes du bilan, montre que le maximum des apports, des réserves et des pluies se situe principalement en hiver pour les barrages de Cheffia, Ain Dalia, Hammam Debagh, Zardezas, Guénitra, Hammam Grouz et Ain Zada, en automne pour les deux barrages K'sob et Foum El Gherza, et enfin au printemps, pour le barrage de Foum El Gueiss. En année sèche, une diminution notable des apports, des pluies et des réserves a été observée pour l'ensemble des barrages.

La répartition des années déficitaires et excédentaires n'est pas toujours généralisable sur le plan géographique. Cette caractérisation a été approfondie par une approche basée sur la détection des changements potentiels dans les enregistrements hydro climatiques (Matrice de Bertin) d'une part et l'identification des principaux modes de variabilité des apports et précipitations (méthode des ondelettes), d'autre part.

Le caractère sévère de la sécheresse apparaît entre 1990/1991 à 2001/2002 et une phase humide survient à partir de l'année hydrologique 2002/2003 avec une plus grande fréquence d'années humides et très humides. Par ailleurs, l'analyse de la variabilité temporelle annuelle à pluri-annuelle des pluies des barrages par la transformée en ondelettes indique que cette évolution est effectivement structurée par plusieurs modes de variabilité, s'exprimant sur différentes échelles de temps : de l'échelle annuelle aux échelles pluriannuelles. Les résultats indiquent une variabilité pluviométrique décrite par cinq modes (1 an, 1-2 ans, 2- 4 ans, 4-8 ans et 8-12 ans). Les deux fluctuations de période 1 an et 1-2 ans sont observées pour tous les barrages sur des périodes différentes. La fluctuation de l'échelle interannuelle de 2-4 ans est détectée selon une forte puissance seulement pour le barrage de Foum El Gueiss, et elle se produit après l'année 1994. La fluctuation de 4-8 ans est identifiée pour tous les barrages, à l'exception des barrages Guenitra, Zardezas, K'sob. Elle se produit à partir des années 2000 pour les barrages Hammam Debagh, Cheffia, Ain Dalia, Foum El Gherza, Hammam Grouz, et à partir des années 1990 pour le barrage Foum El Gueiss. La bande fréquentielle 8-12 ans est spécifique au barrage de K'sob. Ces différences de la variabilité des pluies entre barrages pourraient être liées aux contextes physico-climatiques.

De la même manière, la variabilité des apports, est marquée par des fluctuations diverses : cycle hydrologique annuel et fluctuations d'échelle interannuelle à 1-2 ans, 2-3 ans, 2-4 ans, 4-8 ans, 5-12 ans et 8-12 ans. La fluctuation de 1 an à 2 ans est commune pour tous les barrages. Les autres fluctuations semblent être plus spécifiques à certains barrages. La fluctuation 2-3 ans concerne les barrages Guenitra , Zardezas, Hammam Debagh et Ain Zada. La fluctuation 2-4 ans concerne les barrages Hammam Grouz, Foum El Gherza , K'sob et Ain Zada. La fluctuation 4-8 ans est détectée dans les barrages Foum El Gueiss , Cheffia , Ain

Dalia, Foum El Gherza, Hammam Grouz. La fluctuation 8-12 ans est identifiée dans les barrages Foum El Gueiss et Hammam Grouz, enfin, la fluctuation 5-12 ans caractérise les barrages Hammam Debagh et Zardezas.

Des changements dans la composition spectrale sont également observés, le changement majeur constaté dans les apports dès l'année 2002/03 est également observé dans les pluies. Trois périodes sont globalement identifiées pour les apports : avant 2001/02, entre 2002/03 et 2006/07, et après 2006/07. Les mêmes périodes ont été identifiées dans les séries des pluies, avec de petits décalages dans les années.

La relation entre apport et pluie est également caractérisons par la cohérence en ondelettes. Les principaux modes de variabilité des apports et des pluies sont fortement similaires (fréquence, occurrence temporelle et amplitude), selon chaque barrage. Sur la cohérence totale, trois groupes de barrages ont été distingués : le premier groupe (Guenitra, Zardezas, Cheffia, Hammam Debagh et Ain Dalia) est très fortement influencé par les pluies (supérieure à 80 %), le deuxième groupe (Ain Zada, Foum El Gherza et Foum El Gueiss) est fortement influencé (entre 70 et 80 %), enfin le troisième groupe (Hammam Grouz et K'sob) est assez fortement influencé les pluies (inférieure à 70 %).

Pour pouvoir chercher l'origine des parts de pourcentage qui ne sont pas reliées aux pluies (de 7.40 % à 33.62 %), des relations entre les fluctuations climatiques (NAO) et la variabilité hydrologique de ces barrages ont été effectués. Les résultats de cohérence de l'indice climatique NAO avec la variabilité hydrologique des barrages indiquent une influence sur les apports et les pluies pour tous les barrages. La variabilité des apports et des pluies apparait reliée pour moitié à la variabilité de l'indice climatique NAO, avec une cohérence totale allant d'un minimum observé de 44.32 % (barrage Foum El Gueiss), à un maximum de 56.97 % (barrage Ain Dalia) pour les apports, et une cohérence totale allant d'un minimum observé de 51.53 % (barrage Ain Zada), à un maximum de 61.89 % (barrage Ain Dalia) pour les pluies. Le reste de la variabilité peut alors s'expliquer par d'autres indices climatiques, mais aussi le climat local (gouverné par l'altitude, la latitude, etc.) et par les paramètres physiographiques des bassins d'alimentation des barrages.

CHAPITRE 4

**VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PERTES EN EAU
(EVAPORATION, FUTES), DEVERSEMENTS DE CRUE ET
VIDANGES DE FOND**

INTRODUCTION AU CHAPITRE

Après l'étude détaillée des apports, des pluies et des réserves sur un échantillon de dix barrages dont la période hydrologique commune est de 23 ans, nous allons étudier dans ce chapitre les variations spatio-temporelles des pertes en eau (évaporations et fuites) et des volumes d'eau évacués (déversements de crue et vidanges de fond) sur la même période et le même échantillon de barrages (cf. figure 65, chapitre 3). Il est à rappeler que les barrages étudiés, sont représentatifs des différents milieux où le régime climatique est très varié (climat humide au climat aride).

Il s'agit dans un premier temps d'étudier les évaporations des lacs des barrages aux échelles annuelles, interannuelles et mensuelles. Dans un deuxième temps, les fuites des barrages feront l'objet d'une étude approfondie à l'échelle interannuelle et annuelle. Dans un troisième temps, une étude traite la variation des volumes évacués par la vidange de fond et par le déversement de crue. On procédera à une discussion sur le facteur des crues exceptionnelles qui sont à l'origine des fortes valeurs des volumes de déversement.

1. PERTES EN EAU DES BARRAGES : EVAPORATION ET FUTES

Le volume des pertes aux barrages se compose des volumes d'eau évaporés sur la retenue, des volumes infiltrés à travers la digue ou ses assises et des volumes infiltrés dans les couches profondes de la retenue (**Girard, 1966**).

1.1. Les évaporations des barrages

L'évaporation des lacs des barrages étant l'une des composantes clés du bilan en eau d'une retenue, sa quantification précise et la connaissance de son évolution dans l'année sont indispensables. Ce phénomène devient de plus en plus important, notamment dans les régions arides où l'évaporation peut atteindre des valeurs considérables.

1.1.1 Rappel sur la question de l'évaporation des barrages et son ampleur

Pour mieux comprendre l'ampleur du phénomène de l'évaporation des lacs des barrages dans le monde, nous présentons ici quelques études abordant ce sujet.

En Egypte, plusieurs travaux menés sur l'évaporation du barrage d'Aswan (**Omar et al, 1970 et 1981 ; Whittington and Guariso, 1983 ; Sadek, 1992 ; Sadek et al, 1997 ; Shaltout et El Housry, 1997**).

En Tunisie, **Alazard et al (2015)** ont montré que les valeurs extrêmes des évaporations du barrage El Houareb (Oued Merguellil, Tunisie centrale), d'une capacité initiale de 95 millions de m³, étaient de 1758 mm et 2351 mm au cours de la période de 1989 à 2009, ils ont constaté que les valeurs maximales ont été observées en juillet alors que les valeurs minimales ont été

enregistrées en décembre. L'étude de **Kingumbi (1999)** sur le barrage El Houareb indique un volume évaporé de 50.21 hm³/an durant une période d'exploitation de 9 ans (de 1989/90 à 1997/98).

L'analyse conduite sur le barrage de Sidi Saâd, implanté sur l'oued Zeroud (capacité initiale : 209 millions de m³), a montré une perte totale par évaporation de 315.8 hm³ durant une période allant de janvier 1982 à août 1999. Le volume maximal évaporé (24.7 hm³) revient à l'année hydrologique 1992/93 alors que le volume minimal évaporé (4.2 hm³), a été observé au cours de l'année hydrologique 1981/82 (**Nazoumou, 2002**).

Au Maroc, un milliard de m³ d'eau sur les 13 milliards de m³ stockés dans les 90 barrages du Maroc s'évapore chaque année. **Lahlou (2000)** constate que l'évaporation des eaux du barrage Monsour Eddahbi (Oued Drââ, Sud Marocain) s'élève à 40 hm³/an. Aussi, **Jean (1957)** note une variation spatiale des volumes évaporés ; en effet, l'évaporation annuelle est importante dans la zone littorale (1775 mm au barrage de l'oued Mellah), et dépasse deux mètres dans la région subatlantique (2239 mm au barrage de l'oued Zemrane).

En Algérie, les pertes par évaporation des lacs de barrages sont considérables. De nombreuses études ont été réalisées au cours des dernières décennies. **Remini (2005, 2009)** indique que la quantité évaporée des 39 barrages algériens durant la période de 1992 à 2002 représente une moyenne annuelle de 250 millions de m³ soit une perte de 6.5 % de la capacité totale des barrages. La valeur maximale du volume évaporé s'élève à 350 hm³ (1992/93) alors que la valeur minimale avoisine les 100 hm³ (2001/02). Selon le même auteur, l'ampleur de l'évaporation est très importante au barrage de Djorf Torba (Oued Guir, Sud-Ouest algérien), les pertes par évaporation dépassent les 80 hm³ pendant les années 1994/95, 1996/97 et 2000/01. **Benfetta et al (2016)** ont montré que la valeur moyenne annuelle des volumes évaporés pour le grand barrage de Gargar (capacité : 450 millions de m³) étant égale à 20.48 hm³ (1990/2000), 4.21 hm³ pour le barrage de Bouhanifia (capacité : 73 millions de m³) au cours de la période de 1987 à 2009, 3.01 hm³ pour le barrage d'Ouizert sur l'oued Hammam (1998/2010) et de 3.38 hm³ pour le barrage de Foug El Gherza sur l'oued Abiod (1950-2007). Les volumes évaporés du barrage de Hammam Grouz (Haut Rhumel, Constantinois) s'élèvent en moyenne à 2.12 hm³/an (période de 1987/88 à 2002/03) dont la moitié s'effectue pendant les trois mois d'été (**Mebarki, 2005**). Au barrage Béni Haroun (Oued Kébir Rhumel), l'étude de **Boulahbal et Mebarki (2013)** a montré que les pertes par évaporation de la retenue sont de 30 hm³/an (période de 2003/04 à 2010/11) soit un volume considérable traduisant l'étendue de la surface de la retenue (39.3 km²) et l'importance des facteurs climatiques.

1.1.2 Variabilité interannuelle de l'évaporation des barrages

Les barrages en Algérie sont équipés d'un bac classe A ou de type Colorado, installés à proximité de la retenue (photo 5 et 6). Les mesures journalières sont effectuées par les services de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (A.N.B.T).

Par ailleurs, le calcul de l'évaporation dans le bac est basé sur une relation simplifiée qui peut se traduire comme suit (Boutoutaou et al, 1995 et 2012) : $E = \Delta H \pm P$

Où E est l'évaporation mesurée sur le bac (mm), P est la pluie tombant sur le bac (mm), et ΔH est la différence de cote du plan d'eau dans le bac entre deux mesures en mm. Pour le passage de l'évaporation du bac à l'évaporation du plan d'eau, on multiplie les résultats de mesures sur le bac par un coefficient du bac (k), ce coefficient est déterminé en fonction du type de bac, de son environnement et du climat (Roche, 1963).



Photo 5 : Bac classe A installé à proximité de la retenue du barrage de Fom El Gherza (Rémini, 2005)



Photo 6 : Bac Colorado installé à proximité de la retenue du barrage de Zardezas (ANB, 2018)

Nous avons utilisé les données de l'évaporation mesurées sur 9 retenues dont la période hydrologique commune est de 23 ans (de septembre 1990 à août 2013). Le barrage Ain Dalia n'a pas été pris en compte dans cette analyse eu égard à l'incertitude des données d'évaporation.

Pour établir des comparaisons entre barrages de taille et de capacité différente, nous utilisons les lames évaporées en mm, ce qui renseigne réellement sur les différentes conditions climatiques régissant les lacs de barrages.

La figure 77 représente les valeurs moyennes annuelles du volume évaporé à travers les retenues. Dans la zone bioclimatique humide à subhumide (l'Atlas tellien), les pertes par évaporation sont inférieures à 1600 mm/an.

Dans la zone aride à semi-aride (les Hautes Plaines et les piémonts Nord et Sud de l'Atlas saharien), l'ampleur de ce phénomène est bien marquée aux barrages K'sob (2409 mm/an) et Fom El Gherza (2669 mm/an).

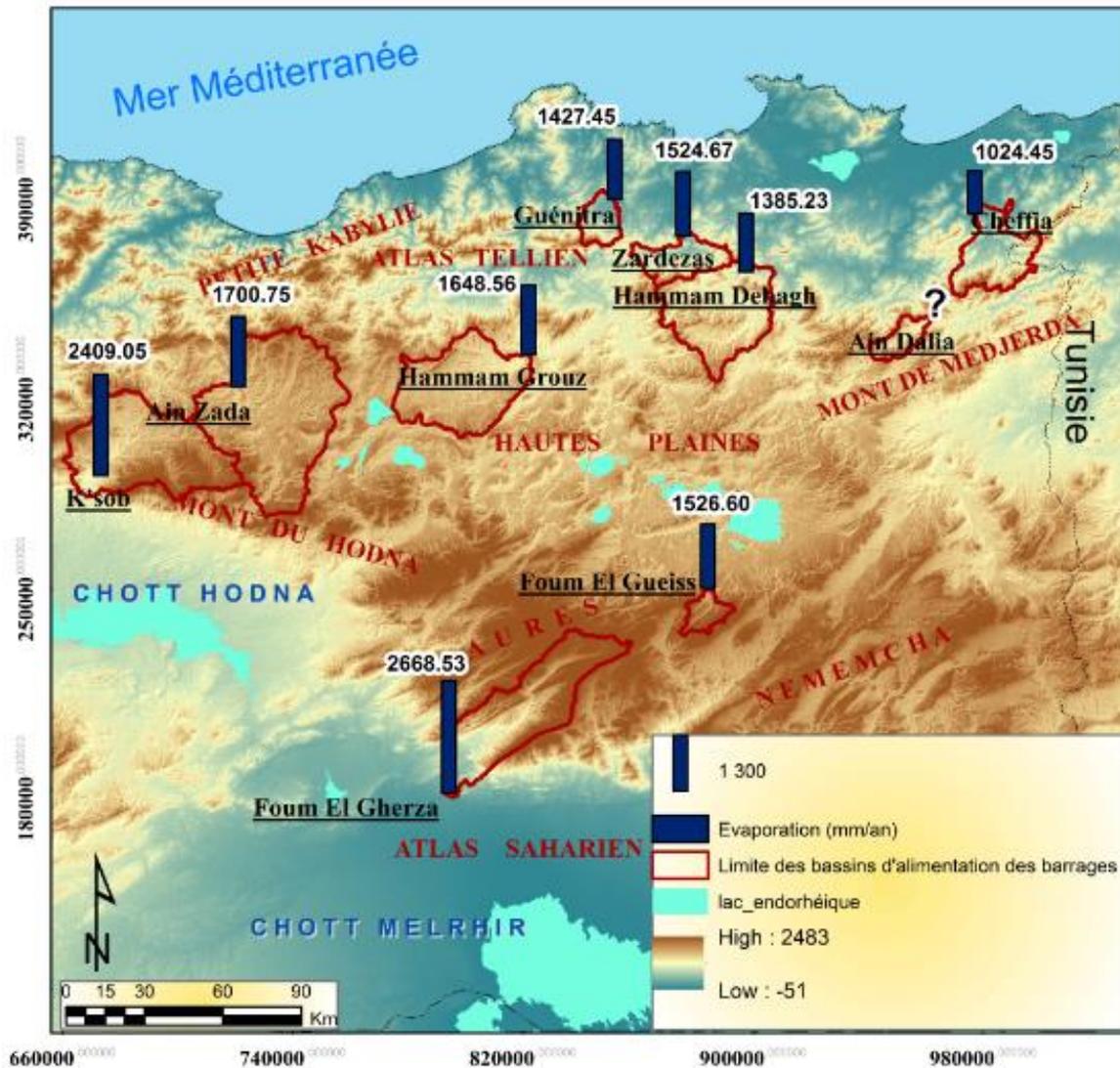


Figure 77 : Distribution géographique des moyennes interannuelles des volumes évaporés des retenues (période : 1990/1991 -2012/2013)

Afin d'avoir une vue globale sur la variabilité des lames évaporées, nous nous avons tracé côte à côte les graphiques (box plots) correspondant aux évaporations annuelles des différentes retenues. La figure 78 souligne une nouvelle fois l'hétérogénéité de notre échantillon de retenues étudiées. Il est à noter que les volumes évaporés annuels les plus élevés ont été recueillis au sein des retenues Foum El Gherza (3256.6 mm en 1993/94) et K'sob (2915.5 mm en 2004/05). La retenue de Cheffia est la moins évaporée avec des volumes relativement peu variables qui varient de 836.4 mm (en 2012/13) à 1211.4 mm (en 1999/00) et une médiane de 1035.7 mm.

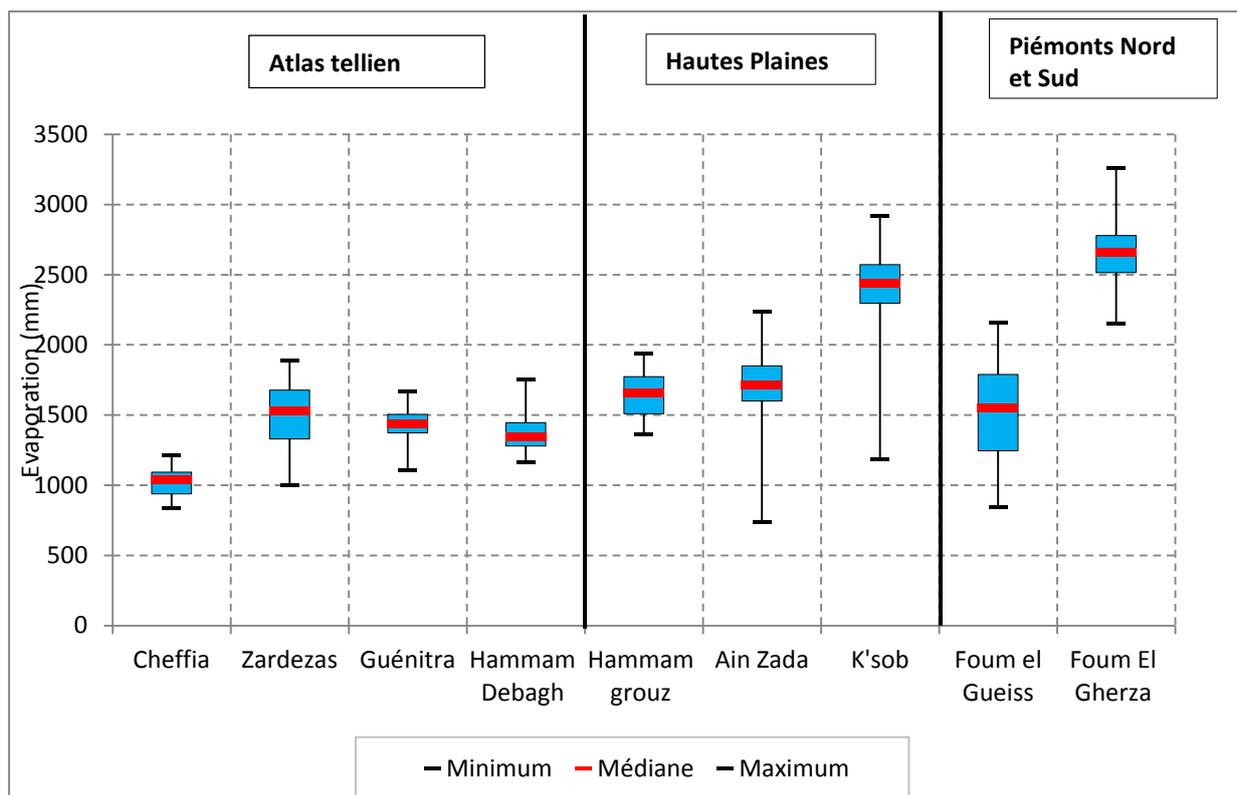


Figure 78 : Caractérisation statistique de l'évaporation interannuelle des retenues de l'Est algérien. Les différents box plots : La boîte en couleur avec tirets horizontaux en haut (maximum) et en bas (minimum) correspond à l'amplitude de la dispersion, le trait rouge à l'intérieur de la boîte représente la médiane.

1.1.3 Variations de l'évaporation d'une année à une autre

Nous avons, par ailleurs, analysé la variation année par année de l'évaporation cumulée dans l'ensemble des retenues (figure 79). L'historgramme fait ressortir, que d'une manière générale les évaporations se caractérisent par leur irrégularité interannuelle. Sur une période de 23 ans, 9 valeurs dépassent nettement la moyenne de la série. Les années sèches (1993/94, 1996/97 et 2000/01) ont été marquées par les valeurs les plus fortes de l'évaporation. A l'inverse, les années humides (1991/92, 2008/09 et 2010/11) ont été enregistrées les valeurs les plus faibles de l'évaporation.

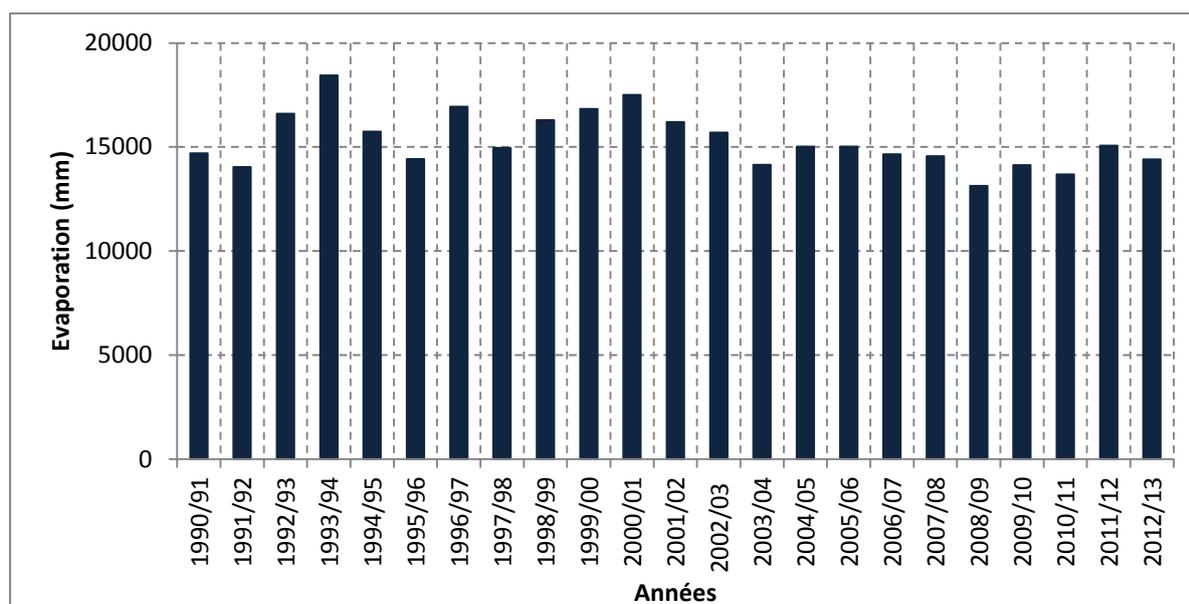


Figure 79 : Variation annuelle de l'évaporation cumulée sur les neuf retenues de l'Est algérien

Au vu de ces résultats, il convient d'analyser plus en détail les variations annuelles de l'évaporation pour chaque barrage en allant du Nord vers le Sud (figure 80).

- **Le barrage de Cheffia** dans le Tell maritime (climat subhumide à humide) : la variabilité interannuelle des évaporations est peu marquée (le coefficient de variation est de 9.8 %). La valeur maximale de 1211.4 mm a été enregistrée lors de l'année 1999/00. A l'inverse, la valeur minimale de 836.4 mm a été observée lors de l'année 2012/13.

- **Le barrage Zardezas** dans le Nord tellien (climat subhumide) : les fluctuations annuelles des évaporations sont peu importantes, et évoluent entre un minimal de 996.9 mm (en 2012/13) et un maximal de 1885.6 mm (en 1993/94), avec une moyenne de 1524.7 mm et un écart-type de 223.9 mm (le coefficient de variation est de 14.7 %).

- **Le barrage Guenitra** dans le Nord tellien (climat humide à subhumide) : la variabilité interannuelle des évaporations est faible avec un coefficient de variation de 8.6 %. La valeur la plus faible observée pendant l'année hydrologique 2005/06 est de 1108.70 mm, et la valeur la plus forte enregistrée pendant l'année 1990/91 est de 1665.4 mm.

- **Le barrage Hammam Debagh** dans le Sud tellien (climat subhumide à semi-aride) : l'évaporation est marquée par une faible irrégularité interannuelle (le coefficient de variation est de 11.5 %). Le volume moyen évaporé atteint les 1385.2 mm. Le maximum est enregistré essentiellement au cours de l'année sèche 1996/97 (1749.1 mm) et le minimum est observé durant l'année humide 2003/04 (1165.3 mm).

- **Le barrage Hammam Grouz** dans les Hautes Plaines (climat semi-aride) : la moyenne interannuelle de l'évaporation dépasse les 1648.5 avec un écart type de 158.4 mm (coefficient

de variation : 9.6 %). Les valeurs de l'évaporation fluctuent entre un maximum de 1937.6 mm en 2000/01 et un minimum de 1363.5 mm en 2007/08.

- **Le barrage Ain Zada** dans les Hautes Plaines (climat semi-aride): l'évaporation est marquée par une forte irrégularité interannuelle, ce qui souligne l'appartenance du barrage au climat semi aride. La hauteur moyenne annuelle évaporée s'élève à 1700.7 mm /an. L'évaporation a atteint son maximum durant l'année 1993/94 (2236 mm) tandis que l'évaporation a atteint son minimum au cours des années 1990/91 (absence des évaporations pendant la saison estivale) et 1991/92 (absence des évaporations dès le mois de septembre 1991 jusqu'au mois de janvier 1992).

- **Le barrage K'sob** dans les versants sud des monts du Hodna (climat semi-aride) montre des valeurs très importantes des évaporations, supérieures à 2000 mm /an pendant toute la période d'étude, à l'exception de l'année 2008/09 qui enregistre une lame évaporé de 1185.8 mm (absence des évaporations durant les trois mois de mai, juin et aout).

- **Le barrage Foum El Gueiss** dans le Piémont Nord de l'Aurès (climat semi-aride à subhumide), l'évaporation moyenne interannuelle a dépassé les 1500 mm/an. L'année sèche 1996/97 apparait comme celle ayant enregistré une forte évaporation et l'année humide 2005/06 comme celle ayant enregistré une faible évaporation. Il est à remarquer que les quantités d'eau évaporées se démarquent par une réduction à partir de l'année hydrologique 2003/04, ceci s'explique par le taux élevé d'envasement de cet ouvrage (cf. cinquième chapitre).

- **Le barrage de Foum El Gherza** dans le Piémont Sud de l'Aurès (climat aride) , illustre l'importance de l'évaporation, en effet, la hauteur totale d'eau perdue durant 23 ans années d'exploitation avoisine la valeur de 2668.5 mm/an, la variabilité des évaporations est très faible avec un coefficient de variation de 9.42 %. Les valeurs extrêmes se situent entre 3256.6 mm durant l'année particulièrement sèche 1993/194 et 2151.2 mm au cours de l'année humide 2010/11.

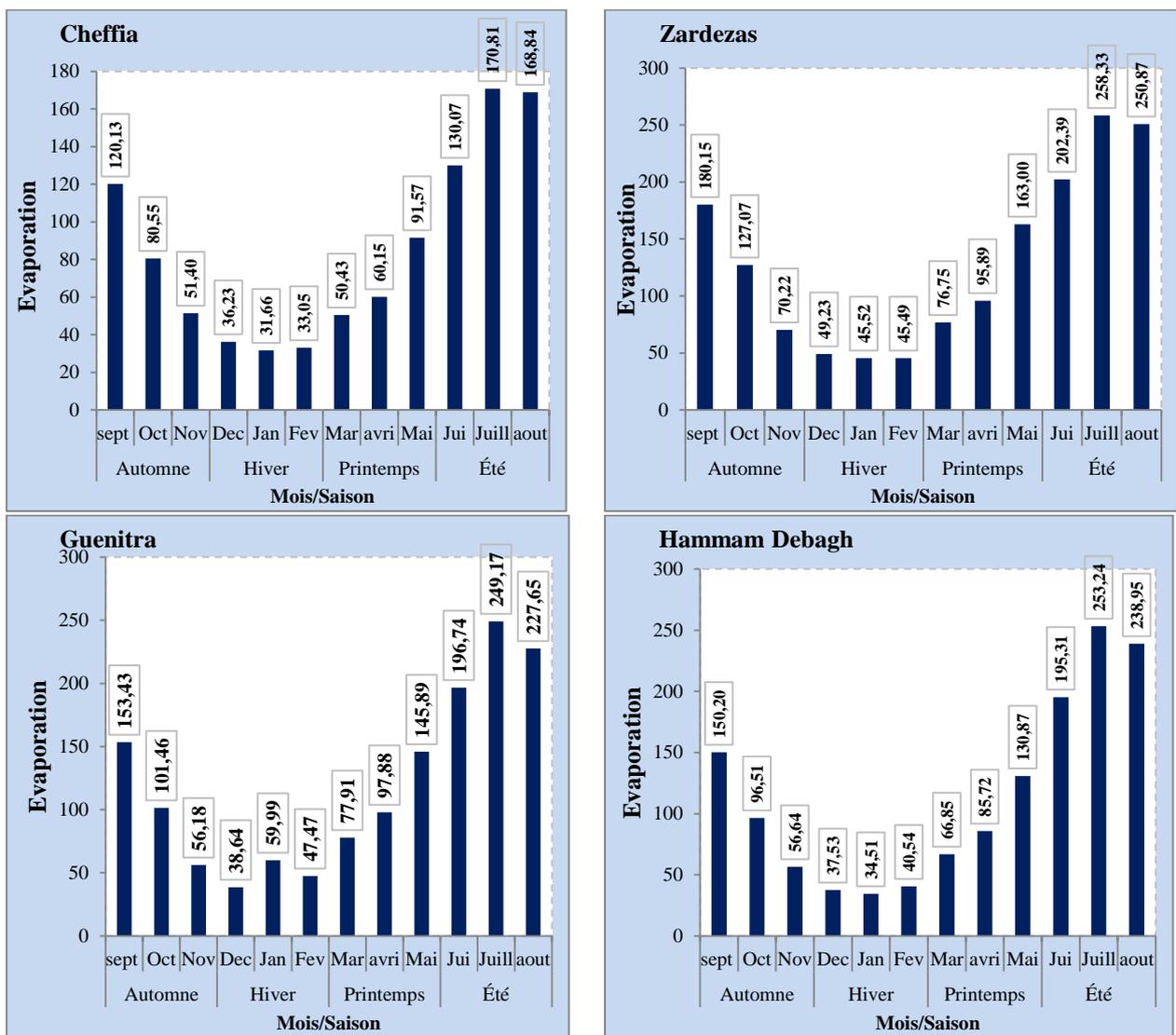
Chapitre 4 : Variabilité spatio-temporelle des pertes en eau (évaporation, fuites),
dévèrsements de crue et vidanges de fond



Figure 80 : Variations annuelles des évaporations des barrages (période : 1990/1991 - 2012/2013)

1.1.4 Variations mensuelles et saisonnières des évaporations

Pour illustrer le caractère variable du régime des évaporations, il est nécessaire d'analyser la variation des quantités d'eau évaporées à l'échelle mensuelle et saisonnière. La figure 81 montre que les volumes maximums des pertes par évaporation se situent en été pour tous les barrages (juin, juillet et aout) où le total saisonnier varie entre un maximum de 1097.5 mm au barrage K'sob (Hautes Plaines) et un minimum de 469.7 mm au barrage Cheffia (Tell maritime). Par contre, les volumes les plus faibles des évaporations ont été enregistrés durant la saison d'hiver (décembre, janvier et février) avec un total saisonnier qui oscille entre un maximum de 262.6 mm au barrage Foug El Gherza (Piémont Sud de l'Atlas saharien) et un minimum de 100.9 mm pour le barrage de Cheffia.



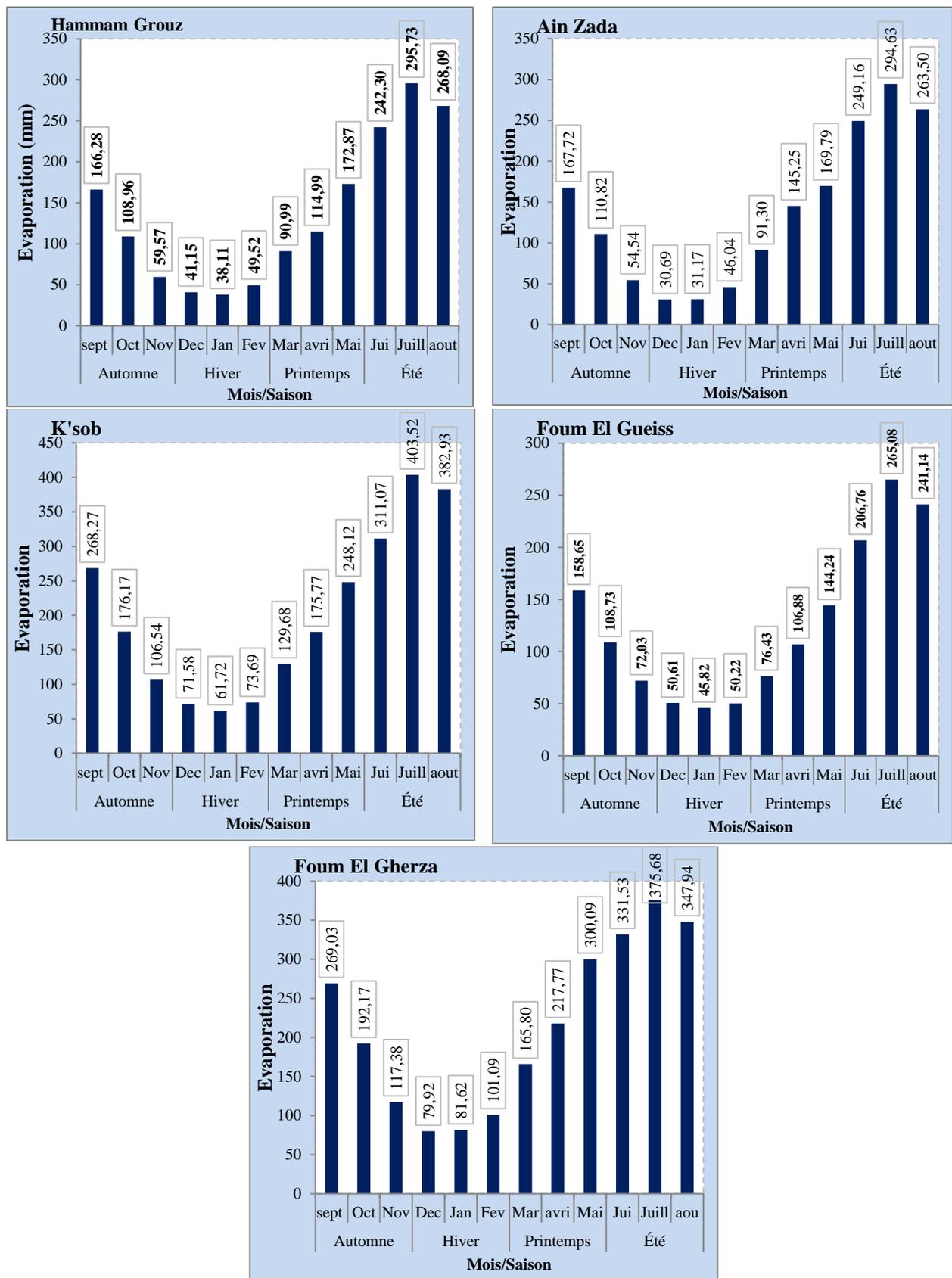


Figure 81 : Variations mensuelles et saisonnières des évaporations (période : 1990/91-2012/13)

En résumé, l'analyse statistique des données des évaporations des lacs de barrages a mis en évidence une variabilité notable dans le temps et dans l'espace, en lien avec les contextes physiographiques et climatiques différents. Les résultats permettent de procéder à un regroupement des barrages suivant leur moyenne interannuelle d'évaporation : le premier groupe concerne la retenue de Cheffia qui a un volume évaporé faible (1024.4 mm/an). Le deuxième groupe concerne les retenues Guénitra, Zardezas, Hammam Debagh et Fom El Gueiss qui ont des volumes évaporés moyens compris entre 1385.2 et 1526.6 mm/an. Le troisième groupe rassemble les retenues Hammam Grouz et Ain Zada qui enregistrent des volumes évaporés importants, dépassant les 1600 mm/an. Enfin, le quatrième groupe concerne les retenues K'sob et Fom El Gherza qui ont des volumes évaporés très importants, dépasse les 2400 mm/an. Ces résultats peuvent être liés à la répartition géographique et les caractères climatiques des retenues où par l'influence des autres facteurs naturels telles que l'étendue et la profondeur de la retenue.

En outre, les évaporations annuelles enregistrées dans les barrages, montrent clairement la forte variabilité temporelle. L'évolution mensuelle permet de distinguer une saison très sèche qui correspond à l'été (les mois de juin, juillet et août) et une saison très humide qui correspond à l'hiver (les mois de décembre, janvier et février).

1.2. Les fuites des barrages

Les fuites d'eau, terme non négligeable dans le bilan d'eau de certains barrages, se traduisent par des quantités de pertes considérables. L'étude de ce phénomène s'avère prioritaire, car il peut mettre en danger la stabilité du barrage et réduire sa capacité utile (**Therond, 1980 ; Benfetta, 2008, 2017**).

1.2.1 Rappel bibliographique sur les fuites des barrages

Plusieurs travaux ont porté sur l'étude des fuites des barrages de différentes régions dans le monde. En Espagne, **Coyne (1994)** montre que le barrage de Cannelles (Oued Noguera Ribagorzana, affluent de Sègre), a été le siège d'importantes fuites d'eau à travers la rive gauche et à proximité de la centrale souterraine : le débit des fuites a atteint 1600 l/s pour un plan d'eau dépassant la cote de 75 m. En France, **Therond (1980)** a étudié les fuites dans quelques barrages français comme le barrage de Castillon (fleuve Verdon, région de Alpes de Haute Provence), le barrage de la Chaudanne (fleuve Verdon, région de Alpes de Haute Provence), le barrage de Saint Etienne de Cantales (fleuve Cère, région d'Auvergne-Rhône-Alpes) et le barrage Genissiat (fleuve du Rhône, région d'Auvergne-Rhône-Alpes).

Au Maghreb, de nombreux travaux menés sur différents barrages ont porté sur l'étude des fuites. En Tunisie, l'étude de **Rouis (1984)** montre que le barrage de Sidi Boubeker (Oued El Kébir dans le Nord de la Tunisie centrale) se caractérise par des fuites importantes à l'aval ; il a expliqué que ces fuites furent attribuées à l'origine au cisaillement du diaphragme en béton qui assurait l'étanchéité de l'ouvrage lors du premier remplissage.

En Algérie, **Rémini (2009)** a étudié l'évolution des fuites dans 22 barrages durant une période de 10 ans, allant de 1992/93 à 2001/02. Il trouve que le volume total des fuites oscille entre

20 et 75 millions de m³ ; les volumes perdus plus faibles sur la période 1998-2002 s'expliquent par l'assèchement de plusieurs barrages durant cette période de pluies déficitaires. **Benefetta et al (2017)** présentent la variation annuelle des pertes en eau par fuite des barrages algériens qui se trouvent confrontés sérieusement à ce problème : les barrages Zardezas, Fom El Gherza, K'sob, Bouhanifa, Ghrib et Djorf Torba (pour la période de 1992/93 à 2001/02), Ouizert (pour la période de 1986/87 à 2001/02) et Cheurfa (pour la période de 1993/94 à 2001/02). Ils montrent une variabilité très nette dans le temps et dans l'espace, selon les conditions naturelles et la situation géographique du site de chaque barrage. La valeur maximale des fuites a été observée au barrage d'Ouizert (région de Mascara) durant l'année 1995/96 (23.34 hm³). Par ailleurs, **Toumi et Remini (2006)** montrent que le barrage de Hammam Grouz rencontre des difficultés de stockage des eaux provenant de l'oued Rhumel, puisque le débit moyen de fuites d'eau à travers la rive droite avoisine les 50000 mètres cubes par jour. Aussi, **Mihoubi et al (2013) et Boussekine (2017)** notent l'apparition des fuites dans cet ouvrage de façon nette pour la première fois durant le mois d'avril de l'année exceptionnelle 2002/03. Au barrage Ouizert (Ouest algérien), **Benefetta et Rémini (2008)** montrent que les fuites se manifestent au niveau de la rive gauche à l'aval du barrage et sont favorisées par la présence de fissures de directions parallèles et perpendiculaires au cours de l'oued, Le débit de fuite a atteint une valeur record de 930 l/s à la fin de l'année 1996. Pour ce qui concerne le barrage Fom El Gherza (Oued El Abiod, région de Biskra), **Toumi et Rémini (2004)** étudient le phénomène de fuites sur une période de 27 ans (1975/76 – 2001/02) pour montrer que le volume des pertes a atteint jusqu'à 20.7 millions de m³ au cours de l'année 1980/81. Les travaux de **Kabour et al (2016)** sont consacrés aux fuites importantes du barrage Djorf Torba (Sud-Ouest algérien), provenant principalement du contournement de l'amorce du voile au large en rive droite. L'expertise du bureau d'étude **Coyne et Belier (1985)** ont signalé des fuites substantielles au niveau de la galerie sur l'aile rive gauche, bas rive gauche, au centre, rive droite, et galerie des calcaires.

1.2.2 Variations interannuelles et annuelles des fuites des barrages de l'Est algérien

Notre étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux qui visent à analyser les fuites des barrages. La figure 82 représente les valeurs moyennes annuelles du volume perdu par fuites à travers dix retenues, durant la période 1990/1991-2012/2013. Ces fuites d'eau sont déduites des bilans d'eau établis par l'ANBT.

On remarque que le volume des fuites d'eau varie d'un barrage à un autre avec première vue une absence des fuites pour les deux barrages Cheffia et Ain Zada.

Le barrage Hammam Grouz se caractérise par des fuites dont le volume réel n'est pas comptabilisé dans les bilans établis par l'ANBT, ne reflétant donc pas les pertes remarquables du lac de retenue. Il est implanté dans un site calcaire (cénomaniens) et marneux fortement tectonisé et moyennement karstique. Après corrections, le volume des fuites s'élève respectivement à 7.4 hm³ en 2002/03, 32.3 hm³ en 2003/04 et 26.2 hm³ en 2004/05 (**Mihoubi et al, 2013 et 2017**).

Trois autres barrages (Zardezas, Hammam Debagh et K'sob) accusent des fuites d'eau supérieures à un million de m³ par an ; les volumes d'eau perdus par les deux barrages Zardezas et K'sob durant la période étudiée sont quasi constants, sans risques notables sur la stabilité de ces barrages.

Un volume ne dépassant pas un million de m³ par an, est constaté sur quatre barrages : Ain Dalia, Guénitra, Hammam Grouz et Fom El Gueiss.

Cependant, des pertes d'eau considérables (2.5 hm³ par an) concernent le barrage Fom El Gherza sur l'oued Abiod. Ce dernier, fondé sur les calcaires cristallins du Maëstrichtien jusqu'à une profondeur de 80 m, est l'un des barrages algériens le plus fortement confronté à ce problème épineux (**Gouskov, 1952 ; Toumi et Rémini, 2004**).

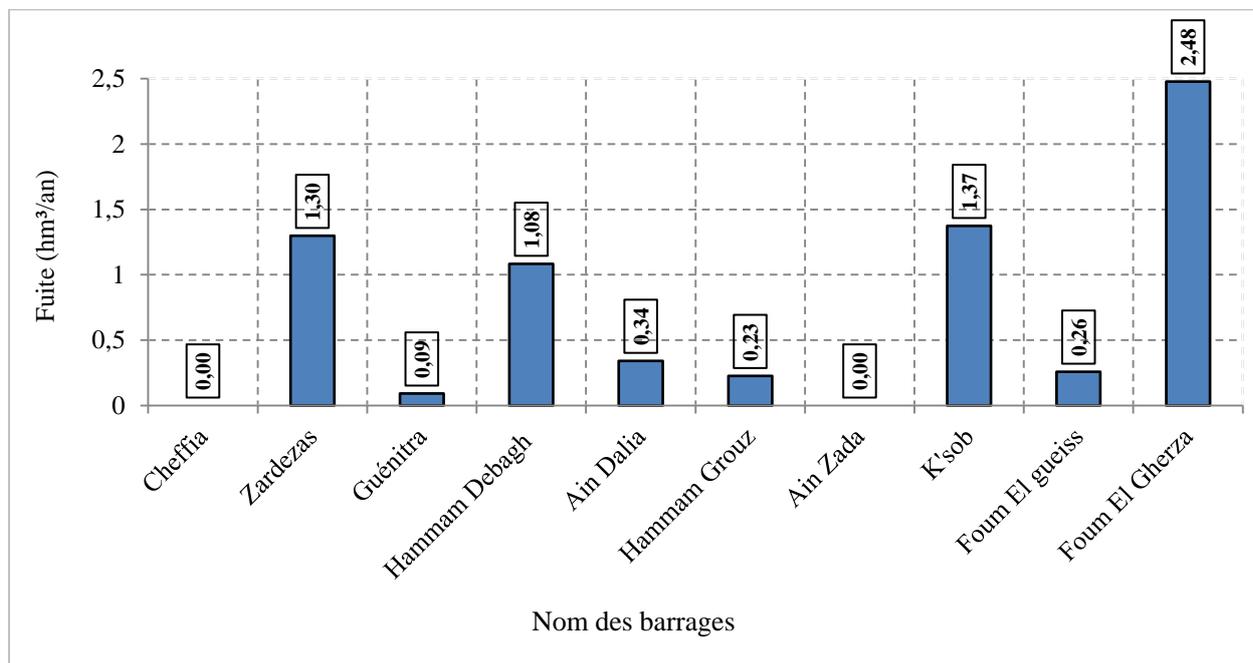


Figure 82 : Moyennes interannuelles des fuites d'eau de barrages de l'Est algérien
(période : 1990/1991 - 2012/2013)

Pour aller plus loin, une étude de la variation annuelle des volumes de fuites de chaque barrage est proposée (figure 83). Il est intéressant de signaler qu'il y'a une variabilité d'une année à une autre des volumes de fuites déduits des bilans d'eau.

Pour le **barrage Zardezas**, les pertes par fuites sont presque constantes. Une légère augmentation a été observée durant les années 2000/01 et 2001/02, qui peut être expliquée par l'apparition d'endroits idéaux de fuites d'eau suite à l'enlèvement de la vase qui les a colmatés.

Les fuites dans les deux barrages **Guénitra et Ain Dalia** : la valeur la plus importante a été observée dans le barrage Ain Dalia au cours de l'année 1990/91 (7 hm³) ; ces fuites sont apparues en rive droite du barrage à environ 200 m du pied aval , ce qui a conduit à réaliser en

1995 des travaux de stabilisation de la zone de captage et de drainage des résurgences au moyen de 12 drains sub-horizontaux d'environ 30 m de long (ANBT , 2014).

En ce qui concerne le **barrage Hammam Debagh**, les pertes par fuites sont apparues de façon nette pour la première fois durant l'année sèche 1993/94. Ces pertes ont certes significativement augmenté en 2008/09 (1.9 hm³), 2009/10 (2 hm³) et 2012/13 (1.6 hm³).

Comme évoqué au plus haut, le volume réel des fuites sur le **barrage Hammam Grouz** n'est pas comptabilisé de façon fiable dans le bilan d'eau calculé par l'ANBT. Les pertes enregistrées durant les cinq années successives (de 2002/03 à 2006/07) se sont avérées comme sous-estimées. **Mihoubi et al (2013 et 2017)** ont fait les corrections mensuelles par comparaison aux apports mesurés à la station de jaugeage (en amont de la retenue) ; les auteurs ont constaté que le volume des fuites du barrage s'élève à 7.4 hm³ en 2002/03, 32.3 hm³ en 2003/04 et 26.2 hm³ en 2004/05, ces fuites ont été confirmées par l'apparition, en avril 2003, d'un premier vortex d'un diamètre de 1.5 m (photos 7). Par ailleurs, le bilan d'eau montre des volumes considérables des fuites de l'ordre de 11.2 hm³ et 11.1 hm³ pendant les années consécutives 2014/15 et 2015/ 2016 (années non comprises dans la série d'étude).

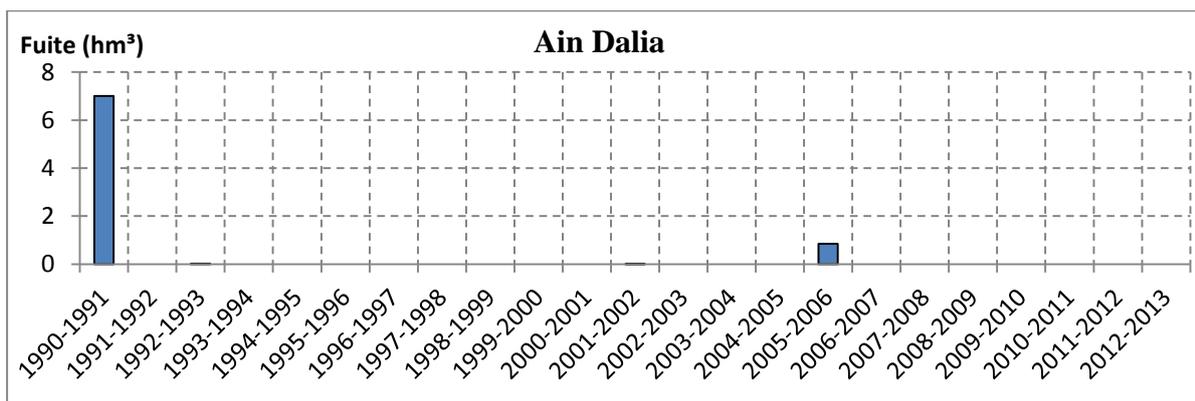
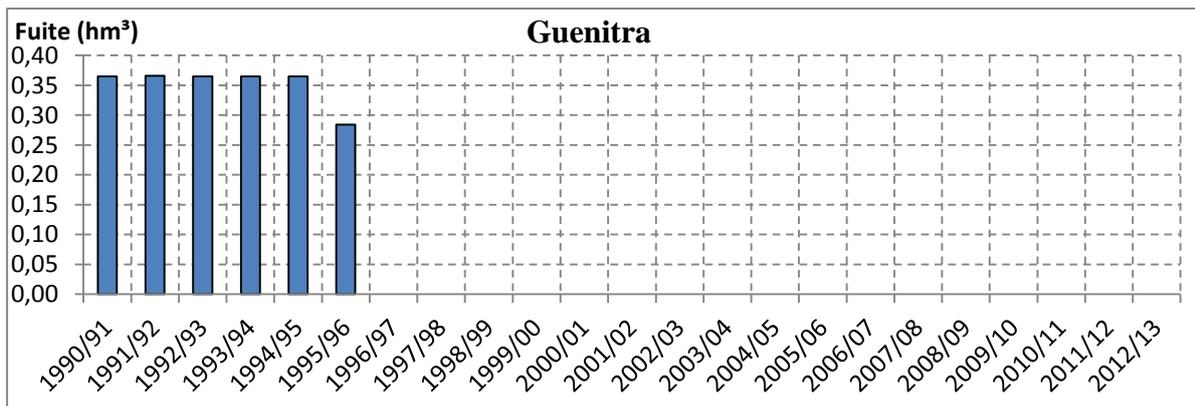
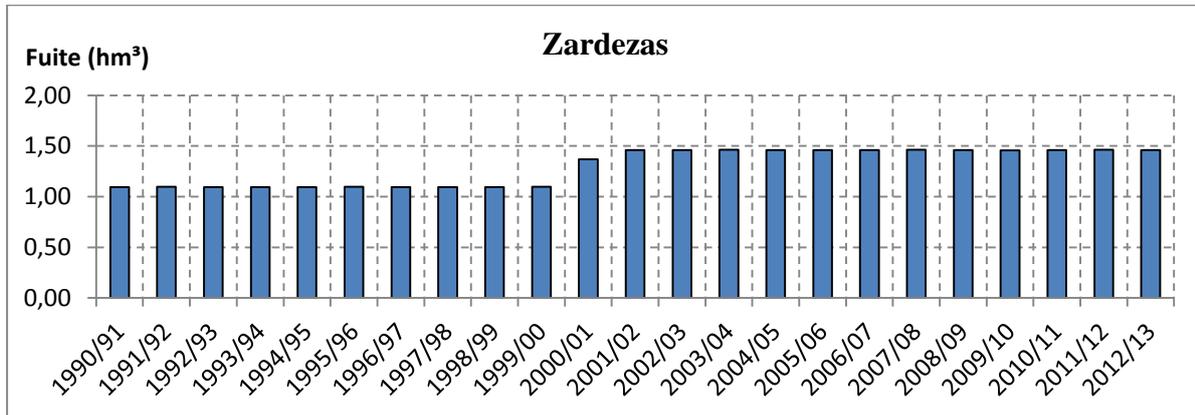


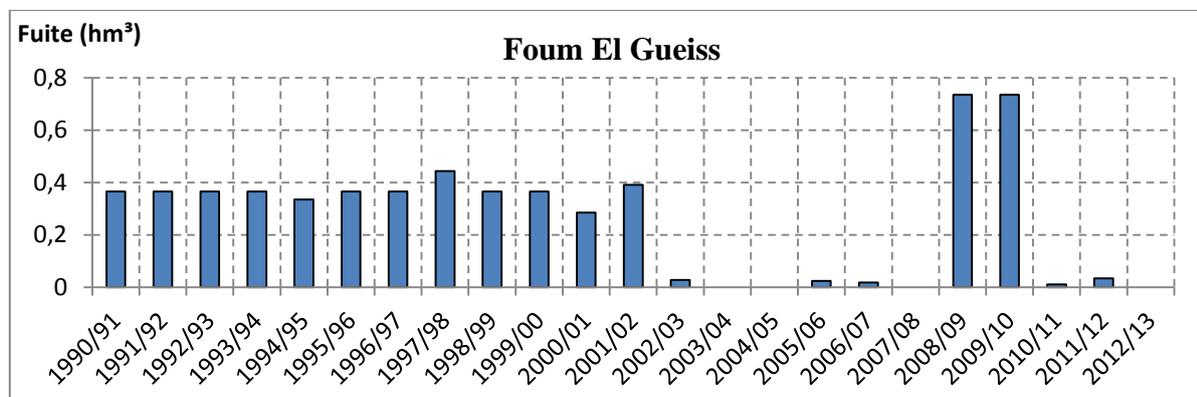
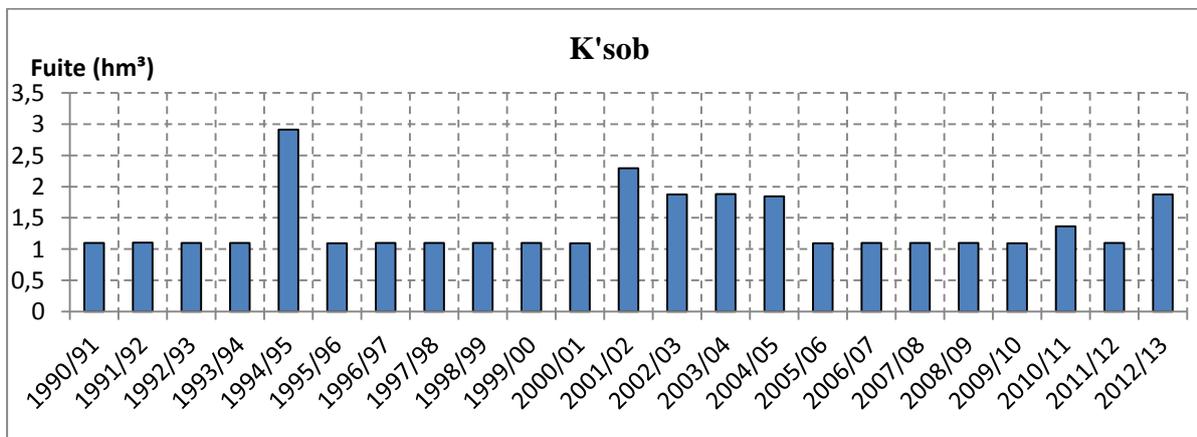
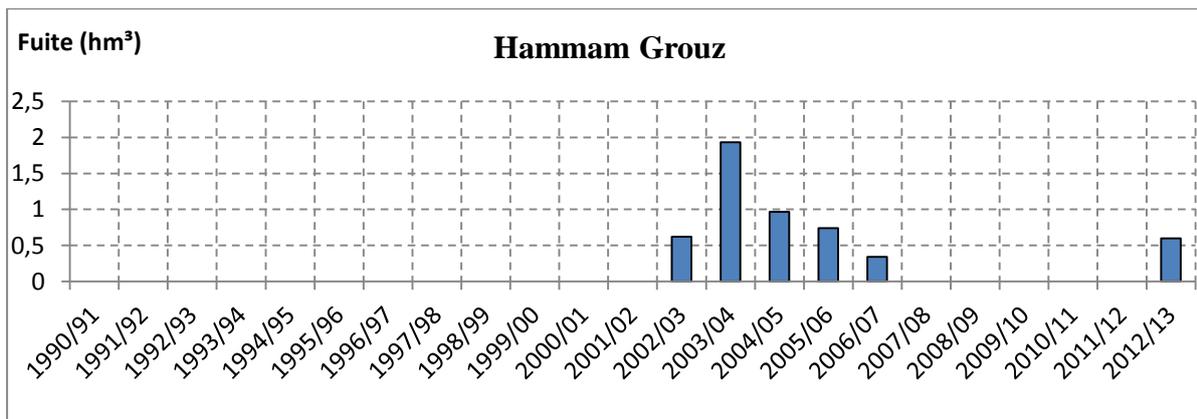
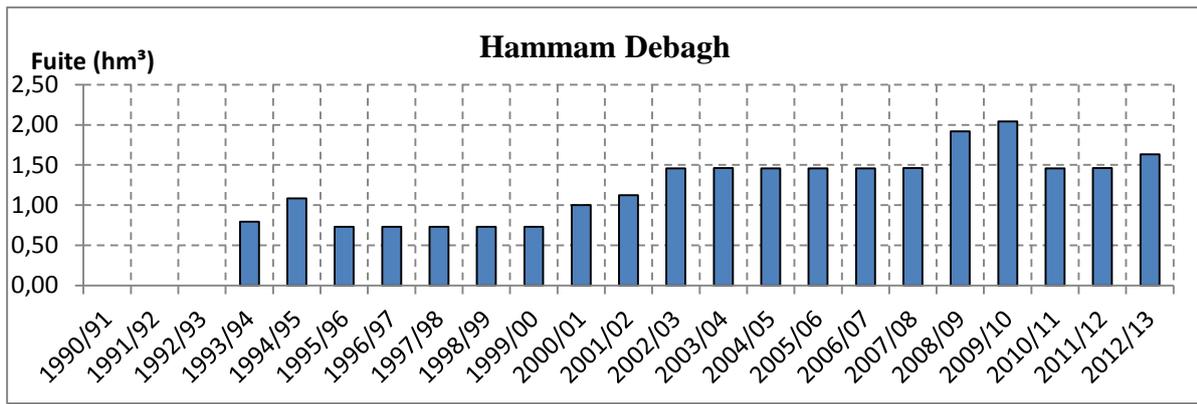
*Photo 7 : Le premier gouffre karstique (avril 2003) au sein de la cuvette de Hammam Grouz
(Mihoubi et al 2013 et 2017)*

L'implantation du **barrage K'sob** sur un site fissuré a engendré des fuites allant jusqu'à 2.9 hm³ (1994/95). Il faut noter que les fuites d'eau perdues durant la période étudiée sont quasi constantes. Excepté les années 1994/95, 2001/02, 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2010/11 et 2012/13 au cours desquelles les fuites se distinguent par une augmentation notable.

Le barrage Foum El Gueiss se caractérise généralement par des volumes des fuites très faibles. Les valeurs maximales des fuites apparaissent durant les années 2008/09 et 2009/10 (0.7 hm³), alors que les valeurs minimales ont été observées pendant les deux périodes de 2002/03 à 2007/08 et 2010/11 à 2012/13.

En ce qui concerne le barrage **Foum El Gherza**, les maximums des fuites se situent dans les années 1990/1991, 1991/1992 et 1995/1996 et 2004/05. Les années 1993/94, 2000/01, 2007/08 et 2008/09 se caractérisent par le volume le plus faible de la série d'observation. Il est intéressant de constater une diminution des fuites au cours de la dernière décennie qu'il faut imputer au manque de mesures dû au comblement des dispositifs de mesure par la vase évacuée du barrage (Toumi, 2004).





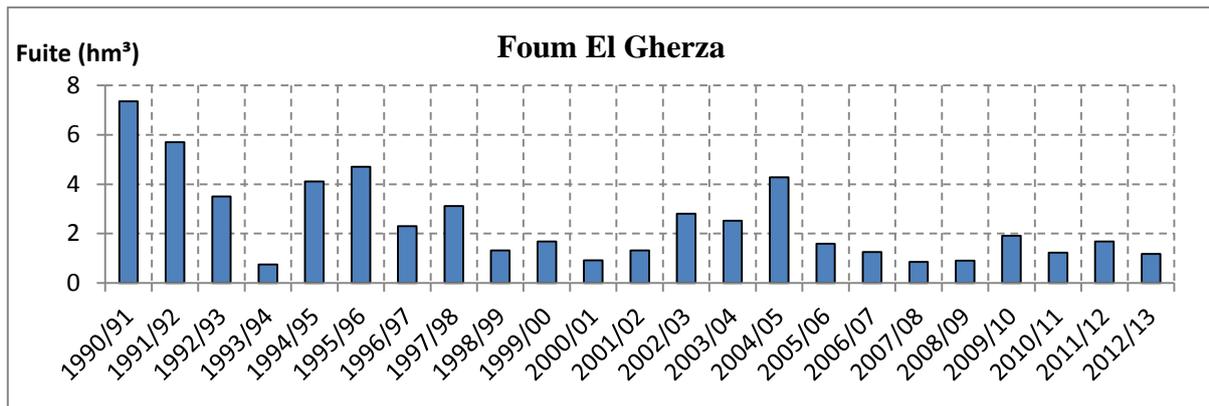


Figure 83 : Variations annuelles des fuites d'eau de barrages (période : 1990/1991 - 2012/2013)

L'étude des fuites au niveau des barrages a permis de dégager les observations suivantes :

- les volumes de fuites varient d'un barrage à l'autre selon les conditions géologiques et géotechniques des sites d'implantation.
- La distribution des moyennes interannuelles des fuites des barrages nous a permis de classer ces barrages en trois groupes distincts : le premier groupe représente les deux barrages de Cheffia et Ain Zada qui n'ont pas des fuites ; le deuxième groupe présente les barrages Guenitra, Ain Dalia, Hammam Grouz et Foum El Gueiss qui ont des fuites inférieures à un million de m³, le troisième groupe présente les barrages de Zardezas, Hammam Debagh, K'sob et Foum El Gherza qui ont des fuites supérieures à un million de m³.
- les pertes d'eau par fuite varient d'une année à une autre, se produisant sur quelques années pour les barrages Guenitra (6 sur 23 ans), Ain Dalia (4 sur 23 ans) et Hammam Grouz (6 sur 23 ans). Par contre, elles se produisent sur plusieurs années pour les deux barrages Hammam Debagh et Foum El Gueiss (20 sur 23 ans) et pendant toute la série d'étude pour les barrages de Zardezas, K'sob, et Foum El Gherza.
- Parmi ces barrages, le barrage Foum El Gherza est fortement confronté à ce phénomène, les volumes des fuites peuvent atteindre des valeurs considérables : 2.5 hm³/an en moyenne (soit une perte de 5.3 % de la capacité totale de cet ouvrage). Il est constaté également des évaporations très importantes (2668.5 mm/an en moyenne), soit une perte de 8.5 % de la capacité totale).

2. LES VOLUMES EVACUES : DEVERSEMENTS DE CRUE ET VIDANGES DE FOND

L'évacuateur ou le déversoir de crue est l'un des principaux ouvrages d'un barrage destiné à évacuer un volume d'eau depuis le réservoir amont vers un canal de décharge. Il sera notamment utilisé en cas de crue qui pourrait mettre en péril le barrage en faisant augmenter le niveau amont d'une manière excessive. Certains déversoirs de crue sont équipés de système de vannes permettant de contrôler le débit restitué, mais les déversoirs dits à seuil libre restent

les plus fiables vis-à-vis des ruptures ou des pannes mécaniques, ils ne nécessitent aucune intervention humaine pour leur fonctionnement.

Par ailleurs, le système de vidange de fond des barrages permet d'abaisser le plan d'eau en cas de besoin, ou de vider partiellement ou entièrement la retenue en cas du passage d'une onde de crue conséquente ou en cas de maintenance de l'ouvrage ou chasse de sédiments en période de crue.

Ces deux systèmes donc jouent un rôle fondamental pour la sécurité d'un barrage. Pour cela, il importe d'étudier la variation des volumes évacués par le déversement de crue et la vidange de fond à l'échelle interannuelle et annuelle, et d'autre part d'analyser les valeurs importantes de déversement de crue et de vidange de fond suite à des événements de crues exceptionnelles. L'objectif est de comprendre la gestion des barrages ainsi que leur comportement hydrologique lors des événements de crues.

2.1. Variations interannuelles et annuelles des déversements de crue et des vidanges de fond des dix barrages

La figure 84 montre que les moyennes interannuelles de déversement de crue et de vidange de fond se caractérisent par leurs nuances spatiales et temporelles remarquables. Les trois barrages Cheffia, Hammam Debagh et Zardezas enregistrent les valeurs les plus importantes, alors que les barrages Hammam Grouz et Ain Zada enregistrent les valeurs les plus faibles. Cette variation a pu être expliquée par les conditions climatiques notamment pluviométriques. Il est intéressant de constater que les valeurs moyennes de déversement de crues ont été bien marquées dans les trois barrages K'sob, Foum El Gueiss et Foum El Gherza (entre 10 et 19.6 hm³/an), malgré leurs situations dans la zone semi-aride à aride. Cette variation s'explique par la brutalité des crues notamment dans les barrages Foum El Gherza sur l'oued El Abiod (région de Biskra) et K'sob sur l'oued K'sob (région de M'sila).

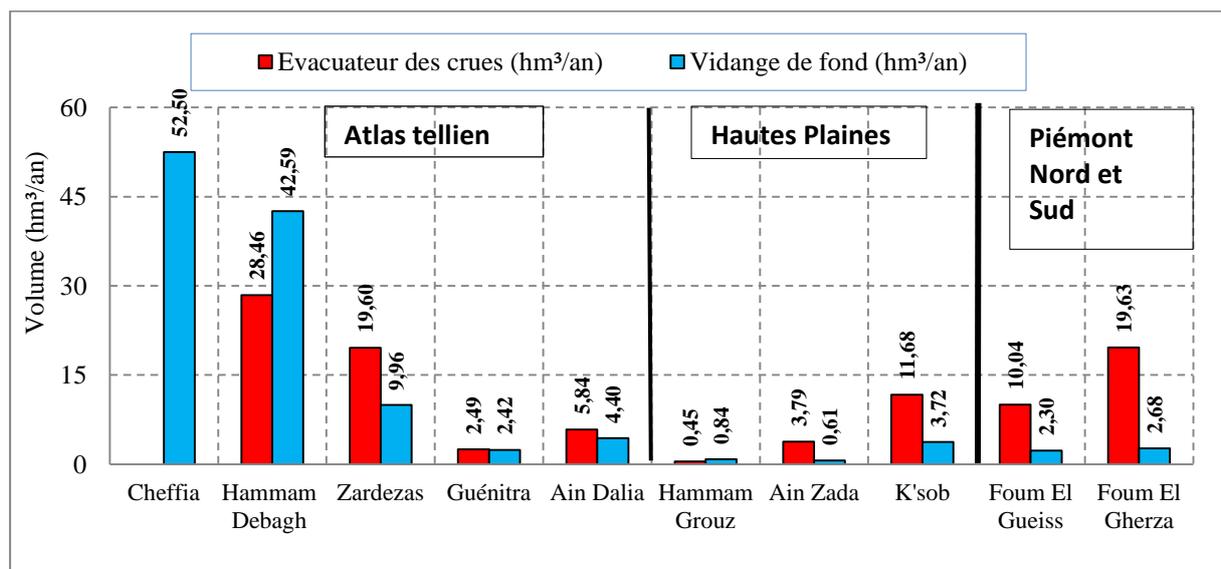


Figure 84 : Moyennes interannuelles des volumes des déversements de crue et des vidanges de fond des retenues de barrages (période : 1990/1991 - 2012/2013)

Afin de mieux cerner l'évolution chronologique des volumes d'évacuation de crue et de vidange de fond, nous procédons à l'étude de la variabilité annuelle de ces volumes pour chaque barrage (figure 85) :

Le barrage Cheffia : un volume moyen de 52.5 hm³/an a été évacué à partir de la vanne cylindrique de cet ouvrage ; les plus importants volumes déversés correspondent respectivement aux années 2004/05 (326.9 hm³), 2002/03 (206.8 hm³) et 2011/12 (194.1 hm³).

Le barrage Zardezas se caractérise par des valeurs très importantes avec une très forte variabilité (coefficient de variation supérieur à 100 %). Les valeurs maximales de déversement de crue ont été observées au cours des années 1990/91 (44.9 hm³), 1992/93 (55.96 hm³), 1994/95 (40.5 hm³), 2002/03 (56.9 hm³) et 2004/05 (69.1 hm³). Aussi, les valeurs maximales de vidange de fond ont été enregistrées pendant les deux années 2004/05 (42.2 hm³) et 2011/12 (36.7 hm³).

S'agissant de **barrage Hammam Debagh**, le graphique indique que les valeurs de la vidange de fond sont comprises entre 0.4 (1990/91) et 110.4 hm³ (1994/95). Par ailleurs, les valeurs de déversement de crues sont nulles pendant plusieurs années, excepté les années 1992/93, 1994/95, 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2010/11 et 2011/12 dont les valeurs varient entre 8.7 et 291 hm³.

Pour **le barrage Guenitra**, les valeurs de vidanges de fond et de déversement de crue sont très faibles avec une très forte variabilité (coefficient de variation supérieur à 200 %). Les valeurs maximales ont été atteintes durant l'année hyper humide 2004/05 (un déversement total annuel de 31.3 hm³ et une vidange de fond de 33.7 hm³ soit plus de 74 % de l'apport total annuel).

Le barrage Ain Dalia a connu des volumes considérables de vidanges de fond et de déversement crue. Les volumes maximaux de la vidange de fond ont été enregistrés pendant les deux années successives 1991/92 et 1993/94, respectivement 22.6 hm³ et 52.7 hm³. Par ailleurs, les volumes maximaux de déversement de crue ont été observés durant les trois années consécutives 2002/03 (20.1 hm³), 2003/04 (21.9 hm³) et 2004/05 (72 hm³).

Sur **le barrage Hammam Grouz**, et durant 23 ans d'exploitation, le premier déversement a été effectué durant l'année 2002/03 (un volume total annuel de 10.2 hm³). Ce barrage a connu aussi durant la même année une vidange de fond de 17.7 hm³. Il est intéressant de constater que l'année 2014/15 (année non comprise dans la série d'étude) a également marquée par un volume considérable de vidange de fond (un total annuel de 10.6 hm³) et de déversement de crue (3.6 hm³).

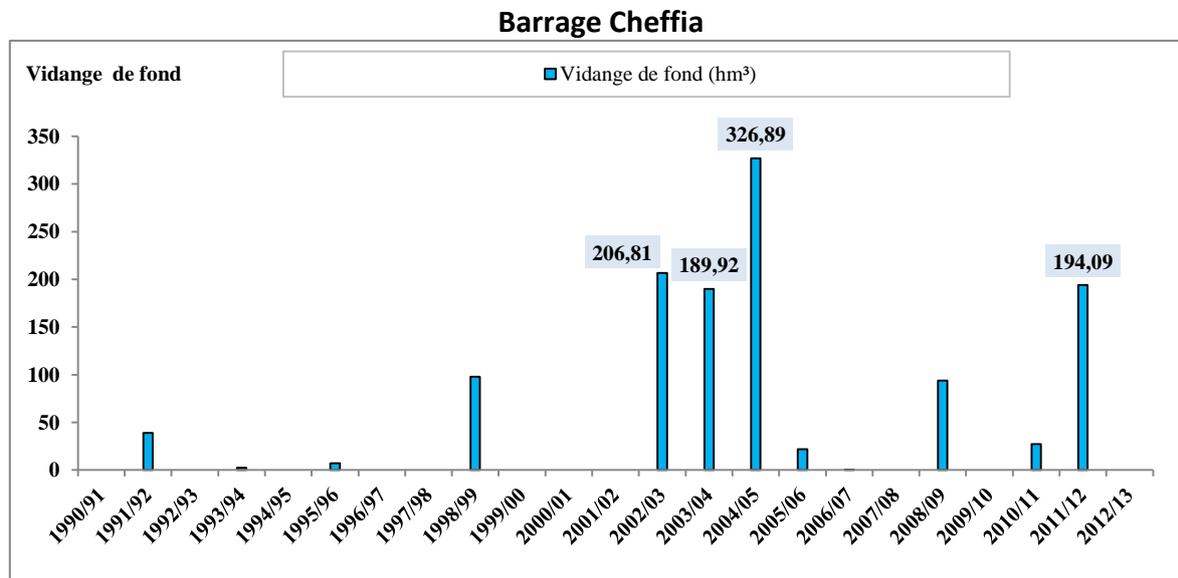
Depuis l'année 1990/91 jusqu'à l'année 2012/13, **le barrage Ain Zada** a connu des vidanges de fond très faibles se produisant durant quelques années. La valeur la plus forte a été enregistrée en 1998/99 avec 4.4 hm³. Par ailleurs, le déversement de crue apparaît dans les

années 1990/91, 1992/93, 2002/03, 2003/04 et 2004/05 avec des valeurs se situant entre 0.01 hm³ et 46.3 hm³.

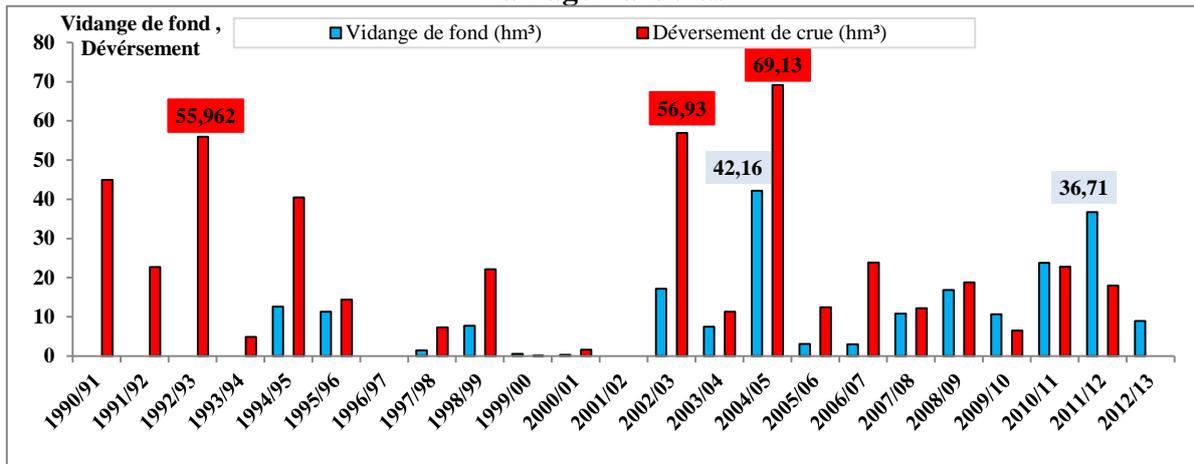
Sur le barrage K'sob, les valeurs annuelles de la vidange de fond et de déversement de crue traduisent une grande variabilité : les valeurs les plus fortes de la vidange de fond ont été observées dans les années 1991/92, 1994/95, 1995/96, 1999/00 et 2003/04, alors que les valeurs les plus fortes de déversement de crue ont été enregistrées dans les années 1994/95, 2002/03, 2003/04, 2005/06, 2006/07, 2007/08 et 2008/09.

Pour ce qui concerne le barrage Foum El Gueiss, les valeurs annuelles de déversement de crue et de vidange de fond montrent également une grande variabilité. En effet, les valeurs de la vidange de fond varient entre 0 et 18 hm³ avec un coefficient de variation supérieur à 100 %. Concernant le déversement de crue, les valeurs annuelles varient entre 0.01 et 33.2 hm³ avec un coefficient de variation supérieur à 97 %. L'année 2002/03 a été une année particulière car elle se distingue par l'importance des déversements de crues et des vidanges de fond (un volume total annuel de 51.4 hm³ soit 97 % de l'apport annuel observé au cours de cette année).

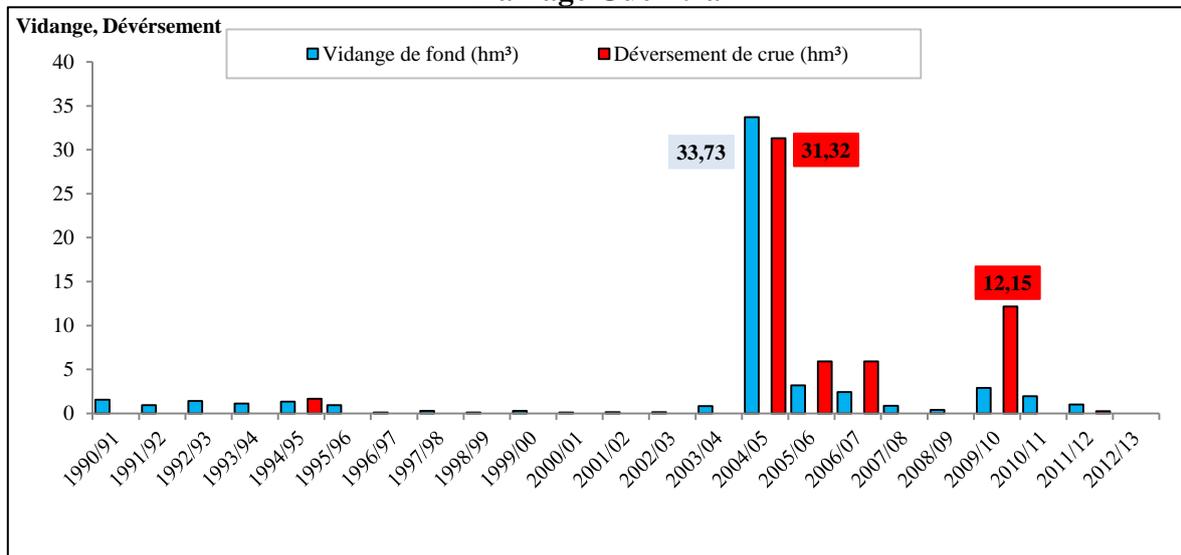
Le barrage Foum El Gherza a connu des volumes exceptionnels de vidange de fond et de déversement de crue pendant cinq années : 1995/96, 2003/04, 2004/05, 2008/09 et enfin 2011/12. Cette dernière est considérée comme exceptionnelle dans l'histoire des crues du barrage Foum El Gherza.



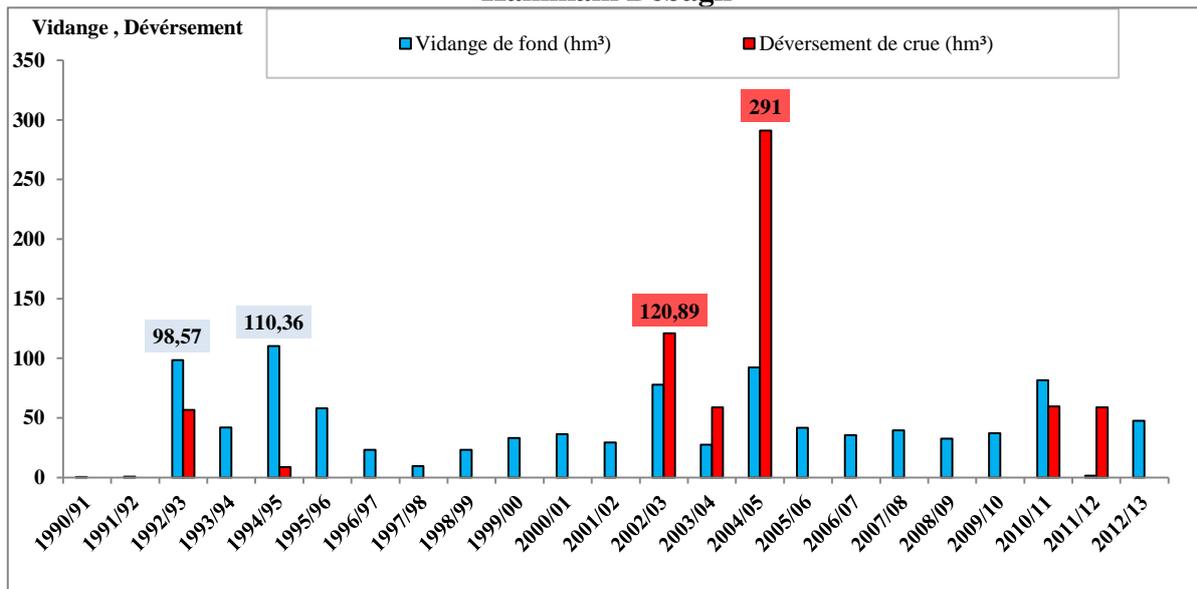
Barrage Zardezas



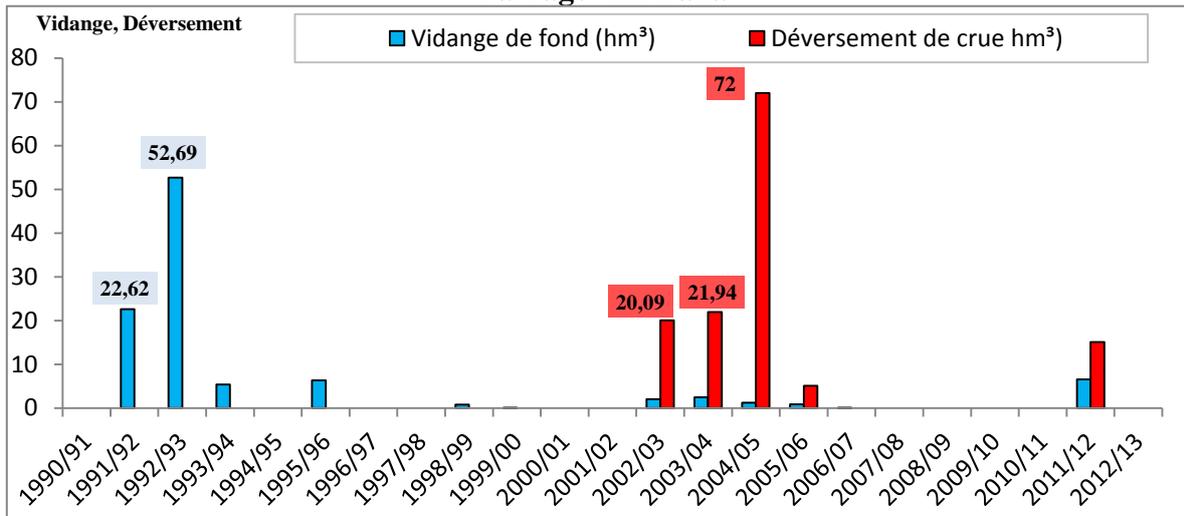
Barrage Guenitra



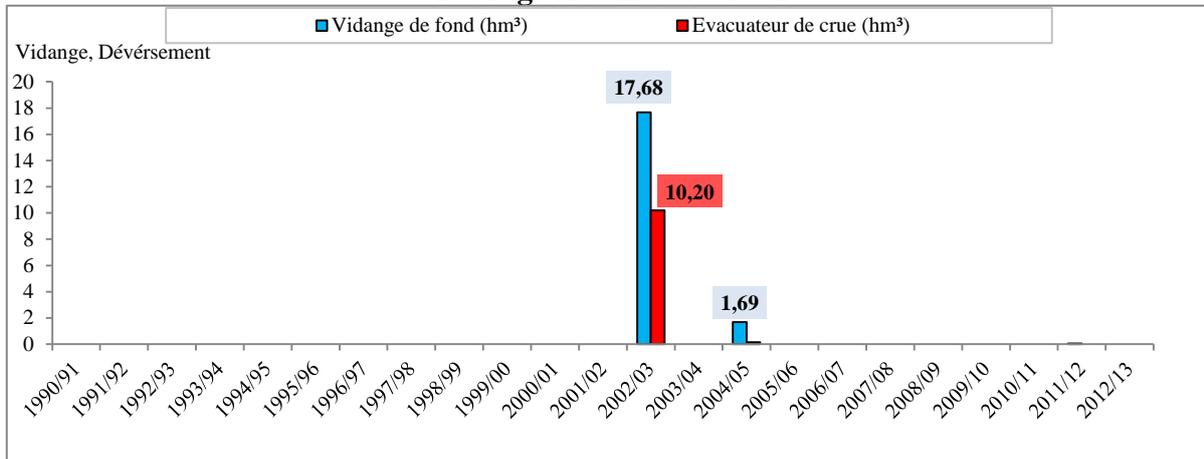
Hamam Debagh



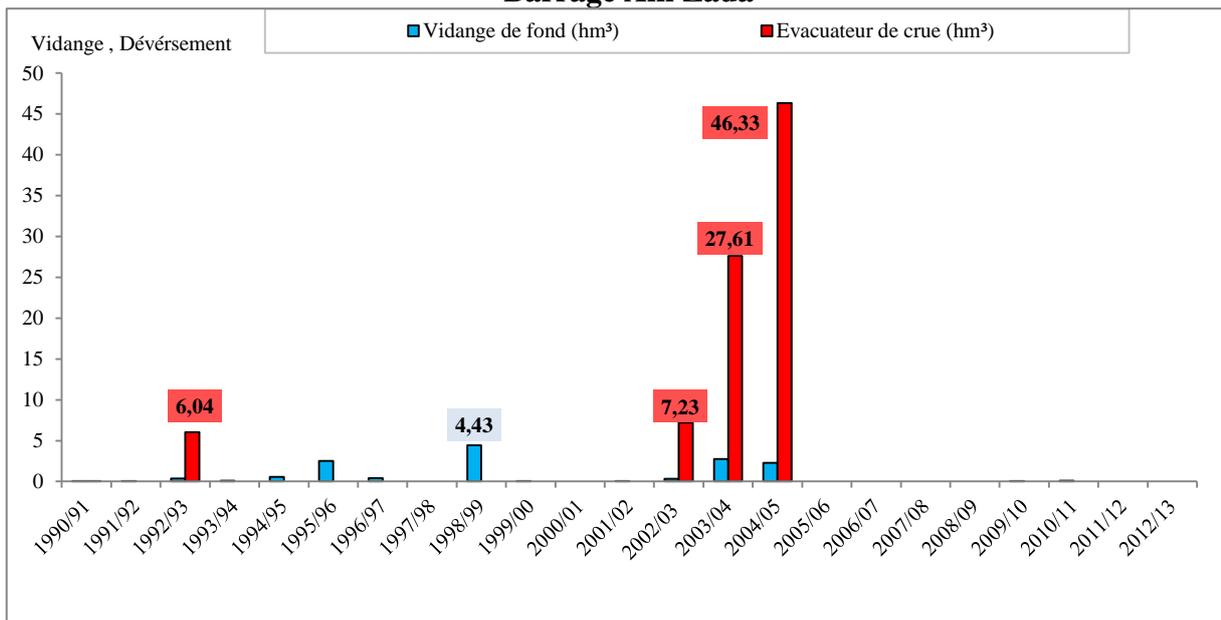
Barrage Ain Dalia



Barrage Hammam Grouz



Barrage Ain Zada



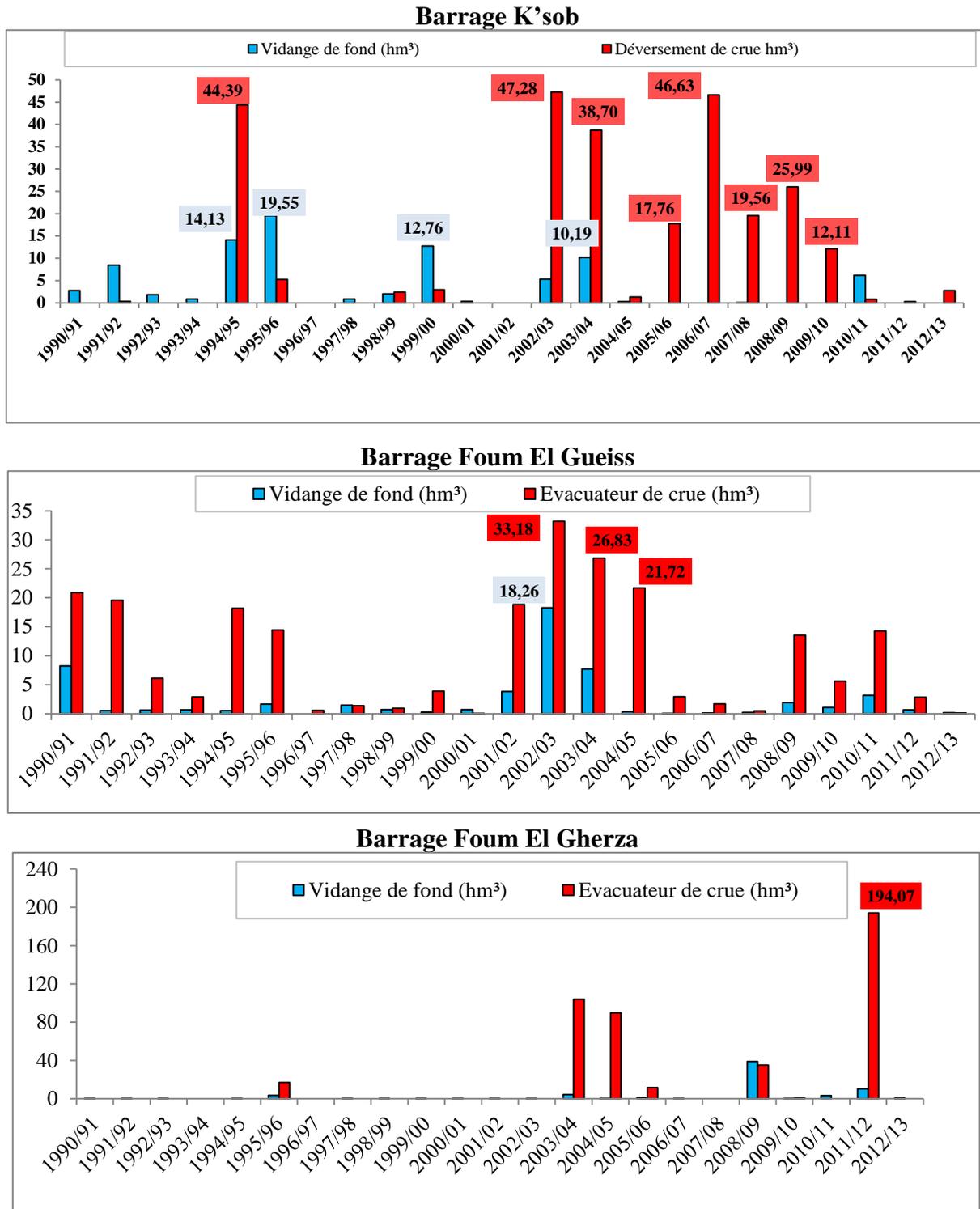


Figure 85 : Variations annuelles des déversements de crue et des vidanges de fond des retenues de barrages (période : 1990/1991 - 2012/2013)

À partir de ces résultats, il ressort que la variabilité temporelle des vidanges de fond et des déversements de crue est saisissante dans les dix barrages étudiés. Le volume évacué se produit sur un nombre d'années limité pour certains barrages (Hammam Grouz, Foum El Gherza, Ain Zada, Cheffia et Ain Dalia), et sur plusieurs années pour les barrages Zardezas, Hammam Debagh, K'sob, Foum El Guéiss et Guenitra.

Par ailleurs, les valeurs maximales de vidanges de fond et de déversement de crue ont été enregistrées respectivement dans le barrage Cheffia (326.9 hm³ en 2004/05) et le barrage Hammam Debagh (291 hm³ en 2004/05).

Il est intéressant de constater que les volumes considérables des vidanges de fond et des déversements des crues ont été enregistrés durant les années de forte hydraulicité. Pour chercher l'origine de ces volumes, nous allons étudier dans ce qui suit, le déroulement de plusieurs crues ayant affecté certains barrages.

2.2. Facteur à l'origine du déversement de crue et de la vidange : les crues exceptionnelles

2.2.1 Rappel bibliographique

Une crue se définit par différents critères : sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe (ou débit maximum) et son volume (**Klemes, 1975**). Elle présente un risque important pour les barrages ; la perte de contrôle de la cote de retenue peut entraîner la submersion du barrage, ce qui peut conduire à sa capture.

De nombreux travaux menés sur différents barrages dans le monde ont porté sur l'étude des crues. En France, nous citons les travaux de **Fouchier et al (2004)**, **Poulard et al (2008)**. Les résultats portent sur une crue exceptionnelle du 08/09/2002 au 10/09/2002 dans les barrages de la Rouvière (Oued Crieulon, affluent rive gauche du Vidourle) et de Conqueyrac (fleuve Vidourle). Le pic principal du débit de pointe entrant a été enregistré au barrage de la Rouvière (1575 m³/s). Au Maroc, **Abdelloui et al (2002)** abordent la variation de l'état de remplissage du barrage Saboun, situé dans la région de Tanger (Nord- Ouest du Maroc), au cours de la crue de novembre 1997 à octobre 1999 ; les résultats indiquent que le volume stocké dans la retenue a enregistré une rapide augmentation au mois de janvier 1998, liée à une forte pluviométrie, ce qui a conduit à évacuer la retenue pendant le mois de février 1998 (plus de 59 % des apports se sont déversés avec un volume total de 995 655 m³, et 24 % ont été vidangés avec un volume de l'ordre de 398 658 m³). En Tunisie, **Daoud et al (2009)** ont étudié les fortes crues du barrage de Sidi Salem (Oued Medjerda, Ouest de Tunis) qui sont observées au début de l'année 2003 (mois de janvier et février) ; ces crues conduisent à lâcher par l'usine et la vidange de fond un débit de 1074 m³/s. Aussi, les auteurs **Guillau et Trabelsi (1991)** notent une augmentation notable de la cote du plan d'eau des barrages de Sidi Saad et El Haouareb pendant la crue du 22 au 25 janvier 1990. Pour l'Algérie, nous citons les travaux de **Mebarki (2005)** et **Mihoubi (2013)** qui analysent la variation des différents termes du bilan d'eau du barrage Hammam Grouz au cours de la crue exceptionnelle de l'année 2002/03. Par ailleurs, les travaux de **Benkhaled et al (2013)** étudient l'évolution horaire de la crue de décembre 2004 au barrage Foug El Gherza. Le barrage de Fergoug, situé au Nord-Ouest de l'Algérie, a été étudié par **Bouhlali (2006)**, concernant une crue exceptionnelle d'un débit de pointe de 850 m³/s observée le 15 décembre 1881. **Affoun Ikhlef et al (2019)** ont analysé les deux crues exceptionnelles au sein de la retenue de Cheffia (Nord-Est Algérien) : la crue de mars 1973, dont le débit maximum journalier moyen est de 1047.9 m³/s, et la crue

de février suivie de celle de mars 2012 dont le débit maximum instantané mesuré était respectivement de 1429 m³/s et 985.6 m³/s. Ces deux crues ont montré le risque encouru par les zones aval du barrage où les inondations se produisant sur des sols saturés et une topographie plane, mal drainée.

Dans cet axe, nous nous intéressons à l'étude des crues pour mieux expliquer les fortes valeurs de déversement de crue et de vidange de fond abordés dans la précédente analyse. Les données des crues sont disponibles au sein de trois barrages : le barrage de Cheffia (Tell maritime), le barrage de Zardezas (Atlas tellien) et le barrage de Foug El Gherza (Piémont Sud de l'Atlas saharien).

2.2.2 Les crues de l'oued Bounamoussa au barrage Cheffia

Le tableau 9 résume les principales caractéristiques des crues qui ont été observées sur la période 1990/91– 2012/13. Les crues au barrage Cheffia surviennent souvent durant les saisons d'hiver et de printemps. Les fortes crues ont été enregistrées au cours des années 2003/04 et 2011/12 dont le débit maximum instantané a dépassé 1000 m³/s ; elles sont engendrées par des précipitations importantes, présentant des intensités fortes. La durée de ces crues peut s'allonger jusqu'à près d'une semaine (cas de la crue des 30 décembre 2003 au 05 janvier 2004).

Tableau 9 : Quelques exemples de crues au barrage Cheffia (période 1990/91 – 2012/13)

Date de la crue	Débit maximum instantané (m ³ /s)	Date et heure de la pointe de crue (heures)	Durée totale de la crue (heures)	Le volume évacué par la vidange de fond pendant la crue (hm ³)	Fréquence de la crue (ans)	Pluie pendant la crue (mm)
Crue du 24 au 27 mai 1992	831	25/05 à 7 h45	42	20.7	100	138.7
Crue du 4 et 5 avril 2003	1280	04/04 à 16 h	46	64.5	100	99.8
Crue du 12 au 15 décembre 2003	1159	13/12 à 1 h	72	18.9	100	124.4
Crue du 30 décembre 2003 au 05 janvier 2004	900	01/01 à 15 h	145	105.3	100	139.6
Crue du 9 au 13 avril 2005	426	10/04 à 18 h	88	74.9	10	135.2
Crue du 29 décembre 2004 au 01 janvier 2005	671	29/12 à 7 h	92	60	10	110.7
Crue du 15 au 16 mai 2009	634	16/05 à 3 h	23	26	20	140.1
Crue 22 et 23 février 2012	1429	22/02 à 19h30	25	85.8	100	149.4
Crue 9 et 10 mars 2012	985	09/03 à 8h30	48	10.6	100	3.6

La figure 86 montre l'évolution journalière des principaux termes du bilan d'eau pendant les fortes crues ; il en résulte des hydrogrammes complexes et étalés dans le temps.

La crue du 4 au 5 avril 2003 a donné un débit maximum instantané de 1280 m³/s, correspondant à une crue centennale avec un apport journalier de 61.3 hm³ et un cumul pluviométrique de 99.8 mm. Le volume de la réserve du barrage a dépassé les 156 hm³, ce qui a mis en fonction la vidange de fond grâce à l'ouverture des vannes cylindriques (un volume total de 64.4 hm³ a été évacué durant cette crue).

La deuxième crue entrante du 12 décembre 2003 présente un débit maximum instantané de 1159 m³/s. L'apport journalier a augmenté dès le premier jour de la crue d'une valeur de 8.4 hm³ à une valeur de 50.9 hm³ pendant le jour suivant. Sur la durée totale de l'évènement, un volume de 18.9 hm³ a été évacué par la vidange de fond.

La troisième crue arrive le 30 décembre 2003 sur une retenue déjà pleine ; elle est à l'origine d'un apport total de 85.1 hm³ et un volume évacué de 105.2 hm³.

Les deux crues successives de l'année 2012 ont donné un débit maximum instantané de 2414 m³/s. La première pointe de crue a été observée au barrage Cheffia le 22 février à 19 h 30, avec un débit de pointe de 1429 m³/s, provoquant une augmentation très rapide des apports (73.2 millions de m³ pendant une journée) et une mise en service des vannes cylindriques (un volume évacué de 85.82 hm³). On souligne le caractère exceptionnel et dangereux de ce phénomène : le débit évacué maximum est évalué à 1537.3 m³/s pendant 4 heures consécutives. Ces lâchers ont eu des conséquences sur les populations exposées en aval (photo 8 et 9). Cela implique la nécessité de consignes de gestion, par la mise en place d'un système de pré-alerte avec des cotes de référence (la cote de 163 m est la cote de déclenchement d'alerte en aval) (**Affoun Ikhlef et al, 2019**).



Photo 8 : Inondation de l'agglomération de Bouhllallah. (Daira de Ben M'Hidi) RN 44 vers Annaba. (Wilaya d'El Tarf, 2012) (d'après Affoun Ikhlef et al, 2019)



Photo 9 : Inondation du nouvel aéroport d'Annaba vers la commune El Chat (Wilaya d'El Tarf, 2012) (d'après Affoun Ikhlef et al, 2019)

La deuxième pointe de crue arrive le 9 mars à 8 h30, elle se distingue par un débit maximum instantané de 985 m³/s. La cote de la retenue a dépassé les 163 hm³.

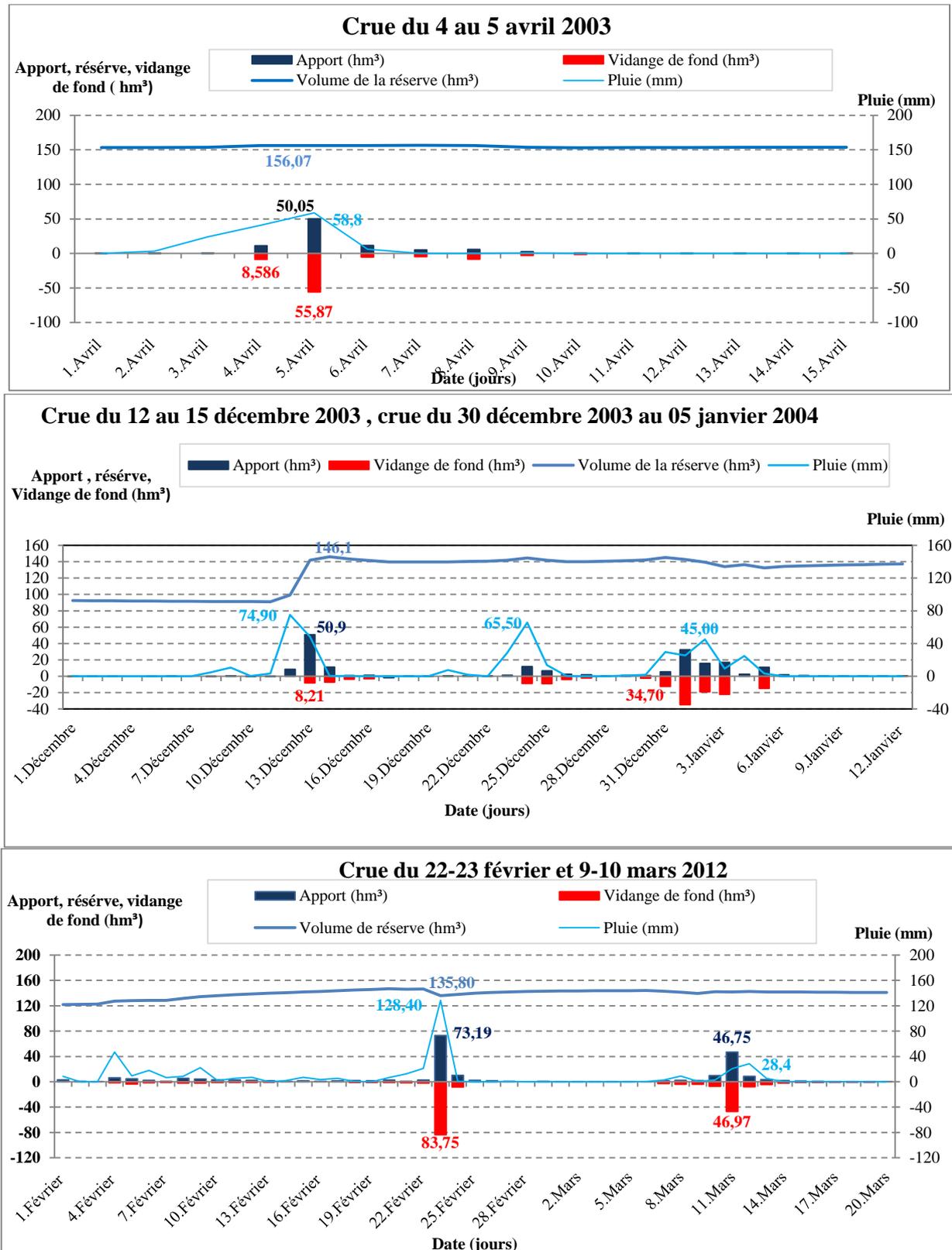


Figure 86 : Exemples de chroniques de crues au barrage Cheffia

2.2.3 Les crues de l'oued Saf-Saf au barrage Zardezas

Les crues et leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 10. La très grande majorité des évènements extrêmes se déroule pendant la période hivernale. Le débit maximum instantané oscille entre 110 (crue du 27 novembre 1998) et 990 m³/s (crue du 13 au 14 novembre 2004).

Tableau 10 : Quelques exemples des crues au barrage de Zardezas (période 1990/91 – 2012/13)

Date de la crue	Débit maximum instantané (m ³ /s)	Apport de la crue (hm ³)	Débit moyen journalier (m ³ /s)	Le volume évacué par la vidange de fond (hm ³)	Le volume évacué par l'évacuateur de crue (hm ³)	Pluie du mois de la crue (mm)
Crue du 29 décembre 1992	136	5.54	64	0	15	246.5
Crue du 05 janvier 1993	145	5.87	68	0	36.4	112.5
Crue du 08 janvier 1995	234	7.63	88	11.7	28.5	225.3
Crue du 27 novembre 1998	110	5.18	60	0	5.7	171.4
Crue du 24 janvier 2003	171	6.64	77	9.8	25.7	199
Crue du 13 au 14 novembre 2004	990	12.01	139	10.1	8.4	249.7

La crue du 8 janvier 1995 se caractérise par un débit maximum instantané de 234 m³/s. Une pluviométrie importante a été enregistrée pendant le jour de la crue (72.5 mm), engendrant une augmentation très rapide des apports (9.4 hm³). Le niveau de la retenue se distingue par une montée très rapide : il a augmenté dès le 7 janvier d'une valeur de 185.8 hm³ à une valeur de 191.3 hm³ pendant le jour suivant (figure 87).

La crue du 13 au 14 novembre 2004 est considérée comme la plus importante, du fait que le barrage a connu un débit entrant de 990 m³/s. Durant cette crue exceptionnelle, une pluie journalière de l'ordre de 135.4 mm est enregistrée, engendrant un apport journalier de 12.1 hm³ dont 60 % ont été évacués par l'évacuateur de crue.

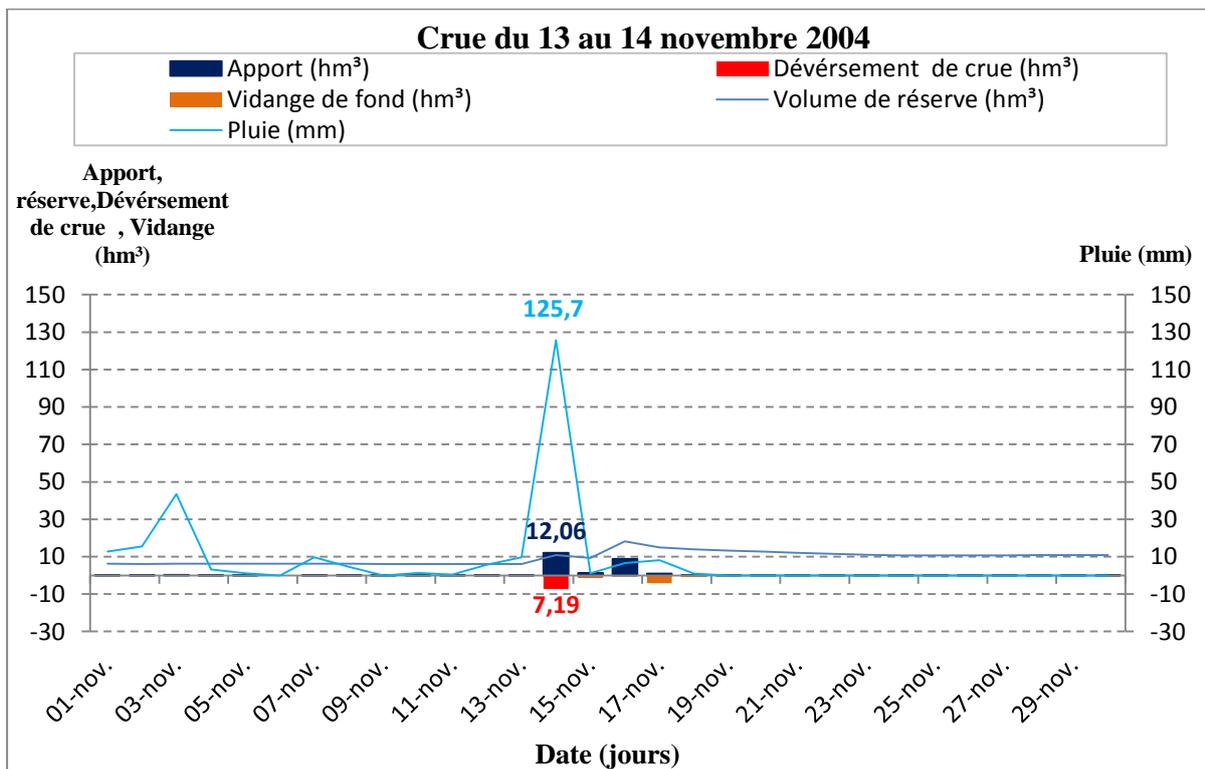
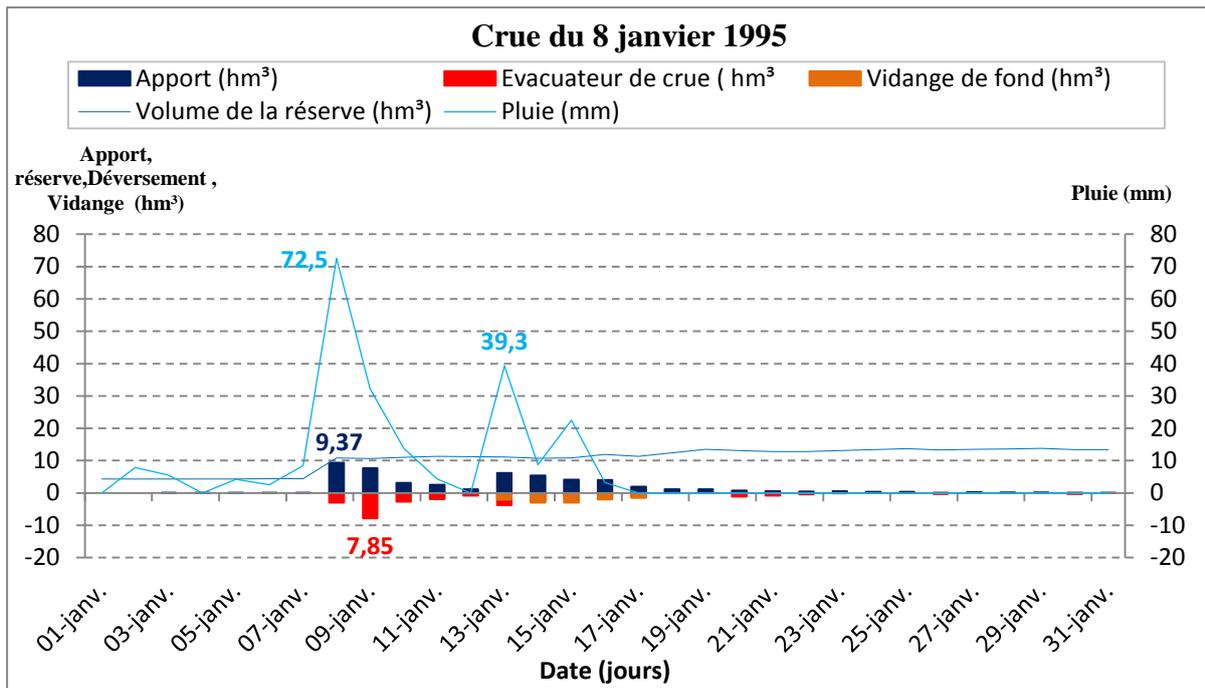


Figure 87 : Exemples de chroniques de crue au barrage Zardezas

2.2.4 Les crues de l'oued El Abiod au barrage Foum El Gherza

Le tableau 11 montre les caractéristiques de quelques crues au barrage Foum El Gherza. Les crues surviennent souvent pendant l'hiver et le printemps. Le débit maximum instantané oscille entre 53.9 m³/s (crue de 5 décembre 2004) et 7826.9 m³/s (crue de 28 au 31 octobre 2011). La durée de ces crues peut s'étaler sur près de 4 jours (cas de la crue du 28 au 31 octobre 2011).

La crue exceptionnelle du 28 au 31 octobre 2011 a été particulièrement importante, tant en ce qui concerne son débit maximum instantané (7826.9 m³/s), sa durée (supérieure à trois jours) ainsi que son volume considérable (192.7 hm³) déversé par l'évacuateur de crue (figure 88). L'apport hydrologique a dépassé 185 hm³ pendant une seule journée (le 30 octobre 2011), suite à une pluviométrie très importante qui a atteint les 60 mm. La capacité de stockage de la retenue a dépassé les 20 hm³, ce qui a mis en service l'évacuateur de crue et la vidange de fond (un volume total de 171.4 hm³). Ces résultats confirment et justifient l'augmentation rapide des apports qu'on a vue précédemment dans le troisième chapitre.

Tableau 11 : Quelques exemples des crues au barrage de Foum El Gherza (période 1990/91–2012/13)

Date de la crue	Débit moyen de la crue (m ³ /s)	Débit maximum instantané (m ³ /s)	Durée totale de la crue (heures)	Vitesse de la crue (cm/h)	Vitesse moyenne de la montée des eaux (cm/h)	Pluie pendant la crue (mm)
Crue du 5 décembre 2004	33.61	53.94	30	/	/	14
Crue du 23 Février 2006	17.13	102.78	17	6.33	3.00	18.5
Crue du 6 Septembre 2009	58.49	146.78	3	10.80	8.86	/
Crue du 28 Septembre 2010	84.22	140.00	1	16.00	14.40	/
Crue du 8 Novembre 2010	29.75	109.44	4	13.00	4.89	/
Crue du 28 au 31 Octobre 2011	975.06	7826.90	80	29.70	4.61	107

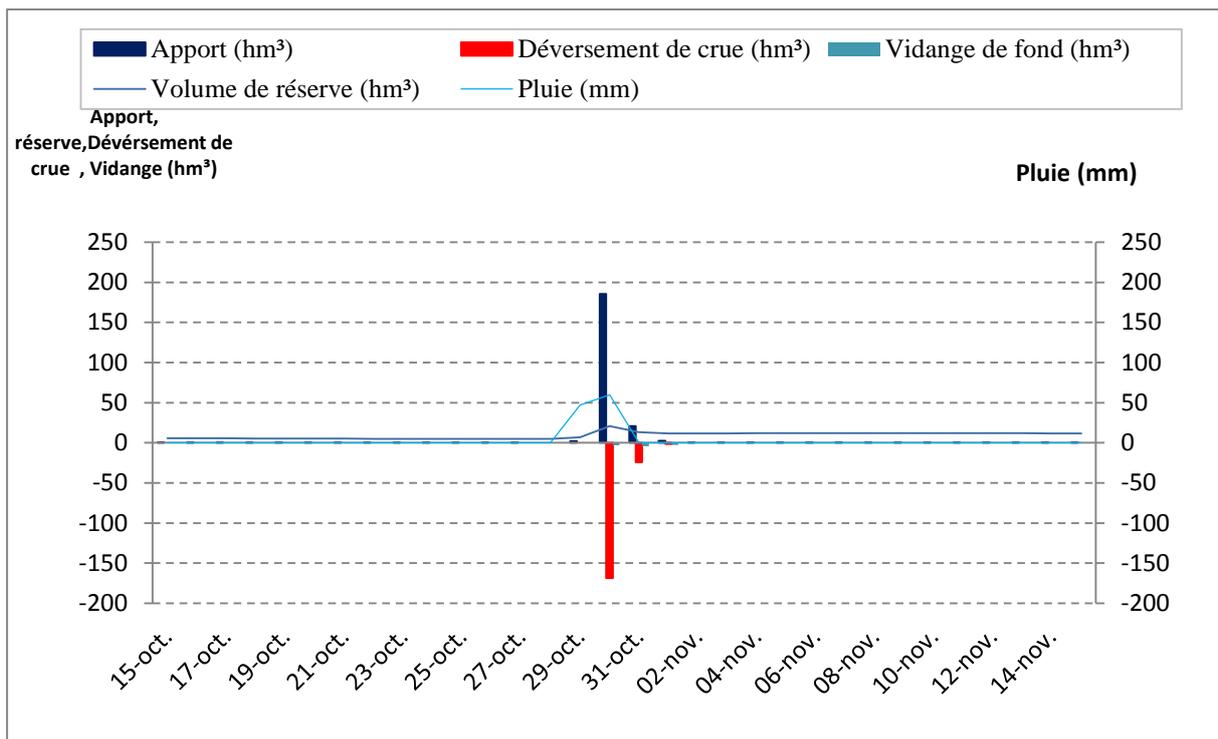


Figure 88 : Chronique de crue exceptionnelle du 28 au 31 Octobre 2011 au barrage Foum El Gherza

CONCLUSION :

En se basant sur les données d'observation à différentes échelles de temps dans dix (10) barrages représentatifs de la zone d'étude, les résultats du bilan en eau mettent en évidence l'importance des pertes en eau par évaporation, et fuite d'une part, et les forts volumes évacués sous forme de déversement de crue et de vidange de fond d'autre part. Ces pertes et volumes évacués constituent un phénomène irrégulier et complexe ; les facteurs mis en jeu étant nombreux et interdépendants.

Les évaporations se caractérisent par une variabilité à la fois spatiale et temporelle. En effet, les moyennes interannuelles des lames d'eau évaporées oscillent entre un maximum de 2668.5 mm/an (barrage Foum El Gherza) et un minimum de 1024.4 mm/an (Barrage Cheffia). Ces résultats permettent de définir quatre groupes : le premier groupe (Cheffia dans le Tell maritime) se caractérise par de faibles volumes évaporés. Le deuxième groupe (Guenitra, Zardezas, Hammam Debagh dans l'Atlas tellien et Foum El Gueiss dans le Piémont Nord de l'Atlas saharien) présente des volumes évaporés moyens qui oscillent entre 1385.2 à 1526.6 mm/an. Le troisième groupe correspond deux barrages des Hautes Plaines (Hammam Grouz et Ain Zada) dont les hauteurs d'eau évaporées sont importantes (supérieures à 1600 mm/an). Le quatrième groupe, concerne les barrages K'sob dans les Hautes plaines et Foum El Gherza dans le Piémont Sud de l'Atlas saharien qui ont des hauteurs d'eau évaporées très importantes (dépassant les 2400 mm/an). Cette répartition spatiale des évaporations est influencée par les caractères physio- climatiques des différents barrages.

Les variations mensuelles et saisonnières des évaporations dans les neuf barrages ont montré un maximum qui se situe en général en été et un minimum en hiver.

Concernant l'étude des variations interannuelles et annuelles des fuites d'eau à travers les retenues, elle a permis de distinguer trois groupes de barrages suivant leur moyenne interannuelle des fuites : le groupe 1 concerne les deux barrages Cheffia et Ain Zada qui n'ont pas de fuites. Le groupe 2 est représenté par les barrages de Guenitra, Ain Dalia, Hammam Grouz et Foum El Gueiss qui ont de fuites inférieures à un million de m³, enfin le groupe 3 concerne les barrages de Zardezas, Hammam Debagh, K'sob et Foum El Gherza qui ont de fuites supérieures à un million de m³. Cette étude a trait à l'importance de fuites du barrage de Foum El Gherza (région de Biskra). Elle est liée à la présence de formations karstifiées jusqu'à une profondeur de 80 m sur le site d'implantation de l'ouvrage. Aussi, le barrage de Hammam Grouz (haut Rhumel à Oued Athménia) a connu des fuites très importantes estimées respectivement à 7.0 hm³ en 2002/03, 32.2 hm³ en 2003/04 et 26.2 hm³ en 2004/2005. Ces données sur les fuites d'eau ont montré l'intérêt de coupler deux approches : le bilan de régularisation du réservoir (calcul de l'affluent négatif) et les mesures des débits de l'oued, à l'amont immédiat de la retenue (**Mihoubi et al, 2017**).

Par ailleurs, la répartition annuelle des volumes évacués a montré une forte disparité spatio-temporelle. Les valeurs maximales des volumes évacués correspondent aux mêmes années caractérisées par une forte abondance hydrologique (année 2002/03 : cas des barrages Hammam Grouz, K'sob, Foum El Gueiss, année 2004/05 : cas des barrages Cheffia, Zardezas, Guenitra, Hammam Debagh, Ain Dalia et Ain Zada).

Ces volumes évacués sont liés à l'importance des crues dans l'année et aux valeurs atteintes par les débits maximaux instantanés. L'étude des quelques chroniques des crues dans les trois barrages de Cheffia, Zardezas et Foum El Gherza a permis de comprendre l'augmentation remarquable des volumes évacués à l'exemple de l'année 2011/12 (barrage Foum El Gherza et Cheffia), de l'année 2004/05 (barrage Zardezas et Barrage Cheffia).

Le volume mort est un autre élément susceptible d'être affecté par les fluctuations hydroclimatiques en particulier suite aux effets des crues récurrentes, et qui charrient des apports solides conséquents. Ces apports solides influent sur la durée de vie des barrages suite à une sédimentation plus ou moins rapide des retenues. Ils feront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 5

**L'ENVASEMENT, FACTEUR DE REDUCTION
DU VOLUME UTILE DES BARRAGES**

INTRODUCTION AU CHAPITRE

L'envasement des retenues des barrages constitue un obstacle majeur aux capacités de stockage et de régularisation des ressources en eau superficielles. L'accumulation des sédiments dans une retenue peut être estimée à partir de mesures bathymétriques. La différence entre deux campagnes bathymétriques permet d'obtenir le volume déposé dans la retenue (**Vanoni, 1977; Morris et Fan, 1998**).

La durée de vie d'un barrage se situe entre la date de sa mise en eau et la période où la sédimentation est tellement avancée que le barrage ne sert plus les objectifs prévus. Cette durée est liée à l'importance de la charge solide véhiculée par les oueds, et aux techniques de lutte contre l'envasement (**Nemouchi, 2001**).

Après un bref aperçu bibliographique concernant l'envasement des barrages, son évolution dans le monde et les opérations de lutte menées pour réduire ce phénomène, on tentera une analyse de l'évolution spatio-temporelle de la sédimentation des 25 barrages de l'Est algérien, en exploitant les données des levés bathymétriques réalisés en 2004 et 2014. Il est primordial, non seulement de voir le rythme de comblement de retenues mais aussi, les dispositions qui s'imposent pour sauvegarder au maximum l'existence des barrages en luttant contre ce phénomène. En dernier, une analyse sur la base des courbes hauteur-capacité des retenues de Zardezas, K'sob, Cheffia et Béni Haroun est envisagée afin d'apporter plus d'explication sur les phases d'évolution de la sédimentation de ces lacs de barrage.

1. ETAT DES CONNAISSANCES SUR L'ENVASEMENT DES BARRAGES

1.1. Pour une meilleure connaissance de l'envasement des barrages

De nombreux chercheurs ont tenté de comprendre l'évolution de l'envasement dans les barrages au fil du temps, et les mécanismes contribuant aux dépôts des sédiments dans les lacs de barrage. Ces différents travaux ont donné lieu à une panoplie de publications dont quelques-unes vont être exposées ci-dessous.

À l'échelle mondiale, le rapport régional « Afrique » du Forum mondial de l'eau de 2006 (Mexique) souligne l'importance des phénomènes d'envasement dans le monde. Le nombre total de barrages s'élève à environ 845 000 avec une capacité totale de 6000 km³. La perte de capacité due à l'envasement a atteint les 567 km³, soit 11.8 %, avec un envasement annuel de 30.9 km³ (**Sumi et Hirose, 2009**).

En Australie, **Chanson (1998)** a cité quelques exemples de petits barrages, comme celui de Moore Creek, où deux averses ont pu transporter 85000 m³ de vase, et la retenue a été complètement envasée au bout de 26 ans de service. Même chose pour le barrage de Korrumbyn Creek, qui a été complètement envasé au bout de 20 ans de service.

En Indonésie, le travail de **Mathias (2013)** sur l'envasement de douze barrages, a permis de noter que les volumes envasés sont très hétérogènes, variant entre 19.8 hm³ pour le barrage de Cirata à 0.11 hm³ pour celui de Lodoyo. Les résultats indiquent une perte de capacité

moyenne annuelle inférieure à 1 % pour les barrages de Lahor, Jatiluhur, Cirata et Selorejo, une perte entre 1 % et 2 % au niveau des barrages Saguling, Sutami, Bening, Lodoyo et Wonogiri, et enfin une perte de capacité supérieure à 2 % pour les trois barrages Wlingi, Sengguruh et Mrica.

En France, **Mekerta (1995)** et **Lucie (2015)** ont étudié l'évolution de l'envasement de la retenue de Génissiat (en amont de la chaîne des aménagements du Rhône français), sur la base des campagnes de mesures bathymétriques de 1958 à 1991. Ils constatent un taux d'envasement relativement élevé (64 %).

En Iran, l'envasement constitue un phénomène remarquable dans la retenue de Sefid-rud, une perte de stockage est évaluée à 36.5 hm³/an soit un taux d'envasement annuel de 2.1 % (**Morris et Fan, 1998**).

Au Pakistan, plusieurs travaux ont été réalisés sur l'envasement du barrage de Tarbela sur la rivière de l'Indus : **Lowe et Fox (1982) (1984)** ; **Tams (1998)** ; **White (2001)** ; **Wallingford (2011)** ; **Roca (2012)**. Les auteurs montrent que les sédiments réduisent de 30 % la capacité initiale du barrage (13.69 km³). Aussi, **Javed (2012 ; 2016)** fait ressortir que, selon la bathymétrie réalisée en 2005, les trois barrages Tarbela, Mangla et Chashma du Pakistan ont connu un envasement cumulé de 6.03 hm³, soit une perte cumulée de la capacité initiale de 27 % (Tarbela : 28 %, Mangla : 21 % et Chashma : 49 %).

Le barrage d'Aswan sur le Nil en haute Egypte est caractérisé par une moyenne annuelle de sédimentation de 124 millions de tonnes au cours de la période de 1968 à 1979 (**Shalash, 1980**). Selon **El Shazli Hussein (2018)**, cet ouvrage a perdu 12 % de sa capacité durant la période de 1964 à 2013.

Dans le Centre-Ouest de la Jordanie, le barrage de Mujib, construit en 2003 avec une capacité initiale de 31.2 hm³, a perdu 1.55 % par année de sa capacité, ce qui indique que la tranche morte occupe 18.63 % de la capacité initiale après 12 ans seulement d'exploitation de l'ouvrage (**Ijam et Al-Mahamid, 2012 ; El-Radaideh et al, 2017**).

En Chine, la retenue de Sanmenxia sur le fleuve Jaune, mise en eau en 1960, a accumulé un volume de 1.8 milliards de tonnes de sédiments, soit un taux d'envasement de 17 % au cours de 18 mois succédant sa mise en exploitation (**Luci, 2015 in Morris et Fan, 1998**).

Le phénomène d'envasement est largement signalé aux États-Unis où 156 relevés bathymétriques provenant de 68 barrages ont été exploités dans l'étude de **William et al (2006)**. L'envasement spécifique moyen pour l'ensemble des 68 retenues est de l'ordre de 386.9 m³/ km²/an.

En ce qui concerne l'Afrique, l'envasement des barrages est très élevé (**Seklaoui-oukid, 2016**). En Afrique du Sud, la moyenne d'envasement pour 170 barrages a engendré une perte de capacité de 105 hm³ par an, ce qui correspond à une perte économique de 21.2 Millions de

Dollars (Braune, 1989). En Afrique du Nord, des constatations sur l'envasement des barrages entre 2001 et 2003 ont été rapportées par Drouhin et al (1951), Plus de 230 grands barrages d'une capacité totale de 23 km³ sont signalés par Remini (2003) et dont la tranche perdue par envasement atteint, en moyenne annuelle 125 hm³. Par ordre d'importance décroissante, le Maroc a enregistré un envasement annuel moyen de 65 hm³ (Badraoui et Hajji, 2001), l'Algérie 32 hm³ et la Tunisie 25 hm³ (Demmak, 1982) (figure 89).

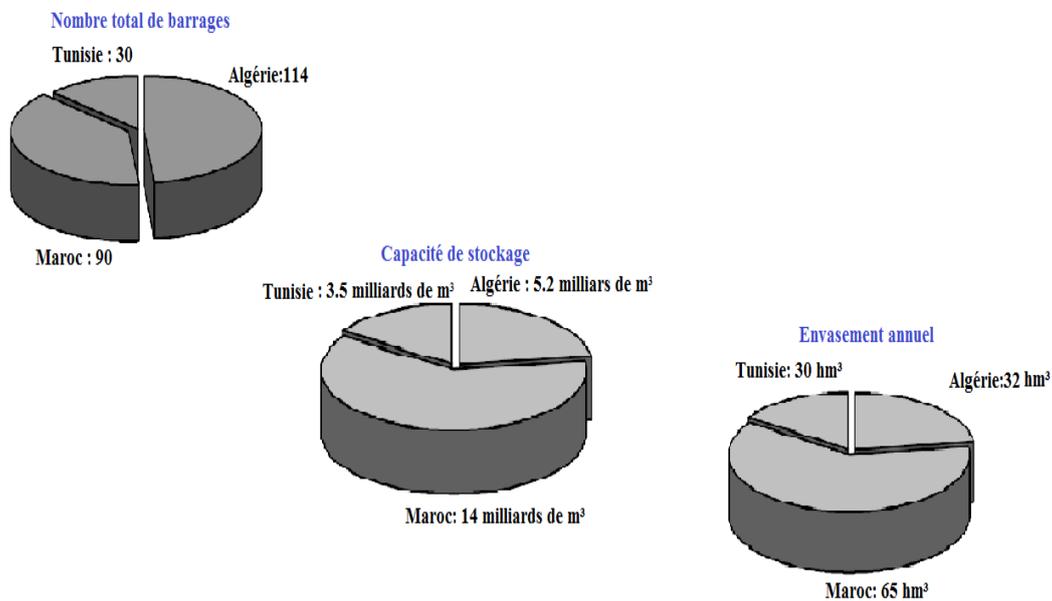


Figure 89 : Capacité et envasement des barrages en Afrique du Nord (d'après Rémini, 2003).

L'envasement en Tunisie, cause une réduction non négligeable de la capacité des ouvrages, en raison d'une érosion hydrique importante favorisée par l'agressivité des pluies, l'alternance des périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques, les paysages ondulés et les pentes souvent raides et enfin, l'action de l'homme (Mahjoub et al, 2001). La Tunisie compte vingt-neuf barrages dont la perte de capacité peut atteindre 17 % de leur capacité globale initiale (Ben Mammou et Louati, 2006). Plusieurs auteurs ont suivi l'évolution temporelle de l'envasement des retenues tunisiennes (Claude et Chartier, 1977 ; Ghorbel et Chartier, 1977 ; Mouelhi, 1980 ; Bouazizi, 1981 ; Rouis, 1984 ; Oukhey, 1991 et 1993 ; Abid, 1980, 1998 ; Jomaa, 1989 ; Ben Mammou 1988, 1992, 1995 et 1998 ; Ben Mammou et Louati, 2006 ; Marzougui et Ben Mammou, 2006 ; Marzougui, 2009 ; Cherni et al, 2010 ; Bouaziz et Rebai, 2012 ; Kotti et al, 2018). Pour Claude et Chartier (1977), les résultats des mesures sur six barrages tunisiens montrent que le volume des sédiments varie dans une large gamme, allant de 1.3 hm³ (barrage de Masri) à 47.6 hm³ (barrage de Mellégué). Le taux d'envasement oscille entre 14.94 % au barrage de Nabaana et 33.7 % au barrage de Chiba (tableau 12).

Tableau 12 : Résultats des mesures d'envasement de six barrages tunisiens (Claude et Chartier, 1977)

Nom du barrage	Superficie du bassin versant (km ²)	Date de mise en eau ou début des observations	Volume maximum stocké (hm ³)	Volume stocké au moment des mesures (hm ³)	Taux de remplissage correspondant (%)	Volume des sédiments (hm ³)	Taux d'envasement du barrage (%)
Mellegue	10300	Avril 1954	268.06	176.8	65.9	47.6	17.75
Nebaana	855	1965 et 1967 - 1968	86.4	75.6	87.5	12.90	14.94
Bezirk	73 (84)	Décembre 1960	6.46	6.46	100	1.68	26.01
Chiba	64	1963-1965 et novembre 1967	7.86	7.70	98	2.65	33.71
Masri	40(53)	février 1968	6.82	6.78	99.4	1.32	19.3
Lakhmess	131	Avril 1966	8	7.90	98.7	2.01	15.1

Par ailleurs, **Ben Mammou et Louati (2006)** ont analysé l'évolution de l'envasement de dix-neuf (19) barrages tunisiens selon des campagnes bathymétriques différentes. D'après les résultats, les volumes moyens annuels de sédiments piégés dans les retenues varient de 0.02 hm³ (barrage de Bezirk) à 6.6 hm³ (barrage de Sidi Salem). Par la suite, **Bouaziz (2012)** utilise les trois campagnes bathymétriques de 2003, 2000 et 1993 concernant les barrages Sejnane, Joumine et Ghezala pour indiquer que le tonnage moyen annuel des sédiments piégés dans les retenues des barrages est évalué à 1.39 Mt (Millions de tonnes), qui sont répartis comme suit : 0.95 Mt dans la retenue du barrage Joumine, 0.41 Mt dans la retenue du barrage Sejnane et 0.03 Mt dans la retenue du barrage Ghezala.

Au Maroc, l'envasement dans les retenues de barrages pose d'importants problèmes qui réduisent la rentabilité des ouvrages (**Boutaleb, 1988**), en raison d'une perte annuelle équivalente à 700 millions de m³, soit une diminution de l'ordre de 0.5 % par an de la capacité totale des barrages, qui est de l'ordre de 14 milliards de m³ (**Moukhchane, 2001**). La problématique et l'ampleur de l'envasement des barrages au Maroc ont suscité l'intérêt de nombreux chercheurs depuis les années 1980. D'après **Lahlou (1994)**, les 23 grands barrages en exploitation au Maroc perdent annuellement 50 hm³ de leur capacité de stockage soit un taux d'envasement de 6.2 %. Le même auteur constate que l'envasement moyen annuel du barrage de Mohamed Ben Abdelkrim Al Khattabi (Nord-Est du Maroc) est de 2.7 hm³ pour une capacité de 43.10 hm³ et correspondant à un pourcentage de perte annuelle du volume utile de la retenue de 6.3 %. Aussi, **Badraoui et Hajji (2001)** suivent l'envasement des vingt-cinq (25) barrages marocains, l'analyse des résultats de suivi bathymétrique permet de constater que cinq (5) retenues (M.Hommadi, Sidi Driss, Nakhla, Oued Mellah et Mohamed V) sont envasées à plus de 40% de leur capacité initiale; six (6) retenues (Moulaya Youssef, Lalla Takerkoust, M.B Al Khattabi et Ibn Battouta) sont envasées de 20 à 40 % de leur capacité initiale. Les autres barrages enregistrent une perte de capacité inférieure à 20 %. **Abdellaoui et al (2002)** indiquent dans leur étude que l'envasement du barrage Saboun (Nord-Ouest du Maroc) depuis sa mise en eau en 1991 est de l'ordre de 196 010 m³, soit une

perte de capacité de 17.8 % correspondant à un apport moyen annuel en sédiments de l'ordre de 21 779 m³ (tableau 13).

Tableau 13 : Résultats de dépouillement des données de la bathymétrie du barrage de Saboun (Abdellaoui et al, 2002)

Volume initial m ³ (1991)	Volume restant m ³ (novembre 1999)	Volume envasé m ³	Perte annuelle %	Durée de vie
1 100 000	903 990	196 010	2	53

En ce qui concerne l'Algérie, l'envasement constitue, par son importance, un problème majeur pour la sécurité des barrages, leur exploitation et leur durée de vie. Nous citons ci-après quelques références ayant abordé le thème de l'envasement des barrages algériens : **Drouhin et al (1951), Duquennois (1954), Korso (1986), Remini et al (1994,1995), Remini (1997, 2002, 2006, 2018), Kassoul et al (1997), Benamar et al (2012), Benkadja et al (2013), Seklaoui-oukid (2016), Remini et Bensafia (2016), Benasla et al (2016), Touahir et al (2018).**

En 1957, les barrages avaient une capacité totale de 900 hm³, dont 200 déjà occupés par les sédiments (**Valembos et Migniot, 1975**). En 1995, la quantité de sédiments déposés dans les 110 barrages algériens était évaluée à 560 hm³ soit un taux d'envasement de 12.5 %, elle sera de 650 hm³ en 2000 soit un taux d'envasement de 14.5 % (**Bouchelkia et Remini, 2003**). Par ailleurs, les différents levés bathymétriques effectués sur la période 1986-2008 par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts sur l'ensemble des 59 barrages en exploitation, ont montré que le volume perdu par envasement était de 898 hm³ soit 13.4 % du volume total des retenues. A titre d'exemple, la retenue du barrage Fodda (228 hm³), compte parmi les plus atterries, avec une accumulation de 130 hm³ de sédiments entre sa mise en eau en 1932 et le dernier levé bathymétrique effectué en 2006, ce qui représente 57 % de sa capacité initiale (**ANBT, 2010**). Pour le barrage d'Ighil Emda, l'étude de **Remini et al (1995)** montre que le barrage a accumulé, depuis sa mise eau en 1954 jusqu'à 1992, près de 52 millions de m³ de vase et accuse ainsi une perte de capacité de 35 %.

1.2. Moyens de lutte contre l'envasement des barrages

Afin de limiter les risques associés à l'envasement des retenues et d'assurer leur longévité, il est nécessaire de mettre en place des mesures de gestion des sédiments dans la retenue et à l'aval. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour limiter l'envasement des barrages :

- le reboisement : il s'agit de protéger le bassin d'alimentation par la restauration des sols, la formation des banquettes, la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds. Nous citons l'exemple des barrages de Bouhanifia, de Fergoug et de Cheurfas dont les tamaris constituent de véritables pièges à sédiments.

- la réalisation du barrage de décantation : la meilleure méthode pour réduire l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage. Cela peut se faire par la création de

retenue pour la décantation des apports solides, ce qui revient à construire un autre barrage à l'amont. À titre d'exemple, le barrage de Boughezoul (wilaya de Médéa dans le Nord algérien) a permis de retenir depuis sa construction un volume de près de 35 millions de m³ de vase qui auraient pu s'ajouter aux 114 millions de m³ de vase actuellement retenus dans le barrage de Ghrib. Il a donc réduit l'envasement de Ghrib de près de 24 % (**Chadi et Haji, 1992**).

- le dragage des retenues : cette opération consiste à extraire les matériaux situés sur le fond d'un plan d'eau. Il s'agit de procéder à des travaux d'excavation sous l'eau dans les retenues des barrages afin d'extraire les sédiments immergés tels que sable, gravier, argile, métaux précieux et agents fertilisants, et enfin la navigation gênée ou rendue impossible par l'envasement (**Serbah, 2011**). L'opération de dragage est menée en plusieurs étapes : l'étude préalable et la caractérisation des sédiments, le choix de la filière de destination, l'extraction des boues et le transport de matériaux de dragage. Selon **Serbah (2011)**, cette opération est très coûteuse et elle n'est pas économique pour les grandes retenues.

En Algérie où cette technique est utilisée depuis plus de 50 ans, la première expérience de dragage a été réalisée à l'aide d'une drague suceuse, appliquée sur les quatre barrages de Cheurfas, Sig, Hamiz et Fergoug pour extraire 19 millions de m³ de vase (**Benblidia et al, 2001**). Le barrage de Fergoug dans le Nord-Ouest algérien a fait l'objet d'un dragage de 10 millions de m³ pendant la période allant de 1986 à 1989 (**Semcha, 2006**). Aussi, le dragage a été appliqué sur les barrages de l'oued Fodda, K'sob, Zardezas, Merdja Sidi Abed, Bouhanifa et Foum El Gherza.

- la surélévation de barrages : cette technique permet de compenser la réduction de la capacité de la retenue par suite de son envasement. L'Algérie, parmi les premiers pays du monde à pratiquer la technique de la surélévation des barrages. Avec huit barrages surélevés, un volume total de 92 millions de m³ d'eau a été récupéré (tableau 14) (**Remini, 2008**).

Tableau 14 : Les barrages surélevés en Algérie (**Remini, 2008**)

Barrage	Année de la mise en eau	Capacité initiale (hm ³)	Année de la surélévation	Capacité de la réserve créée par la surélévation (hm ³)
Sig	1846	1	1858	1
Hamiz	1879	14	1936	16
K'sob	1939	11.6	1974	18
Zardezas	1945	14.9	1977	16
Boughezoul	1935	55.8	1960	10
Foum El Gueiss	1939	2.5	1969	05
Bakhada	1936	36	1958	20
Beni Amrane	1988	15.6	2001	11

- la technique de chasse à l'Espagnole : c'est une méthode pratique qui consiste à vider complètement le barrage pendant les périodes d'interruption de service possibles (la saison automnale). Les crues de l'automne, qui arrivent très chargées, évacuent ainsi une partie importante des apports solides (**Benblidia et al, 2001**). Nous citons l'exemple des barrages algériens Hamiz, Béni Amrane et K'sob.

- le soutirage des courants de densité : cette pratique 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). Il convient de citer l'expérience et l'efficacité de cette technique au barrage d'Ighil Emda où 16 vannettes de dévasement ont été aménagées, et 46 hm³ de vases soutirés entre 1954 et 2000.

En plus de ces moyens de lutte, il existe des recherches sur d'autres nouvelles méthodes telles que la technique des obstacles émergés (**Remini, 2011**) et la méthode de revégétation (**Eklaoui-Oukid, 2016**).

2. QUANTIFICATION DE L'ENVASUREMENT DES BARRAGES DE L'EST ALGERIEN

2.1. Les données de mesures bathymétriques

La quantification des volumes de sédiments dans les barrages de l'Est Algérien s'appuie sur les deux échosondages de 2004 et 2014. Au total ; 19 barrages sont concernés par la campagne bathymétrique de 2004 et 22 barrages par celle effectuée en 2014 (tableau 15). Ces mesures bathymétriques ont été réalisées avec une embarcation, à l'aide d'un échosondeur odom hydrotrac qui enregistre en continu la profondeur. Les travaux portant sur ces mesures se basent sur les points connus d'après la polygonation géodésique et la triangulation.

Les résultats en termes de volume total envasé, envasement moyen annuel, taux d'envasement et dégradation spécifique soulignent la forte variation de l'envasement d'un site à l'autre, en fonction de l'âge du barrage et de l'intensité de l'érosion dans le bassin d'alimentation. Il est à noter que les valeurs de TSS des bassins d'alimentation ont été calculées à partir des levés bathymétriques de 2004 et 2014, pour une densité de 1.6.

La bathymétrie est certainement réalisée avec une grande précision. Cependant, les données relatives aux bassins versants des barrages Erraguene, Mexa, Bougous, El Agrem, et Boussiaba montrent des dégradations spécifiques anormalement élevées (supérieures à 6000 t/km²/an), ce qui demande des investigations plus approfondies. Il est à noter que les bassins versants du flanc Nord de Tell oriental sont souvent bien couverts par une végétation dense qui protège le sol durant toute l'année, à l'exemple du bassin versant de l'oued Bounamoussa où la dégradation spécifique n'atteint pas 950 t/km²/an.

Tableau 15 : Envasement des barrages de l'Est Algérien

Nom du barrage	Année de mise en eau	Capacité initiale (hm ³)	Levé bathymétrique de 2004 (source ANBT)					Levé bathymétrique de 2014 (source Rémini, 2017)				
			Capacité (hm ³)	Volume perdu depuis la mise en eau (hm ³)	Envasement moyen annuel depuis la mise en eau (hm ³ /an)	Taux d'envasement depuis la mise en eau (%)	Dégradation spécifique (t/km ² /an)	Capacité (hm ³)	Volume perdu depuis la mise en eau (hm ³)	Envasement moyen annuel depuis la mise en eau (hm ³ /an)	Taux d'envasement depuis la mise en eau (%)	Dégradation spécifique (t/km ² /an)
Mexa	1998	47	30.27	16.73	2.79	35.59	(6863.59)	-	-	-	-	-
Bougous	2010	65	-	-	-	-	-	59.06	5.94	1.49	9.1	(10110.64)
Cheffia	1965	171.99	158.83	13.16	0.34	7.65	938.95	155.74	16.25	0.33	9.5	922.80
Guenitra	1984	125	117.82	7.18	0.36	5.74	2843.56	113.12	11.88	0.4	9.5	3136.63
Beni Zid	1993	40	39.39	0.61	0.06	1.53	1514.12	37.8	2.2	0.10	5.5	2860.39
Zardezas	1975 ⁽¹⁾	31	18.68	12.32	0.42	39.74	1970.21	13.02	17.98	0.45	58	2138.09
Zit emba	2001	117.39	116.59	0.8	0.26	0.68	874.32	112.69	4.7	0.36	4	1185.37
El.Agrem	2002	34	33.04	0.96	0.48	2.82	(19692.31)	27.71	6.29	0.52	18.5	(21504.27)
Kissir	2009	68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erraguene	1963	200	184	16	0.39	8	4659.63	160	40	0.78	20	(9364.94)
Ighil emda	1954	154	81.2	72.8	1.46	47.27	3606.19	-	-	-	-	-
K'sob	1977 ⁽²⁾	30	12.34	17.66	0.65	58.87	716.79	9.65	20.35	0.55	67.8	602.74
Babar	1995	41	38.01	2.99	0.33	7.29	937.49	36.49	4.51	0.24	11	669.82
F.D. Gazelles	2000	55.5	54.74	0.76	0.19	1.37	183.13	52.17	3.33	0.24	6	229.26
F.El.Gherza	1950	47	14.89	32.11	0.59	68.32	731.85	11.28	35.72	0.56	76	686.92
K.Medouar	2003	69	-	-	-	-	-	64.17	4.83	0.44	7	1190.76
F.E.Gueiss	1939 ⁽³⁾	3	0.43	2.57	0.04	85.66	410.79	0.3	2.7	0.04	90	374.03
H.Grouz	1987	45	40.15	4.85	0.29	10.77	403.96	36.9	8.1	0.3	18	424.78
Beni Haroun	2003	963	-	-	-	-	-	880	83	8.3	8.62	1719.09
Boussiaba	2010	120	-	-	-	-	-	108	12	3	10	(12664.91)
Ain Dalia	1987	82	76.08	5.92	0.35	7.22	2886.92	72.57	9.43	0.35	11.5	2895.41
H.Debagh	1987	200	184.35	15.65	0.92	7.82	1376.58	183.5	16.5	0.61	8.25	913.81
Oued-Cherf	1995	157	152.65	4.35	0.48	2.77	452.24	146.01	10.99	0.58	7	541.21
Ain Zada	1986	125	121.4	3.6	0.2	2.88	153.85	118.75	6.25	0.2	5	171.70
Tichy Haf	2007	80	-	-	-	-	-	74.4	5.6	0.8	7	741.17

⁽¹⁾ : Mise en eau en 1945 (15 hm³) et surélévation en 1975 (31 hm³).

⁽²⁾ : Mise en eau en 1940 (11.42 hm³) et surélévation en 1977 (30 hm³).

⁽³⁾ : Surélévation en 1969 et 2004, gain de capacité de 0.5 et 1.1 hm³ respectivement (**Guidoum, 2017**).

- : Barrage non concerné par le levé bathymétrie ou donnée manquante.

() : Les résultats mis entre parenthèses nous ont paru excessifs.

2.2. L'envasement entre la mise en eau et le levé bathymétrique de 2004

2.2.1 Envasement et perte de capacité

À l'issue des levés bathymétriques de 2004 qui couvrent 19 barrages en exploitation, le volume total des sédiments accumulés a été estimé à 231.0 hm³, représentant 15.66 % de la capacité totale des retenues (1474.86 hm³). La figure 90 montre le classement par ordre décroissant des réservoirs selon le volume d'envasement qui varie entre 0.61 hm³ (barrage de Béni Zid dont le bassin d'alimentation se réduit à 58.6 km²) et 72.8 hm³ (barrage d'Ighil Emda dont le bassin d'alimentation s'étend sur une superficie de 646 km²). La figure 91 illustre la diminution de la capacité des réservoirs depuis la mise en eau jusqu'à l'année 2004 (les pentes des droites sont indicatives de la faible ou forte ampleur de cette perte de capacité ; la très forte pente d'Ighil Emda est caractéristique de la remarquable perte de capacité de cette retenue située au débouché d'un bassin fortement érosif).

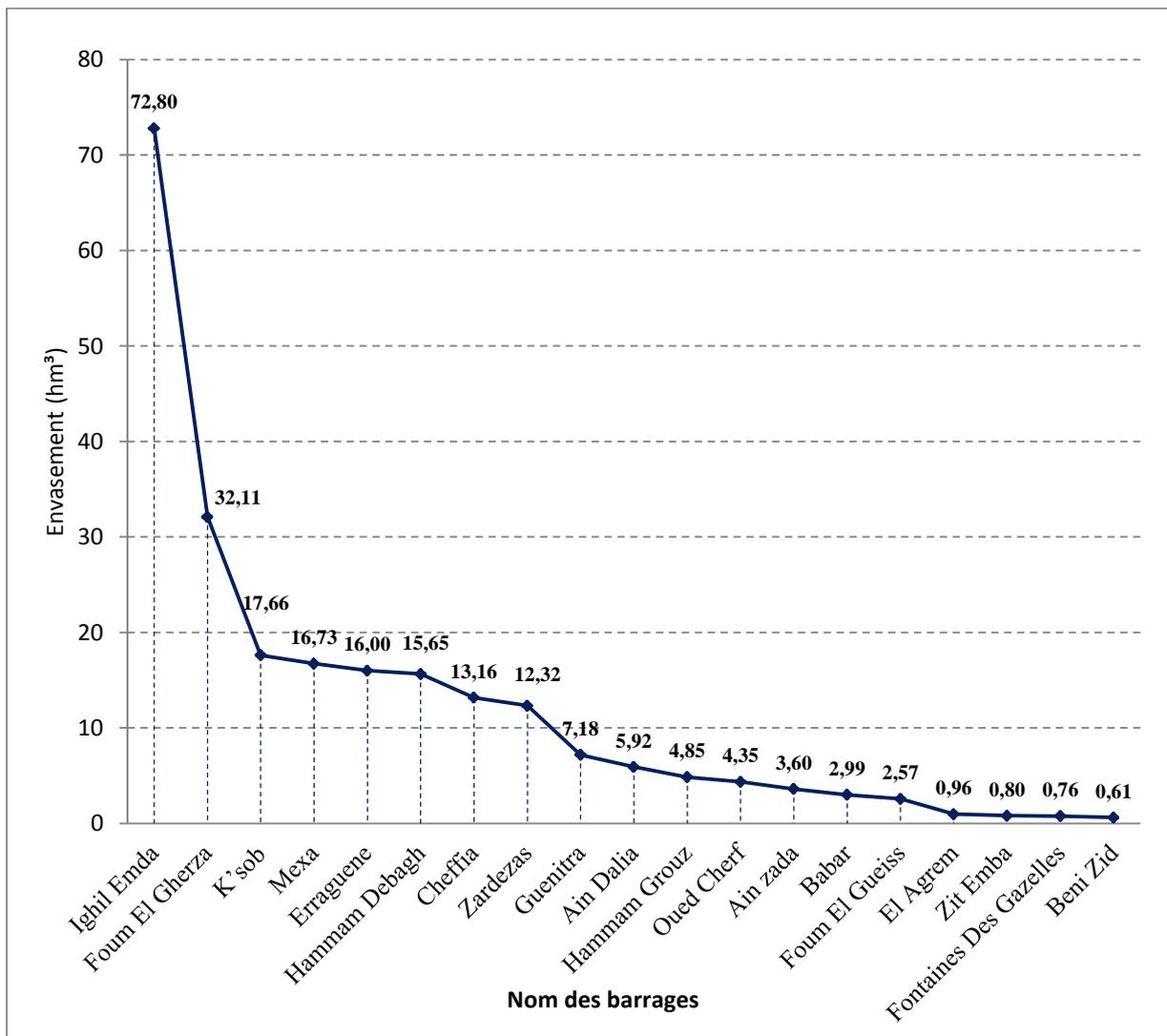


Figure 90 : Rangement par ordre décroissant de l'envasement de 19 barrages en exploitation, selon le levé bathymétrique de 2004.

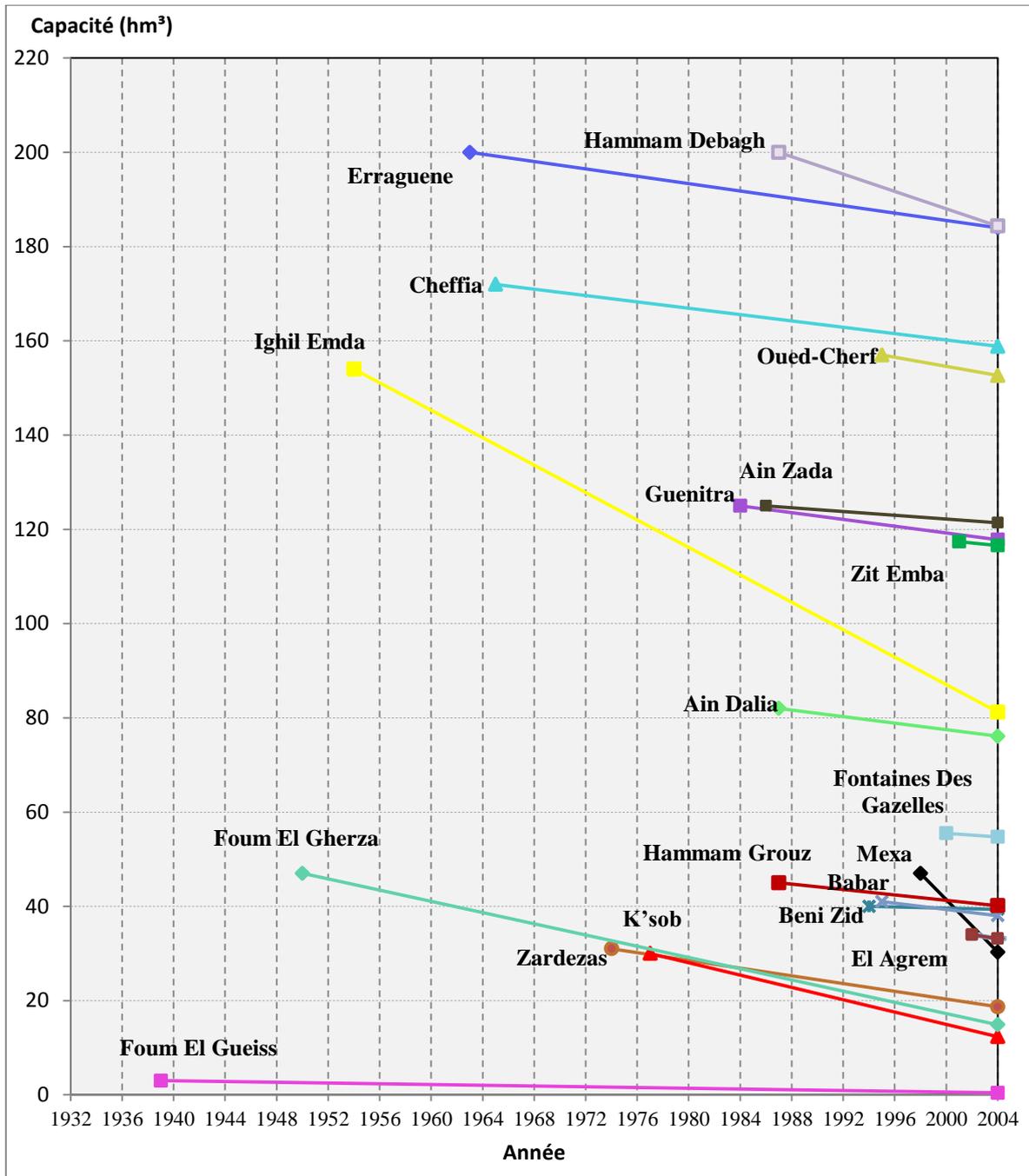


Figure 91 : Réduction de la capacité des retenues entre la date de mise en eau et le levé bathymétrique réalisé en 2004

Les barrages ont des taux d'envasement très différenciés, variant entre un minimum de 0.68 % (Zit El Emba) et un maximum de 86 % (Foum El Gueiss) (figure 92).

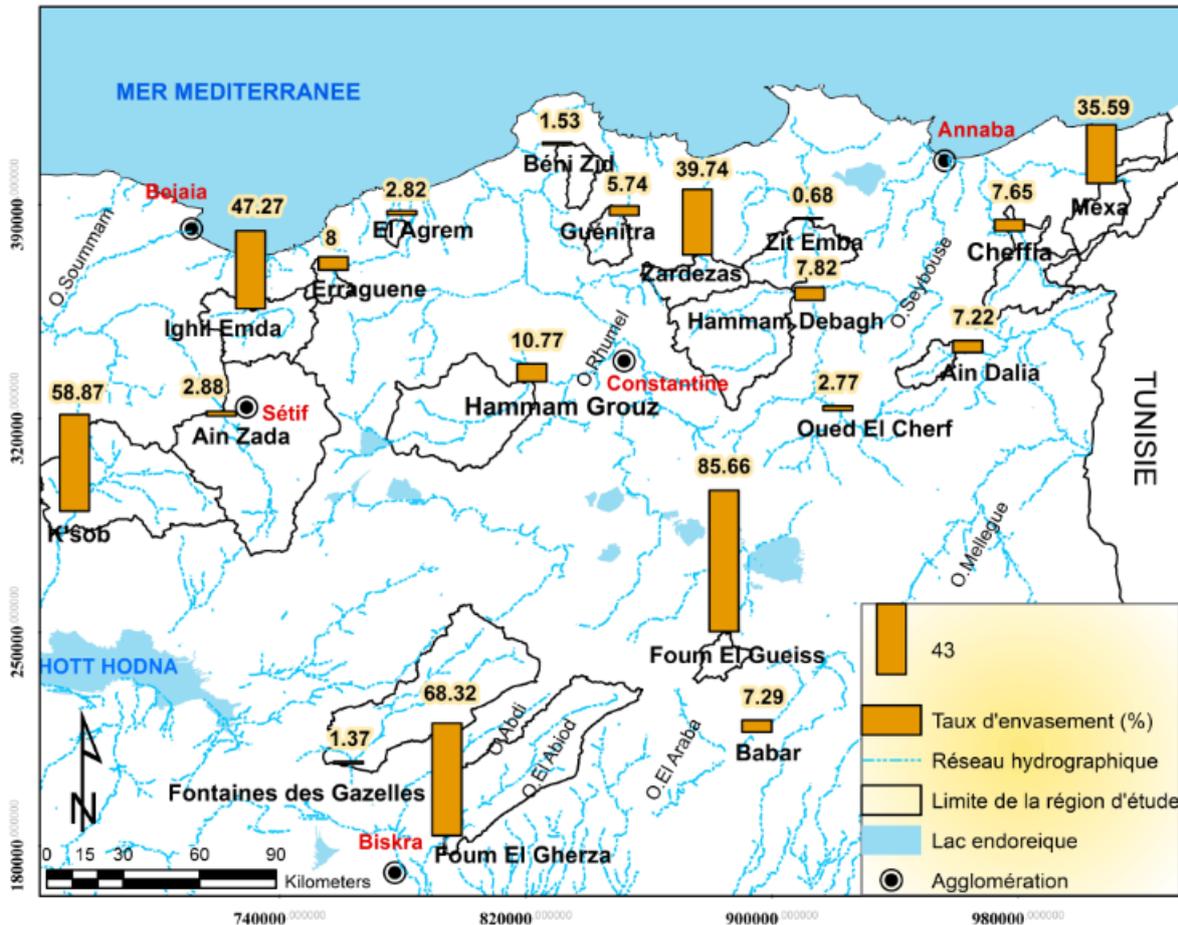


Figure 92 : Taux d'envasement entre la mise en eau et le levé bathymétrique de 2004 réalisé sur 19 barrages.

Les taux d'envasement traduisent en même temps les taux de perte de capacité (en %) des barrages. A ce titre, la classification de ces derniers peut être envisagée en trois classes, de la plus forte à la plus faible.

2.2.2 Les barrages dont la perte de capacité est supérieure à 50 %

Il s'agit des barrages Foum El Gueiss, Foum El Gherza et K'sob. **Le petit barrage de Foum El Gueiss** construit au début des années 30, d'une capacité initiale de 3 hm³, a connu en 2004 une perte de capacité de 2.57 hm³, soit un envasement moyen annuel de 0.04 hm³/an et un taux de sédimentation de 86 %. En conséquence, le barrage a bénéficié d'une opération de dragage étalée sur plusieurs années. Ceci a nécessité la rehausse du niveau de retenue normale de 1 m, afin de permettre l'utilisation d'une barge suceuse exigeant un minimum de tirant d'eau (Mebarki, 2005).

Le barrage de Foum El Gherza construit en 1948 sur l'oued El Abiod, d'une capacité initiale de 47 hm³, a subi une forte sédimentation dès le début de sa réalisation. En deux ans (1948-1950), le batardeau amont ayant été complètement comblé (Remini, 2000). Le volume de vase déposé dans la retenue en 54 années d'exploitation est de l'ordre de 32.11 hm³, soit un comblement moyen de 0.59 hm³/an et un taux d'envasement de 68.32 %. Vu l'importance

économique de cette retenue pour la région sud des Aurés (oasis de la région de Biskra) et afin de prolonger sa durée de vie, le dragage est devenu une nécessité. En effet, la première opération a commencé durant le mois de mars 2005 pour évacuer un volume de 4 millions de m³ (photo 10 et 11). Parallèlement, des tentatives de reboisement et des corrections torrentielles ont été appliquées sur le bassin d'alimentation du barrage de Foug El Gherza.



Photo 10 : Rejet de la vase lors de l'opération de dragage de 2005 (Rémini, 2018).



Photo 11 : Dragage suceuse/refouleuse en activité dans la retenue de Foug El Gherza (IME, 2010).

Du fait de l'apport solide important et malgré la surélévation de sa digue en 1977, la retenue du **barrage K'sob**, d'une capacité initiale de 30 hm³ s'est réduite à une capacité d'environ 12.34 hm³, soit un volume de vase de 17.66 hm³ (environ 41.13 % de sa capacité initiale). En conséquence, l'opération de dragage et de soutirage des courants de densité est devenue une solution indispensable. La figure 93 montre que de nombreux dragages et soutirages ont été effectués durant la période 1990/91-2012/13 afin de réduire le volume de sédiments déposé dans le lac du barrage.

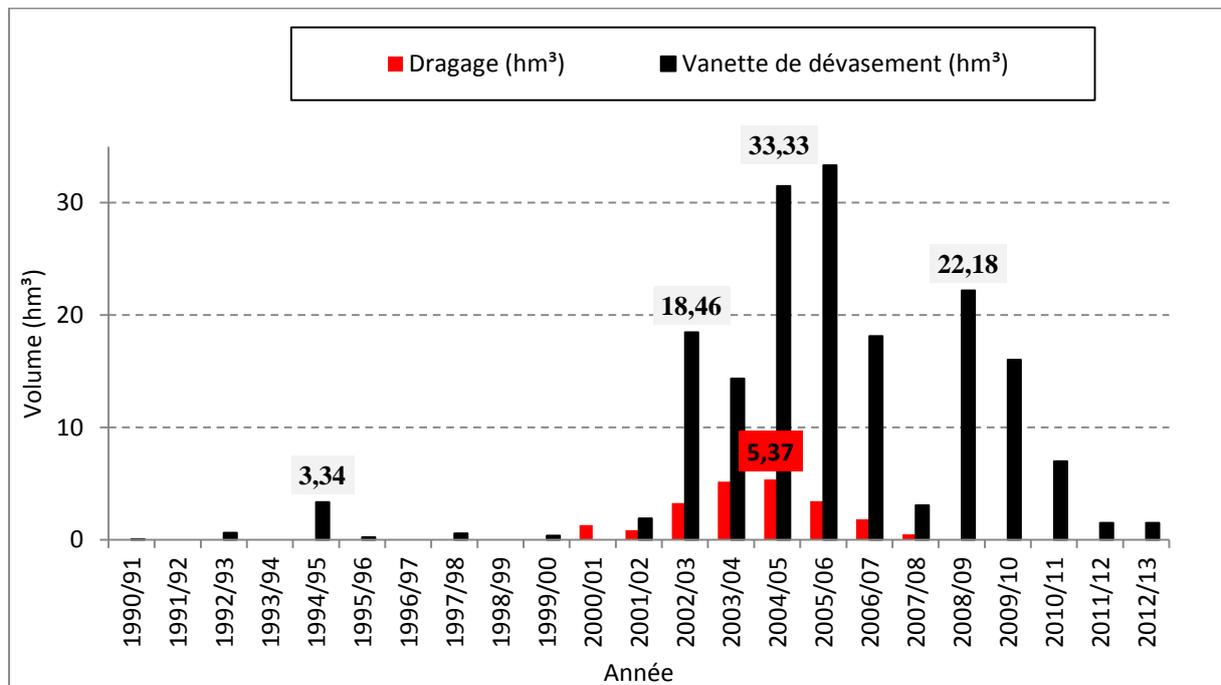


Figure 93 : Extraction des sédiments par dragage et soutirage dans le barrage de K'sob entre 1990/91 et 2012/13

2.2.3 Les barrages dont la perte de capacité est comprise entre 30 et 50 %

Trois ouvrages sont concernés : Ighil Emda, Zardezas et Mexa. **Le barrage d'Ighil Emda** sur l'oued Agrioun, vieux de plus de 50 ans, a fait l'objet d'une sédimentation croissante. En effet, le volume de sédiments déposé est passé de 2.8 hm³ en 1954 à 72.8 hm³ lors du levé bathymétrique de 2004, soit une perte de 47.27 % de sa capacité initiale (figure 94), ce qui représente un envasement moyen de 1.46 hm³/an et une dégradation spécifique de 3606.91 t/km²/an, valeur très probablement sous-estimée en comparaison avec les résultats de travaux antérieurs basés sur des séries anciennes où les pièges à sédiments fonctionnaient pleinement.

Pour réduire l'envasement de cette retenue, l'opération de soutirage des sédiments a été envisagée. Les volumes de vases soutirés varient considérablement d'une année à une autre comme le montre la figure 95. Une quantité de vase de l'ordre de 17 hm³ a été évacuée par les vannettes de dévasement durant une période de 20 ans (1990-2010) contre un apport solide entrant de 33.3 hm³, soit un volume de 16.4 hm³ déposé dans la retenue.

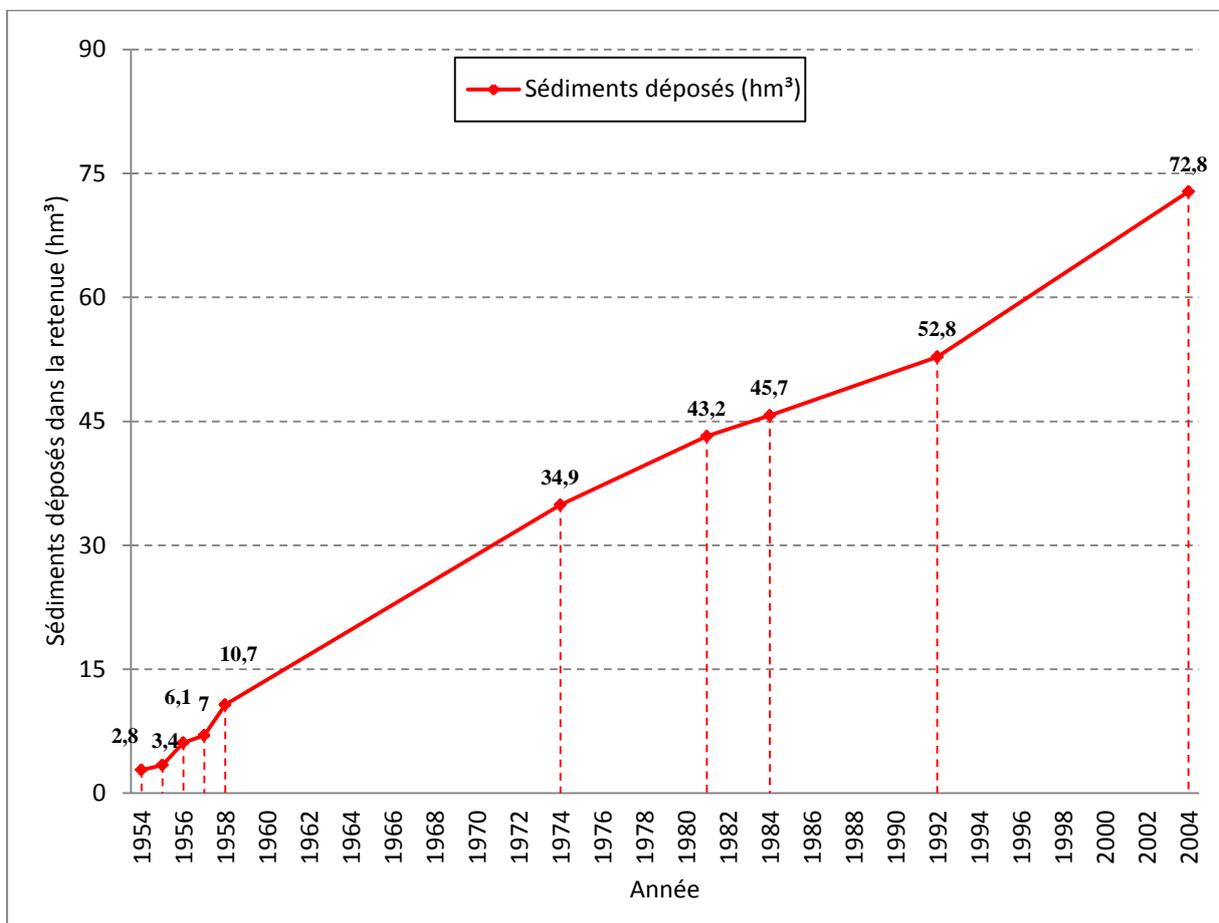


Figure 94 : Evolution de l'envasement du barrage d'Ighil Emda depuis sa mise en eau jusqu'à 2004

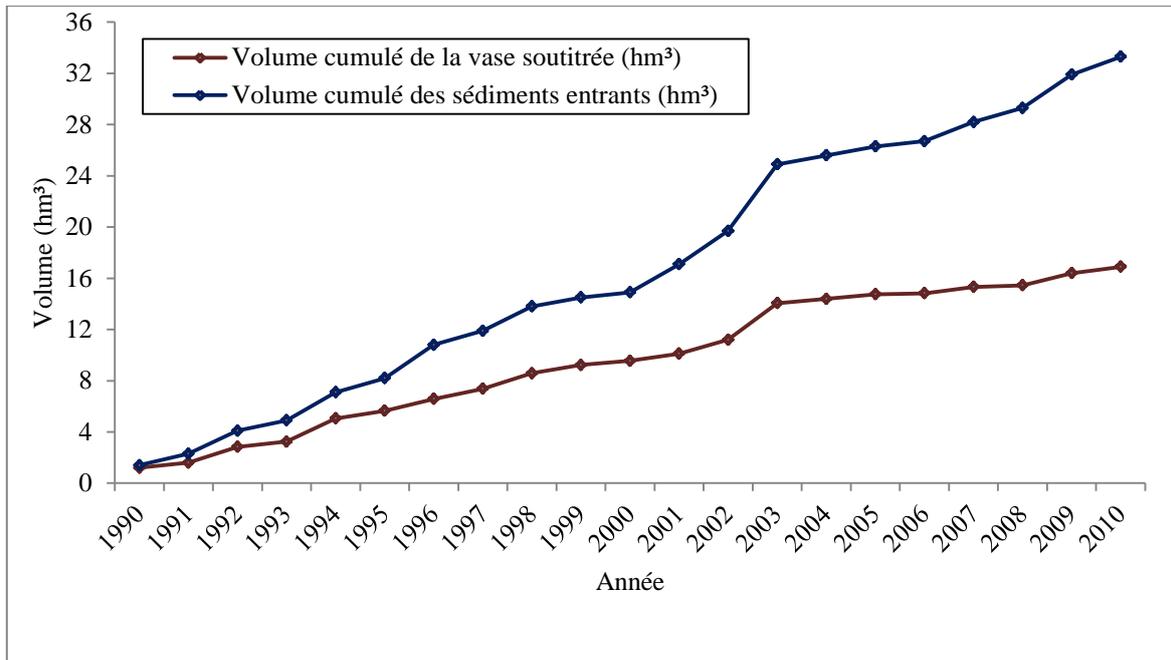


Figure 95 : Evolution du volume de sédiments entrants et de sédiments soutirés dans le barrage d'Ighil Emda (période de 1990 - 2010)

Pour une période de fonctionnement de 30 ans, la capacité du **barrage de Zardezas** s'est réduite à 18.68 hm³ soit un envasement moyen annuel de 0.42 hm³/an et une perte de capacité de 39.74 %. Afin de réduire l'envasement de cette retenue, les opérations de dragage et de soutirage des courants de densité sont devenues une nécessité (figure 96). La moyenne du volume de vase évacué durant la période de 1975/76 et 2012/13 est évaluée à 3.98 hm³ par an, les quantités les plus fortes ont été observées durant les années 1980/81, 1983/84 ,1998/99, 2002/03 et 2005/06.

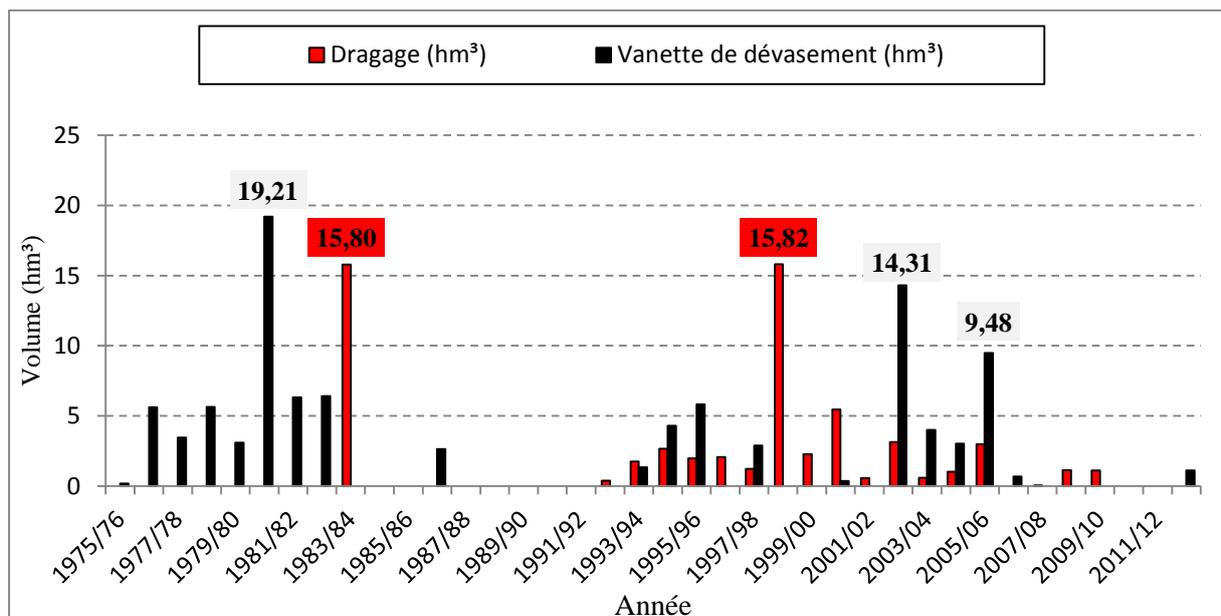


Figure 96 : Extraction des sédiments par dragage et soutirage dans le barrage de Zardezas entre 1975/76 et 2012/13

Le barrage de Mexa, d'une capacité initiale de 47 hm³, a perdu un volume de 16.73 hm³ durant uniquement 6 années de mise en eau et d'exploitation (de 1998 à 2004), soit un envasement moyen annuel de 2.79 hm³/an et une dégradation spécifique de 6864 t/km²/an.

2.2.4. Les barrages dont la perte de capacité est inférieure ou égale à 10 %

Treize barrages sur dix-neuf enregistrent une perte de capacité inférieure ou égale à 10 %. Il s'agit de Hammam Grouz, Erraguene, Hammam Debagh, Cheffia, Babar, Ain Dalia, Guenitra, Ain Zada, El.Agrem, Oued-Cherf, Beni Zid, F.D. Gazelles et Zit emba.

Le barrage de Hammam Grouz a été mis en fonction en 1987 avec une capacité initiale de 45 hm³. Sa perte de capacité en 17 ans d'exploitation est de 4.85 hm³, soit un taux de sédimentation de 10.77 % (ce qui est proche des prévisions de l'étude l'APD du barrage qui a fixé à 9 hm³, le volume de sédimentation après 30 ans de service). L'ancien **barrage d'Erraguene** a recueilli plus de 16 hm³ de vase, depuis sa mise en eau en 1963 jusqu'à 2004. Cet envasement représente 8 % de la capacité totale du barrage soit un rythme de comblement de 0.20 % par an. L'envasement du **barrage Hammam Debagh** après 17 ans de fonctionnement (1987-2004) se situe autour de 15.65 hm³ soit un envasement moyen annuel de 0.92 hm³/an, ce qui correspond à une dégradation spécifique du bassin d'alimentation de 1376.6 t/km²/an. Ce résultat est à comparer à celui obtenu par l'étude de **Touaibia (2010)** (505 t/km²/an), par l'étude d'Avant-Projet Détaillé (792 t/km²/an) et par l'étude de **Louamri (2013)** (914 t/km²/an). Depuis sa mise en service en 1965 jusqu'à 2004, **le barrage de Cheffia** a perdu un volume de 13.16 hm³, soit un envasement moyen annuel de 0.34 hm³/an, valeur bien plus forte que celle obtenue par l'étude d'avant-projet (0.13 hm³/an). **Les barrages Babar et Oued Cherf** ont perdu de leur capacité respective 2.99 hm³ et 4.35 hm³ après 9 années d'exploitation (1995-2004). La retenue du **barrage Ain Dalia** a connu un cumul de sédimentation de 5.92 hm³ durant une période de 17 ans (1987-2004), ce qui représente un envasement moyen annuel de 0.35 hm³/an et un taux d'envasement de 7.22 %. **Le barrage de Guenitra**, d'une capacité initiale de 125 hm³, a perdu un volume de 7.18 hm³ durant 20 ans (1984-2004), soit un comblement moyen de 0.36 hm³/an et un taux de sédimentation de 5.74 %. **Le barrage d'Ain Zada**, de même capacité initiale que Guenitra, a recueilli un volume de 3.60 hm³ depuis sa mise eau au cours de l'année 1986 jusqu'à 2004 ; l'envasement moyen annuel a été 0.2 hm³/an. Enfin, **les barrages d'El Agrem, de Zit Emba, de Fontaines Des Gazelles et de Beni Zid** connaissent un rythme d'envasement faible, avec un volume de sédimentation inférieur à 1 hm³.

2.3. L'envasement entre la mise en eau et le levé bathymétrique de 2014

D'après la campagne bathymétrique réalisée par l'A.N.B.T en 2014, le volume total des sédiments piégés dans les barrages (Mexa, Ighil Emda et Kissir non compris) est de 328.5 hm³, représentant 11.7 % de la capacité totale de stockage. Abstraction faite des différences de périodes d'exploitation entre les barrages, la perte de capacité annuelle moyenne est de l'ordre de 0.94 hm³/an.

L'essentiel des résultats peut être résumé dans les remarques suivantes (figures 97 et 98) :

- en fonction des rythmes d'envasement liés à la nature géodynamique des bassins versants, le taux d'envasement est supérieur à 50 % pour les barrages de Foum El Gueiss, Foum El Gherza, Zardezas et K'sob, entre 10 % et 21 % pour les barrages Erraguene, El Agrem, Hammam Grouz, Ain Dalia, Babar , Boussiaba, et inférieur à 10 % pour les autres barrages (figure 97) ;
- la perte en volume de sédimentation jusqu'au levé bathymétrique de 2014 est très hétérogène, variant de 2.2 hm³ pour celui de Béni Zid à 83 hm³ pour le barrage de Béni Haroun (figure 98) ;
- un cumul considérable de sédiments concerne les retenues de création relativement récente : Beni Haroun (83 hm³ : 2003-2014), Boussiaba (12 hm³ : 2010-2014), El Agrem (6.29 hm³ : 2002-2014), Bougous (5.94 hm³ : 2010-2014), Tichy Haf (5.6 hm³ : 2007-2014) et Koudiat Medouar (4.83 hm³ : 2003-2014) ;
- l'envasement du barrage de Foum El Gherza a continué sur son rythme d'accroissement rapide pour atteindre la valeur de 35.72 hm³, soit un taux de sédimentation de 76 %, ce qui a conduit l'ANBT de programmer une deuxième opération de dragage entre 2016 et 2017 ;
- l'état d'envasement du barrage de Foum El Gueiss a atteint un seuil critique, puisqu'il est envasé à plus de 90 % de sa capacité totale.

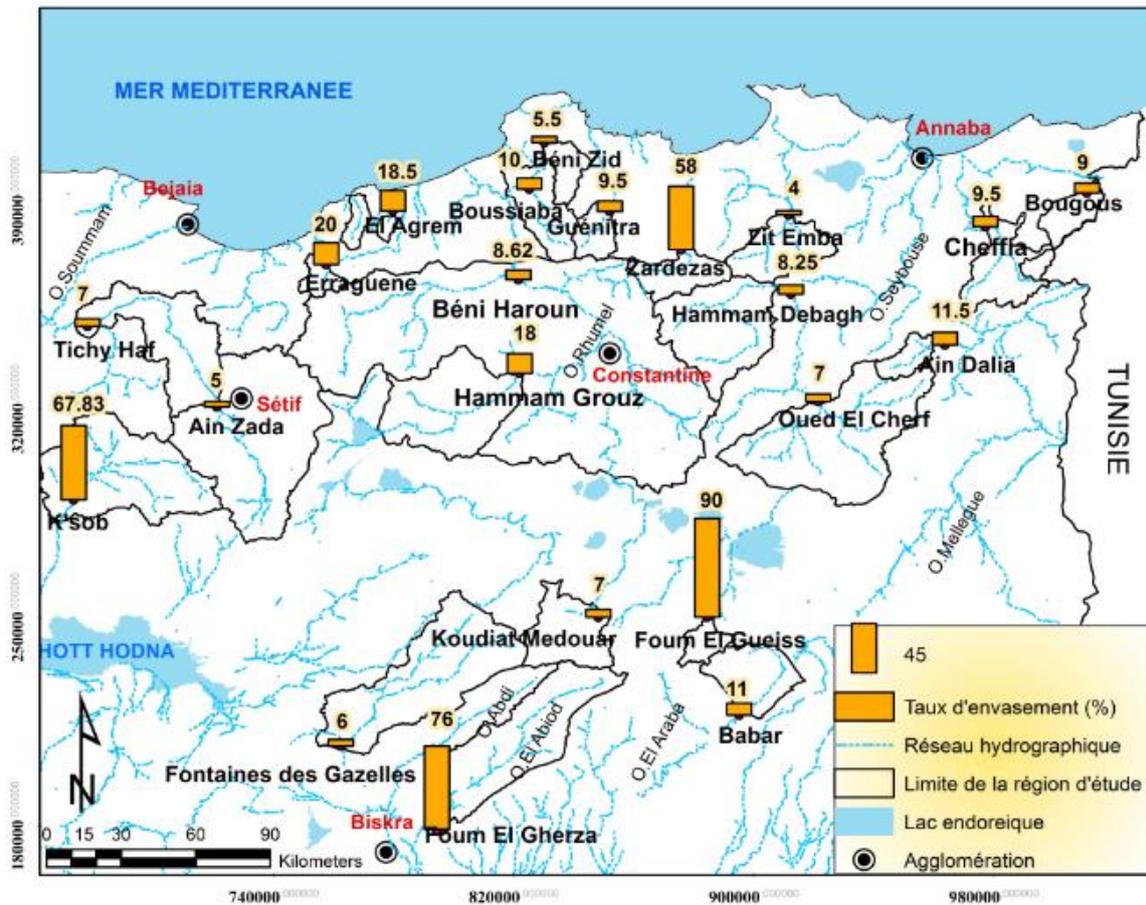


Figure 97 : Taux d'envasement des barrages, entre leur mise en eau respective et le levé bathymétrique de 2014 réalisé sur 22 barrages.

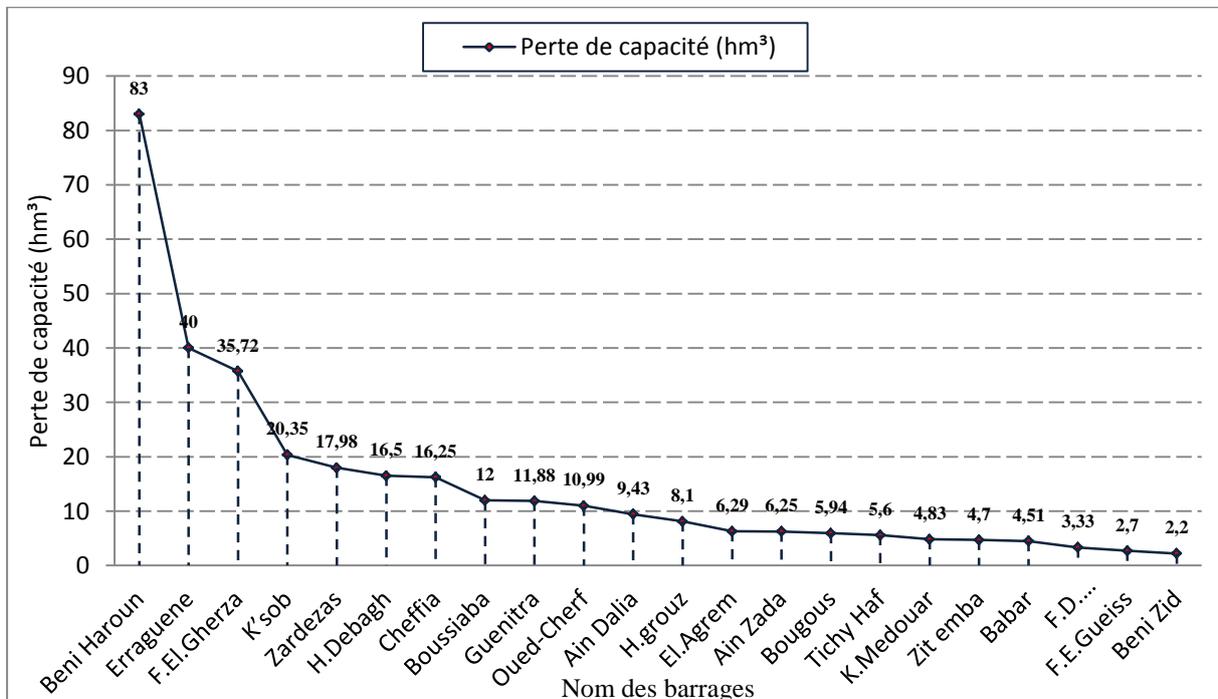


Figure 98 : Rangement par ordre décroissant de la perte de capacité des barrages, entre leur mise en eau respective et le levé bathymétrique de 2014.

3. ETUDE DE L'ENVASEMENT DE QUATRE BARRAGES : ZARDEZAS, K'SOB, CHEFFIA ET BENI HAROUN

Des données bathymétriques assez détaillées sont disponibles au niveau de quatre barrages : Zardezas (campagnes de 1967, 1974, 1975, 1986 et 2004), Cheffia (1986 et 2004), K'sob (1947, 1953, 1961, 1968, 1973, 1977, 1986, 2000 et 2004), et Béni Haroun (levés bathymétriques de 2013). Il devient alors possible de procéder à une analyse sédimentaire plus précise sur ces barrages, en mettant en avant les modifications des courbes capacité - hauteur de ces retenues pendant leur période d'exploitation respective.

3.1. Le barrage de Zardezas

Les résultats des trois campagnes de mesures bathymétriques ont été établies au barrage de Zardezas (en 1975 par la Compagnie Géophysique de France, en 1986 par la Société Polonaises Geokart, et entre le 29 septembre et le 7 octobre 2003, par le laboratoire des Études Maritimes L.E.M et l'entreprise Française FUGRO-GEOID SAS), ont permis de faire une mise au point sur le degré d'envasement de cet ouvrage (tableau 16 et la figure 99).

L'envasement du barrage de Zardezas est variable suivant des périodes d'études avant et après la surélévation :

- De 1945 à 1974, le volume d'envasement est très important, mais aucune opération n'a été pratiquée pour limiter la charge solide qui se dépose dans la cuvette. Environ 7.5 millions de m³ de vase ont été disposés soit un envasement moyen annuel de 0.26 hm³/an et un taux d'envasement de 50 %. Pour une densité de 1.6, la dégradation spécifique s'élève à 1199 t/km²/ an.

- De 1975 à 1986, malgré la surélévation de la digue du barrage (la côte normale de la retenue a été portée à 197 m) et les opérations de dragage et de soutirage des courants de densité (cf. figure 87), le rythme de sédimentation est important. L'envasement cumulé sur cette période de 11 ans est de 10.2 millions de m³ soit un envasement moyen annuel de 0.93 hm³/an et un taux de sédimentation de 32.9 %.

- De 1986 à 2004, le cumul des sédimentations a atteint 2.12 millions de m³. Du fait que des opérations de dragage et de soutirage des courants de densité ont été pratiquées, l'envasement moyen annuel s'est réduit à 0.12 hm³, soit une dégradation spécifique de 546.22 t/km²/ an.

Tableau 16 : Evolution de la capacité et de la tranche morte du barrage de Zardezas

Caractéristiques du barrage	Capacité à la cote normale (hm ³)	Envasement (hm ³)	Envasement cumulé (hm ³)	Envasement annuel moyen (hm ³ /an)	Taux d'envasement (%)
Avant la surélévation					
Mise en eau 1945	15	0	0	0	0
1967	9	6	6	0.27	40
1974	7.5	1.5	7.5	0.21	10
Période 1945 -1974 (29 ans d'exploitation)	7.5	7.5	7.5	0.26	50
Après la surélévation					
Surélévation 1975 (source ANB)	31	0	0	0	0
Bathymétrie 1986 (source GEOKART)	20.80	10.2	10.2	0.93	32.90
Bathymétrie 2004 (source ANB)	18.68	2.12	12.32	0.12	6.84
Période 1975-2004 (29 ans d'exploitation)	18.68	12.32	12.32	0.42	39.74

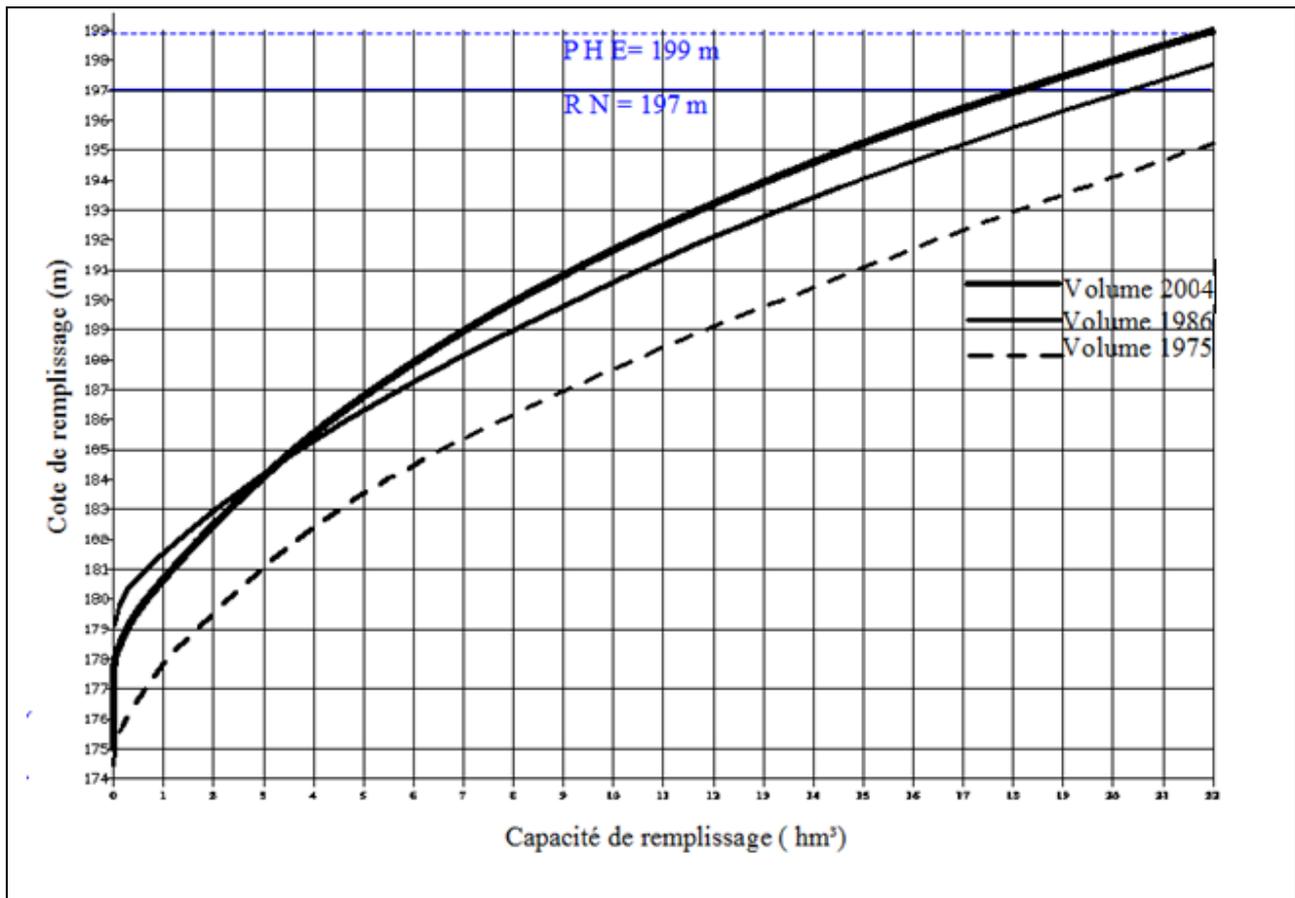


Figure 99 : Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de Zadezas (1975, 1986 et 2004).

3.2. Le barrage de K'sob

Le barrage K'sob, construit entre les années 1934 et 1940, avait une capacité de stockage de 11.42 millions de m³. Suite à la progression rapide du volume de la vase dans la retenue, la capacité s'est réduite à 1.42 hm³ en 1973, soit un taux d'envasement de 87.57 % sur une période d'exploitation de 33 ans. Pour remédier à cette situation, il a été décidé de surélever la digue entre 1972 et 1976 sur une hauteur de 15 m et pour une capacité de 30 hm³. Nous avons à cet effet représenté sur le tableau 17 l'évolution temporelle de l'envasement dans la retenue avant et après la surélévation.

- Avant la surélévation de l'ouvrage :

Le barrage K'sob a perdu depuis sa mise en eau jusqu'à l'année 1973 un volume de 10 hm³, soit un envasement moyen de 0.30 hm³/an et une dégradation spécifique de 332.09 t /an / km², valeur qui paraît faible en comparaison avec celles des oueds Agrioun (barrage d'Ighil Emda) et Kébir Rhumel (le grand barrage de Béni Haroun) qui sont respectivement de 3606.91 t/an/km² et 1719 t /an / km².

L'envasement est variable suivant les caractéristiques météorologiques des périodes. L'envasement étant directement proportionnel au volume d'exploitation et à l'intensité des précipitations mais aussi à la gestion de l'ouvrage (**Nemouchi, 2001**). Il est donc possible de suivre l'envasement selon trois périodes caractéristiques :

- ✓ La première période de 1940 à 1953, se démarque par un volume de sédimentation cumulé de 5.29 hm³ (environ de 46.32% de la capacité initiale), soit un envasement moyen de 0.41 hm³/an ;
- ✓ La seconde période de 1953 à 1968, présente une nette baisse de la sédimentation par rapport à la période précédente avec seulement 2.49 hm³ de vase, soit un envasement moyen annuel de 0.17 hm³/an et un taux d'envasement de 21.81%. Cela peut être expliqué par les opérations de vidange de fond qui ont été pratiquées après 1954 pour chasser la vase qui se dépose au fond de la cuvette ;
- ✓ La dernière période de 1968 à 1973, est caractérisée par un volume de vase de 2.22 hm³ et un envasement moyen annuel peu élevé que celui des deux périodes précédentes (0.44 hm³/an), soit un taux de sédimentation de 19.49 %.

- Après la surélévation de l'ouvrage :

À partir de l'année de surélévation de la digue (1977), trois levés bathymétriques ont été établis : en 1986 (Geokart), en 2000 (CTH) et en 2004 (ANB). Selon ces levés, on peut constater que l'envasement augmente plus rapidement après la surélévation. En effet, 27 ans seulement après sa surélévation, le barrage a perdu de sa capacité un volume cumulé de 17.66 hm³, soit un taux de sédimentation de 58.87 % et une dégradation spécifique de 716.79 t/an /km².

De 1977 à 1986, un volume de sédiments piégé dans la retenue de l'ordre de 3.63 hm³, ce qui représente une perte de capacité de 12.1 % et un envasement moyen annuel de 0.40 hm³/an.

De 1986 à 2004, le rythme de sédimentation a été sensiblement plus rapide puisque la perte cumulée de la capacité s'est élevée à 14.03 hm³, soit une perte de capacité d'environ de 53.20 %. Cela correspond à une perte moyenne annuelle de l'ordre de 779 500 m³/an (figure 100).

Tableau 17 : Evolution de la capacité et de la tranche morte du barrage K'sob

Année de mesure bathymétrique	Capacité à la cote normale (hm ³)	Envasement (hm ³)	Envasement cumulé (hm ³)	Envasement annuel moyen (hm ³ /an)	Taux d'envasement (%)
Avant la surélévation					
Mise en eau 1940	11.42	0	0	0	0
1947	7.94	3.48	3.48	0.49	30.47
1953	6.13	1.81	5.29	0.3	15.85
1961	4.4	1.73	7.02	0.22	15.15
1968	3.64	0.76	7.8	0.1	6.66
1973	1.42	2.22	10	0.44	19.49
Période 1940-1973 (33 ans d'exploitation)	1.42	10	10	0.30	87.57
Après la surélévation					
Surélévation 1977 (source ANB)	30	0	0	0	0
Bathymétrie 1986 (source GEOKART)	26.37	3.63	3.63	0.40	12.1
Bathymétrie 2000 (source CTH*)	15.6	10.77	14.4	0.77	35.9
Bathymétrie 2004 (source ANB)	12.34	3.26	17.66	0.82	10.87
Période 1977-2004 (27 ans d'exploitation)	12.34	17.66	17.66	0.65	58.87
* Organisme National de Contrôle Technique de la Construction Hydraulique					

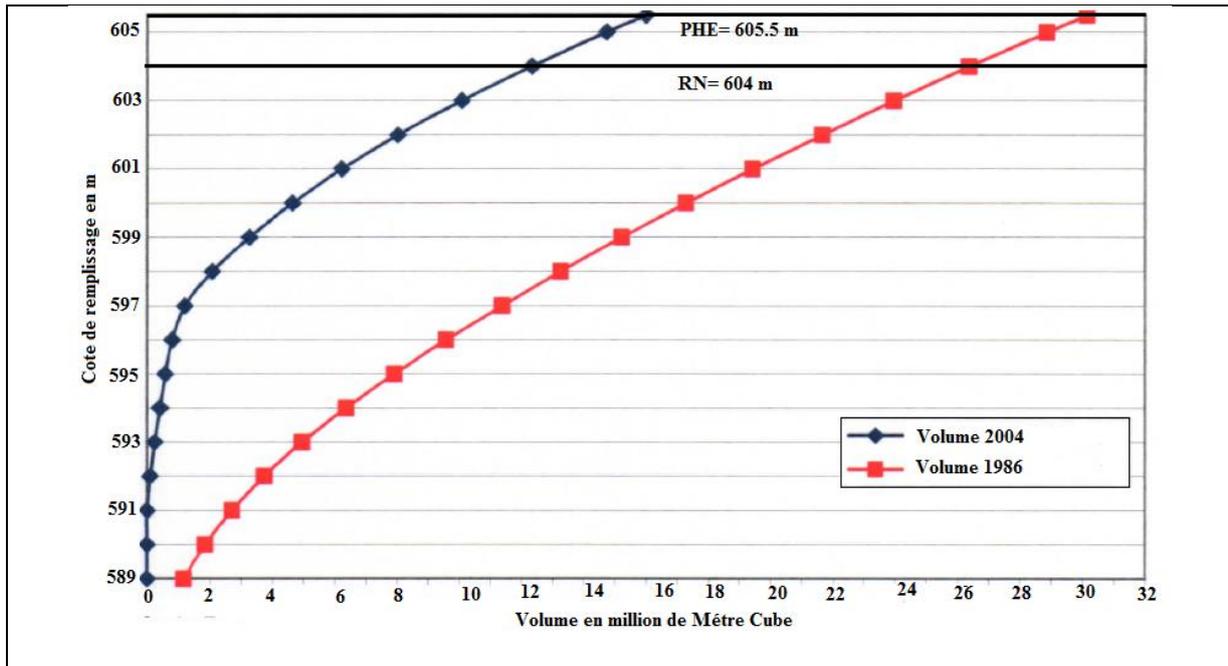


Figure 100 : Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de K'sob entre 1986 et 2004.

3.3. Le barrage de Cheffia

Le suivi de l'évolution du volume des matériaux accumulés dans la cuvette du barrage Cheffia est réalisé grâce à trois campagnes bathymétriques réalisées par l'organisme gestionnaire du barrage (SEGGTH en 1965 ; ANB en 1986, et 2004) pour une hauteur du plan d'eau tous les 50 cm (tableau 18 et figure 101).

- La période entre 1965 et 1986 a révélé que la capacité du barrage s'est réduite à 168.4 millions de m³, soit une perte totale de 3.59 millions de m³, correspondant à un envasement moyen annuel de 0.17 hm³/an et un taux de sédimentation de 2.09 %. Ces valeurs nous donnent une dégradation spécifique de 475 t/an /km² ;
- La période entre 1986 et 2004 se caractérise par une perte de capacité de 9.57 millions de m³, ce qui représente une sédimentation moyenne plus forte que celle de la période précédente d'environ de 0.53 hm³/an et une dégradation spécifique de 1479 t/an /km² ;
- Au final, la période entre 1965 et 2004 a connu une augmentation de la hauteur du toit de la vase qui est passée de 125 m en 1965 à 131 m en 2004. La capacité du barrage s'est réduite à 158.83 hm³, soit une perte cumulée de 13.17 millions de m³ qui correspond à un apport moyen annuel de sédiments de l'ordre de 0.34 hm³/an. Si on rapporte ce volume à la surface du bassin d'alimentation (575 km²), on obtient une dégradation spécifique de l'ordre de 939 t/an /km².

Tableau 18 : Evolution de la capacité et de la tranche morte du barrage Cheffia

Année de mesure bathymétrique	Bathymétrie de 1965 (source SEGGTH)	Bathymétrie de 1986 (source ANB)	Bathymétrie de 2004 (source ANB)	Période 1965 – 2004 (39 ans d'exploitation)
Caractéristique du barrage				
Niveau maximum du barrage (m)	169	169	169	169
Niveau minimum d'exploitation	125.00	127.73	131.38	131.38
Niveau des plus Hautes Eaux (m)	167	167	167	167
Niveau normal de retenue (m)	165	165	165	165
Superficie au niveau PHE (ha)	1040	1056.20	1059.69	1059.69
Capacité à la cote normale (hm ³)	171.99	168.40	158.83	158.83
Envasement (hm ³)	0	3.59	9.57	13.16
Envasement moyen annuel (hm ³ /an)	0	0.17	0.53	0.34
Taux d'envasement (%)	0	2.09	5.57	7.65
Taux d'envasement moyen annuel (%/an)	0	0.10	0.31	0.2

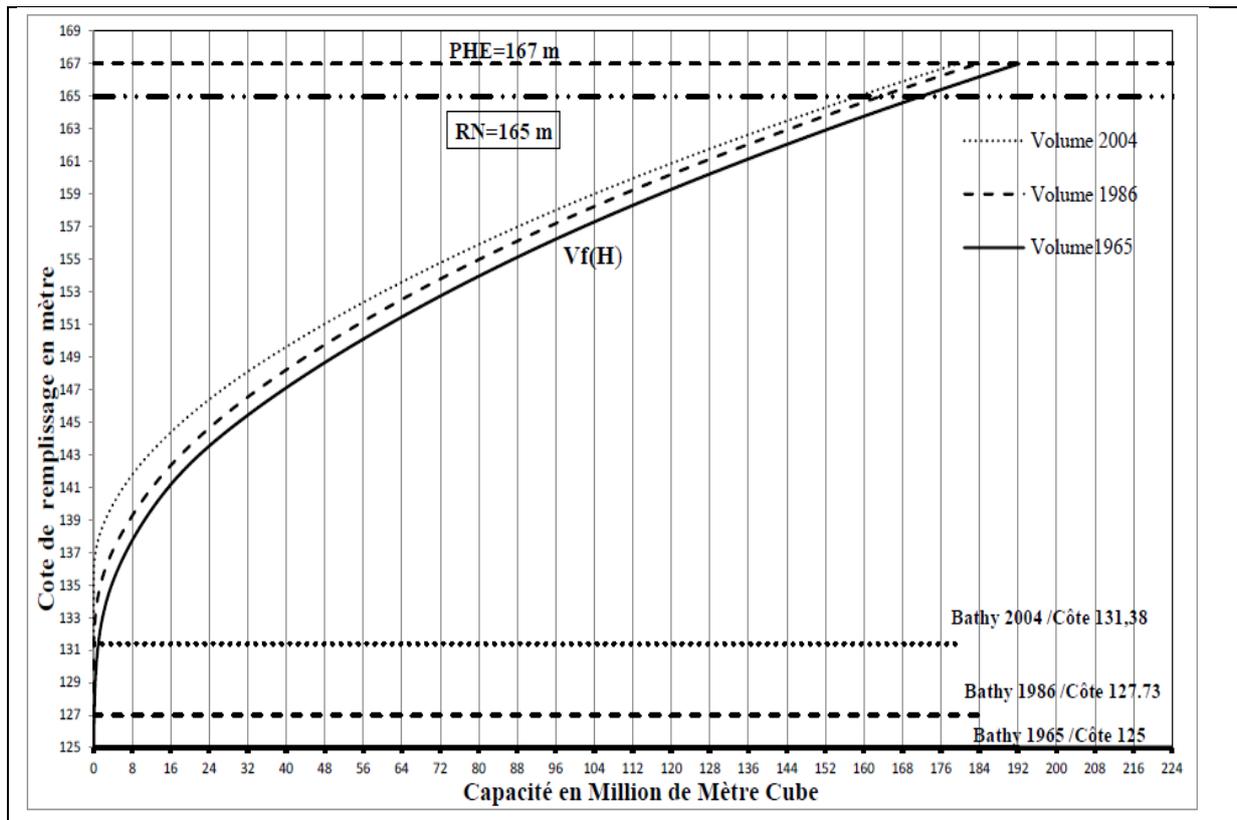


Figure 101 : Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de Cheffia depuis sa mise en eau (Affoun Ikhlef et al, 2019)

3.4. Le barrage de Béni Haroun

Le barrage de Béni Haroun mis en service en 2003, a connu un seul levé bathymétrique, réalisé en 2013 entre le 22 juillet et le 23 septembre. Ce levé a été réalisé par le laboratoire des études Maritimes LEM dans le cadre d'un contrat avec l'Agence Nationale des Barrages l'ANB. Les profils sont espacés de 50 m dans la zone des 1000 m de la digue, puis de 100 m au-delà de cette limite et de lignes de ruptures caractéristiques (thalwegs, lits d'oueds, hauts et bas de talus et d'escarpements ... etc.).

Les résultats sont présentés dans le tableau 19 et la figure 102. Ils montrent que la capacité du barrage s'est réduite à 880 hm³ après une dizaine d'années d'exploitation, ce qui donne un envasement total de 83 millions de m³, soit une perte totale de la capacité initiale du barrage de 8.62 % qui correspond à un apport moyen annuel en sédiments de 8.3 hm³/an, cet envasement moyen correspond à une dégradation spécifique de l'ordre de 1719 t/an /km². (Supérieure à celle évaluée dans l'étude d'avant-projet détaillé : 1205 t/km²/an). Ce cumul de sédimentation atteindrait 830 millions de m³ en 2103 (100 ans), soit 86.2 % du volume total : valeur obtenue par extrapolation à partir de mesures bathymétriques de 2013 (figure 103).

Tableau 19 : Evolution de la capacité et de la tranche morte du barrage Béni Haroun

Caractéristique	Août 2003 (date mise en service)	Bathymétrie 2013 (source LEM)
Niveau maximum du barrage (m)	216.30	216.30
Niveau des plus Hautes Eaux (m)	214.80	214.80
Niveau normal de la retenue (m)	200	200
Superficie à la cote normale (ha)	3768	3846
Capacité à la cote normale (hm ³)	963	880
Envasement (hm ³)	0	83
Envasement moyen annuel (hm ³ /an)	0	8.3
Taux d'envasement (%)	0	8.62
Taux d'envasement moyen annuel (% / an)	0	0.86

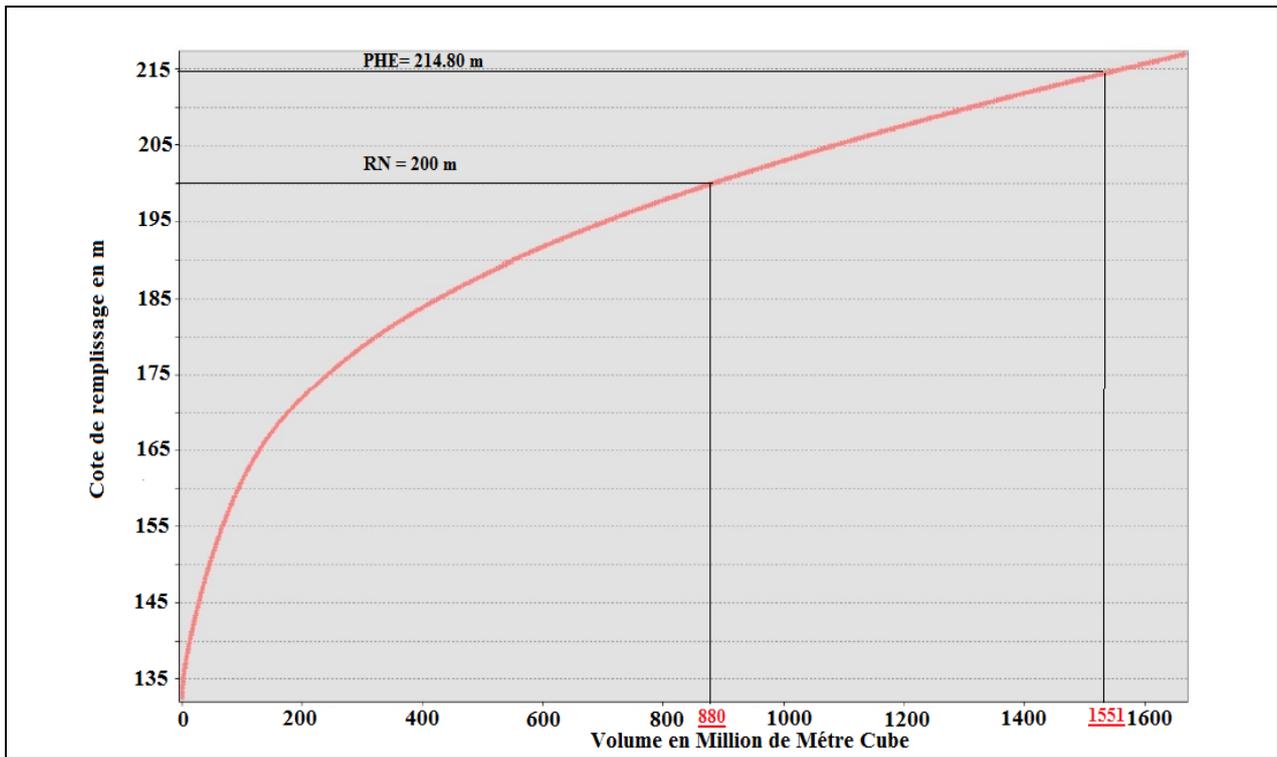


Figure 102 : Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de Béni Haroun (2013).

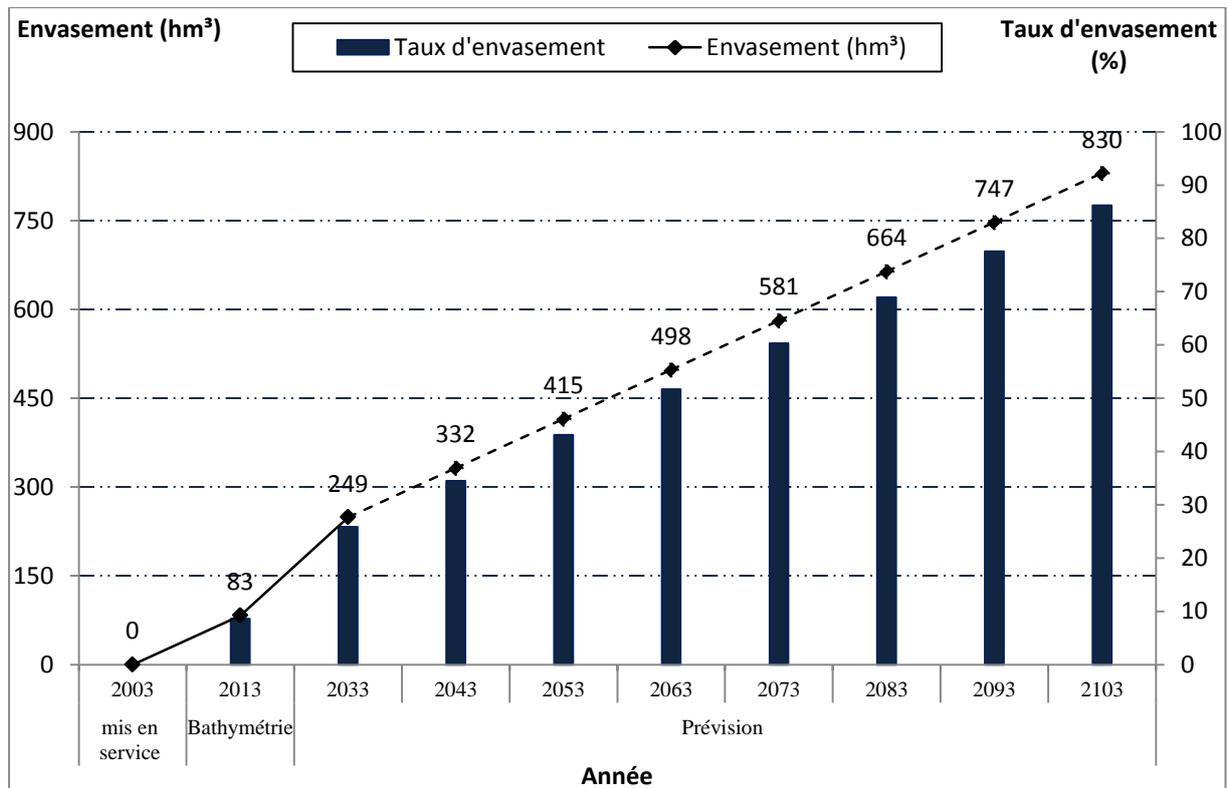


Figure 103 : Prédiction de volume de la vase et du taux de sédimentation du barrage Béni Haroun

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons jugé utile de présenter au préalable un aperçu sur l'état de l'art consacré à la question de la sédimentation des lacs de barrages à travers le monde. En Algérie, l'envasement constitue, par son importance, un problème majeur pour la sécurité des barrages, leur exploitation et leur durée de vie. Une analyse comparative des volumes de sédiments des barrages en exploitation de l'Est Algérien, à travers le traitement des données de mesures bathymétriques de l'ANBT (2004 et 2014) a permis de faire le point sur le rythme d'envasement et les pertes de capacité des barrages, directement influencés par le degré d'érodibilité des bassins versants et la gestion des flux hydro-sédimentaires au niveau des barrages.

Les levés bathymétriques de 2004 ont montré que les dépôts de vase dans 19 barrages avoisinent 231.0 millions de m³, soit une perte de 15.66 % de la capacité totale de ces retenues. Les volumes des sédiments piégés au fond des cuvettes varient de 0.61 hm³ (Béni Zid) à 72.8 hm³ (Ighil Emda). Par ailleurs, le taux d'envasement oscille entre un minimum de 0.68 % (Zit El Emba), et un maximum de 86 % (Foum El Gueiss). Trois catégories de barrages sont identifiées selon le taux d'envasement (supérieur à 50 % : Foum El Gueiss, Foum El Gherza et K'sob ; entre 30 et 50 % : Ighil Emda, Zardezas et Mexa ; inférieur ou égal à 10 % : Hammam Grouz, Erraguene, Hammam Debagh, Cheffia, Babar, Ain Dalia, Guenitra, Ain Zada, El Agrem, Oued Cherf, Beni Zid, Fontaine des Gazelles et Zit Emba).

Les 22 barrages (Mexa, Kissir et Ighil Emda non compris) concernés par les levés bathymétriques de 2014, ont perdu environ 328.5 hm³ de leur capacité depuis leur mise en service, ce qui représente 11.7 % de la capacité totale de stockage. Les volumes de sédiments oscillent entre 2.2 hm³ (Béni Zid) et 83 hm³ (Béni Haroun). Les résultats de cette dernière campagne bathymétrique permettent de tirer les conclusions suivantes : certains réservoirs connaissent une perte de capacité de grande ampleur comme celui de Béni Haroun (83 hm³ durant une période de 10 ans) ; le problème d'envasement est délicat pour certains barrages, à l'exemple des deux barrages de Foum El Gherza et Foum El Gueiss qui ont été envasés respectivement à plus de 76 % et 90 % ; enfin, les barrages de construction récente (Béni Haroun, Boussiaba, El Agrem, Bougous, Tichy Haf et Koudiat Medouar) d'une capacité totale de 1331 hm³, sont vulnérables à un envasement relativement rapide.

Une approche plus détaillée sur la sédimentation de quatre barrages (Zardezas, K'sob, Cheffia et Béni Haroun) a permis de comparer les volumes perdus dans ces réservoirs et les solutions adoptées au fur et à mesure du comblement des retenues. Les dépôts successifs des sédiments ont accéléré l'envasement du barrage Zardezas (un volume cumulé de 7.5 hm³ au cours de la période de 1945 à 1974, soit un taux d'envasement de 50 %). Malgré l'opération de surélévation effectuée en 1975, le barrage a perdu en 29 ans (de 1975 à 2004), un volume de 12.32 hm³, soit un taux de comblement de 39.74 %. En conséquence, des quantités importantes de sédiments ont été évacuées chaque année par la technique de dragage et de soutirage des courants de densités.

Le barrage de K'sob a vu sa capacité initiale (11.42 hm³ en 1940) réduite à 1.42 hm³ en 1973, soit un taux de sédimentation de 87.57 %. La surélévation de la digue du barrage est réalisée en 1977 mais l'envasement continue à augmenter rapidement ; 17.66 hm³ au bout de 27 ans (1977-2004), soit un taux de comblement de 58.87 %.

Le réservoir de Cheffia, d'une capacité totale de 171 hm³, est caractérisé par une perte cumulée de 13.17 millions de m³ en 39 ans, ce qui correspond à un envasement moyen annuel relativement modeste, de 0.34 hm³/an.

Le grand barrage de Béni Haroun d'une capacité de 963 hm³ a connu un envasement de 83 millions de m³, soit une perte de capacité de 8.62 % au terme de dix ans d'exploitation. Le rythme d'envasement de la retenue est plus rapide que celui fixé par l'étude d'APD.

Pour lutter contre l'envasement et prolonger la vie des barrages, l'organisme gestionnaire a appliqué des moyens pour certains barrages : la surélévation des digues (K'sob, Zardezas et Foum El Gueiss), le dragage (Foum El Gherza et Foum El Gueiss), le soutirage des sédiments (Ighil Emda), le dragage et le soutirage (Zardezas et K'sob).

Le phénomène d'envasement affecte la capacité de stockage des barrages, mais entraîne aussi une diminution du volume régularisable (celui devant être fourni annuellement, aux secteurs utilisateurs) et par conséquent, il affecte le niveau de garantie de l'approvisionnement. Ce que nous allons aborder au prochain chapitre.

CHAPITRE 6

**BARRAGES, VOLUMES REGULARISES ET TRANSFERTS INTER-
BASSINS. VERS UN SYSTEME D'AMENAGEMENT
INTERCONNECTE**

INTRODUCTION AU CHAPITRE

En Algérie, les besoins en eau sont très importants engendrés par l'essor démographique et le développement accéléré des activités économiques. Face à cette demande multiple conjuguée à la variabilité climatique, les apports annuels régularisés par les barrages n'arrivent pas juguler entièrement les tensions sur l'eau devenues récurrentes, en particulier dans les zones semi-arides et en période de sécheresse notamment. Cette situation a conduit les décideurs centraux du secteur de l'Hydraulique à réaliser des projets de grands transferts inter-bassins en vue d'aboutir à terme à un réseau de barrages interconnecté devant permettre d'opérer des arbitrages dans l'affectation des volumes d'eau régularisés au profit des différents secteurs d'utilisation.

Dans le cadre de cette problématique, trois points principaux sont abordés : la confrontation entre ressources et utilisations de l'eau des barrages à travers l'étude du rapport entre le volume régularisé (réel) et le volume régularisable (théorique), l'étude de la variation interannuelle par secteur d'utilisation (AEP, irrigation, eau industrielle) des volumes régularisés, et enfin la présentation et l'analyse des principaux systèmes de transferts d'eau et les aménagements associés.

1. CONFRONTATION ENTRE VOLUME REGULARISE REEL ET THEORIQUE

1.1. Le volume régularisé : définition et bref rappel des méthodes de régularisation

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, la réserve en eau dans le barrage, les besoins, l'infiltration et l'état de l'envasement.

Il peut être défini selon **Laborde et al (2013)**, comme « 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. Ce volume régularisable dépend donc à la fois des besoins, de la ressource, du volume utile de l'ouvrage et également des pertes par évaporation ». Laborde et al considèrent que le problème peut être beaucoup plus complexe car s'y ajoutent les fuites, l'envasement et donc la réduction du volume utile de l'ouvrage.

Le volume régularisé est déterminé grâce à des simulations du bilan d'eau établies avant la construction du barrage (l'étude d'avant-projet), traduisant le souci des décideurs de dimensionner des barrages assurant une grande garantie de fourniture d'eau (régularisation interannuelle ou saisonnière) pour se prémunir des années hydrologiques sèches. Parmi les nombreuses méthodes de régularisation, basées généralement sur l'exploitation statistique des données pour effectuer des simulations du bilan, nous citons à titre indicatif quatre méthodes :

- la méthode déterministe de **Rippl (1883)** : elle consiste à tracer une courbe des cumuls des apports et de la consommation en fonction du temps, l'objectif de ces courbes est de déterminer la capacité de stockage minimale, nécessaire pour satisfaire une demande donnée, d'un réservoir avec une série temporelle d'apport d'une taille donnée (**Mezaache, 2015**). Elle est basée sur l'équation suivante :

$$V_r = \alpha A_{\text{moy}}$$

Avec :

V_r : volume régularisable (hm^3),

α : coefficient de régularisation,

A_{moy} : Apport moyen annuel (hm^3).

- la méthode de régularisation **Krisky–Menkel (1932)** : elle permet de déterminer le volume utile, et s'exprime de la façon suivante :

$$V_u = (\beta_{\text{int}} + \beta_s) A_{\text{moy}} - \text{pertes (évaporation + infiltration)}$$

Avec :

V_u : le volume utile du barrage (hm^3) ;

β_{int} : la composante interannuelle du volume utile déterminée par la relation : $\beta_{\text{int}} = V_{\text{interannuel}}/A_{\text{moy}}$. Elle est reproduite sous forme d'abaques, établies en fonction du coefficient de régularisation α , des caractéristiques statistiques de la série des apports (coefficients de variation c_v , d'asymétrie C_s et d'autocorrélation d'ordre 1 r_1), et enfin du taux d'approvisionnement p (probabilités de la garantie de la demande) ;

β_s : la composante saisonnière du volume utile déterminée par la relation : $\beta_s = \alpha (t-m)$ où t et m sont respectivement la durée de la saison sèche au cours de l'année et la fraction de l'étiage dont l'apport annuel correspondant à une probabilité donnée (80 % ou 95 %) ;

A_{moy} : l'apport moyen annuel (hm^3).

- la méthode proposée par **Laborde et al (2013)** est basée sur l'utilisation de relations statistiques dont l'intérêt est d'estimer les volumes régularisables pour des ouvrages à régularisation interannuelle et de prévoir ce que pourrait être l'impact d'une baisse de la pluviométrie. Elle se base sur les résultats de modélisation pluie-débit des apports mensuels sur l'ensemble du Nord de l'Algérie (**ANRH, 2005; PNE, 2010**). Selon l'auteur, pour simuler la marche de l'ouvrage sur plusieurs centaines d'années, la première étape consiste à simuler les débits sur une période de 1050 années (12 600 mois), les 50 premières années servant uniquement à stabiliser les niveaux dans les réservoirs du modèle hydrologique et dans le barrage réservoir.

Pour chaque site, est estimé le rapport v du volume régularisé v_r à l'apport moyen annuel A_{moy} , calcul dépendant du rapport a du volume utile de la retenue à l'apport moyen annuel.

A noter que sur chaque site, le volume utile du barrage est considéré comme une série de pourcentages de l'apport moyen interannuel (10 %, 15 %, ... et 1000 %).

Comme le montre la figure 104, la modélisation de la fonction $v(a) = v_{est}$ dépend d'un seul paramètre régional p , lui-même étant lié à la pluie annuelle médiane de bassin P_{med} :

$$v(a) = v_{est} \approx 1.08 (1 - e^{-(a/p)^{0.6}}) \quad (1)$$

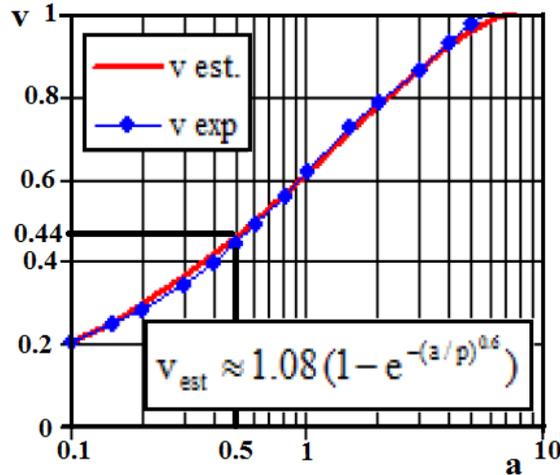


Figure 104 : Modélisation de la fonction $v(a)$ pour la Tafna (Laborde et al, 2013)

Le paramètre p et la lame d'eau écoulée annuelle moyenne L_{moy} sont liés aussi à P_{med} par les relations suivantes :

$$p = 175 P_{med}^{-0.8} \quad , \quad P_{med} \text{ (en mm)} \quad (2)$$

$$L_{moy} \text{ (mm)} = (P_{med} - 100)^{3.5} / (P_{med} + 250)^{2.5} \quad (3)$$

La quatrième relation permet d'estimer le volume régularisable v_r en fonction de v_{est} :

$$V_r \text{ (hm}^3\text{/an)} = v_{est} * A_{moy} \quad , \quad A_{moy} \text{ (en hm}^3\text{)} \quad (4)$$

Un exemple est proposé par **Laborde et al (2013)** en appliquant cette méthode à un barrage choisi sur une section de l'oued Tafna drainant une superficie de 500 km² dans une zone où la pluie médiane est de 400 mm ; p est de 1.45 (2) et la lame écoulée annuelle L_{moy} est de l'ordre de 43.4 mm, soit un apport annuel moyen de 22 hm³ (3). En construisant un barrage dont le volume utile serait de 11 hm³ (soit $a = 0.5$), on aurait une valeur de $v_{est} = 0.44$ (1). Ceci signifie que le volume régularisé v_r serait de $0.44 * 22 \text{ hm}^3 = 9.7 \text{ hm}^3$ (4).

- la méthode adoptée par l'étude d'Actualisation du Plan National de l'Eau du Ministère des Ressources en Eau se basant sur l'exploitation du logiciel « Mike Basin » pour calculer le volume régularisable. Cette méthode a été mise en œuvre dès l'année 2005 par les Agences de Bassin Hydrographique (ABH) dans le cadre de l'élaboration du PDARE (Plan directeur

d'aménagement des ressources en eau). L'intérêt de cet outil réside dans sa capacité d'étudier la répartition et l'utilisation de ressources en eau ainsi que la gestion des barrages réservoirs.

Plusieurs étapes sont nécessaires pour estimer le volume régularisable :

- préparation et organisation des données d'entrée sur des fichiers Excel pour un barrage (les apports au barrage, les caractéristiques géométriques de la retenue, les pluies et les évaporations du plan d'eau) ;
- lancement du logiciel Mike Basin et création d'un projet ;
- importation de couches géographiques, tracées et délimitées à partir d'un MNT (le bassin, le barrage, l'usager);
- introduction des données d'entrée dans le modèle de simulation et d'optimisation de Mike Basin ;
- lancement des simulations et appel à la macro régularisation, cette étape consiste à fixer un volume d'eau correspondant à une demande minimale à satisfaire.

Les résultats des différentes itérations sont résumés sous forme de deux courbes :

- la première courbe représente le nombre des années pour lesquelles un déficit est mesuré en fonction de la demande ;
- une deuxième courbe montre le volume total cumulé des déficits en fonction de la demande. Le volume régularisable correspond au point de confluence de cette courbe, avec le taux de satisfaction fixé à 95% pour l'AEP et à 80% pour l'irrigation.

1.2. Le ratio volume régularisé réel/volume régularisable théorique des barrages de l'Est algérien

Le volume réellement fourni aux consommateurs (volume régularisé) est déduit des bilans d'eau sur toute la période d'exploitation des barrages. Le ratio volume régularisé réel / volume régularisé théorique (ou volume régularisable) met en évidence l'importance du déficit de régularisation, autrement dit la défaillance de l'ouvrage (son incapacité à fournir la quantité d'eau souhaitée).

Le tableau 20 regroupe les valeurs du ratio volume régularisé / volume régularisable ainsi que le déficit de régularisation de l'ensemble des ouvrages en exploitation dans la région de l'Est. Mais la comparaison des déficits et des ratios calculés des barrages est biaisée, du fait de la durée d'exploitation de ces ouvrages qui varie dans une très large fourchette, de 5 à 47 ans. Afin de contourner cette contrainte et faciliter la comparaison, l'étude porte sur l'échantillon de dix barrages disposant d'une période commune de 23 ans (1990/91-2012/13)

*Chapitre 6: Barrages, volumes regularises et transferts inter-bassins.
Vers un système d'aménagement interconnecté*

Tableau 20 : Variation des volumes régularisés, théoriques et réels, des barrages en exploitation de l'Est algérien (périodes d'observation variable et commune)

			Période d'exploitation variable				Période d'exploitation commune (1990/91-2012/13)			
BV	Barrage	Volume régularisé théorique (hm ³ /an)	n = de 5 à 47 ans	Volume régularisé réel (hm ³ /an)	Ratio volume régularisé Réel / volume régularisé théorique	Déficit de régularisation (%)	n = 23 ans	Volume régularisé réel (hm ³ /an)	Ratio volume régularisé Réel / volume régularisé théorique	Déficit de régularisation (%)
BV03	Mexa	37	13	32.55	0.88	12.03				
	Cheffia	95	37	70.21	0.74	26.1	23	71	0.75	25.07
	Zit Emba ⁽¹⁾	43.2	8	10.06	0.23	76.7				
	Zardézas	32	38	11.92	0.37	62.75	23	10	0.32	68.19
	Guénitra	48	26	24.68	0.51	48.59	23	27	0.55	44.58
	Béni Zid	20	15	5.36	0.27	73.21				
	El Agrem ⁽¹⁾	21.5	13	8.12	0.38	62.24				
Kissir ⁽¹⁾	68	6	14.37	0.21	78.87					
BV05	K'sob	20	23	15.14	0.76	24.28	23	15	0.76	24.28
BV06	Babar	12	14	5.27	0.44	56.1				
	F.D. Gazelles	14	16	6.32	0.45	54.86				
	F. El Gherza	13	47	8.99	0.69	30.84	23	8	0.60	39.82
BV07	Koudiat Medouar	18 (bassin au barrage)	12	17	0.94	5.55				
		116 (avec transfert Beni Haroun)			0.15	85.34				
	F. El Guéiss	3.2	26	1.87	0.58	41.66	23	2	0.63	36.86
BV10	Hammam Grouz	16	28	3.64	0.23	77.26	23	4	0.25	75.02
	Beni Haroun ⁽¹⁾	435	15	92.02	0.21	78.85				
	Boussiaba ⁽²⁾	100	5	/	/	/				
BV12	Ain Dalia	45	26	20.68	0.46	54.05	23	20	0.44	56.11
BV14	Hammam Debagh	55	26	32.56	0.59	40.8	23	29	0.53	46.96
	Oued-Cherf ⁽¹⁾	30	14	5.15	0.17	81.78				
BV15	Ain Zada	50	26	21.85	0.44	56.3	23	24	0.49	51.23
	Tichy Haf ⁽¹⁾	150	8	15.38	0.10	89.75				

AEP : Alimentation en Eau Potable, IRR : Irrigation, AEI : Alimentation en Eau Industrielle

- (1) : Barrage récent n'ayant pas atteint son niveau d'exploitation maximal
(2) : Barrage non exploité

1.2.1 En valeurs moyennes interannuelles

La figure 105 montre la répartition du volume régularisé moyen interannuel, réel et théorique, à l'échelle des dix barrages. Pour l'ensemble de ces ouvrages, la moyenne du volume régularisé réel se situe autour de 21.03 hm³ par an contre un volume régularisé théorique de l'ordre de 37.72 hm³ par an; d'où un ratio moyen de 0.53.

La figure 106 illustre la variabilité de ces ratios (de 0.25 à 0.76), traduisant l'importance de la défaillance de fourniture en eau (près de 47 % en moyenne) et sa variation dans un intervalle compris entre 24 % au barrage de K'sob et 75 % au barrage de Hammam Grouz, suivi par le barrage de Zardezas (68 %). Au total, quatre barrages (Hammam Grouz, Zardezas, Ain Zada et Ain Dalia) connaissent un taux de défaillance supérieur à 50 % et six barrages (Hammam Debagh, Guénitra, Fom El Gherza, Fom El Gueiss, Cheffia et K'sob) enregistrent un taux inférieur à 50 %.

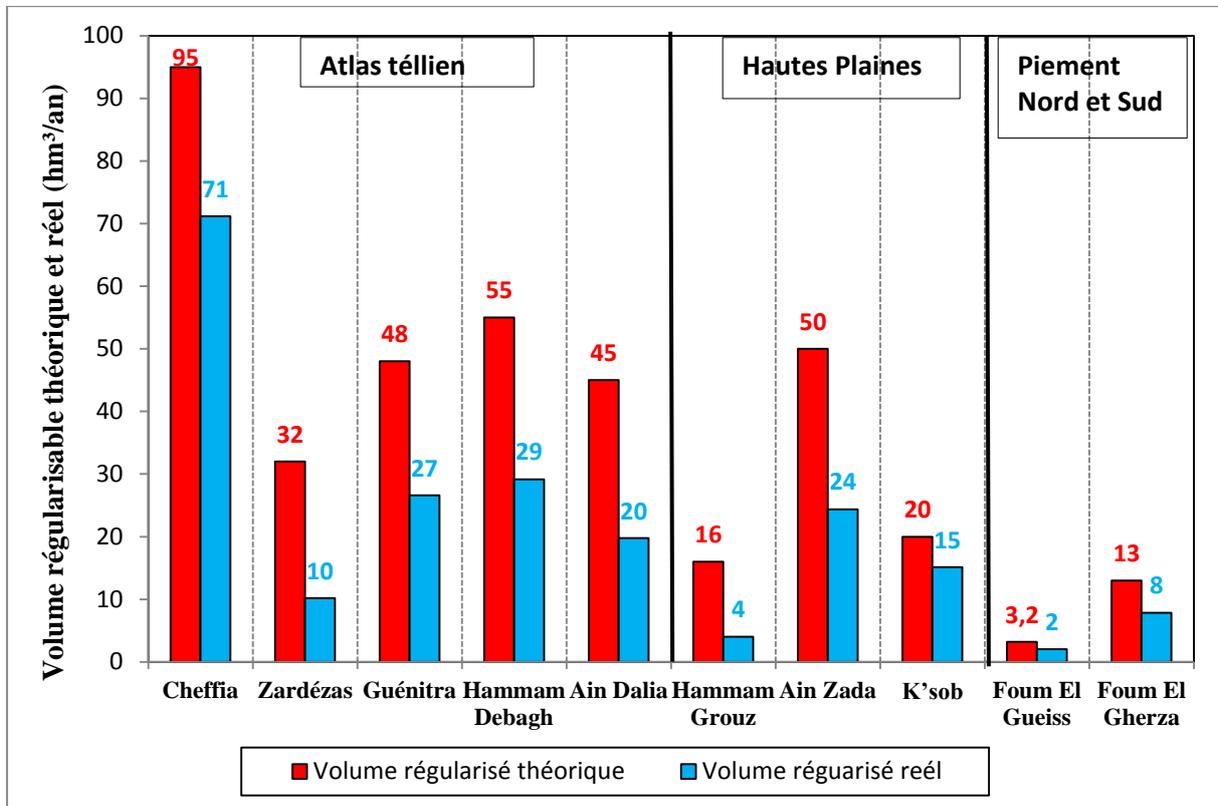


Figure 105 : Variation des volumes régularisés, théoriques et réels, de dix barrages (période commune : 1990/91-2012/13)

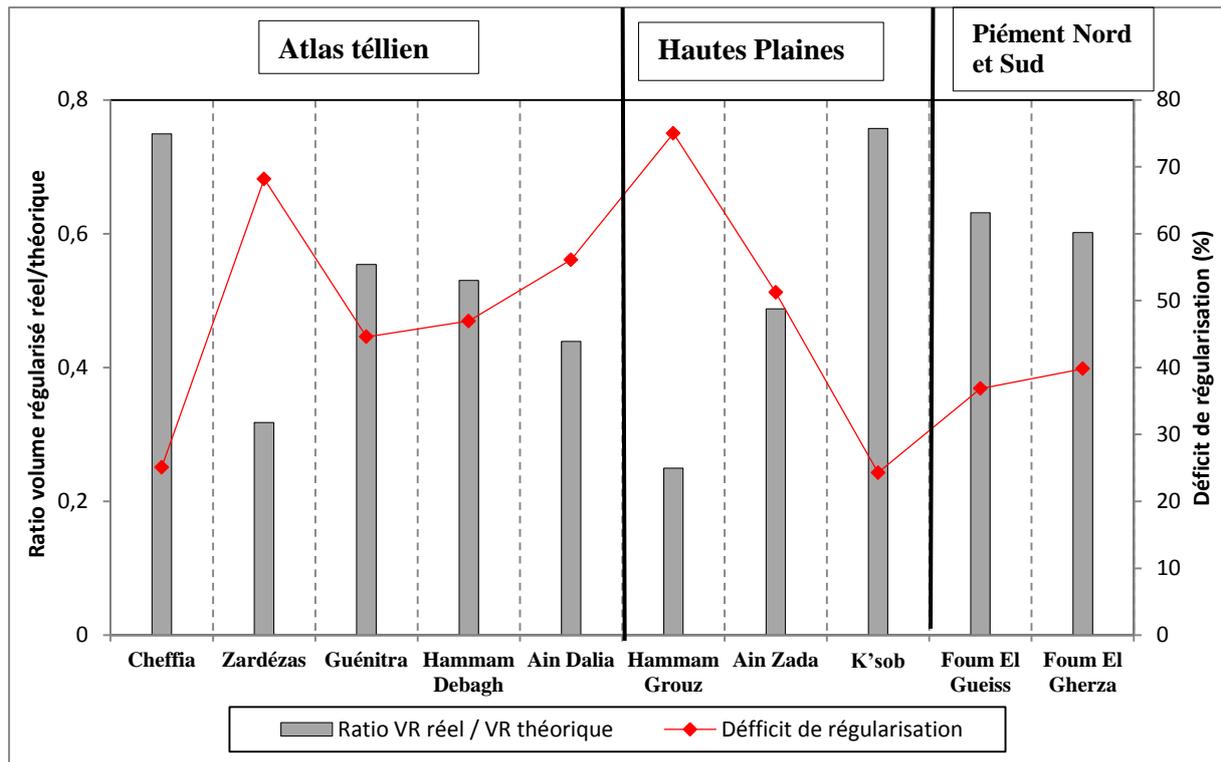


Figure 106 : Variation du ratio VR réel/VR théorique et déficit de régularisation à travers dix barrages (période commune : 1990/91-2012/13).

1.2.2 Amplitude de la variabilité : valeurs médianes et extrêmes

Les résultats des box plots (médianes, minimums, maximums) illustrent bien la grande variabilité d'une année à l'autre, du ratio volume régularisé réel / volume régularisé théorique (figure 107).

Le maximum a dépassé l'unité (VR réel /VR théorique supérieur à 1) dans quatre barrages uniquement : Foum El Gueiss (de 1990/91 à 1992/93, 1995/96, 1998/99, et 1999/00), Foum El Gherza (1990/91, 2008/09, et 2011/12), Hammam Debagh (2012/13), et K'sob (1992/93, 1997/98, et 1999/00). Le ratio le plus élevé (proche de 2) concerne le barrage de Foum El Gueiss, petit barrage fortement touché par l'envasement et pouvant être rempli plusieurs fois dans l'année au vu de l'importance des apports de l'oued Gueiss qui prend sa source dans le massif bien arrosé de l'Aurès.

Les valeurs des ratios sont nulles ou très faibles pendant quelques années particulièrement sèches pour les barrages de Hammam Debagh (1991/92 et 1992/93), de Foum El Gherza (1993/94 et 2012/13), et de Foum El Gueiss (2006/07 et 2011/12), et pendant une année humide pour le barrage de Guénitra (2002/03). Ceci, en raison de l'absence ou du moins de la faiblesse des volumes alloués aux différents secteurs d'utilisations, à relier au faible niveau de la réserve des barrages, lui-même s'expliquant par l'indigence des apports hydrologiques.

Le cas de Hammam Grouz (de 2006/07 à 2010/11) est à expliquer par le phénomène de fuites karstiques qui ont conduit à la fermeture de l'ouvrage et donc l'interruption des lâchers au profit de l'AEP de la ville de Constantine.

Il est à remarquer que le groupe de barrages de Foum El Gueiss, Hammam Grouz, Hammam Debagh, Foum El Gherza se caractérise par une forte variabilité avec un coefficient de variation atteignant respectivement 0.95, 0.88, 0.68 et 0.61.

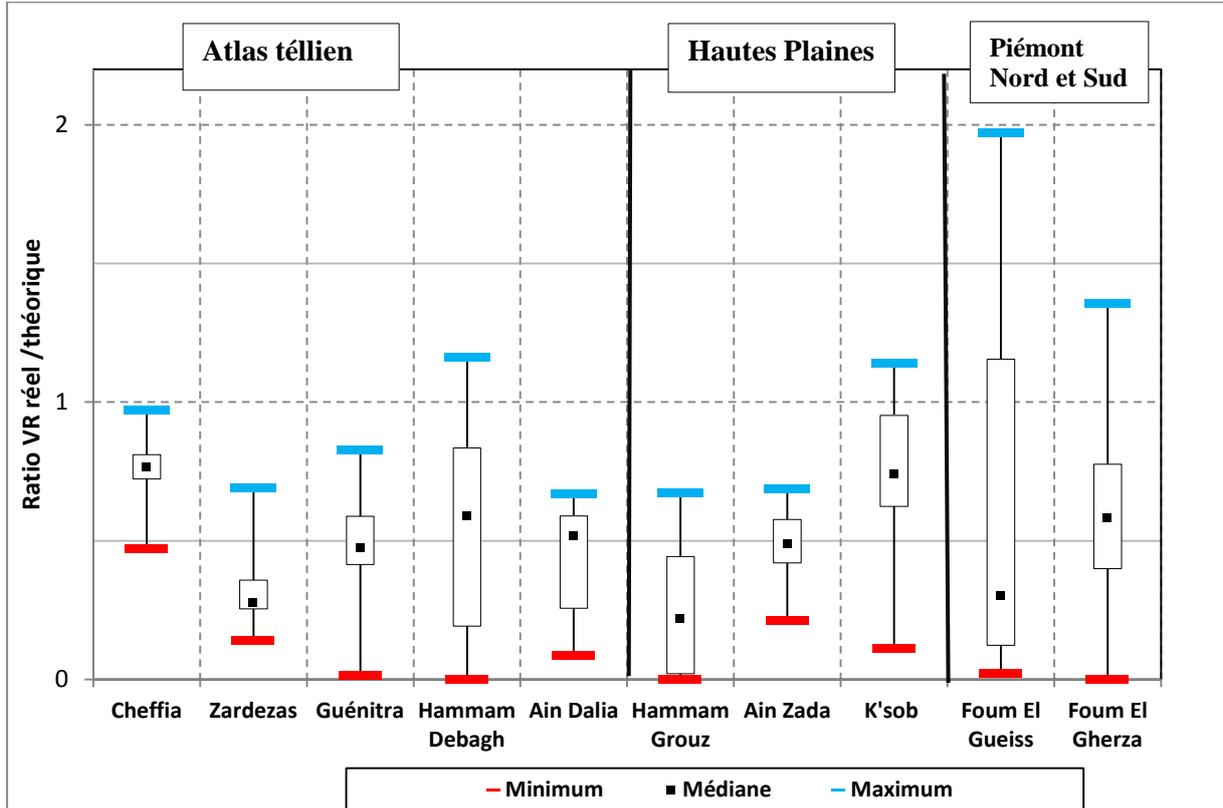


Figure 107 : « Boîtes à moustaches » des ratios volume régularisé réel / volume régularisé théorique de dix retenues (période: 1990/91-2012/13)

2. REPARTITION PAR SECTEUR D'UTILISATION DES VOLUMES D'EAU REGULARISES

2.1. Répartition sectorielle du volume total régularisé

Les barrages répondent à plusieurs objectifs comme l'alimentation en eau potable (AEP), l'alimentation en eau industrielle (AEI) et l'irrigation (IRR). La figure 108 met en évidence la répartition des volumes régularisés sur les dix barrages, pendant la période d'exploitation commune de 23 ans : 58 % des volumes d'eau sont affectés à l'alimentation en eau potable alors que 37 % sont destinés à l'irrigation et 5 % seulement profitent à l'alimentation en eau industrielle.

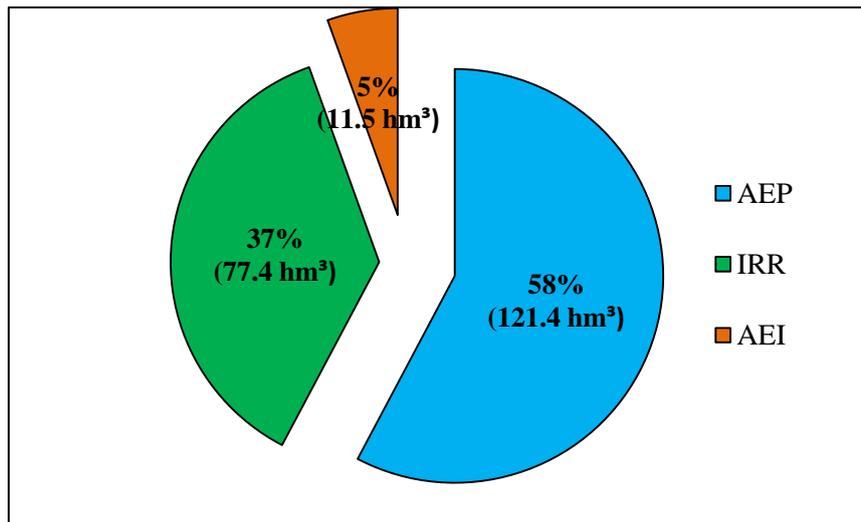


Figure 108 : Répartition par secteur d'utilisation du volume total régularisé de dix barrages de l'Est algérien (période: 1990/91-2012/13)

En outre, les graphiques à secteurs établis pour chaque barrage permettent de classer ces barrages selon quatre types d'objectifs d'allocation de la ressource (figure 109) :

- les barrages destinés à satisfaire uniquement les besoins en eau potable : Ain Zada, Hammam Grouz et Ain Dalia ;
- les barrages affectés exclusivement à l'irrigation : K'sob et Foum El Gherza ;
- les barrages destinés à l'AEP et l'irrigation (objectif mixte) : Zardezas (AEP : 81 %, IRR : 19 %), Guenitra (AEP : 87 %, IRR : 13 %) et Foum El Gueiss (AEP : 5 %, IRR : 95 %) ;
- enfin, les barrages à fins multiples, destinés à répondre aux besoins des trois secteurs d'utilisation AEP, irrigation et AEI : Cheffia (AEP : 48 %, IRR : 38 %, AEI : 14 %) et Hammam Debagh (AEP : 26 %, IRR : 69 %, AEI : 4 %).

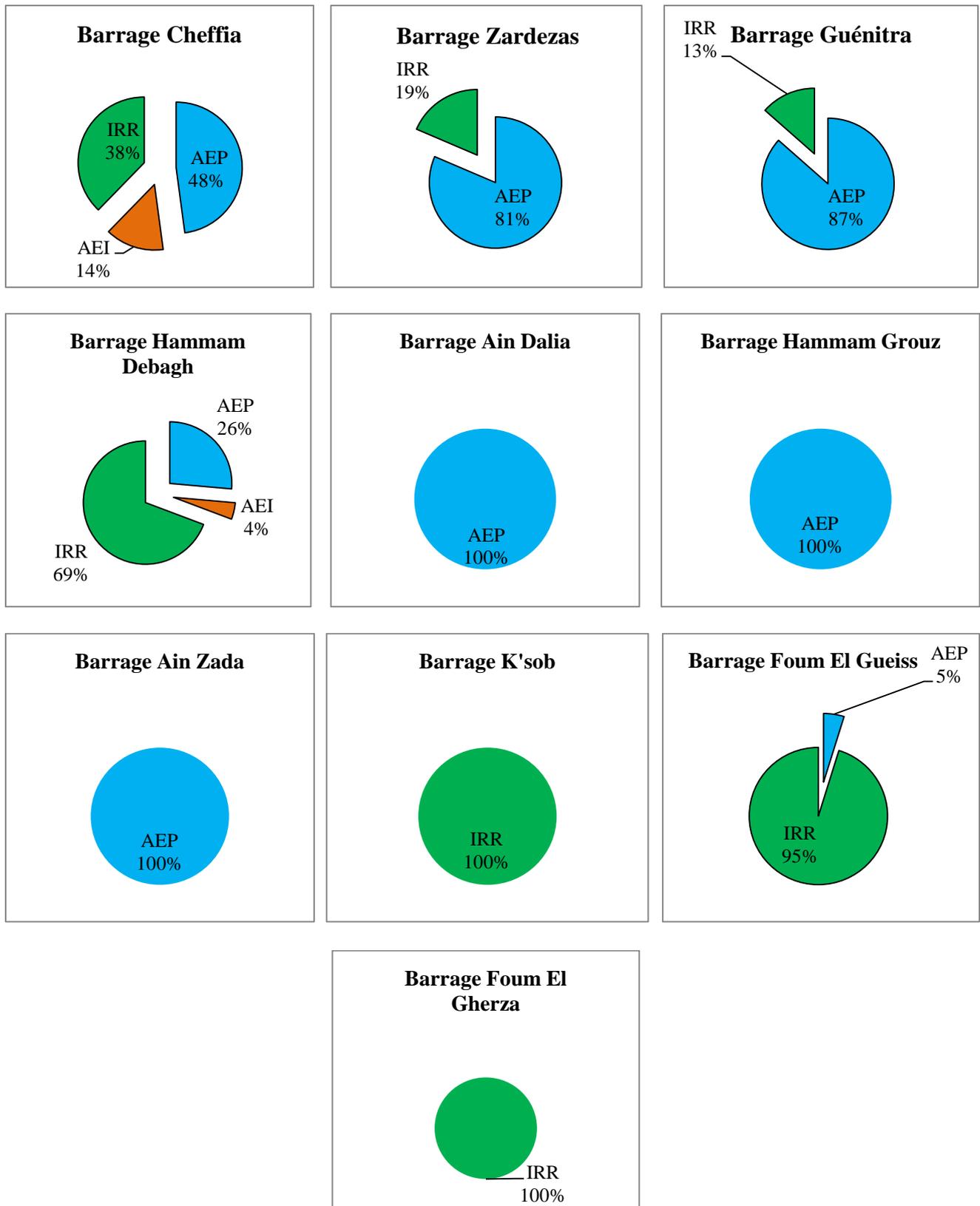


Figure 109 : Répartition par secteur d'utilisation du volume régularisé par chacun des barrages (période: 1990/91-2012/13)

2.2. Variations annuelles par secteur d'utilisation des volumes régularisés

Les valeurs annuelles des volumes régularisés par chacun des barrages et de leur affectation respective au profit de l'alimentation en eau potable, de l'eau industrielle et de l'irrigation sont reportées dans le tableau 21.

Tableau 21 : Ventilation par type d'usage des volumes régularisés de 1990/91 à 2012/13.

Année	Barrage de Cheffia			Barrage de Zardezas		Barrage de Guénitra		Barrage de Hammam Debagh			Barrage d'Ain Dalia	Barrage de Hammam Grouz	Barrage d'Ain Zada	Barrage de K'sob	Barrage de Foum El Gueiss		Barrage de Foum El Gherza
	AEP	AEI	IRR	AEP	IRR	AEP	IRR	AEP	AEI	IRR	AEP	AEP	AEP	IRR	AEP	IRR	IRR
90/91	14.77	10.91	22.04	13.43	0.12	10.86	0.00	0.00	1.06	0.00	28.19	7.61	10.68	15.38	0.10	6.21	17.26
91/92	27.77	12.80	34.35	6.70	0.14	19.29	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	9.20	18.71	19.41	0.10	4.15	12.94
92/93	29.97	13.42	48.88	9.98	1.42	22.02	0.00	0.00	0.00	0.00	4.75	8.51	18.85	22.82	0.10	4.81	10.09
93/94	27.98	10.05	35.51	11.43	0.36	26.51	0.00	0.98	0.00	0.00	3.87	6.52	21.99	19.10	0.10	1.88	0.00
94/95	30.63	9.82	28.33	10.50	1.01	29.29	0.00	1.44	0.00	0.00	4.75	3.47	21.77	18.96	0.04	1.76	5.72
95/96	21.02	7.13	29.00	6.99	1.74	37.17	0.00	1.44	28.15	7.14	5.89	3.51	21.39	14.90	0.10	4.14	9.79
96/97	32.00	7.25	33.02	5.92	1.54	34.80	0.00	1.46	0.00	9.85	10.35	0.87	24.54	20.34	0.10	0.86	5.80
97/98	34.36	7.65	30.60	4.77	1.37	34.38	0.00	1.46	0.00	8.29	23.55	2.99	24.43	22.12	0.10	2.54	10.07
98/99	33.77	10.33	33.86	6.07	3.57	36.36	0.00	1.46	0.00	20.32	24.71	5.19	20.53	18.24	0.60	4.75	0.99
99/00	36.01	10.61	30.17	6.17	3.41	39.77	0.00	1.46	0.00	24.31	26.72	8.25	24.14	21.06	0.06	3.91	6.74
00/01	38.76	11.33	20.86	6.59	1.48	20.21	4.43	1.46	0.00	30.94	30.08	6.56	25.04	17.42	0.06	0.49	5.32
01/02	27.96	8.89	7.94	3.40	1.06	10.85	2.97	3.28	0.00	29.08	22.60	4.09	20.58	9.17	0.07	0.37	6.37
02/03	28.36	6.94	26.34	14.19	0.86	0.65	2.65	8.49	0.00	31.33	12.72	10.78	14.85	13.48	0.07	0.81	7.55
03/04	36.94	9.44	25.41	19.56	2.55	1.93	11.38	13.45	0.00	10.79	22.48	7.73	23.54	12.60	0.07	0.84	11.75
04/05	44.30	8.10	30.47	11.27	4.13	21.86	4.71	14.23	0.00	13.75	22.06	5.39	24.59	14.65	0.02	0.57	3.86
05/06	39.39	9.62	35.58	6.79	4.62	24.24	6.69	14.53	0.00	40.38	23.31	0.08	27.55	8.85	0.05	0.11	7.70
06/07	36.81	10.86	28.93	4.96	3.23	22.70	7.43	14.10	0.00	34.25	26.29	0.00	28.31	10.14	0.07	0.02	9.29
07/08	39.21	11.01	26.91	6.17	2.64	23.37	7.78	15.17	0.00	38.07	28.12	0.00	29.65	14.81	0.07	0.25	2.70
08/09	37.27	12.14	15.10	6.23	2.01	21.09	6.89	16.43	0.00	26.98	23.37	0.00	29.37	2.27	0.07	3.35	17.60
09/10	39.48	12.57	18.47	6.40	1.44	20.67	5.64	16.41	0.00	33.68	24.97	0.00	29.51	13.26	0.07	1.87	9.18
10/11	40.63	11.82	16.30	6.74	1.86	24.87	6.76	16.43	0.00	26.24	22.81	0.00	32.83	12.15	0.07	0.28	5.08
11/12	45.27	11.42	23.45	9.34	1.73	19.51	7.06	16.42	0.00	32.36	28.77	0.60	33.72	14.80	0.07	0.00	14.15
12/13	45.20	11.39	18.80	7.16	1.09	27.13	7.89	17.15	0.00	46.75	29.19	0.59	34.31	12.36	0.07	0.27	0.00
Moy	<u>34.09</u>	<u>10.19</u>	<u>26.89</u>	<u>8.29</u>	<u>1.89</u>	<u>23.02</u>	<u>3.58</u>	<u>7.71</u>	<u>1.27</u>	<u>20.20</u>	<u>19.75</u>	<u>4.00</u>	<u>24.39</u>	<u>15.14</u>	<u>0.10</u>	<u>1.92</u>	<u>7.82</u>
%	<u>47.89</u>	<u>14.33</u>	<u>37.78</u>	<u>81.47</u>	<u>18.53</u>	<u>86.55</u>	<u>13.45</u>	<u>26.42</u>	<u>4.35</u>	<u>69.23</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>4.80</u>	<u>95.20</u>	<u>100</u>

2.2.1 Barrage Cheffia :

Les eaux du barrage de Cheffia ont été sollicitées pour trois principaux objectifs, assurant un taux de satisfaction de 74.9 % de la demande globale (en référence à l'objectif initial de l'étude d'APD du barrage). Le volume moyen régularisé est de 71 hm³/an, réparti entre 34 hm³ pour l'alimentation en eau potable (ville de Annaba principalement), 10 hm³ pour l'alimentation en eau industrielle (complexe sidérurgique d'El Hadjar) et enfin 27 hm³ pour l'irrigation (périmètre de Bounamoussa).

Les volumes affectés sont très variables d'une année hydrologique à l'autre (figure 110). Le volume maximum consommé est de 92.3 hm³ en 1992/93 (77.7 % de la réserve en début d'année), assurant un taux de satisfaction de 97.1 %. Le volume minimum consommé est de 44.8 hm³ (enregistré pendant l'année hypersèche de 2001/02) ; malgré un apport hydrologique insignifiant, le taux de satisfaction parvient à atteindre les 47.15 % du fait de la réserve initiale dans la retenue.

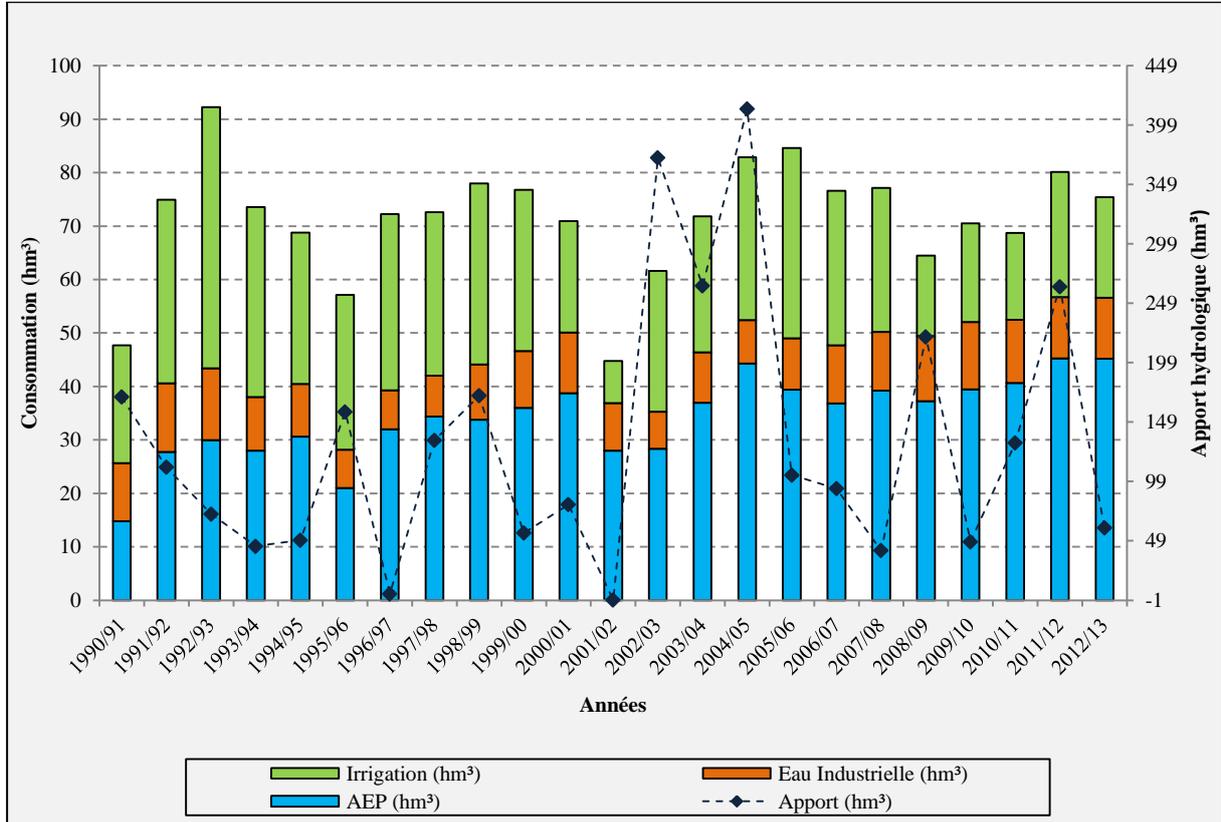


Figure 110 : Variations annuelles par secteur d'utilisation des volumes régularisés du barrage de Cheffia (période : 1990/1991 à 2012/2013).

2.2.2 Barrage Zardezas :

Les consommations totalisent un volume de 10 hm³/an , avec prédominance de l'AEP (8.29 hm³/an) et secondairement l'irrigation du périmètre de Safsaf (1.89 hm³/an). Ce dernier bénéficie d'un apport complémentmtnaitre à partir du barrage de Guénitra. Ces consommations varient d'une année à une autre, avec une augmentation notable observée au cours des trois années humides 2002/03 (15.04 hm³) , 2003/04 (22.10 hm³) et 2004/05 (15.40 hm³) ayant enregistré des apports de l'ordre de 116.73 hm³, 50.21 hm³ et 135.04 hm³ respectivement. Les consommations ont chuté à 4.46 hm³ durant l'année sèche de 2001/02 où l'apport s'est réduit à 4.09 hm³ (figure 111).

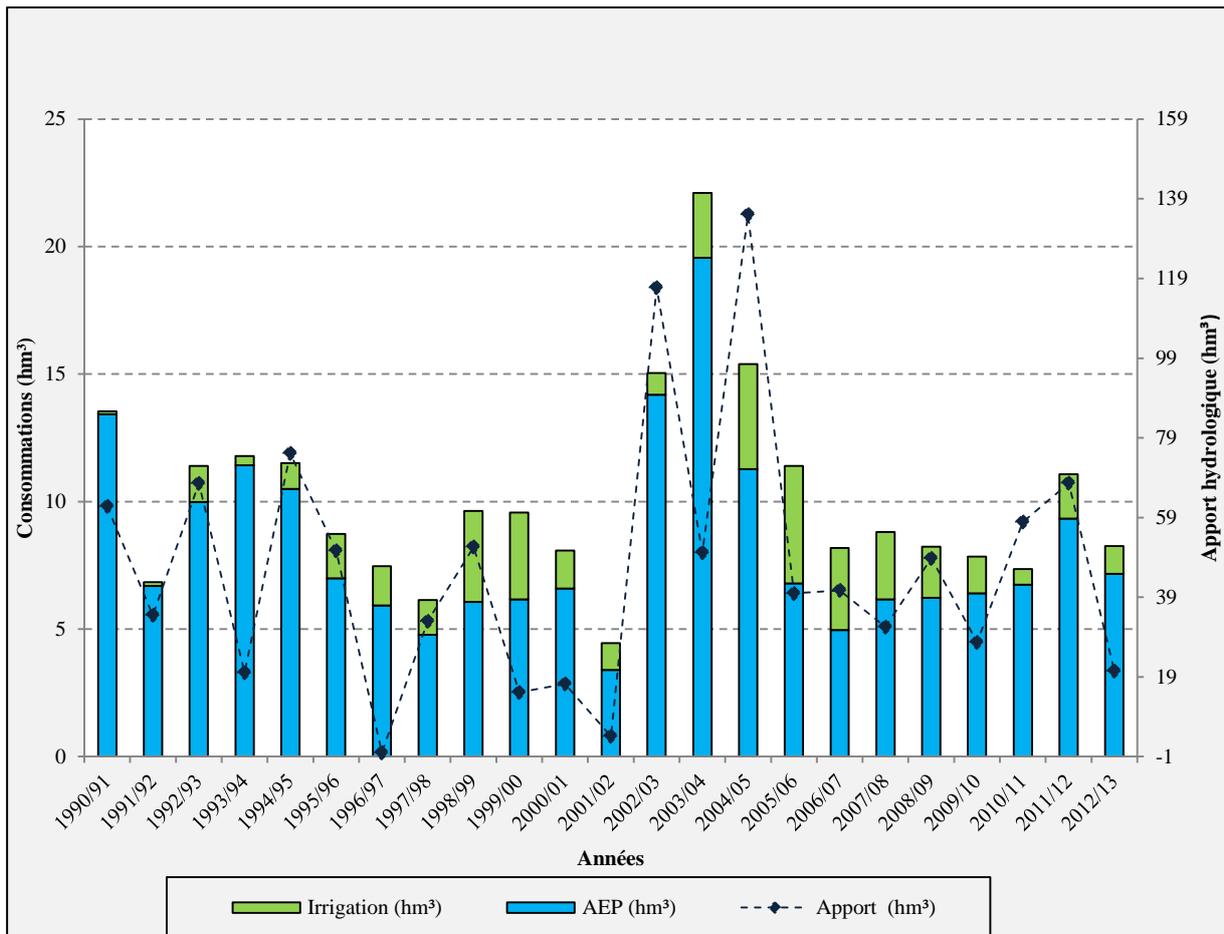


Figure 111 : Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Zardezas (période : 1990/1991 à 2012/2013).

2.2.3 Barrage Guenitra :

L'alimentation en eau potable du couloir Tamalous - Aïn Kechera-Béni Ouelbane-Oum Toub (Ouest de la ville de Skikda) est assurée par le barrage de **Guenitra** sur l'oued Fessa, avec un volume annuel moyen de 23 hm³, soit 60.8 % de l'apport interannuel. Les prélèvements, passent de 1.38 hm³ en année humide (1990/91) à 39.77 hm³ en année sèche (1999/00). Cependant une baisse notable de ces prélèvements est observée au cours des années 2002/03 à 2003/04, à cause du volume très faible qui est resté dans la réserve en début de l'année hydrologique 2002/03 (0.14 hm³) puis celle-ci augmente durant la période de 2004/05 à 2012/13. Par ailleurs, avec l'équipement hydraulique du périmètre irrigué du Safsaf, les prélèvements à des fins d'irrigation ont débuté à partir de l'année 2000/01, soit 16 ans après la mise en eau du barrage. Le minimum enregistré est de 2.65 hm³ en 2002/03 et le maximum est de 11.38 hm³ en 2003/04, année hydrologique abondante (figure 112).

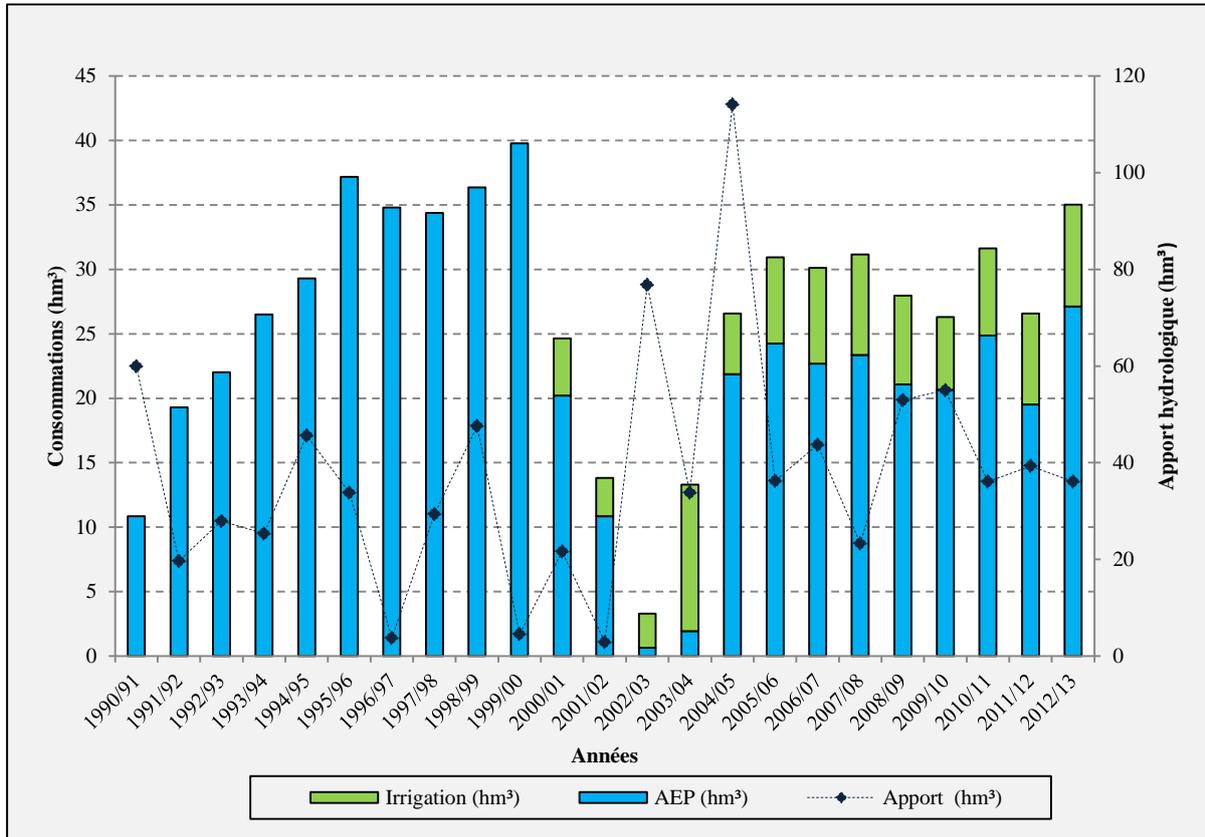


Figure 112 : Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Guénitra (période : 1990/1991 à 2012/2013).

2.2.4 Barrage Hammam Debagh:

Le volume régularisé du barrage de **Hammam Debagh** affecté aux trois secteurs d'utilisation représente moins de 50 % du volume initialement prévu. Le secteur de l'irrigation est prédominant (69.2 %) suivi par l'AEP (26.4 %) et enfin l'industrie (4.4%).

L'alimentation en eau industrielle est apparue au cours des deux années hydrologiques de 1990/91 et de 1995/96, suite à la pénurie d'eau qui a touché la zone industrielle d'Annaba, faisant recours aux eaux abondantes du barrage de Hammam Debagh. La part affectée à l'alimentation en eau potable des petits centres proches du barrage et de l'agglomération de Guelma représente un volume d'environ 8 hm³ en moyenne. Une augmentation progressive des prélèvements pour l'AEP s'observe de 1990/91 à 2012/13, variant entre un minimum de 0.003 en 1992/93, et un maximum de 17.15 hm³ en 2012/13 (figure 113).

Le barrage a commencé à fournir de l'eau pour l'irrigation du périmètre de Guélma-Boucheougouf (superficie équipée totale de 12 200 ha) en mai 1996. Depuis, les volumes destinés à l'irrigation sont très variables d'une année à une autre, le minimum est enregistré en 1995/96 (7.14 hm³ soit 8.01% de l'apport annuel) et le maximum en 2012/13 (46.75 hm³ soit 93% de l'apport annuel).

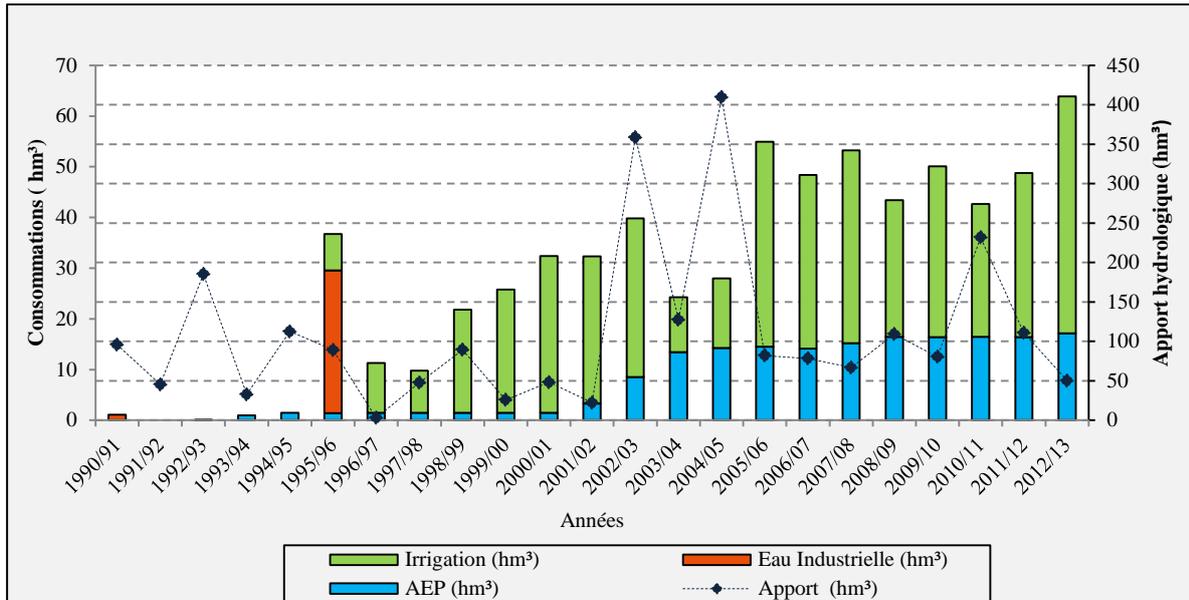


Figure 113 : Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Hammam Debagh (période : 1990/1991 à 2012/2013).

2.2.5 Barrage Ain Dalia:

Les lâchers du barrage **Ain Dalia** sont affectés exclusivement à l'AEP de la ville de Souk Ahras ne dépassant jamais le seuil des 31 hm³ prélevés pendant l'année 2000/01. Le volume moyen régularisé représente 20 hm³, soit une proportion de 49.83 % de l'apport interannuel. Les prélèvements les plus importants s'effectuent pendant les années 1990/91, 2000/01, 2007/08, 2011/12 et 2012/13, alors que les volumes les plus faibles sont enregistrés de 1991/92 jusqu'à 1996/97 (figure 114). Le volume prélevé est relativement modéré pendant l'année humide de 2002/03, ayant enregistré le pic des apports (104 hm³).

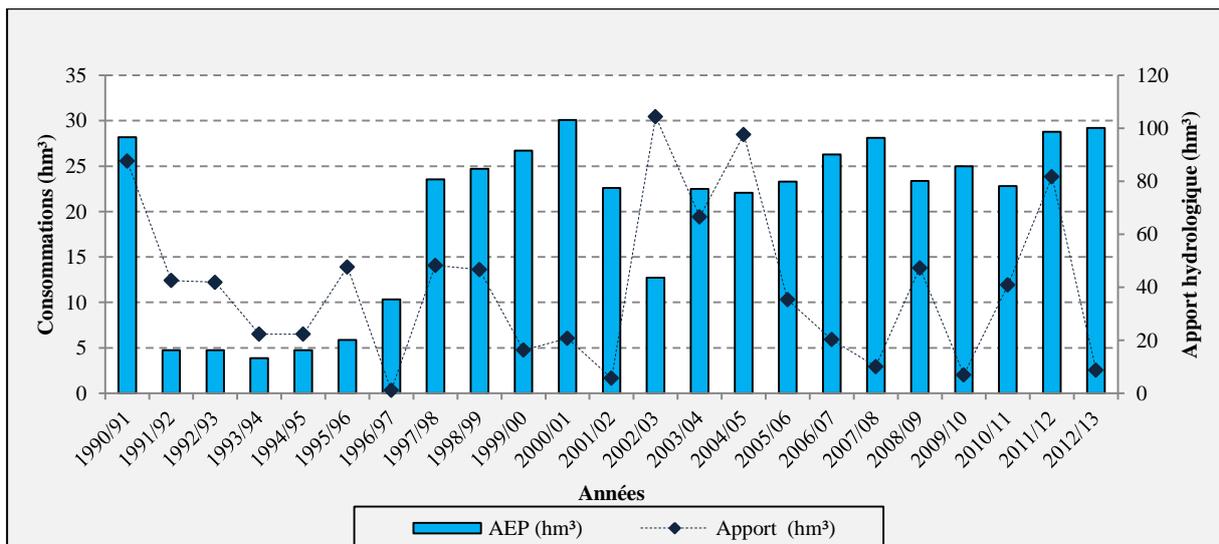


Figure 114 : Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Ain Dalia (période : 1990/1991 à 2012/2013).

2.2.6 Barrage Hammam Grouz:

Le barrage de **Hammam Grouz** a assuré un volume moyen régularisé de 4 hm³/an au profit de l'AEP de la ville de Constantine, représentant 47.4 % de l'apport interannuel et 50.4 % des sorties du barrage. La variation de la distribution des volumes des prélèvements est plus prononcée pour cet ouvrage : au creux prononcé de l'année hypersèche 1996/97, s'oppose le pic remarquable de 2002/03, année caractérisée par des apports de crues exceptionnelles (figure 115). L'absence quasi totale de lâchers au profit de l'AEP à partir de 2005/06, s'explique par la fermeture des vannes du barrage suite aux volumes considérables de fuites d'eau constatées dans la retenue.

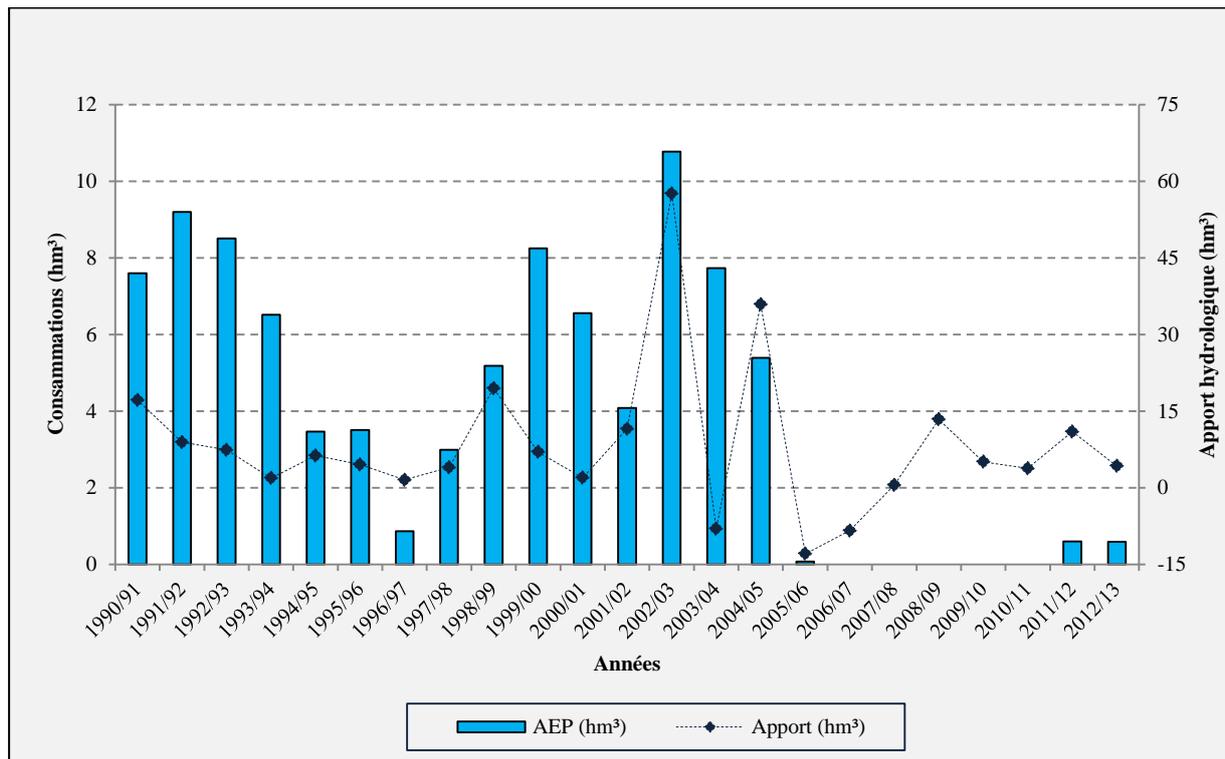


Figure 115 : variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Hammam Grouz (période : 1990/1991 à 2012/2013).

2.2.7 Barrage Ain Zada:

La fourniture en eau potable des villes de Sétif, El Eulma et Bordj Bou Arreridj est assurée par le barrage **Ain Zada**. L'analyse révèle que les volumes annuels des eaux distribués pour l'AEP n'ont jamais atteint le volume régularisé prévu (50 hm³/an). Le maximum de ces volumes a été enregistré en 2012/13 avec 34.31 hm³ (plus de 77 % de l'apport annuel), le minimum a été atteint en 1990/91 avec 10.68 hm³ (plus de 39 % de l'apport annuel) (figure 116). Il faut souligner la diminution des prélèvements (14.85 hm³, soit 11.54 % de l'apport annuel) au cours de l'année fortement pluvieuse de 2002/03 en lien probablement à des problèmes techniques.

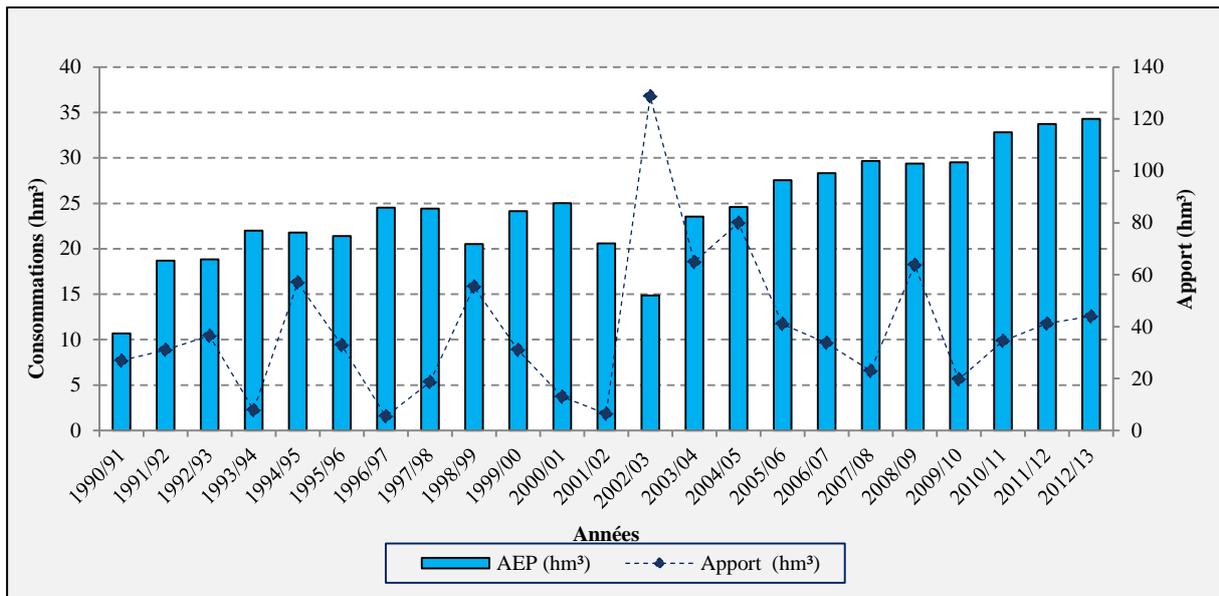


Figure 116 : variations annuelles des volumes regularisés du barrage de Ain Zada (période : 1990/1991 à 2012/2013).

2.2.8 Barrage K'sob:

L'eau du barrage de **K'sob** sert essentiellement à l'irrigation des terres agricoles de la plaine du M'sila (cultures maraichères, céréales et arbres fruitiers). Le volume d'eau moyen prélevé au cours de la période de référence est de 15.14 hm³/an (plus de 35 % de l'apport interannuel), mais connaît-il des variations très importantes (figure 117). Le volume maximum distribué a atteint 22.82 hm³ en 1992/93, et le minimum est de 2.27 hm³ en 2008/09. Cette amplitude s'explique en général par les fluctuations de l'état de la réserve (influencée par les apports) et des quotas d'allocation de la ressource fixés pour chaque campagne d'irrigation.

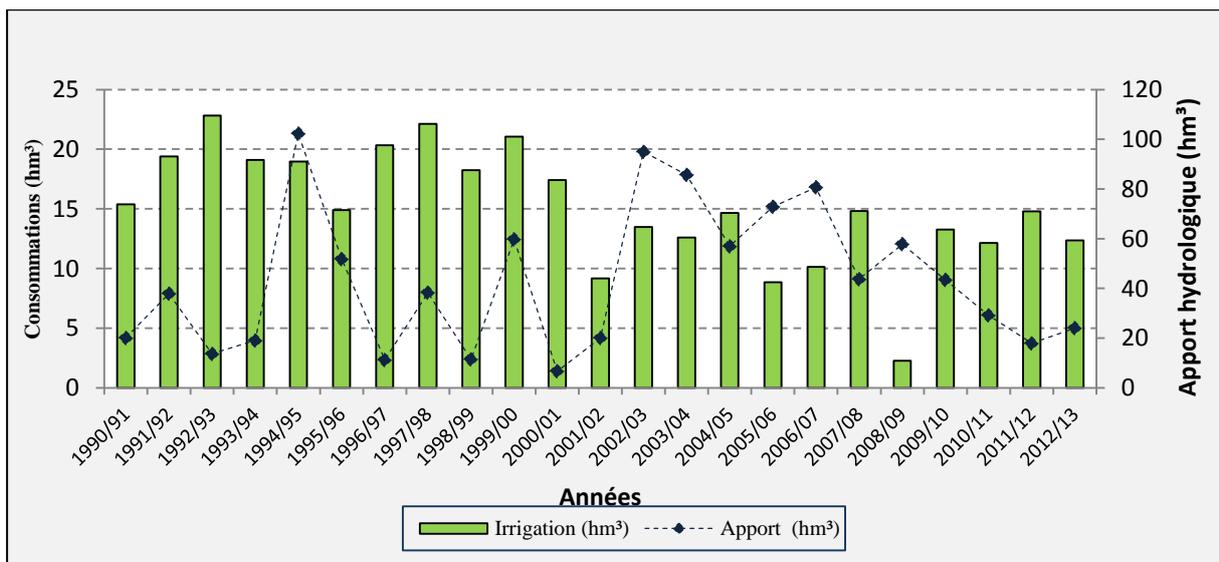


Figure 117 : variations annuelles des volumes regularisés du barrage de K'sob (période : 1990/1991 à 2012/2013).

2.2.9 Barrage Foum El Gueiss:

Les eaux du barrage de **Foum El Gueiss** sont destinées principalement à l'irrigation des terrains agricoles de la plaine de Remila et secondairement à l'AEP de la commune de Kais. En moyenne, le volume total consommé représente 63 % du volume initialement prévu. La majorité des prélèvements est affectée à l'irrigation, avec des variations interannuelles très importantes ($Cv = 186 \%$) (figure 118). Un fort tassement des prélèvements est constaté de 2001/02 à 2007/08 (malgré l'augmentation remarquable des apports de 2001/02 à 2004/05) qui se poursuit jusqu'en 2012/13, en dépit d'une certaine reprise en 2008/09 et 2009/10. La part affectée à l'AEP est très faible et presque constante au cours de la période de référence.

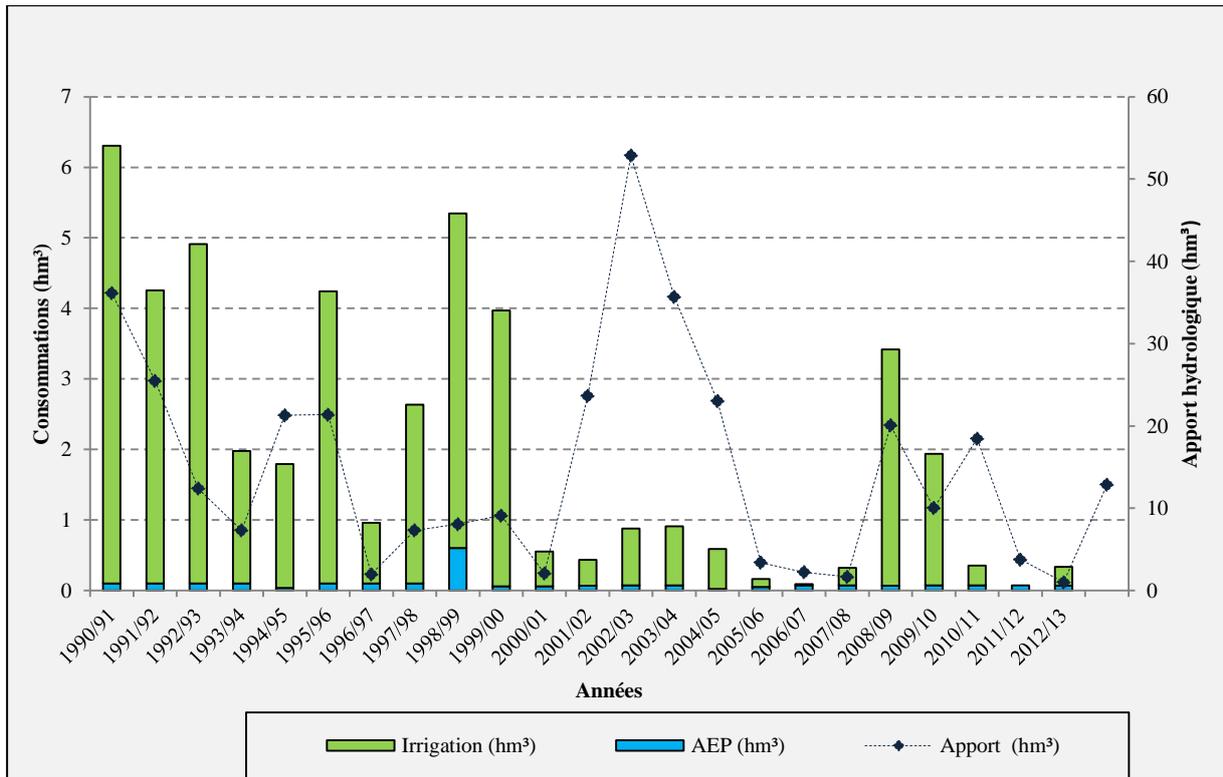


Figure 118 : Variations annuelles des volumes regularisés du barrage de Foum El Gueiss (période : 1990/1991 à 2012/2013).

2.2.10 Barrage Foum El Gherza :

Le barrage de **Foum El Gherza** assure l'irrigation des palmeraies de Sidi Okba, Garta, Seriana et Thouda, avec une variation d'une année à l'autre en fonction des apports (figure 119). Le volume d'eau fourni en moyenne représente 22 % de l'apport total ou encore 21.41 % du volume total des sorties. Le volume alloué à l'irrigation a dépassé le volume regularisé théorique pendant les années 1990/91, 2008/09 et 2011/12. En revanche, pendant les deux années sèches 1993/94 et 2012/13 où le niveau de la réserve a atteint un seuil critique, aucun volume n'a été prélevé au profit de l'irrigation.

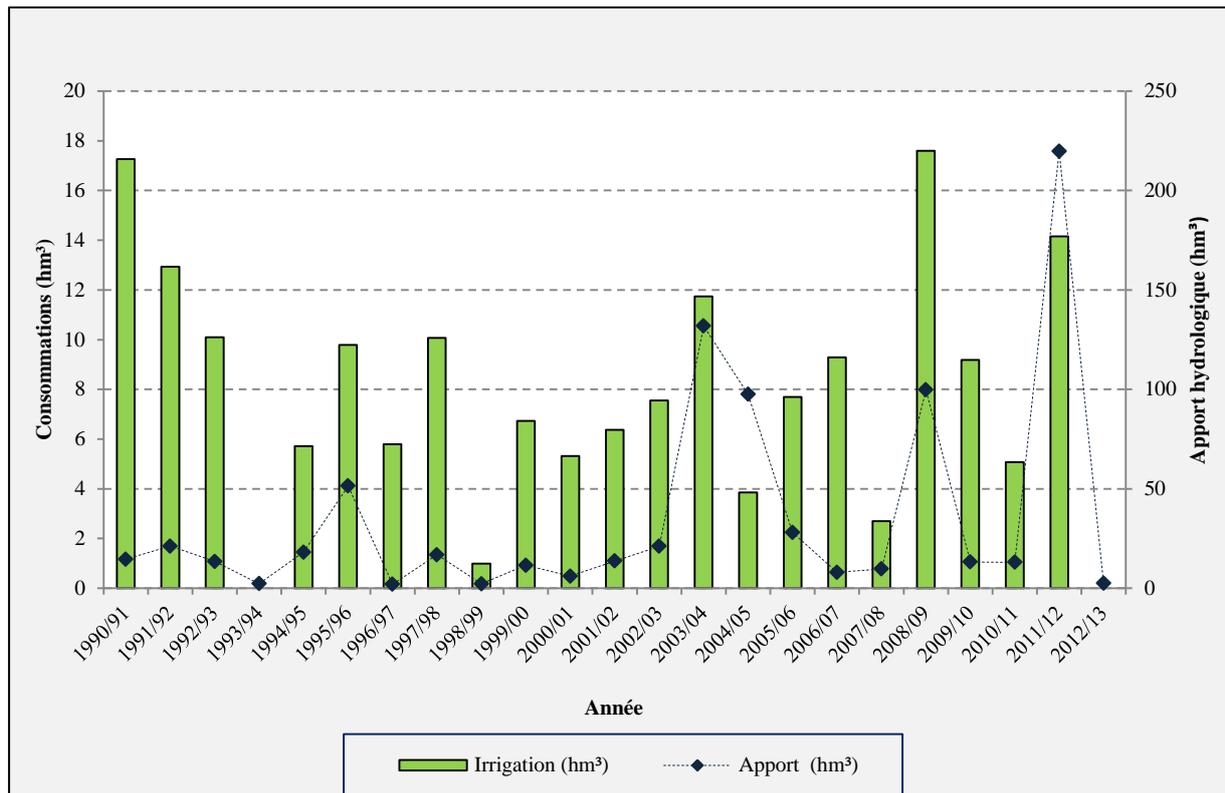


Figure 119 : Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Foum El Gherza (période : 1990/1991 à 2012/2013).

3. VALORISATION DES RESSOURCES EN EAU DES BARRAGES : TRANSFERTS D'EAU ET INTERCONNEXIONS

En vue de pallier à la répartition inégale des ressources en eau à travers le territoire et de fournir l'eau aux régions consommatrices à partir des régions productrices, il est fait recours à des systèmes de transfert qui sont, en général, techniquement complexes (conduites de transfert et d'adduction, stations de pompages, de traitement...) et onéreux. L'interconnexion des barrages est un moyen de rationalisation de la gestion des ressources mobilisées (livraison de l'eau en surplus d'un barrage vers une ou plusieurs autres retenues).

3.1. Les systèmes de transferts d'eau en Algérie

En Algérie, la construction de nouveaux barrages, s'est suivie de la réalisation de grands systèmes de transfert régionaux (avec la tendance vers l'interconnexion des barrages) dans le souci d'améliorer les conditions d'approvisionnement en eau des régions déficitaires.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à cette thématique. **Mebarki (2005, 2006, 2010, 2011)** a exposé et expliqué les principaux réseaux de barrages interconnectés à travers l'Est algérien, de même qu'il a étudié d'une manière détaillée le système de mobilisation et de transfert de Béni Haroun, Ce système complexe, le plus important en Algérie, a été abordé également par **Marouf (2012)** et **Guidoum (2014)**.

En outre, **Cote (2011)**, à l'instar de **Mebarki (2010)**, a souligné les interventions du secteur de l'Hydraulique algérien qui visent à opérer de grands transferts et interconnexions à travers le territoire. Il cite les cas les plus imposants : dans le Constantinois, le grand barrage de Beni Haroun est relayé par 5 autres barrages plus petits, pour desservir une vingtaine de villes et 4 périmètres d'irrigation (38 000 ha) ; dans le Sétifois, les deux barrages Erraguène et Ighil Emda, ne seront plus destinés à l'électricité, mais leurs eaux transférées vers le sud, et desserviront 36 000 ha irrigués et 1.7 millions de personnes ; dans le Centre, les nouveaux barrages de Taksebt et de Koudiat Acerdoun sont intégrés dans le système complexe desservant la capitale et ses annexes ; pour l'Oranie, région ayant le plus souffert du manque d'eau, le MAO (système Mostaganem-Arzew-Oran) connecte les barrages intérieurs, le Chélif et les unités de dessalement, pour desservir les zones urbaines du Nord-Ouest du pays.

Touati (2010) a montré plusieurs exemples de systèmes de barrages interconnectés aux fins d'AEP, nous citons trois exemples, répartis d'Ouest en Est : l'approvisionnement de la ville d'Oran a été initialement assuré par le système interconnecté des barrages de Beni Bahdel et de Sidi Abdelli (partie Ouest) et le triplex hydraulique Ouizert, Fergoug et Bouhanifia (partie Est) ; pour répondre aux gros besoins en eau d'Alger, il a été procédé à l'interconnexion des trois barrages de Ghrib (Ain Defla), Bouroumi et Boukerdane (Tipaza); enfin, pour répondre à la fois aux besoins en eau de la ville de Skikda et de l'irrigation du périmètre Safsaf, le barrage Guenitra a été relié à celui de Zardezas, de même qu'une autre liaison avec le barrage de Zit Emba a été opérée depuis la grande pénurie de 2002.

Les systèmes de transferts et d'interconnexions dans la région Oranie-Chott Chergui sont signalés dans les travaux de **Saci (2008) et Hamlat (2014)** ; ils montrent que le transfert du barrage Cheliff-Kerrada (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 des barrages situés à l'Est de la wilaya d'Oran. **Akli (2015)** a abordé le grand système de fonctionnement et d'approvisionnement en eau des barrages du bassin côtier algérois, et de façon plus détaillée l'interconnexion sur une longueur de 90 km des barrages de Taksebt et de Boudouaou. Par ailleurs, **Boucherit (2016)** s'est intéressé à l'ensemble des interconnexions et transferts d'eau dans la région de Tafna : l'interconnexion entre le barrage Béni Bahdel (oued Tafna) et Sidi Abdelli (oued Isser), le barrage Hammam Bougherara (oued Tafna) et Sidi abdelli (oued Isser) et enfin les deux barrages Sekkak (oued Sekkak) et Mefrouch (oued Mefrouch).

3.2. Les projets structurants dans la région de l'Est Algérien

L'Algérie orientale représente la moitié de la capacité installée des barrages du pays, ce qui a engendré l'insertion de plusieurs systèmes de transfert, avec de longues conduites de transfert et d'adduction. Les sept systèmes considérés par le Ministère des Ressources en Eau comme grands projets structurants sont les suivants (**Mebarki, 2005 ; MRE, 2005 ; PNE, 2010**) (figure 120).

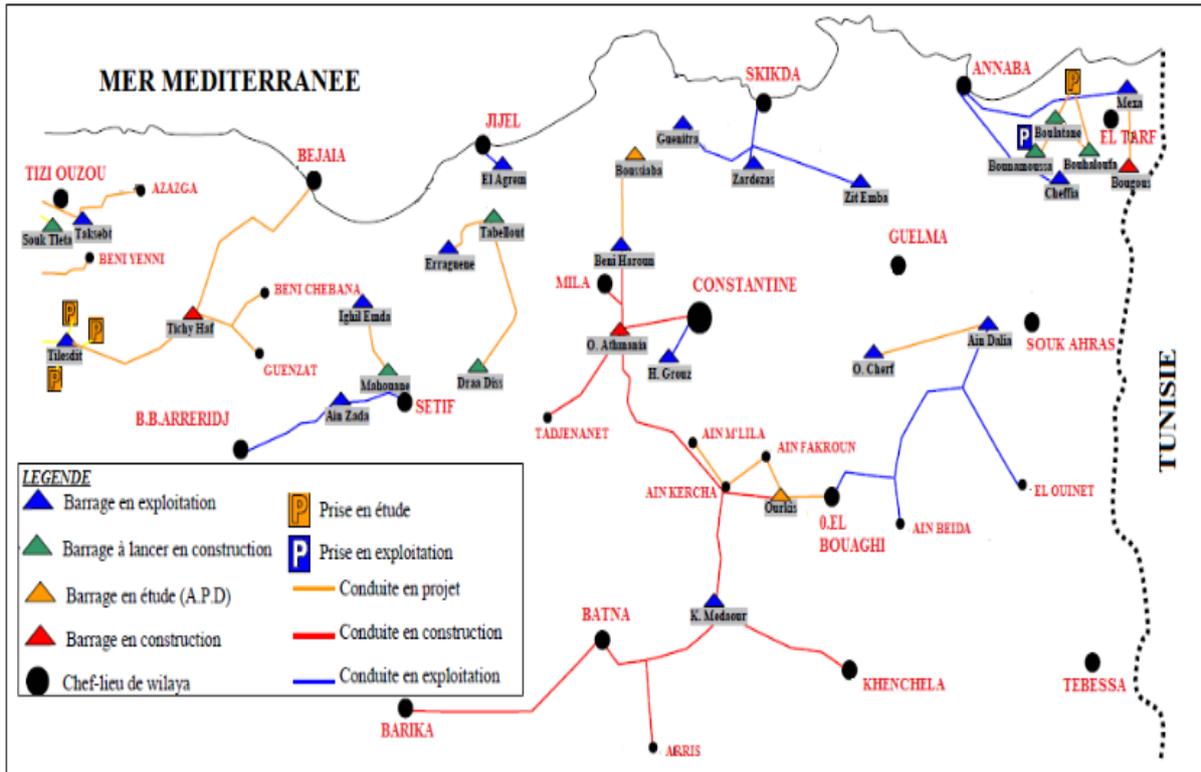


Figure 120 : Grands transferts hydrauliques de l'Est algérien (d'après A.N.B., 2005 in Mebarki)

3.2.1 Le système Mexa-Bougous et Cheffia –Bouhaloufa – Boulatane

Les eaux provenant du barrage de Cheffia (oued Bounamoussa, Nord-Est algérien) sont destinées à l'alimentation en eau potable de la ville côtière de Annaba et l'irrigation du périmètre de Bounamoussa qui occupe la partie Sud-Est de la plaine d'Annaba (superficie de 16500 ha). 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, il a été fait recours au barrage de Mexa aux fins de renforcer l'AEP de Annaba, en plus de l'approvisionnement des villes de El Tarf et El Kala (figure 121). Au système connecté des 2 barrages Mexa - Bougous (ce dernier, d'une capacité de 65 hm³, a été mis en eau en 2010 dans la région frontalière algéro-tunisienne), il est prévu d'ajouter la connexion entre le barrage de Cheffia (en exploitation), et les barrages Bouhaloufa et Boulatane (en construction).

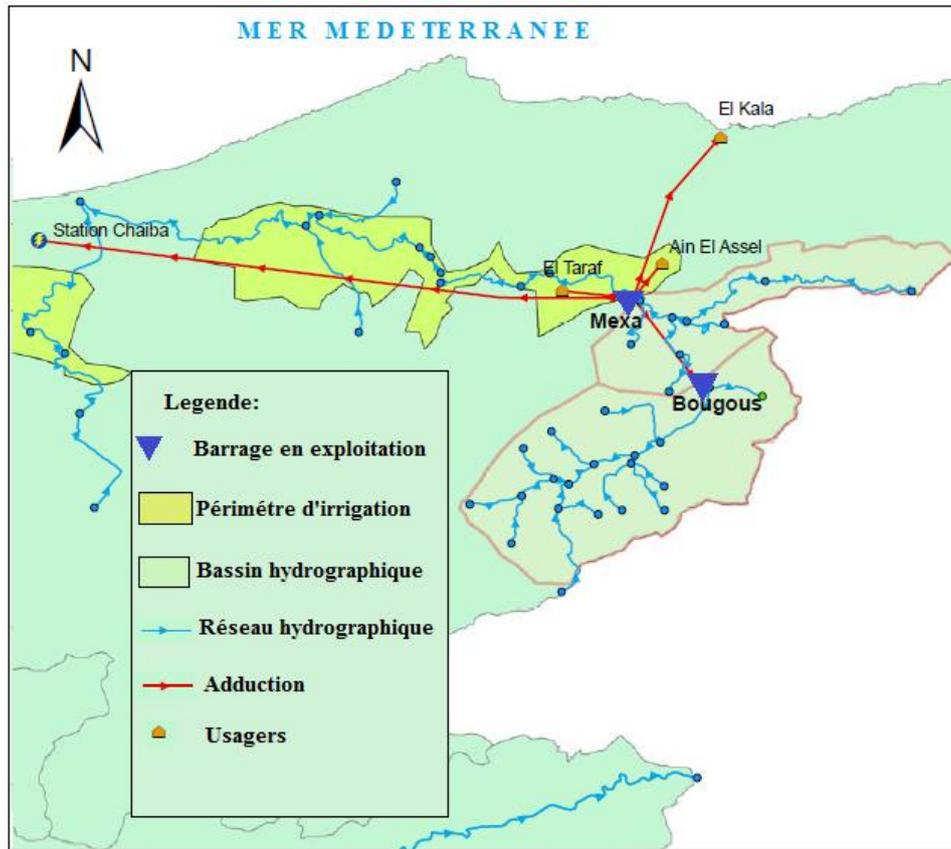


Figure 121 : Schéma du système interconnecté Mexa-Bougous (d'après PNE 2010, modifié)

3.2.2 Le système Ain Dalia –Foum El Khanga

Le système de transfert des eaux du barrage d'Ain Dalia sur l'oued Medjerda, a été réalisé pour répondre aux besoins en eau potable des villes de Souk Ahras, Tebessa et Oum El Bouaghi (figure 122). L'eau brute de la cuvette d'Ain Dalia est acheminée vers trois branches :

- en direction du Nord-Est (Ain Dalia – Souk Ahras), le transfert d'eau traitée par la station de traitement (située à l'aval du barrage Ain Dalia entre les cotes 600 et 650 m), s'effectue par l'intermédiaire de la station de pompage d'Ain Dalia (cinq groupes électropompes : 6500 Kilowatts). Cette station a la possibilité de refouler sur une hauteur de 245 m, un débit de 400 l/s vers le réservoir de Dekma (capacité : 5000 m³, compris entre les cotes 862.50 et 868.5 m). Partant de ce réservoir, l'eau est envoyée par gravité vers le réservoir de distribution à la ville de Souk Ahras, et par piquage vers les localités d'Ain Dalia et d'El Hamri.
- en direction du Sud-Est (Ain Dalia- Tebessa), le transfert a été effectué de façon gravitaire par le biais d'une conduite de 800 mm de diamètre vers la station de reprise El Amri, située à la cote de 797 m. A l'extrémité de cette station, le pompage de l'eau traitée s'effectue vers un réservoir tampon de M'Daourouch (cote : 924 m, capacité : 5000 m³), ensuite l'eau est amenée par gravité aux réservoirs d'oued El Kebarit (cote :

784 m, capacité : 400 m³), Ouenza (alimentant le réservoir de la localité d'Ouled Abbès), et El Aouinet (capacité : 2000 m³).

- en direction du Sud-Ouest (Ain Dalia-Oum El Bouaghi), l'eau est acheminée de façon gravitaire vers les deux réservoirs de Zouabi (capacité : 300 m³) et Sadrata (capacité : 2000 m³). À partir de la station de reprise de Berriche, située entre les cotes 876.20 et 879.20 m, l'eau est relevée par pompage vers les réservoirs de Ain El Beida, Berriche, Ain Babouche et Oum El Bouaghi.

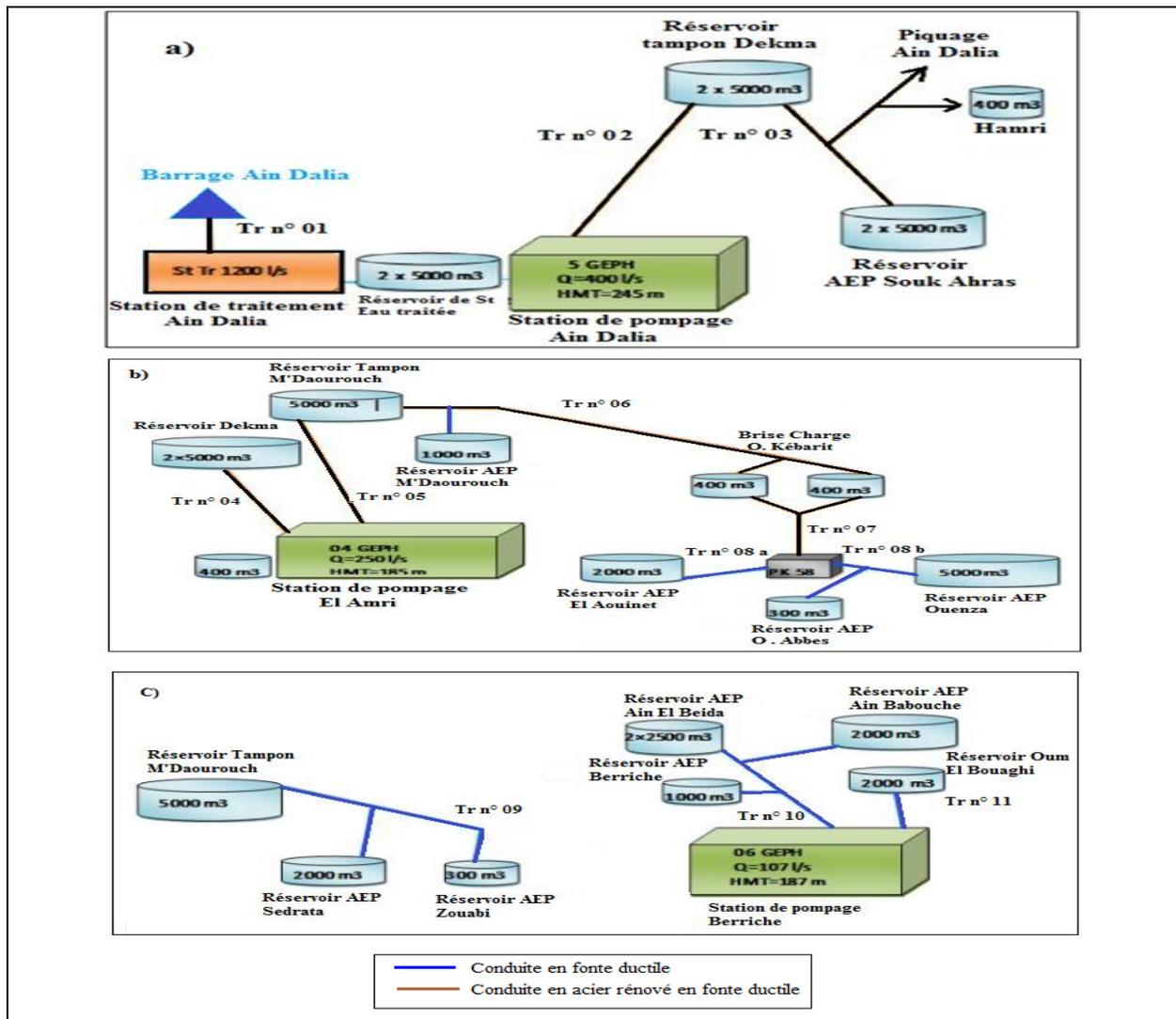


Figure 122 : Schéma du système de transfert des eaux du barrage d'Ain Dalia :
a : Transfert Ain Dalia – Souk Ahras b : Transfert Ain Dalia - Tebessa c : Transfert Ain Dalia-Oum El Bouaghi (ADE Ain Dalia- Souk Ahras, 2015, modifié)

Par ailleurs, le volume d'eau de la retenue d'Ain Dalia ne suffisant plus, en particulier pendant la période de sécheresse, les autorités ont décidé d'établir la mise en connexion entre cet ouvrage et le barrage de Foum El Khanga (oued Cherf, affluent de la Seybouse), et la réalisation d'un nouveau barrage dans la région de Souk Ahras (barrage oued Djedra d'une capacité initiale de 35 hm³).

3.2.3 Le système Zardezas-Guénitra-Zit Emba face aux besoins pressants de la ville de Skikda

Les ressources en eau approvisionnant les différents secteurs d'utilisateurs de la région de Skikda proviennent essentiellement de quatre barrages :

- l'ancien barrage de Zardezas sur l'oued Saf Saf, destiné à l'alimentation en eau potable des communes Emdjez Edchich, El Harrouche, Ain Bouziane et Zardezas, il est également envisagé de fournir l'eau d'irrigation nécessaire au périmètre de Saf Saf ;
- le barrage de Guénitra sur l'oued Fessa destiné à l'irrigation de la plaine de Saf Saf mais aussi à l'AEP des communes de Skikda, Hammadi Krouma, El Hadaik, Sidi Mezghich et Oum Toub, ainsi que l'alimentation en eau des unités industrielles de Skikda ;
- le barrage de Béni Zid sur l'oued Guergoura destiné principalement à l'alimentation en eau potable des communes de Béni Zid, Kerkara, Coll, Cheraia et également à l'irrigation des terres de la plaine de Collo ;
- le barrage de Zit Emba sur l'oued Hammam, destiné à l'alimentation en eau potable des communes de Azzaba, Ain Charchar, Es -Sabt, Djendel et aussi à l'irrigation du périmètre de Zit Emba (6500 ha).

Malgré ces ressources, la croissance démographique et les besoins en eau induits par le développement industriel et agricole ; la ville de Skikda et sa région ont toujours connu des problèmes liés à l'insuffisance des quantités d'eau affectées à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation. Face à cette situation, l'Agence Nationale des Barrages et Transferts a procédé à la réalisation d'un système interconnecté entre le barrage de Zardezas (capacité totale : 31 hm³), et le barrage de Guénitra (capacité totale : 125 hm³). 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). À l'aide d'un nombre important des conduites, l'eau traitée par ces stations sera relevé par pompage vers des réservoirs, d'un volume variant entre 500 m³ (réservoir 5, entre les cotes 209 et 213 m) et 2900 m³ (réservoir 2, entre les cotes 142 et 147 m), ensuite vers la vanne de jonction Salah Bouchaour (figure 123). C'est à travers cette vanne que les eaux des barrages de Guénitra et Zardezas sont transportées sur une longueur de 35 km vers la station de traitement de Hammadi Krouma (mise en service en 1979), d'une capacité de 3600 m³/h, et destinée à alimenter la ville de Skikda et ses unités industrielles.

Suite à la sécheresse de 2002, une autre conduite a été utilisée pour interconnecter ce système au barrage de Zit Emba. L'eau brute de cet ouvrage sera envoyée par pompage, sur une longueur de 25 km, vers un réservoir tampon, puis vers la station de traitement de Hammadi Krouma (vanne d'interconnexion de trois barrages).

Chapitre 6: Barrages, volumes regularises et transferts inter-bassins.
Vers un système d'aménagement interconnecté

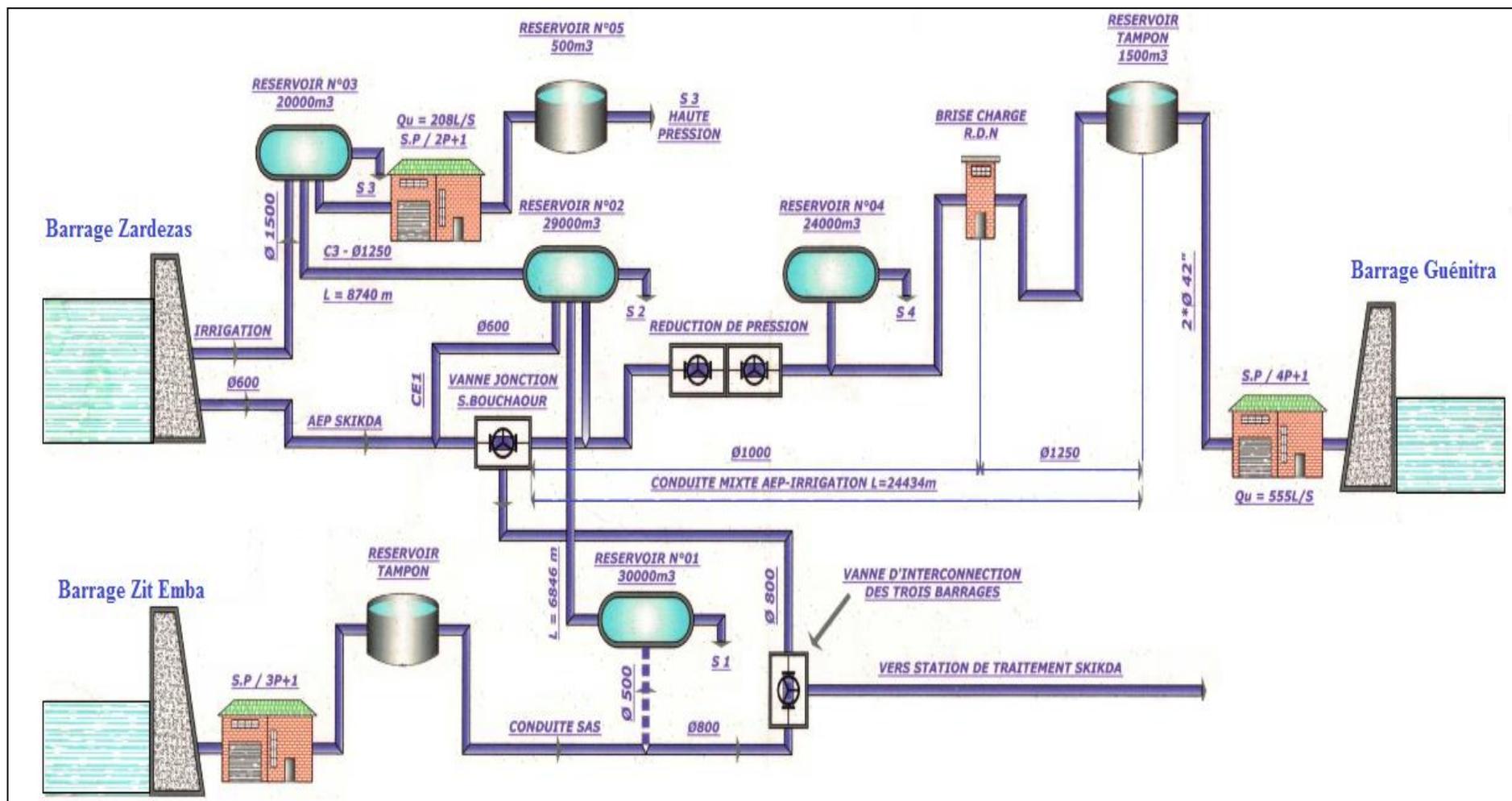


Figure 123 : Schéma du système interconnecté des barrages Zardezas, Guénitra et Zit Emba (ONID Skikda et ANB Zardezas, 2019).

Par ailleurs, ce système interconnecté est exploité pour irriguer le périmètre du Saf Saf (mis en service en 1985). Ce périmètre couvre une superficie de 5654 ha et son réseau de distribution s'étend sur une longueur de 135 km linéaires, avec un réseau de drainage de 19.1 km (Khelfaoui, 2014). Il comporte quatre secteurs d'irrigation (secteur Skikda : 1720 ha, secteur Salah Bouchaour : 1609 ha, secteur El Harrouch : 1023 ha, secteur Emjez Edchich : 1302 ha) qui sont équipés d'un réseau de distribution sous pression, le mode d'arrosage dominant étant l'aspersion (384 bornes d'irrigation).

L'alimentation en eau du périmètre s'effectue à partir des eaux régularisées des barrages de Zardézas, Guénitra et Zit Emba (figure 124). En 2010, les volumes d'eau alloués au profit de l'irrigation sont de l'ordre de 26 millions de m³ dont le barrage de Guénitra contribue un volume de 15 hm³ (soit 57 %), 6 hm³ à partir du barrage de Zardézas, et un volume de 5 hm³ est prélevé à partir du barrage de Zit el Emba.

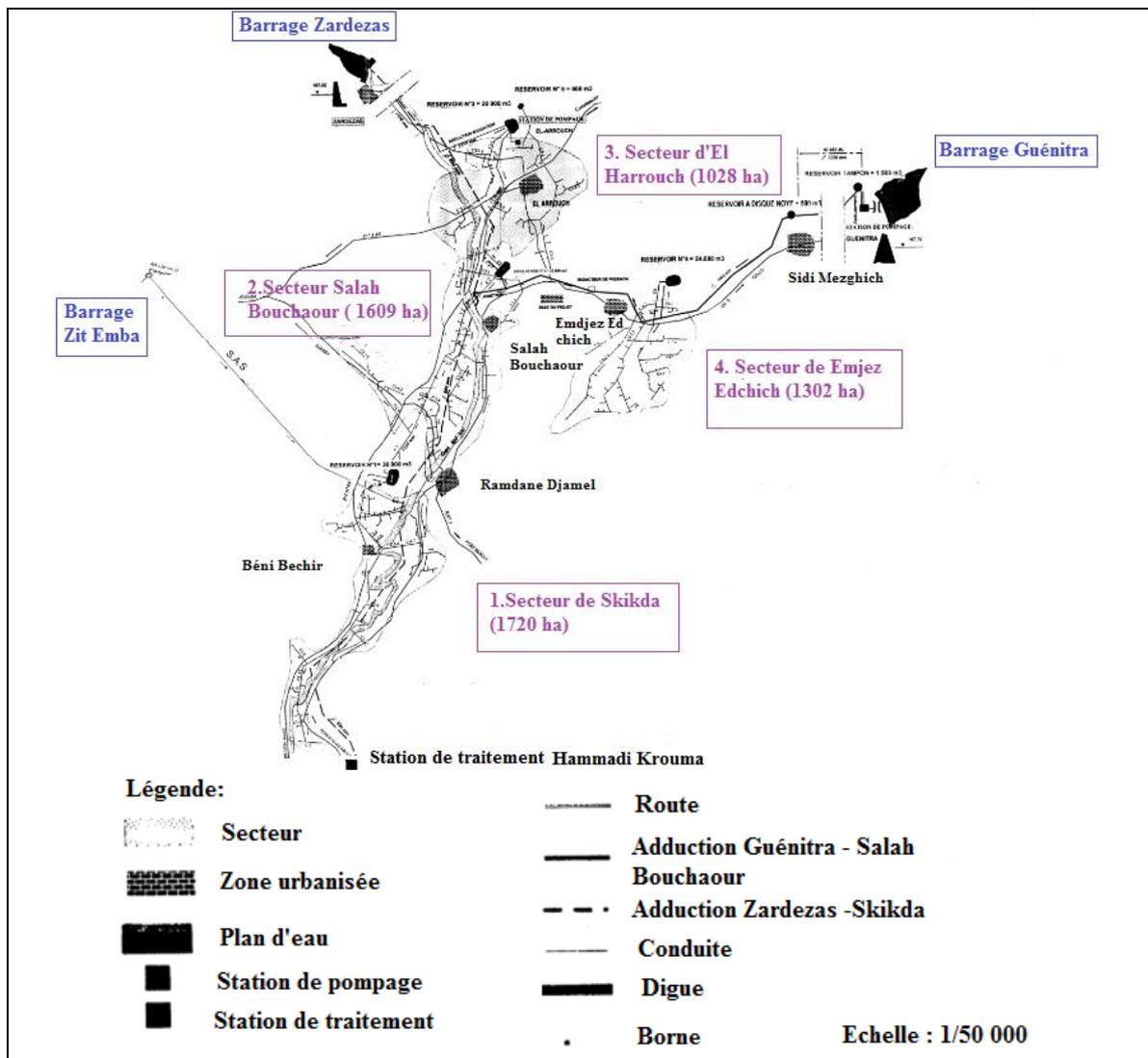


Figure 124 : Schéma du périmètre de la vallée Saf Saf et de la plaine d'Emjez Edchich (d'après AGID, 2002, modifié).

3.2.4 Le complexe de Béni Haroun :

Le système de transfert des eaux régularisées par le barrage de Béni Haroun (963 millions de m³) vise à renforcer l'alimentation en eau potable et industrielle de plusieurs agglomérations dans les wilayates de Constantine, Mila, Jijel, Oum El Bouaghi, Khenchela, et Batna, et l'irrigation des terres agricoles dans les Hautes Plaines sud-constantinoises. Il s'est confronté à des contraintes techniques liées aux longues distances que ce transfert devait parcourir, mais aussi les altitudes qui se traduisent par d'importantes hauteurs de refoulement d'eau (**Mebarki et al, 2008**).

L'important système de transfert repose sur l'interconnexion de cinq barrages (les deux barrages pivots Béni Haroun et Boussiaba et les trois barrages de compensation Oued Athmenia, Koudiat Medouar et Ourkiss), trois stations de pompage d'eau brute dont la plus principale est celle de Béni Haroun d'une puissance de 180 mégawatts refoulant 23 m³/s sur une hauteur de 702 m, trois stations de traitement d'une production totale de 598 000 m³ par jour, plus de 600 km de conduites d'adductions dont 175 km pour le transfert et 452 km pour l'adduction AEP, six couloirs d'alimentation en eau potable, et quatre périmètres d'irrigation d'une superficie globale de 40 000 hectares (Teleghma, Chemora, Batna-Ain Touta et Touffana-Remila).

Le tracé d'ensemble de ce système s'est décomposé en deux principales destinations (**Mebarki, 2005 et 2010 ; ANBT, 2019**) :

- le transfert Nord (Constantine-Mila) assure l'alimentation des quinze agglomérations dans la wilaya de Mila (Ferdjioua, Oued Endja, Rouached, Zeghaïa, S.Merouane, Grarem Goua, Tiberguent, Ahmed Rachedi, Yahya Benguecha, Chelghoum el Aïd, Oued Athmania, Teleghma, Oued Seguin, et Tadjenanet) et trois dans la wilaya de Constantine (Ain Smara, el Khroub, et Constantine-chef-lieu). L'eau de la retenue de Béni Haroun est pompée vers le bassin de compensation d'Aïn Tinn (20 000 m³ de capacité) à l'aide d'une conduite métallique d'une longueur de 11.4 km et d'un diamètre de 1.9-2.6 M, l'acheminement de ces eaux vers le réservoir tampon de Oued Athménia sur l'oued El Kaim (capacité totale : 33.6 hm³, volume utile : 25 millions de m³) se fait par alimentation gravitaire à l'aide d'un tunnel d'une longueur de 6.4 km et d'un diamètre de 3.9 m (figure 125).

- le transfert Sud (les 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 (capacité : 70 hm³, volume utile : 65 hm³ compris entre les cotes 881 et 902.5 m), assurent l'alimentation en eau potable des villes de Ain Fakroun, Ain Beida, Oum Al 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 (69 hm³ de capacité).

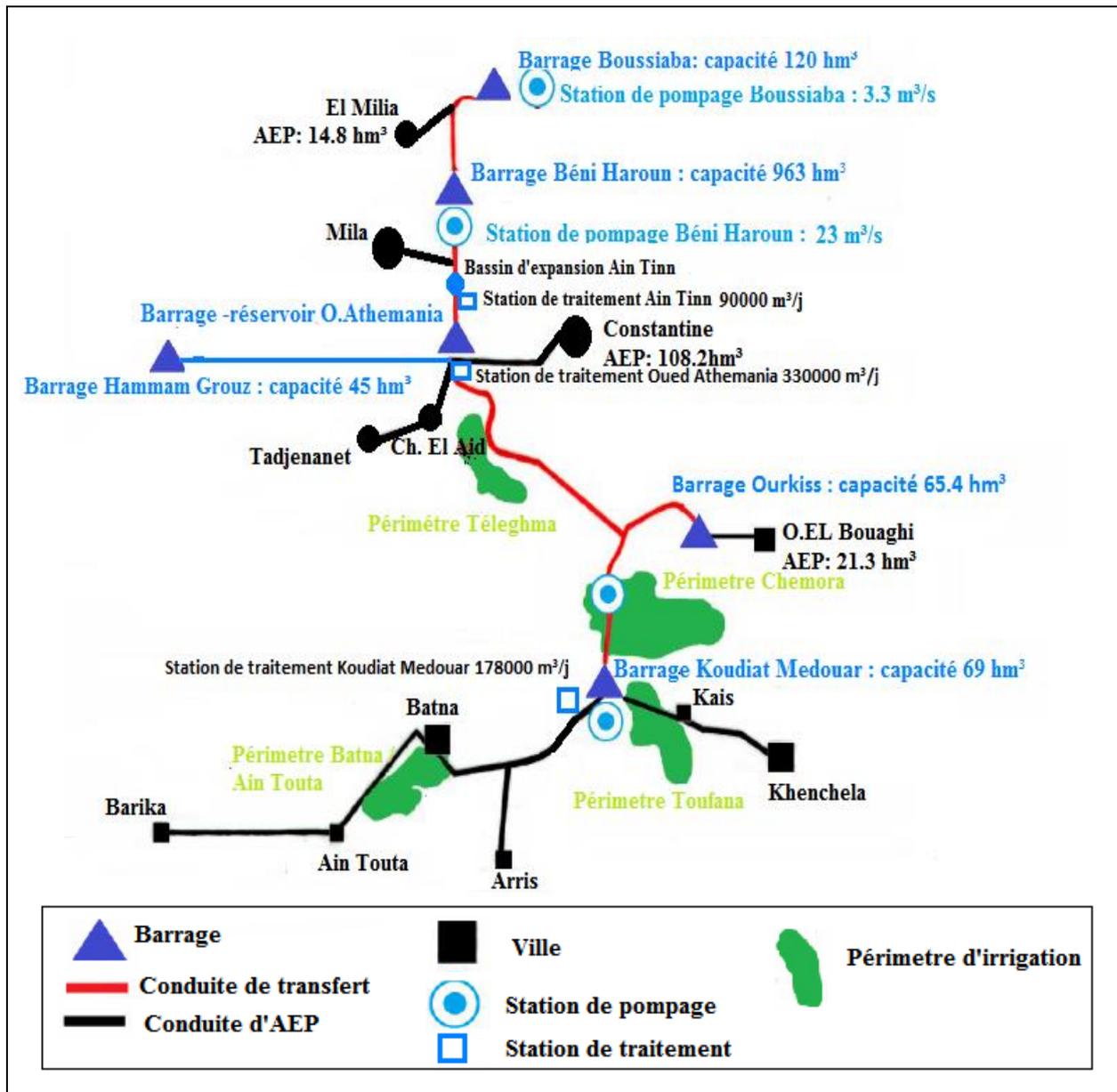


Figure 125 : Schéma régional du transfert hydraulique de Beni Haroun (d'après ANBT 2019, modifié).

3.2.5 Le complexe hydraulique Sétif- Hodna

Le grand transfert hydraulique « Sétif–Hodna », regroupe deux aménagements distincts ; le système Ouest et le système Est (Mebarki, 2010 ; PNE, 2010 ; ANB, 2019) (figure 126). L'aile Ouest s'appuie essentiellement sur le transfert des eaux régularisées du barrage Ighil Emda par pompage vers le réservoir de Mahouane (hauteur : 90 m , capacité : 147 hm³) ; l'objectif est de transférer annuellement un volume de 119 millions de m³, dont 30 hm³ destinés à l'alimentation en eau potable de la ville de Sétif et des agglomérations avoisinantes et 89 hm³ affectés à l'irrigation des terres agricoles des Hautes Plaines Sétifiennes (35 000 ha) ; l'aile Est s'appuie, quant à elle, sur l'eau de la retenue d'Erraguène , relevée par gravitaire

vers la retenue de Tabellout (hauteur : 120 m , capacité : 294.40 hm³), puis transférée par pompage vers la retenue de Drâa Diss (hauteur : 76 m , capacité : 137 hm³), cette aile permet de distribuer annuellement un volume de 189 millions de m³, soit 20% destinés à l'alimentation en eau potable des agglomérations de la région d'El Eulma et 80% affectés au profit de l'irrigation de terres agricoles de la région .

À signaler que les deux barrages Ighil Emda et Erraguene, réalisés pour faire face à la pénurie d'énergie, seront mis aux fins d'irriguer les terres agricoles (30 000 ha), et d'alimenter en eau potable les centres urbains de la région de Setif-El Eulma.

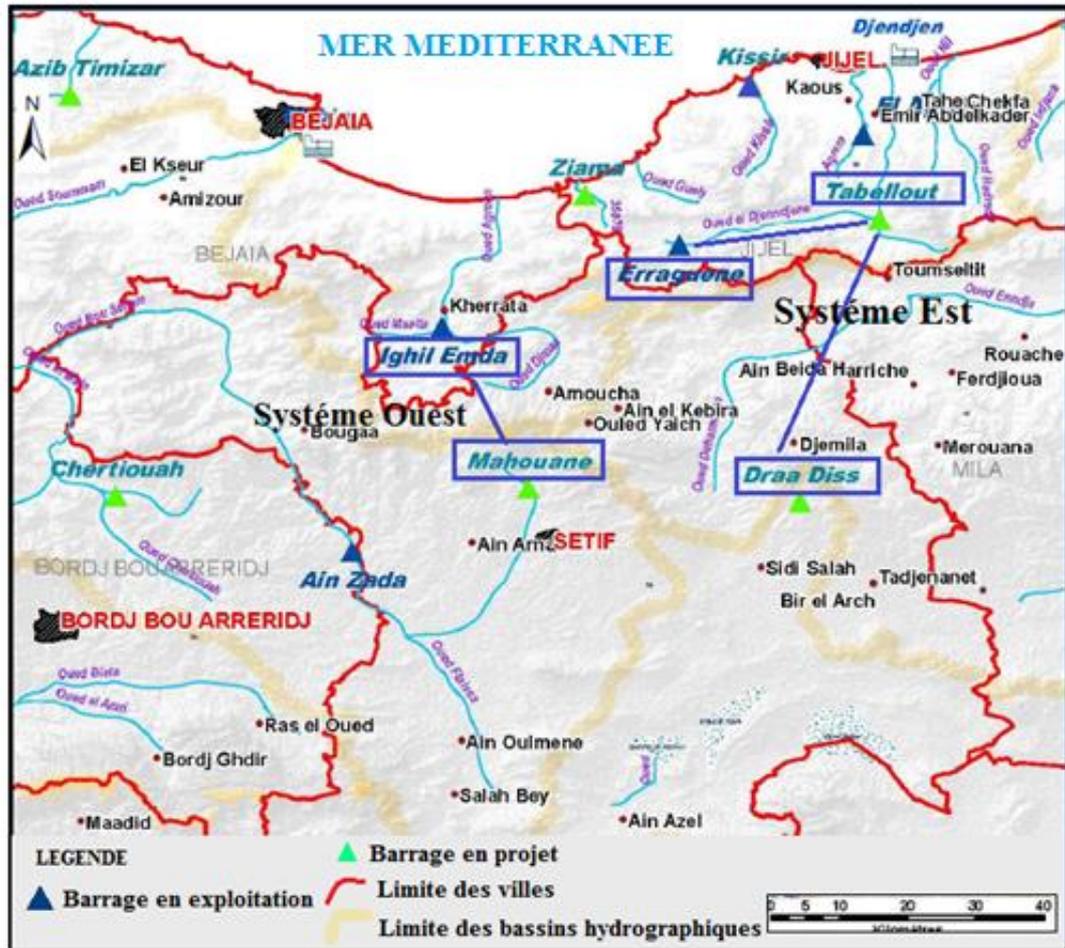


Figure 126 : Situation générale du système Sétif Hodna (PNE, 2010, modifié)

3.2.5.1. Le système Ouest : schéma de transfert Ighil emda – Mahouane

Une première tranche de l'aménagement est constituée de deux barrages en interconnexion (Ighil Emda et Mahouane), et englobe en outre trois stations de pompage, (une puissance totale de 52 120 kw), et 22.40 kilomètres de conduites de 1800 mm de diamètre.

L'importance des hauteurs de refoulement d'eau du Nord vers le Sud imposée par la configuration du relief a conduit à découper le transfert en trois tronçons de dénivelées équivalentes. Le premier tronçon, entre la station de pompage qui est implantée sur le flanc sud de la retenue d'Ighil Emda et la deuxième station de pompage, la conduite de transfert de

ce tronçon (longueur : 5.09 km) se dirige vers le Sud-Est pour rejoindre les abords de la localité de Mechta Tabia à proximité de laquelle est implantée la deuxième station de pompage. Le deuxième tronçon, entre la station de pompage 2 et la station de pompage 3, se compose d'une conduite d'une longueur de 4.95 km. Enfin, sur le troisième tronçon, entre la station de pompage 3 et le réservoir de Mahouane (en construction), la conduite d'adduction aboutit vers le talweg de l'oued Guessar (affluent de l'oued Bousellam), en extrémité amont de la retenue de Mahouane (figure 127).

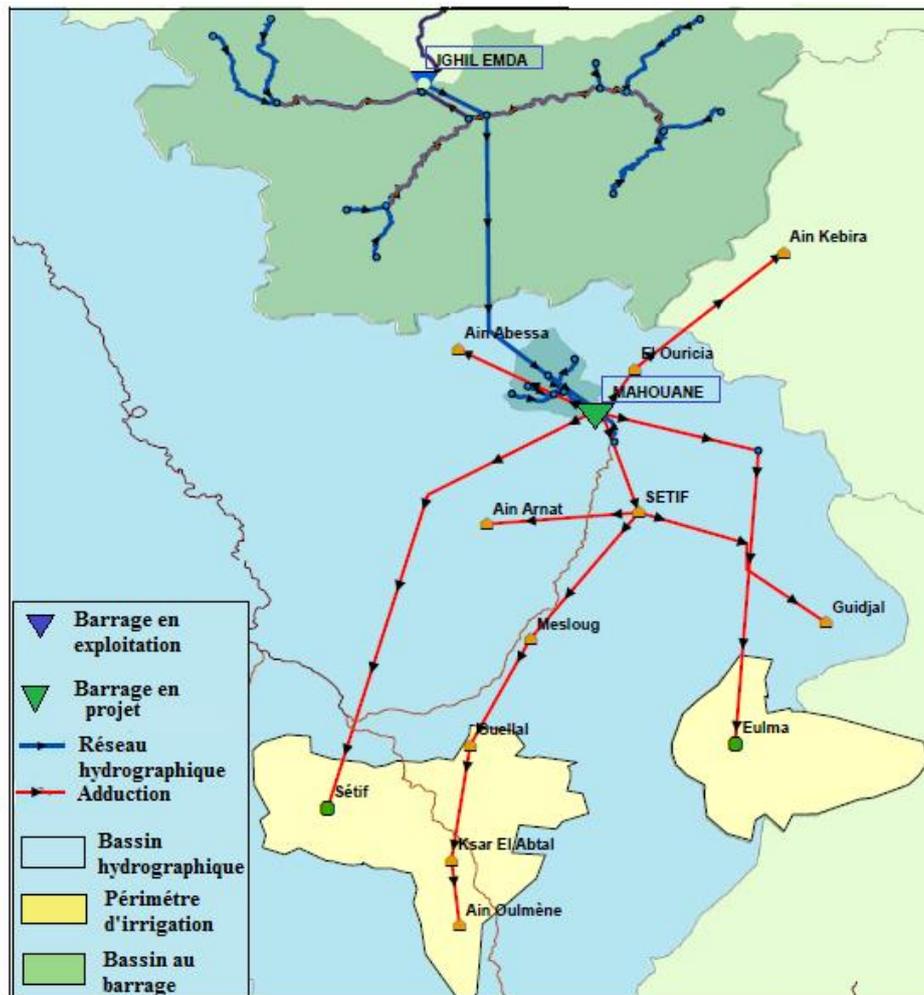


Figure 127 : Schéma du transfert Ighil Emda – Mahouane (d'après PNE 2010, modifié)

3.2.5.2. Le système Est : schéma de transfert Erraguene – Drâa Diss

Le système Est s'appuie sur trois barrages Erraguene, Tabellout et Drâa Diss, cinq stations de pompage, un tunnel de 13 km et plus de 42 km de conduite de transfert et d'adduction. Les principaux éléments hydrauliques du transfert sont illustrés par le schéma synoptique de la figure 128. Le transfert des eaux régularisées du barrage d'Erraguene se fait gravitairement vers le barrage intermédiaire de Tabellout, situé dans la région de Jijel à la confluence des oueds Djendjen et Raha (ce barrage avec d 294 millions de m³ de capacité, fait partie des cinq plus grands ouvrages hydrauliques d'Algérie). Puis, le pompage depuis cette retenue se fait vers la retenue de Drâa Diss (oued Medjez, région de El Eulma).

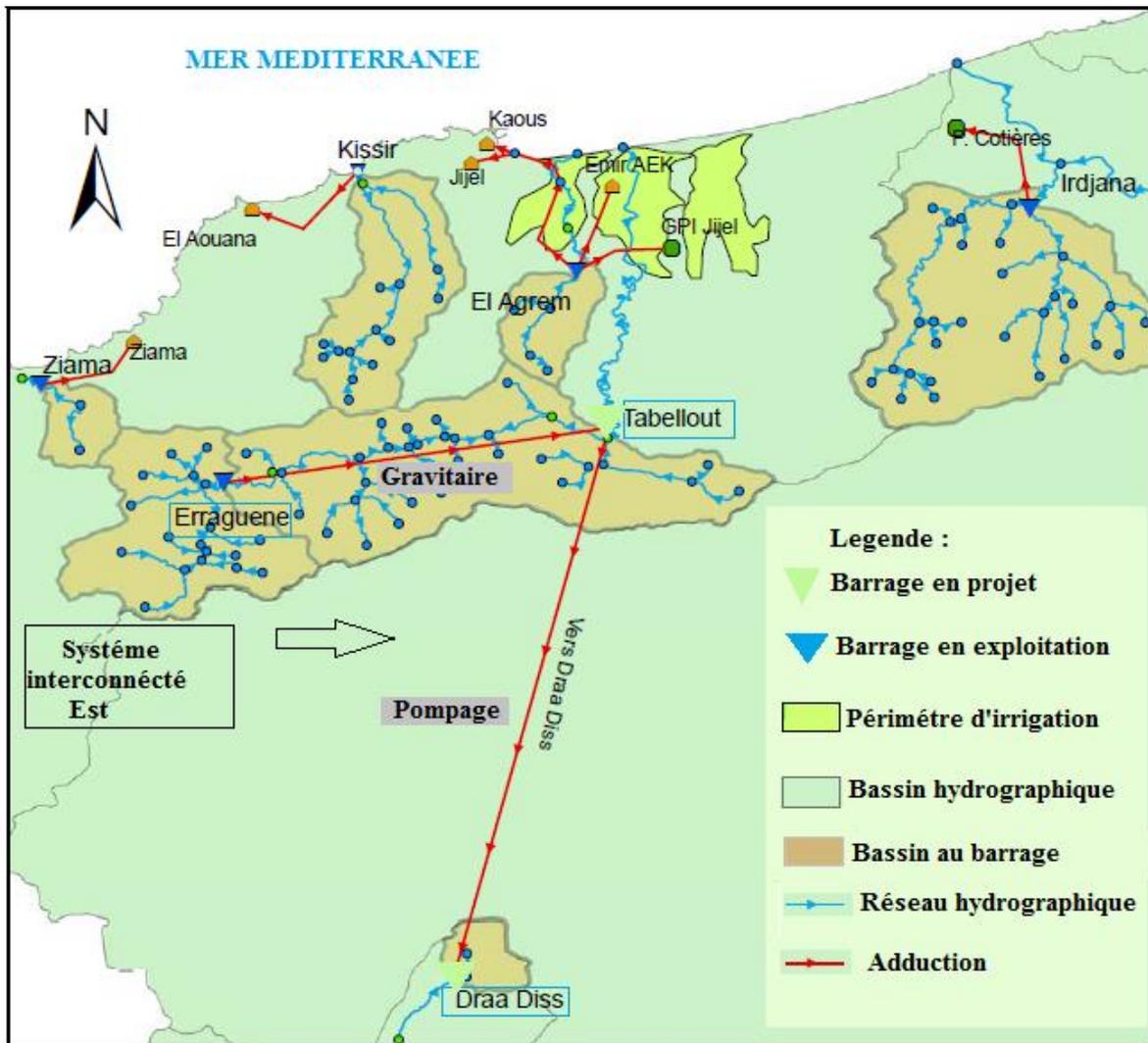


Figure 128 : Schéma du transfert Erraguene – Drâa Diss (d'après PNE 2010, modifié)

3.2.6 Le système de transfert Tichy Haf

Le barrage de Tichy Haf permet de transférer annuellement un volume de 47 millions de m³ pour couvrir les besoins en eau potable de la ville de Bejaia (figure 129). Ce système d'alimentation consiste à transférer l'eau brute du barrage de Tichy Haf (oued Boussemam, affluent de la Soummam) vers la station de traitement située à proximité d'Akbou (capacité : 120 000 m³/jour). De la station de traitement, partent les conduites d'adductions qui ont été déployées sur une longueur de 89 km (diamètre variant entre 1000 et 1800 mm pour les conduites principales) vers les agglomérations de 24 communes situées le long de la vallée de la Soummam (couloir Akbou-Béjaia). Il est également envisagé de fournir à partir de la retenue de Tichy Haf l'eau d'irrigation nécessaire aux périmètres du Sahel (superficie : 6400 ha). En plus du volume régularisé par la cuvette de Tichy Haf (150 hm³/an), le système se complètera, dans une seconde étape, par la connexion du barrage de Tilesdit (oued Eddous, région de Bouira), apportant un volume complémentaire de 83 hm³/an.



Figure 129 : Schéma du transfert des eaux du barrage de Tichy Haf (d'après ANBT 2017, modifié).

CONCLUSION

L'importance du déficit de la fourniture en eau apparaît à travers l'écart entre le volume régularisé réel (déduit du bilan d'exploitation des eaux emmagasinées dans les barrages) et le volume régularisable (préalablement fixé grâce à des méthodes d'étude de régularisation, basées sur la simulation du bilan d'eau).

A noter que certains barrages n'ont pas atteint leur niveau d'exploitation maximal (Zit Emba, El Agrem, Kissir, Beni Haroun, Oued Cherf et Tichy Haf) ; le barrage Boussiaba n'a procédé à aucune distribution d'eau au cours des 5 premières années de son fonctionnement.

Selon les données de dix barrages ayant fonctionné sur une période commune de 23 ans (1990/91-2012/13), l'écart entre le volume interannuel régularisé (21.03 hm³) et le volume régularisable (37.72 hm³) montre l'importance du déficit de fourniture en eau (44% en moyenne) et sa variation de 24 % au barrage de K'sob et à 75 % au barrage de Hammam Grouz.

A ces variations spatiales du déficit de régularisation, s'ajoutent des variations de la répartition par secteur d'utilisation des volumes régularisés. Les résultats montrent que 58 % des volumes d'eau affectés exclusivement à l'alimentation en eau potable alors que 37 % destinés à l'irrigation et 5 % seulement sont à l'alimentation en eau industrielle. Aussi, le classement des barrages peut se faire selon quatre grands types d'usage : trois barrages sont exploités pour satisfaire les besoins en eau potable (Ain Zada, Hammam Grouz et Ain Dalia), deux barrages affectés exclusivement à l'irrigation (K'sob et Foum El Gherza), trois barrages mixtes, destinés à l'AEP et l'irrigation, et enfin deux barrages à but multiple (AEP, irrigation et AEI).

Le déséquilibre géographique de la ressource en eau à travers l'Est algérien impose la nécessité d'insérer un réseau interconnecté de barrages, facteur structurant de l'espace et d'intégration régionale. La région comporte sept systèmes interconnectés, aménagements à la fois complexes et coûteux. En plus de leur impact régional (au profit des zones semi-arides de l'intérieur notamment); la maîtrise d'une gestion dynamique de niveau de réserve est nécessaire pour faire face aux périodes de sécheresse récurrentes.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse s'inscrit dans une contribution à l'étude du fonctionnement hydrologique des barrages dans la région la plus arrosée de l'Algérie, l'Est algérien. Cette région a connu un programme ambitieux de construction des barrages hydrauliques, totalisant en 2015 une capacité de 3102 hm³. De fortes disparités physiques et climatiques caractérisent les bassins d'alimentation des 25 barrages en exploitation, de même qu'une certaine variété distingue les ouvrages hydrauliques du point de vue de leurs caractéristiques hydrotechniques (digues, ouvrages annexes et lacs de retenue).

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**

Les barrages de l'Est algérien contrôlent une surface drainée globale de 25 224 km². Ils se répartissent à travers de grandes unités physiques contrastées, disposées du Nord au Sud : l'Atlas tellien, les Hautes Plaines et l'Atlas Saharien. L'organisation oro-hydrographique permet également de distinguer les barrages par rapport à leur appartenance aux bassins : les bassins septentrionaux à écoulement exoréique (Côtiers constantinois : 11 barrages, Soummam : 2, Kébir-Rhumel : 3, Seybouse : 2 et Medjerda : 1), et les bassins méridionaux à écoulement endoréique (Hauts Plateaux : 2, Chott Melrhir : 3 et Chott Hodna : 1).

Les bassins de l'Atlas tellien se caractérisent par la prédominance des classes de pentes de 9 à 14 %, 15 à 25 % et supérieure à 25 %. Au Sud de cette zone, le domaine des Hautes Plaines se démarque par la prédominance de la classe de 0 à 4 % ; la classe supérieure à 25 % apparaît seulement dans les monts du Hodna, et enfin les bassins de l'Atlas saharien sont caractérisés par de fortes pentes. S'agissant de l'organisation de l'édifice structural, les bassins étudiés sont caractérisés par la complexité et la diversité des matériaux qui les composent. Le contexte climatique est également marqué par de forts contrastes, avec un climat méditerranéen au Nord et continental subdésertique au Sud. L'examen des cartes des isohyètes, des températures, et des évapotranspirations permet de saisir cette répartition latitudinale irrégulière, de la mer vers l'intérieur.

Pour ce qui concerne l'écoulement, le modèle global à réservoirs « LOIEAU » utilisé par l'ANRH pour la cartographie des apports en eau de surface, a permis d'estimer une lame d'eau écoulee qui varie dans une large gamme, entre 15 mm/an au bassin du barrage Foug El Gherza (Piémont Sud des Aurès) à 501 mm/an au bassin du barrage d'Erraguene (Petite Kabylie). Les ressources potentielles en eau de surface de 25 bassins sont quantifiées autour de 2 milliards de m³ par an. Aussi, la comparaison des apports en eau de surface calculés à l'aide de la modélisation avec ceux obtenus par les études d'avant-projet détaillé (APD) des barrages, montre que des écarts importants sont constatés pour certaines retenues, pouvant aller du simple au double.

- **Variété des caractéristiques hydrotechniques**

Les différents barrages se répartissent selon la nature de leur digue principale, en deux grands types : 18 barrages souples, répartis entre barrages en terre (15) et barrages en enrochement (3), et 7 barrages rigides, en béton ou en maçonnerie, répartis entre barrages de type poids (5) et barrages à multivoûtes (2). Ils sont dotés d'ouvrages annexes nécessaires à leur sécurité et à leur fonctionnement productif. Pour l'ouvrage de l'évacuateur de crue, dont le débit maximum de laminage varie de 142 m³/s au barrage El Agrem à 13700 m³/s au barrage Béni Haroun, la majorité de barrages comprennent un déversoir à seuil libre alors que d'autres sont dotés de types différents, comme le barrage Cheffia équipé d'un évacuateur principal et secondaire de type vanné (vanne cylindrique), et le barrage Hammam Debagh équipé de deux évacuateurs de crue en puits de section circulaire. Par ailleurs, les ouvrages de vidange sont dimensionnés pour des débits très variables, de 21 m³/s (barrage Fontaines des Gazelles) à 700 m³/s (barrage Béni Haroun) en passant par des valeurs moyennes de 300 m³/s (Foum El Khanga). Enfin, les prises d'eau comportent trois niveaux pour la plupart des ouvrages. Les lacs de barrages ont des capacités très différenciées, variant entre 3 hm³ au petit barrage de Foum El Gueiss et 963 hm³ au grand barrage de Béni Haroun. Aussi, le volume régularisable (théorique) des barrages est très variable, allant de 3.2 hm³ par an (Foum El Gueiss) à 435 hm³ par an (Béni Haroun). Les valeurs du ratio capacité /volume régularisable dépassent pour la quasi-totalité des retenues la valeur de 1 pouvant aller jusqu'à 5.23 (barrage Foum El Khanga sur oued Cherf) ; ce dimensionnement de grandes capacités de stockage répond au souci de faire face aux risques d'occurrence d'années sèches (régularisation interannuelle).

- **Caractérisation statistique de la variabilité hydrologique des barrages (apports, réserves et précipitations)**

La variabilité des bilans d'eau des barrages est suffisamment appréhendée sur dix barrages, de capacité variable (de 3 à 200 hm³) et dont la répartition géographique est représentative du contexte climatique très contrasté (du climat humide au climat aride) de l'Est algérien.

L'apport moyen annuel varie entre 8.44 hm³ au barrage Hammam Grouz (le haut Rhumel) et 132.6 hm³ au barrage Cheffia (oued Bounamoussa). Les précipitations moyennes annuelles mesurées sur le site des barrages varient entre 125.7 mm (barrage Foum El Gherza, Piémont Sud des Aurès) et 805.8 mm (barrage Cheffia, Tell maritime). En conséquence, les valeurs moyennes des réserves en eau en fin d'année, sont très disparates (0.6 hm³ au barrage Foum El Gueiss, 135.6 hm³ au barrage Hammam Debagh). Certains barrages se démarquent par l'apparition d'affluents négatifs, traduisant une perte de capacité des retenues, bien supérieure à la somme des défluent. Ils sont dus à des phénomènes de fuites karstiques (cas des barrages Hammam Grouz, Zardezas et K'sob).

La caractérisation de la variabilité temporelle est affinée par une approche basée sur la détection des changements potentiels dans les enregistrements hydroclimatiques (Matrice de Bertin) d'une part, et par la méthode des ondelettes pour l'identification des principaux modes

de variabilité des apports et des précipitations, d'autre part. Les résultats de la matrice Bertin indiquent une forte relation entre les paramètres étudiés (apport, pluie et taux de remplissage), exprimées graphiquement et statistiquement. Le caractère sévère de la sécheresse apparaît entre 1990/1991 à 2001/2002 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 barrages par la transformée en ondelettes indique que cette évolution est structurée par plusieurs modes de variabilité, cinq modes en particulier : 1 an, 1-2 ans, 2- 4 ans, 4-8 ans et 8-12 ans. De la même manière pour les apports, la variabilité est marquée par des fluctuations différentes : le cycle hydrologique annuel et les fluctuations d'échelle interannuelle à 1-2 ans, 2-3 ans , 2-4 ans , 4-8 ans, 5-12 ans et 8-12 ans. Des changements dans la composition spectrale sont également observés : le changement majeur observé dans les apports dès l'année 2002/03 est également observé dans les pluies. Trois périodes sont globalement identifiées pour les apports : avant 2001/02, entre 2002/03 et 2006/07, et après 2006/07. Les mêmes périodes ont été identifiées dans les pluies, avec de petits décalages dans les années. Enfin, l'étude de la relation entre apport/pluie par cohérence en ondelettes a montré que les principaux modes de variabilité des apports et des pluies sont fortement similaires pour chacun des barrages (fréquence, occurrence temporelle et amplitude). Sur la cohérence totale, trois groupes de barrages se distinguent : Guenitra, Zardezas, Cheffia, Hammam Debagh et Ain Dalia (premier groupe) très fortement influencés par les pluies (supérieure à 80 %) ; Ain Zada, Foum El Gherza et Foum El Gueiss (deuxième groupe) fortement influencés (entre 70 et 80 %) et enfin le troisième groupe, composé des deux barrages Hammam Grouz et K'sob, est assez fortement influencé par les précipitations (inférieure à 70 %).

- **Liens potentiels de la variabilité hydrologique des barrages avec les oscillations climatiques**

La détermination des relations possibles entre les modes de variabilité des apports et pluies et les fluctuations climatiques à large échelle est précisée au moyen de la comparaison avec l'indice pertinent de la NAO (North Atlantic Oscillation). Les résultats indiquent une influence sur les apports et les pluies pour tous les barrages. La variabilité des apports et des pluies apparaît reliée pour moitié à la variabilité de l'indice climatique NAO, avec une cohérence totale allant d'un minimum observé à 44.3 % (barrage Foum El Gueiss), à un maximum de 56.9 % (barrage Ain Dalia) pour les apports et une cohérence totale allant d'un minimum observé à 51.5 % (barrage Ain Zada), à un maximum de 61.8 % (barrage Ain Dalia) pour les pluies. Le reste de la variabilité peut alors être lié à d'autres indices climatiques, mais aussi au climat local et à d'autres paramètres physiographiques des bassins d'alimentation des barrages.

- **Importance des pertes en eau et des volumes évacués soustraits aux volumes régularisables**

Les pertes (évaporation, fuites) et les volumes évacués (déversements de crue, vidanges de

fond) constituent un phénomène irrégulier et complexe ; les facteurs mis en jeu étant nombreux et interdépendants. L'évaporation est une contrainte majeure pour les barrages de la région, notamment ceux situés sur le piémont Sud de l'Atlas saharien où les moyennes interannuelles des évaporations peuvent atteindre un maximum de 2668 mm (barrage Foum El Gherza).

L'étude de fuites s'avère prioritaire, car ce phénomène peut mettre en danger la stabilité du barrage et affecter sévèrement le volume régularisé. La présence de formations karstifiées assez développées sur les sites d'implantations (cuvette et rives de la digue), explique en grande partie ces pertes (cas Foum El Gherza et de Hammam Grouz). Selon les données disponibles sur l'échantillon de dix barrages, les volumes moyens interannuels des fuites d'eau conduisent à séparer trois groupes de barrages dans la région de l'Est : les barrages de Zardezas, Hammam Debagh, K'sob et Foum El Gherza qui ont des fuites supérieures à un million de m³. Un deuxième groupe composé des barrages de Guénitra, Ain Dalia, Hammam Grouz et Foum El Gueiss qui ont des fuites inférieures à un million de m³, enfin le dernier groupe (barrages Cheffia et Ain Zada), est non concerné par les fuites.

Par ailleurs, les moyennes interannuelles de déversement de crue et de vidange de fond se caractérisent par leurs nuances spatiales et temporelles remarquables : les volumes sont plus élevés au niveau des barrages Cheffia, Hammam Debagh, ils sont moyens dans les barrages de Zardezas, K'sob, Foum El Gueiss et Foum El Gherza, et ils sont faibles dans les barrages de Guénitra, Ain Dalia, Hammam Grouz, Ain Zada. Les volumes évacués sont liés à l'importance des crues dans l'année et aux valeurs atteintes par les débits maximaux instantanés. L'étude de cas de barrages a permis de comprendre l'augmentation remarquable des volumes évacués pendant les années d'abondance hydrologique exceptionnelle (l'année 2011/12 pour les barrages Foum El Gherza et Cheffia, l'année 2004/05 pour les barrages Zardezas et Cheffia).

- **Ampleur et rythme de la sédimentation des barrages**

Comme partout au Maghreb, dans l'Est algérien, l'envasement constitue, par son importance, un problème majeur pour la sécurité des barrages, leur durée de vie et par conséquent pour l'utilisation de la ressource en eau mobilisée. Pour une vision plus fine de l'envasement et l'explication des différentes phases d'évolution de la capacité et de la tranche morte, l'intérêt des mesures bathymétriques est évident ainsi que l'examen de l'évolution dans le temps des courbes de remplissage (capacité –surface- hauteur) des barrages.

En 2004, les dépôts vaseux accumulés au fond des retenues de 19 barrages depuis leur date respective de mise en eau, avoisinent 231 hm³, soit une perte de 15.66 % de leur capacité totale installée. En 2014, l'envasement de 22 barrages a atteint 328.5 hm³. Le stade d'envasement est très avancé pour certains barrages (Foum El Gherza et Foum El Gueiss comblés respectivement à plus de 76 % et 90 %). En outre, des barrages de création récente (Béni Haroun, Boussiaba, El Agrem, Bougous, Tichy Haf et Koudiat Medouar) d'une capacité totale de 1331 hm³, montrent déjà des signes d'un envasement à un rythme

relativement rapide. Pour lutter contre l'envasement et prolonger la vie des barrages, l'organisme gestionnaire a appliqué des moyens complémentaires : la surélévation de ses digues des barrages (K'sob, Zardezas et Foum El Gueiss), le dragage (Foum El Gherza et Foum El Gueiss), le soutirage des sédiments (barrage Ighil Emda), le dragage et le soutirage (barrage K'sob et Zardezas).

- **Volumes d'eau régularisés et importance du déficit de fourniture en eau aux secteurs d'utilisation**

L'importance du déficit de la fourniture en eau apparaît à travers l'écart entre le volume régularisé réel (déduit du bilan d'eau des barrages) et le volume régularisable (préalablement fixé par les études d'APD grâce à des méthodes d'étude de régularisation). Sur la base des données de dix barrages ayant fonctionné sur une période commune de 23 ans (1990/91-2012/13), l'écart entre le volume interannuel régularisé (21.03 hm³) et le volume régularisable (37.72 hm³) montre l'importance du déficit de fourniture en eau (44 % en moyenne) et sa variation de 24 % au barrage de K'sob à 75 % au barrage de Hammam Grouz. Les résultats montrent que 58 % des volumes d'eau régularisés sont affectés à l'alimentation en eau potable (AEP) alors que 37 % sont destinés à l'irrigation et 5 % seulement profitent à l'alimentation en eau industrielle.

- **Perspectives d'un système d'aménagement interconnecté**

Le déséquilibre géographique de la ressource en eau à travers l'Est algérien impose la nécessité d'installer un réseau interconnecté de barrages, élément structurant de l'espace et d'intégration régionale (**Mebarki, 2006**). Sur la base des transferts d'eau des barrages, la région comporte sept systèmes, d'aménagement, à la fois complexes et coûteux. En plus de leur impact régional (notamment au profit des zones semi-arides de l'intérieur); la maîtrise d'une gestion dynamique des réserves d'eau est nécessaire pour faire face aux périodes de sécheresse récurrentes.

Ces résultats ouvrent de nouvelles pistes de recherche afin d'améliorer et approfondir nos connaissances scientifiques sur la problématique hydrologique des barrages de l'Est algérien :

- **Compréhension spécifique de l'impact des facteurs physiques au bassin d'alimentation sur la variabilité hydrologique** : une analyse approfondie sur les facteurs autres que le climat qui jouent sur la variabilité hydrologique, tels que la physiographie des bassins versant autour des lacs de barrage (lithologie, morphologie, couvert végétal ... etc).
- **Impact des facteurs externes (autres indices climatiques) sur la variabilité hydrologique** : une identification de liens potentiels entre la variabilité hydrologique et les autres indices climatiques affectant l'Afrique du nord comme Wemoi (Western Mediterranean Oscillation index) qui est un indice mesurant la différence entre la

pression atmosphérique normalisée enregistrée à Padoue (45.40°N, 11.48°E) dans le nord de l'Italie et celle de San Fernando, Cádiz (36.28°N, 6.12°W) dans le sud-ouest de l'Espagne et soi (Southern oscillation index) qui donne la différence de pression entre Tahiti et Darwin.

- **Modélisation des débits des crues sur un ensemble de barrages pour améliorer la gestion de ces ouvrages:** l'utilisation de modèle HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) nous permet de simuler les hydrogrammes des crues de projet avec le processus de modélisation pluie-débit. Cette modélisation permettrait de minimiser les risques et de mieux gérer les évènements de crue exceptionnels.
- **Etude de l'érosion spécifique des bassins d'alimentation :** Il serait très intéressant de calculer la dégradation spécifique des bassins d'alimentation sur la base des mesures effectuées au niveau des stations hydrométriques gérées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). L'objectif est de comparer ces résultats avec ceux calculés à l'aide des levés bathymétriques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelali S.2013. Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935- 2005): Réactualisation de la carte des précipitations. Thèse de doctorat, Université Hassan II Mohammedia – Casablanca.189 p.
- Abdellaoui B, Merzouk A, Aberkan M, Lbergel J. 2002. Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc). *Revue Science de l'Eau*, 15, 737-748 p.
- Abdelhafid Karim F. 2014.Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien. Magistère en Ecologie et Environnement. Université de Constantine 1 .127p.
- Abid A. 1980. Apports solides et soutirages aux barrages Nebeur sur l'oued Mellegue (1954-1980). Séminaire International d'Experts sur le Dévasement des retenues. Tunis, 1-4 juillet, 13 p.
- Abid M. 1998. Envasement des barrages en Tunisie. Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques (DGBGTH), Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 69 p.
- Affoun Ikhlef S, Mebarki A, Taabni M. 2019. Bilans d'eau et apports de crues exceptionnelles de l'oued bounamoussa, (Algérie orientale) : implications pour la gestion du barrage Cheffia. *Revue de Sciences & Technologie D – N°49*, Constantine. 59-72 p.
- AGID.2002. Schéma du périmètre de la vallée Saf Saf et de la plaine d'Emjez Edchich.Wilaya de Skikda.
- Aidaoui S. 1994. Ressources en eau et aménagement hydro agricole dans la région des Zibans. Thèse de Doctorat. Université de Nancy II. 353 p.
- 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.
- Alazard M, Leduc C, Travic Y, Boulet G, Ben Salem A. 2015. Estimating evaporation in semi-arid areas facing data scarcity: Example of the El Haouareb dam (Merguellil catchment, Central Tunisia). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 265-284p.
- 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.
- A.N.B. (Agence Nationale des Barrages). 1986. Exploitation du barrage de Cheffia. Tableau des mesures 1986 : hauteur -surface -capacité. Etude Geok art.
- A.N.B. (Agence Nationale des Barrages). 2004. Exploitation du barrage de Cheffia, Tableau des mesures 2004 : hauteur-surface-capacité. Etude FUGRO GEOID SAS et LEM.
- ANBT. (Agence Nationale des Barrages et Transferts). 2014. Fiche technique des 25 barrages. Agence National des barrages et de transfert – Alger.
- ANBT. (Agence Nationale des Barrages et Transferts). 2017. Schéma du transfert des eaux du barrage de Tichy Haf.
- A.N.B. (Agence Nationale des Barrages).2018. Exploitation du barrage de Zardezas. Bac colorado installé à proximité de la retenue du barrage de Zardezas.
- A.N.B. (Agence Nationale des Barrages).2019. Exploitation du barrage de Zardezas. Schéma du système interconnecté des barrages Zardezas, Guénitra et Zit Emba.

- ANBT. (Agence Nationale des Barrages et Transferts). 2019. Présentation du système de Béni Haroun.58 p.
- A.N.B. (Agence Nationale des Barrages).2019. Exploitation du barrage d'Ighil Emda. Projet de transfert « Sétif-Hodna ».114 p.
- Anctil F, Coulibaly P. 2004. Wavelet analysis of the interannual variability in southern Québec streamflow. *J. Clim.* 17, 163–173p.
- Anctil F, Pelletier G.2006. Analyse en ondelettes de fluctuations de débit en réseau de distribution d'eau potable. *Revue des sciences de l'eau* .Volume 24, numéro 1, 2011, 1-85 p.
- ANRH .1993.Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500000" (2 feuilles, une notice de 49 p.). Ministère de l'Équipement, éd. I.N.C., 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, Rapport d'étude (ANRH-GTZ), Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Alger, DZ.
- ANRH.2005.Carte des écoulements de surface du Nord de l'Algérie, Ministère des Ressources en Eau, Alger, 1 carte et sa notice de 24 pages.
- Arnaud P, Paquet E, Aubert Y, Royet P., Fine J.A. 2016. Estimation de la distribution de côtes de retenue par simulation stochastique pluie-débit. Cas d'un ouvrage fictif. 25ème Congrès de la Commission Internationales des Grands Barrages/ ICOLD 25th Congress, Jun 2015, Stavanger, Norvège.615-632 p.
- Antoniado T, Besse P, Fougères AL. 2001. L'oscillation atlantique Nord (NAO) et son influence sur le climat européen , *Revue statistique appliquée XLIX* (3).39-60 p
- 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 de doctorat .Université de Nice .France .257 p.
- Athmani H, Boulahdid M, Bouchahm N, Hocini N.2018. Géochimie des métaux traces dans les sédiments du barrage de la fontaine des gazelles, Algérie. *Courrier du Savoir – N°26*, 481-494 p.
- B**adraoui A, Hajji A. 2001. Envasement des retenues de barrages. *Revue la Houille Blanche n° 6/7*. 72 – 75 p.
- Ballais J L. 2010. Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du Bas-Sahara Algérien. *Physio-géo* .vol 4 .2010.107-127p.
- Bekhti B, Errih M, Sidi Adda M. 2012. Modélisation de la sédimentation dans les retenues de barrages en Algérie (barrage Es-Saada) .*Revue de Science et changements planétaires /sécheresse* volume 23 n° 1.38-47p.
- 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.

- Belhadad.H, 2018. Modélisation des écoulements à travers la digue du barrage Ain Zada. Thèse de doctorat .Université de M'sila. 199 p.
- Belhadj M.2017. Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la wilaya de Skikda .Thèse de doctorat en Sciences, Université de Mohamed Khider Biskra .172 p.
- Benabadji N, Bouazza M. 2000. Contribution à une étude bioclimatique de la steppe à Artemisia herba-alba Asso dans l'Oranie (Algérie occidentale). Sécheresse. Vol 11, N° 2, 117-23 p.
- Ben mammou A. 1988a. Envasement de la retenue de Sidi Salem. Journées Tunisienne de Géologie Appliquée 31/5-4/6/1998 Sfax Tunisie.
- Ben mammou A. 1988b. Identification des sédiments piégés dans la retenue de Sidi Salem.1re Journées Tunisiennes de Géologie Appliquée 31/5-4/6/1988 Sfax Tunisie.
- Ben mammou A. 1992. Alluvionnement de la retenue du barrage Nebeur sur l'Oued Mellègue.Notes du Serv. Géol. de Tunisie no 58. 173–184 p.
- Ben mammou A. 1995. Alluvionnement, identification et caractérisation géotechnique des sédiments de la retenue du barrage Sidi Sâad.Bulletin de l'A.I.G.I. no 52. 39–52 p.
- Ben mammou A. 1998. Barrages Nebeur, Sidi Salem, Sidi Saad et Sidi Boubaker. Quantification, étude sédimentologie géotechnique des sédiments piégés. Apports des images satellitaires. Thèse de Doctorat ès-Sciences Géologique, Université de Tunis II, Faculté des Sciences de Tunis, 345p.
- Benblidia M.Salem A.Demmak A.2001. Extraction des sédiments dans les retenues.Revue la Houille Blanche N°6-7 (Octobre 2001). 76-78 p.
- Benchabane N.2015.Relation Barrage-Nappes. Etude de cas : barrage Béni Haroun .Wilaya de Mila. Mémoire de magistere en Hydrogéologie. Université des frères Mentouri Constantine 1.113 p.
- Benfetta H, Remini B. 2008. Les fuites d'eau à travers le barrage algérien d'Ouizert. Revue Sécheresse, Vol 19, n°3. 185-192 p.
- Benfetta H, Ouadja B, Achour B, Remini B. 2016. Perte de capacité dans les barrages situes dans les zones arides et semi arides. Cas des barrages de gargar, bouhanifia, ouizert et foug el gherza. Larhyss journal, issn 1112-3680, n°25. 183-201p.
- Benfetta H, Achour B, Ouadja A. 2017. Les fuites d'eau dans les barrages dans le monde : quelques exemples algériens. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°31. 195-218 p.
- Benkadja R, Benhadouga M, Benkadja A. 2013. Quantification des matières en suspension et valorisation des sédiments de dragage a` l'échelle d'un bassin semi-aride: cas du barrage du k'sob (Algérie). Bulletin Eng Geol Environ 72. 523–531p.
- Benkadja R, Boussag F, Benkadja A.2014. Identification et évaluation du risque d'érosion sur le bassin versant du K'sob (Est Algérien). Bull Eng Geol Environ 74.91–102 p.
- Benkhalel, A., Z. Rezghi, et F. Sakhraoui. 2013. Floods in abiod wadi : analysis of database. Journal, Larhyss, **14**, 179-191 p.
- Bensala M, Benamara L, Hadjel M. 2016. Caractérisation de sédiments du barrage de l'Oued Fodda et leur valorisation comme un ajout artificiel dans le ciment. J. Mater. Environ. Sci. 6 (2) .546-558 p.
- Bertraneu J. 1955. Étude géologique du massif du Bou Taleb (Algérie). Service de la Carte géologique

de l'Algérie.

Binnie et Partners, 1988, Barrage Hammam Grouz, Monographie, Ministère de l'Hydraulique, D.P.R.H., Alger, 46 p.

Boleve A. 2009. Localisation et quantification des zones de fuites dans les digues et les barrages par la méthode du potentiel spontané. Thèse de doctorat .Université de Grenoble .224 p.

Bonsal B.R , Zhang X,Vincent L.A , Hogg W.D. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. J. Clim. 14: 1959–1976 p.

Bouaicha R et Benabdelfadel A. 2010. Variabilité et gestion des eaux de surface au Maroc. Science et changements planétaires –Sècheresse 21 (4).1-5 p

Bouazizi H. 1981. Étude de la salinité et de l'envasement de la retenue du barrage Nebeur sur l'oued Mellegue (Tunisie). Thèse de troisième cycle, Université Franche-Comté, France.168 p.

Bouaziz S, Rebai N .2012.Évolution temporelle de l'envasement du lac Ichkeul par le calcul d'un MNT résiduel, Nord Est de la Tunisie. Géomatique Expert N° 88 .Septembre-Octobre 2012.22-31p.

Bouchelkia H, Remini B. 2003. Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif. Ingénieries. No. 33 p. 45–56 p.

Bouchrit R. 2016. Analyse systémique appliquée aux aménagements hydrauliques. Thèse de doctorat en hydraulique. Université de Tlemcen. 303 p.

Boudjema. 2015. Hydrogéologie, vulnérabilité et modélisation de la nappe du Mio-Pliocène d'El Outaya, (Biskra, Sud-Est algérien). Thèse de doctorat en Sciences, Université Abou bekr belkaïd Tlemcen. 186 p.

Bouhlali M.2006. Les risques associant du barrage. Mémoire magistère. Université Abou Baker belkaïde. Tlemcen .174 p.

Boulahbel S, Mebarki A, 2013.Fonctionnement hydrologique du barrage de béni haroun (oued kébir-rhumel, algérie orientale), ciredd alger. 749-754 p.

Boumessenegh A. 2007. Les inondations dans la ville de BISKRA, Causes et Impacts(Algérie). Thèse Magistère, (option : Mobilisation des ressources hydriques). Université El Hadj Lakhdar-Batna.202 p.

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.

Boussekine M. 2017. Etude de l'aléa « rupture de barrage » qui correspond à la formation d'une onde de submersion, à l'origine d'une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval du barrage hammam grouz - algérie. Thèse de doctorat à l'Université badji mokhtar Annaba. 147 p.

Boutaïb M.1988.Impacts économiques de l'envasement des barrages au Maroc. Acte du séminaire international sur l'aménagement des bassins versants .Direction des eaux et foret. Rabat.

Boutoutaou D, 1995. Évaporation des surfaces des plans d'eau des retenues et barrages en Algérie. Thèse de doctorat en Sciences Techniques, Institut d'hydraulique, Moscou. 200p.

Boutoutoua D, Saker M, Daddi Bouhoun M, SAGGAI S, Ould El Hadj M.2012. Détermination de

- l'évaporation des surfaces des plans d'eau pour les conditions climatiques de l'Algérie. Algerian journal of arid environment, vol. 2, n° 2. 94-101p.
- Braune E. Looser U. 1989, Cost impacts of sediment in South African rivers. IAHS publications. 184:131-143 p.
- Busson G, Cornée A. 1989. Données sur les paléoclimats déduites de la sédimentation continentale du Mésozoïque saharien. Environnements of Mid-Cretaceous Saharan dinosaurs- Elsevier. 37-42p.
- Caire A.1965. Morphotectonique de l'autochtone présaharien et de l'alloctone tellien , revue de la Géogr phys et Géol dyn, vol VII . 267-276 p.
- Cañellas B, Orfila A, Méndez F, Alvarez A.L, Tintoré. J.2010 .Influence of the NAO on the north western Mediterranean wave climate. Sci. Mar., 74. 55-64 p.
- Chabour N.2006. Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie .Thèse de doctorat en géologie. Université de Constantine .177 p.
- Chadi A, Hadji.T.1992. Erosion des sols et envasement des barrages .Revue d'Algérie équipement n°5. 20-25 p.
- Chanson H. 1998. Extrême réservoir sédimentation in Australia : à review. International Journal of Sédiment Research 13(3).55–63 p.
- Chaumont M, Paquin C.1971. Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord, échelle 1/500 000" (4 feuilles et notice).
- Chettih S N, McDougle S D, Ruffolo L I, Medina J F. 2011. Adaptive timing of motor output in the mouse: the role of movement oscillations in eyelid conditioning. Front. Integr. Neurosci. 5-72 p.
- Cherni S, Khelifi S, Louati M .2010.Suivi de l'envasement de la retenue du barrage de nebeur sur l'oued mellegue (le kef). Actes des 17èmes journées scientifiques sur les résultats de la recherche agricoles 16 & 17 décembre. 2010.14 p.
- Chevalier L, Laignel B, Turki I, Lyard F, Lion C. 2014. Hydrological variability from gauging stations and simulated SWOT data, for major French rivers over the past decades, in: EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Chevalier L. 2014. Caractérisation et modélisation de la variabilité hydrologique de l'estuaire de la Seine dans le cadre de la future mission spatiale SWOT (PhD Thesis). Rouen.
- Chevalier L, Laignel B, Turk I, Lyard F, Lion C. 2017. Hydrological Variability from Gauging Stations and Simulated SWOT Data, for Major French Rivers. J. Geosci. Environ. Prot. 5- 54p.
- Claude J, Chartier R. 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie, campagne de 1975. Cahiers ORSTOM., série hydro. vol. XIV, 1. 3-36 p.
- Collins M.J. 2009. Evidence for Changing Flood Risk in New England Since the Late 20th Century. Journal of the American Water Resources Association, 45(2): 279-290 p.
- Côte M., 1998, Les régions bioclimatiques de l'Est algérien, Rhumel, n° 6, 57-71p.
- Côte M.2011. L'Algérie, mondialisation et nouvelles territorialités. Revue géographique des pays méditerranéens n° 116. 77-84 p.

- Coulibaly P, Burn D.H .2004. Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resour. Res.* 40 p.
- Coulibaly P. 2006. Spatial and temporal variability of Canadian seasonal precipitation (1900–2000). *Advances in Water Resources*, 29(12), 1846-1865 p.
- Coyne et Bellier. 1985. Barrage de Djorf-Torba sur l'Oued Guir", Monographie, Bureau de conseils d'ingénierie, Paris.
- Coyne B. 1994. Recherche des fuites sur le parement amont par la méthode des potentiels d'électrofiltration au barrage de Lac Long. Rapport interne ANB Alger. 30 p.
- Cunat P. 2012. Détection et évaluation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par analyse de températures réparties, mesurées par fibre optique. Thèse de Doctorat de l'université de Grenoble. 205p.
- D**ai, A., K. Trenberth, and T. Karl .1998. Global variations in droughts and wet spells: 1900–1995, *Geophysical Research Letters*, 25(17), 3367-3370 p.
- Dallel J.2011.le phénomène de l'oscillation nord atlantique (ona) et la sécheresse en Tunisie.
- Daoud A, Jemmali K, Goguel B, Leclerc S. 2009. Couplage d'un évacuateur vanne avec une tranche de laminage, cas du barrage Sidi Salem en Tunisie, Colloque CFBRSHF: «Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues», Lyon, France.8 p.
- 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.
- Derdous O. 2016. Conditions d'écoulement à l'aval d'un barrage en cas de rupture de la digue- Application aux cas Algériens. Thèse de doctorat. Université d'Annaba, 144 p.
- Dieppois B, Durand A, Fournier M, Massei N. 2013. Links between multidecadal and interdecadal climatic oscillations in the North Atlantic and regional climate variability of northern France and England since the 17th century. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 118, 4359–4372 p.
- Djellouli Y. 1981.Etude climatique et bioclimatique des Hauts Plateaux du Sud-Oranais (Wilaya de Saïda). Thèse Doctorat 3^{ème} Cycle, Université. Sci. Tech. H. Boumediene, Alger. 178p.
- Djemai M.1985. Hydrologie du bassin versant du Haut –Sebaou.Hydrologie des formations alluviales.thèse 3^{ème} Cycle, Université. Sci.Méd.Grenoble, 261 p.
- Djemili L. 2006. Critères de choix de projet des barrages en terre: étanchéité par le masque en béton bitumineux. Thèse de doctorat. Université El Hadj Lakhdar de Batna.
- Drouhin .1951. La sédimentation des barrages réservoirs en Algérie. Quatrième congrès des grands barrages, question N° 14. New Delhi .163-196 p.
- Duquennois H.1954. Sédimentation et soutirage des vases au barrage d'IGHIL Emda. Gaz et électricité, compte rendu N° 1.22 p.
- Durand J.M., Degoutte G., Royet P., Jensen M. 1998. La technique du béton compacte au rouleau (B.C.R.), Possibilités d'application pour les barrages en Afrique, *Revue Sud Sciences & Technologies*, Vol 1. 56-62 p.

El-Radaideh N. Al-Taani A. A. et Al Khateeb, W. 2017a. Characteristics and quality of reservoir sediments, Mujib Dam, Central Jordan as a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(143), 143 p.

El Shazli A.2018. Water balance of the Aswan High Dam Reservoir. Thèse de doctorat à l'université d'Egypte.80 p.

FAO .1967. Etude des cultures de périmètre de Ksob, Circonscription de Constantine. Roma. 241-261 p.

FAO. 1993. Forest Resources Assessment 1990 – tropical countries. FAO Forestry Paper No. 112 p.
Fouchier C, Lavabre J, Royet P, Félix H, 2004. Inondation de septembre 2002 dans le Sud de la France : analyse hydrologique et hydraulique au niveau des barrages écrêteur du Vidroule. *Ingénieries* n° 37. France. 23-35 p.

Fossour.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 centreest de la cote d'ivoire (afrique de l'ouest). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°21, 97-120 p.

Fritier N, Massei N, Laignel B, Durand A, Dieppois B, Deloffre J. 2012. Links between NAO fluctuations and inter-annual variability of winter-months precipitation in the Seine River watershed (north-western France). *Comptes Rendus Geosci.* 344, 396–405 p.

Frossard E.2015. Panorama de fondations de grands barrages .Colloque CFBR – Fondations des Barrages 8 et 9 avril 2015 – Chambéry.25 p.

Ghachi A. 1986. Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie : le bassin de la Seybouse. O.P. U. Alger, 250 p.

Ghorbel A, Claude J. 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie: estimation des transports solides. *Proceeding of the Paris Symposium, Actes du Colloque de Paris : IAHS. AISH PUBLI. N°122 : 219-232 p.*

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.

Glaçon J. 1967. Recherches sur les gites métallifère du tell sétifien, Bult de service de carte géol, Algérie, n° 32.

Goel L M. K, Sharad K, Jain & P., Agarwal K .2002.Assessment of sediment deposition rate in Bargi Reservoir using digital image processing, *Hydrological Sciences Journal*, 47:S1, S81-S92 p.

Goula B.T.A, Konan B, Brou Y.T, Savané I, Fadika V, Srohourou B. 2007 .Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois lognormale et de Gumbel. *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 52, n° 2, 49-67p.

Gousskov N, 1952. Eléments de techno géologie des Barrages Algériens et de Quelques ouvrages annexes : le barrage de Foum-el-Gherza. *XIXe Congrès géologique international* .13 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). Thèse de doctorat à l'université Mohamed Khider-Biskra. 368 p.

Guiraud R. 1973. Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne Alpine de l'Algérie, d'après l'étude du bassin d'El Eulma et les régions voisines (PhD Thesis). Thesis, Sc. Nat. Nice, France.

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.

Handouzi M. Evolution du chimisme des eaux du barrage Mexanna (Nord-Est Algérien).Mémoire de Magister .Université de Badji Mokhtar .Annaba.140 p.

Hirche A, Boughani A, Salamani M. 2007. Évolution de la pluviosité annuelle dans quelques stations arides algériennes. Sécheresse 18(4): 314-320p.

Hurrell J. W. 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation, Science, 269(5224), 676-679 p.

Ijam A. Z, Al-Mahamid M. H. 2012.Predicting Sedimentation at Mujib Dam Reservoir in Jordan. - Jordan Journal of Civil Engineering 6(4): 448-463 p.

IME (Institut Méditerranéen de l'Eau).2010.Rapport regional sur la gestion des sediments dans les barrages en mediterranee : Rapport national, Algérie (Agence Nationale des Barrages et Transferts ANBT, Ministère des Ressources en eau), Atelier Régional : Conception et gestion durable des barrages en méditerranée, les 13- 14 décembre 2010 - Marseille (France).

Javed W. 2012. Development of risk management model for construction of dams: A case Study for Diamer Bhasha Dam, Pakistan (Master Thesis, National University of Sciences and Technology, Islamabad, Pakistan).

Javed W, Tingsanchali T.2016. Sediment flushing strategy for reservoir of proposed bhasha dam, pakistan. 2nd world irrigation forum (wif2). Chiang mai.thailand. 11 p.

Jean L.1957.Note sur l'évaporation au Maroc.Revue de Géographie Alpine .Grenoble .351-379 p.

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) .71 p.

Jelassi M A, Gaaloul N, Laignel B, Turki I. 2015. Caractérisation hydrologique de l'Oued Medjerda (Tunisie) dans le cadre de la future mission spatiale SWOT. Conférence Internationale sur l'Hydrologie des Grands Bassins Fluviaux de l'Afrique .At: Hammamet, Tunisia.1-9 p.

Jomaa A. 1989. Contribution à l'étude de l'envasement des retenues des barrages cas Sidi Sâad et Nebhana.Mémoire de fin d'études. I.N.A.T. 85 p. + 3 annexes.

Kabour A, Mekkaoui A, Chebbah L. 2016. Le barrage de Djorf Torba (Béchar, Sud-Ouest Algérien),

sous contraintes du climat, de l'environnement et de gestion. *International Journal for Environment and Global Climate Change*. ISSN 2310-6743. Vol 3, Issue 5. 23-32 p.

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.

Kahya E, Dracup J.A. 1993. US streamflow patterns in relation to the El Niño/Southern Oscillation. *Water Resour. Res.* 29, 2491–2503 p.

Kassoul M, Abdelgader A, Belorgey M.1997. Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. *Revue des sciences de l'eau* Volume 10, numéro 3.339-358 p.

Kettab, A .2001 . Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision *Revue Desalination Elsevier Science B.V.* All rights reserved; Volume 136, Issues 1-3, Pages 25-33p.

Khelfaoui F. 2014. Qualité et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du saf-saf (Nord-Est Algérien). Thèse de doctorat en sciences. Université badji mokhtar –Annaba .300 p.

Kieken M. 1983. Carte d'Esquisse tectonique de l'Algérie.

Kingumbi A. 1999. Bilan et modélisation de la retenue du barrage de El Houareb .Mémoire de diplôme d'études approfondies à l'école nationale d'ingénieurs de Tunis, 148 p.

Korso K. 1986. Contribution à l'analyse du processus de la sédimentation dans le barrage retenue du Fergoug. Dissertation de Post-Graduation, Université des Sciences et de Technologie d'Oran.

Kotti F, Dezileau L, Mahé G, Habaieb H, Bentkaya M, Dieulin C, Amrouni O. 2018. Etude de l'impact des barrages sur la réduction des transports sédimentaires jusqu'à la mer par approche paléohydrologique dans la basse vallée de la medjerda. *Water quality and sediment transport issues in surface water.*67-76 p.

klemes .1975. Applications de l'hydrologie à la gestion des ressources en eau (au niveau de la planification et de la conception), OMM N° 356, Genève, 121 p.

Kucuk M, Kahya E, Cengiz T. M, Karaca M. 2009. North Atlantic Oscillation influences on Turkish lake levels. *Hydrological Processes*, 23(6), 893.l'histoire Naturelle de Afrique du Nord, Alger.

Labat D, Ababou R, Mangin A.1999. Analyse en ondelettes en hydrologie karstique. 2e partie: analyse en ondelettes croisée pluie-débit. *Comptes Rendus Académie Sci.-Ser. IIA-Earth Planet. Sci.* 329, 881– 887p.

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.2006. Oscillations in land surface hydrological cycle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 242, 143–154p.

Labat D.2008. Wavelet analysis of the annual discharge records of the world's largest rivers. *Adv. Water Resour.* 31, 109–117p.

Labat D.2010. Cross wavelet analyses of annual continental freshwater discharge and selected climate indices. *J. Hydrol.* 385, 269–278 p.

Laborde J-P. 1995.Les différentes étapes d'une cartographie automatique : exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord". Publications de l'Association Internationale de Climatologie,

8.37-46 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).

Laborde J, Rezak S, Behlouli, L. 2013. Les effets d'une baisse de la pluviométrie sur les volumes régularisables des ouvrages de stockage d'Algérie, 371-375 p.

Laffitte R. 1939. Etude géologique de l'Aurès [Algérie]. Service de la carte géologique de l'Algérie.

Lahbassi O, Bouthagane H, Hafsi R, Boulmaiz T, Bouzahar F. 2012. Modeling of underground dams Application to planning in the semi arid areas (Biskra, Algeria). Energy Procedia 18 (2012) .426 – 437 p

Lahlou A. 1994. Envasement des barrages au Maroc. Collection Sciences et Techniques, éd. Wallada, Maroc. 286 p.

Lahlou A. 2000. Quel environnement pour l'Afrique du nord. Ed. Dar El Qualam, Rabat (Maroc). 265 p.

Lahondère J.C. 1987. Les séries ultra-telliennes d'Algérie Nord-orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Thèse de doctorat. és-Sciences. univ. Paul Sabatier. Toulouse. France. 238 p.

Laignel B, Massei N, Rossi A, Mesquita J, Slimani S. 2010. Water resources variability in the context of climatic fluctuations on both sides of the Atlantic Ocean. IAHS-AISH Publ. 612–619 p.

Laignel B, Nouaceur Z, Jemai H, Abida H, Ellouze M, Turki I. 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-727–732 p.

Lamb P J.1982. Persistence of subsaharan drought.Nature 299. 46-47 p.

Larouzee J.2015. Théorie et pratique des modèles d'erreur humaine dans la sécurité des barrages hydroelectriques : le cas des études de dangers de barrages d'edf. Thèse de doctorat .paris tech.302.

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.

LEMOALLE J, MAGRIN G.2014. Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles. CBLT, N'Djamena, Marseille, Expertise collégiale IRD, AFD-FFEM, rapport de synthèse, 67 p.

Lepetit L.2002. Etude d'une méthode de diagnostic de digues avec prise en compte du risque de liquéfaction. Thèse de doctorat en Sciences de l'ingénieur. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 288 p.

Lessard L. 1952 éléments de technologie des barrages algériens et de quelques ouvrages annexe-le barrage de foug el Gueiss. Ministère des ressources en eau Algérie.

Lins H.F, Slack J.R. 1999. Streamflow trends in the United States. Geophys. Res. Lett. 26, 227–230 p.

Louamri A, 2013, le bassin versant de la Seybouse (Algérie orientale) : hydrologie et aménagement

des eaux, thèse de doctorat en sciences (géographie et aménagement du territoire, option hydrologie), Université de Constantine, Faculté des Sciences de la Terre.315 p.

Loup J. 1957. Note sur l'évaporation au Maroc. *Revue de Géographie Alpine*. 351-379 p.

Lowe J, Fox I.H.R. 1982. Sedimentation in Tarbela reservoir. In Commission Internationale des Grandes Barrages. Quatorzieme Congres des Grands Barrages, Rio de Janeiro

Lucie G. 2015. Évaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône . Thèse de doctorat à l'université de Lyon.271 p.

MAHAMANE O. 2001. Contribution à l'étude de l'impact et de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de doctorat à l'université de Montpellier .257p.

Mahjoub M, Bergaoui M, Souissi A, Boufaroua M.2001. Régionalisation de l'envasement des lacs collinaires de la dorsle tunisienne . *Revue des Sciences Technologiques, semestriel des Ecoles Inter Etats IER/ETSHER* .15 p.

Makhlouf Z, Michel C.1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318 p.

Maraun D, Kurths J. 2004. Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls. *Nonlinear Process. Geophys.* 11, 505–514p.

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.

Marshall J, Kushnir Y, Battisti D, Chang P, Czaja A, Dickson R, Hurrell J, McCartney M, Saravanan R, Visbeck M .2001, North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms, *International Journal of Climatology*, 21(15), 1863-1898 p.

Marzougui A, Ben Mammou A. 2006. Impacts of the dumping site on the environnement: Case of the Henchir El Yahoudia Site, Tunis, Tunisia. *C. R. Geoscience* 338 . 1176–1183 p.

Marzougui A. 2009. Quantification et caractérisation sédimentologique, géotechnique et géochimique des alluvions des barrages Sejnane, Joumine et Ghezala. *Bilan et impact sur Gaaret Ichkeul*, 262 p.

Massei N, Durand A, Deloffre J, Dupont J.P, Valdes D, Laignel B.2007. Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in northwestern France over the past 35 years. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 112.

Massei N, Laignel B, Deloffre J, Mesquit , J, Motelay A, Lafite R,Durand A. 2010. Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950–2008. *Int. J. Climatol.* 30, 2146–2154 p.

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-decennial variability of streamflow in the Mississippi river basin from 1934 to 1998. *Int. J. Climatol.* 31, 31–43p.

Mate.2003. Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement. 465 p.

- Mathias b h. 2013. La sédimentation dans les lacs de barrage à Java, Indonésie processus, rythmes et impacts. Thèse de doctorat. Université paris 1 panthéon-Sorbonne. 301 p.
- Mauget S.A.2004. Low frequency streamflow regimes over the central United States: 1939–1998. *Clim.Change* 63, 121–144p.
- 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, 303 p.
- Mebarki A. 1994. Le barrage de Hammam Grouz (Haut Rhumel, constantinois) bilan et perspectives d'un aménagement hydraulique en zone semi arides, institut des sciences de la terre université de Constantine, 15-22 p.
- 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 : 360 p.
- 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, 2010. Apport des cours d'eau et cartographie du bilan hydrologique : cas des bassins de l'Algérie orientale, *Sécheresse* vol. 21, n° 4,301-308p.
- Mebarki A. 2010. Hydrologie, Barrage et Transferts d'Eau en Algérie orientale, Université Mentouri de Constantine, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire, *Bulletin des sciences géographiques* N°25,51 p.
- Mebarki A. 2011. Barrages et grands transferts en Algérie : cas de l'aménagement de Béni Haroun (oued kébir-rhumel, est algérien).Le 4ème colloque international « ressources en eau et développement durable (ciredd '4). 16 p.
- Mecibeh I.2017. Les ressources en eau et gestion intégrée du bassin versant d'oued Guebli (nord-est algérien). Thèse de doctorat en sciences. Université d'Annaba. 314 p.
- 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. et Humbert J.2000. Etude des potentialités de l'écoulement fluvial dans le nord de l'Algérie en vue d'une réalimentation des aquifères. Volume « Eaux sauvages, eaux domestiquées. Hommage à Lucette DAVY. Publications de l'Université de Provence - France.
- Meddi M, 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* (ed. by E. Servat et al.). IAHS Publ. 278, 1–7. IAHS Press, Wallingford, UK
- Meddi H. Meddi M. 2007. Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Géographia technica* 2, 49–55p.
- Meddi MM, Assani AA, Meddi H. 2010. Temporal variability of annual rainfall in the macta and tafna catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management* 24(14): 3817-3833 p.
- Medjerab A. 2005. Etude pluviométrique de l'Algérie nord-occidentale: approche statistique et cartographie automatique. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences de la terre, de Géographie et

- Aménagement du Territoire, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.
- Meharzi M. 1994. Le rôle de l'orographie dans la répartition spatiale des précipitations dans le massif de l'Aurès. *Revue de la Méditerranée* N° 3-4, 73-78 p.
- Meilland P, Jehanno P.1992. Conception des évacuateurs vis-à-vis des problèmes de dissipation d'énergie, d'érosion et de cavitation. *Revue de la Houille Blanche* N° 2/3.1-7 p.
- Menchar S.2013. Contribution à l'étude de possibilité d'envasement de la retenue de Koudiat Medouar (w .Batna). Mémoire fin d'étude pour l'obtention du diplôme magister en hydraulique. Université Larbi Ben M'hidi - Oum El Bouaghi. 147 p.
- Mekerta B.1995. Étude des propriétés géomécaniques des sédiments d'envasement de la retenue du barrage de génissiat. Thèse de doctorat en Génie civil et minier. 282 p.
- Merarhemi B.1995. Contrôle et auscultation des barrages (cas du barrage de Foug El Gherza,Biskra), Mémoire fin d'étude , Institut d'hydraulique, Université M.khider ,Biskra ,64 p.
- Mesquita J. 2009. Facteurs de contrôle climatique et géomorphologique de la variabilité hydrologique de bassins versants en substrat carbonaté: Comparaison Haute normandie (FR) et Région d'Austin, Texas (USA) (PhD Thesis). Caen.318 p.
- Mezaache M.2015. Développement d'un modèle de gestion à long terme et d'un outil d'aide à la décision pour le Sous-bassin de Guelma. Thèse de doctorat, Université de Guelma. 202 p.
- 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. 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, 244 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.
- Morris Gregory L, Fan J.1998. *Réservoir sédimentation*”, Mc Graw-Hill. 687p.
- MOUKHCHANE M. 2001. Différentes méthodes d'estimation de l'érosion dans le bassin versant du Nakhla (Rif occidental, Maroc). *Bull. Réseau Érosion*, 21 .255-266 p.
- Mouelhi M.1980. Note sur l'envasement de la futur retenue du barrage Bourguiba à Sidi Saad .Sem .Int.d'expert sur le dévasement des retenues .Tunis.
- MRE .2005. Le secteur de l'eau en Algérie, Alger, Ministère des Ressources en Eau .31 p.
- Nandalal K. D. W., Bogardi Janos J.. 2007. *Dynamic Programming Based Operation of Reservoirs: Applicability and Limits* Cambridge University Presse, 144p.
- Nakken M. 1999. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns, *Environmental Modelling and Software*, Vol. 14.283-295 p.

- Nazoumou Y. 2002. Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone aride : étude par modélisation numérique sur le cas de kairouan (Tunisie centrale). Thèse de doctorat à l'école Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 264 p.
- Nemouchi. N.2001. La géographie hydrologique du bassin du Hodna .Thèse de doctorat .Université de Constantine.
- 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. 2010 .Évaluation des changements climatiques au Maghreb. Étude du cas des régions du quart nord-est algérien. In : *Risques et changements climatiques, Actes du XXIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Rennes)*, 463-468 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 Géographie Phys. Environ.* 307–323 p.
- Novotny E.V, Stefan H.G. 2007. Stream flow in Minnesota: Indicator of climate change. *J. Hydrol.* 334, 319–333 p.
- O**mar, M. H, El-Bakry M. M. 1970. Estimation of evaporation from Lake Nasser. *Meteorol. Res. Bul.* II(i), Cairo: Meteorol. Authority of Egypt, 1-27 p.
- Omar M. H, El-Bakry M. 1981.Estimation of evaporation from the lake of the Aswan High Dam (Lake Nasser) based on measurements over the lake. *Agric. Meteor.*, 23, 293-308 p.
- Otedd.2007.Gestion durable des ressources. Observatoire Tunisien de l'environnement et du développement durable. 1-94 p.
- Oukhey M. 1991. Barrage Sidi Salem. Résultats des campagnes de mesures de l'alluvionnement. Ministère de l'agriculture, direction générale des études et travaux hydrauliques. Rapports techniques et résultats.9 p.
- Oukey M. 1993. Contrôle de l'envasement du barrage Sidi Saâd. Compagne d'avril 1993.Ministère de l'agriculture, Direction Générale des Etudes et Travaux Hydrauliques, Direction d'exploitation des barrages, 6 pages+annexes.
- P**ardé M. Nouvelles données sur les cours d'eau algériens. In: *Annales de Géographie*, t. 55, n°300, 1946. 291-294 p.
- Parent E.1991. Elaboration des consignes de gestion des barrages - réservoirs. Thèse de doctorat .Universités de Paris-Creteil. 216 p.
- Payan JL.2007. Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit. Thèse de doctorat. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts Centre de Paris.256 p.
- Pedelaborde P, Delannoy H. 1958. Recherches sur les types de temps et le mécanisme des pluies en Algérie. *Revue annales de Géographie* .t 59, n° 361. 216-244 p.
- Perreault L, Haché M, Slivitzky M, Bobée B.1999. Detection of changes in precipitation and runoff over eastern Canada and US using a Bayesian approach. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 13, 201–216 P.

- Perrier V. 2005. Transformée en ondelettes continue: Théorie, applications à l'imagerie médicale. Inst. Natl. Polytech. Grenoble.216-228 p.
- Piquemel D.1991.Inventaire et bilan des retenues d'eau au Burkina Faso. Les cahiers d'Outre Mer . 44-175.259-280 p.
- PNE (Plan National de l'Eau). 2010. Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau. Programme meda de l'union européenne.
- Poulard C, Royet P, Ratomski J, Lenar-Matyras A. 2008. Enseignements de retours d'expériences de barrages à pertuis ouverts, de 1905 à nos jours. Revue d'Ingénieries. France. 33-54 p.
- Qadem A. 2015. Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du haut Sebou (Maroc). Thèse de doctorat (université de lorraine et Fès). 360 p.
- Queney P.1937. Le régime pluviométrique de l'Algérie et son évolution depuis 1850. Météorologie .427-440 p.
- Raham.D. 2001. Les structures spatiales de l'Est algérien : Les maillages territoriaux, urbains et routiers. Thèse de doctorat d'état, Université de Constantine .277 p.
- Remini B, Avenard J-M, Kettab A. 1994. Evolution de l'envasement et évacuation des sédiments par les vannes de fond le barrage d'IGHIL EMDA. Communication au premier séminaire national sur l'hydraulique, Biskra,
- Rémini B, Kettab H, Nihat A.1995. Envasement du barrage Ighil Emda (Algérie). Revue houille blanche n°2/3.10 p.
- Remini B. 1997. Envasement des retenues de barrages en Algérie : importance, mécanismes et moyen de lutte par la technique du soutirage. Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, juin, 342 p.
- Remini B .2000. L'envasement des barrages : quelques exemples algériens. Bulletin du réseau Erosion (France), 20/2 :165- 171p.
- Remini B. 2002. Evolution de la sédimentation dans les retenues de barrage et le soutirage des particules fines. Courrier du Savoir – N°02. 29-34p.
- Remini W, Remini B. 2003. La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord. Larhyss Journal, 2, 45-54p.
- Remini B, 2005. L'évaporation des lacs de barrages dans les régions arides et semi arides : exemples algériens. larhyss journal, issn 1112-3680, n° 04.81-89 p.
- Remini B. 2006. Valorisation de la vase des barrages - quelques exemples algeriens. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°05, Juin 2006.75-89p.
- 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, Leduc C, Hallouche W, 2009. Évolution des grands barrages en régions Arides : quelques exemples algériens. Sécheresse 20 (1). 96-103P.

- Remini. 2011. Une nouvelle approche de lutte contre des barrages : la technique des obstacles émerges. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 09,43-53p.
- Remini B.Bensafia D.2012. The impact of climate changes on the acceleration of reservoir siltation in arid regions the Algerian case study. Elixir International journal Bio. Diver. 44. 7074-7076 p.
- Remini B., Bensafia D. 2016. Envasement des barrages dans les régions arides. Exemples algériens. Larhyss journal, issn 1112-3680, n°27. 63-90 p.
- Remini. 2017. Une nouvelle approche de gestion de l'envasement des barrages. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°31.51-81p.
- Remini B. 2018. Le barrage de Sidi m'hamed ben aouda (algérie): l'envasement s'accélère ! sidi m'hamed ben aouda's dam (algeria): acceleration to the silting! Larhyss journal, ISSN 1112-3680, n°33. 221-252 p.
- Renard B, Lang M, BoisP, DupeyratA, Mestre O, Niel H, Gailhard J, Laurent C, Neppel L, Sauquet E. 2006. Evolution des extrêmes hydrométriques en France à partir de données observées. Houille Blanche-Rev. Int. Eau 6, 48 p.
- Rezak S. 2014. Hydrologie algérienne : synthèse des apports de crues sur sig. Thèse de doctorat. Université d'Oran.173 p.
- Riad S.2003. Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc (PhD Thesis). Atelier de reproduction des thèses.154 p.
- Roca. M. 2012. Tarbela Dam in Pakistan. Case study of reservoir sedimentation. the proceedings of River Flow 2012. 10 p.
- Roche M. 1963. Hydrologie de surface. Paris (ORSTOM).
- 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 (PhD Thesis). Université de Rouen, UMR CNRS M2C.334 p.
- Rossi A, Massei N, Laignel B, 2011 . A synthesis of the time-scale variability of commonly used climate indices using continuous wavelet transforms. *Global and Planetary Change*, 78, issues 1-2, 1-13 p.
- Rouis M.1984. Barrage de Sidi Boubecker sur l'Oued El Kebir (Tunisie nord orientale) : étude structurale et hydrogéologique du site ; étude sédimentologie et géotechnique des alluvions déposées. Thèse de troisième cycle, Université Grenoble, France .168 p.
- Royet P.2006. La surveillance et l'entretien des petits barrages.Guide pratique .France .86 p.
- Royet P, Degoutte G, Peyras L, Lavabre J, Lemperrière F. 2009. Cotes et crues de protection, de sûreté et de danger de rupture. Colloque CFBR-SHF: Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues, Paris, France. 8 p.
- Saadaoui M, Ben Sakka M .2007. Pluviométrie en Méditerranée occidentale et oscillation nord-atlantique (NAO), Actes du XXe colloque de l'association internationale de climatologie, 501-507 p.
- Saci D .2008 . Utilisation des grands transferts d'eau dans l'aménagement du territoire "cas de

- l'Oranie". Mémoire de Magistère en hydraulique, université de Tlemcen. 148 p.
- Sadek M. F. 1992. Evaporation from the reservoir of the High Aswan Dam, Egypt: A comparison of relevant methods with limited data. M.Sc. thesis. Delft, The Netherlands: Inter. Inst. Hydr. Env. Engg, 108 p.
- Sadek M.F, Shahin M, Stigter C. 1997. Evaporation from the Reservoir of High Aswan Dam, Egypt: Anew Comparison of Relevant Methods with Limited Data. Theor. Appl. Climatol. 56, 57-66p.
- Saidi A. 1991. Erosion spécifique et prévision de l'envasement des barrages .Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages .Alger 1-3 décembre .204-226 p.
- Sary M. 1976. Géographie physique d'une haute plaine steppique algérienne : Le Hodna (Thèse de Doctorat).Strasbourg.
- Savornin J.1920. Etude géologique de la région du Hodna et du plateau sétifien.Université de Lyon.
- Savornin j.1941.La géologie et les grands barrages en Algérie. carbonnel, Alger.
- Schaepli B,Maraun D,Holschneider M.2007. What drives high flow events in the Swiss Alps ? Recent developments in wavelet spectral analysis and their application to hydrologie. Adv.Water Ressour .2511-2525 p.
- Seguis L, Albergel J., Bader J-C, 1993. Construction de la courbe de remplissage d'un réservoir par bilan hydrologique et applications, Hydrol. continent. Vol. 8, no 1, 63-69 p.
- S.E.G.G.T.H. 1965. Exploitation du barrage de Cheffia, Tableau des ressources et des capacités.
- Seklaoui-oukid O.2016. Valorisation des sédiments du barrage d'el merdja sidi abed : etude technico-économique. Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou .138 p.
- Seltzer P. 1946. Le climat de l'Algérie, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carbonnel. 219 p.
- Semcha A. 2006. Valorisation des sédiments de dragage, Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. Thèse de Doctorat de l'Université de Reims Champagne Ardenne, 167 p.
- Serbah B .2011. Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage BAKHADDA Tiaret. Mémoire magister, Université de Tlemcen, 2011, 129 p.
- Shaltout ,Housry T, 1997. Estimating the Evaporation over Nasser Lake in the Upper Egypt from Meteosat Observations », Advances in Space Research 19, no. 3, 1997, 515–518p.
- Shalash, S. 1980. Effect of Sedimentation on Storage Capacity of Aswan high Dam Reservoir, Nile Research Institute report, National water Research Center, Cairo, Egypt.
- Snard H ,1950. La répartition saisonnière des pluies en Algérie. Revue annales de Géographie .t 59, n° 317. 354-361 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.
- Sumi T. Hirose T. 2009. Accumulation of sediment in reservoirs. In Water Storage, Transport and

distribution, UNESCO-IHE and EOLSS Publishers Co. Ltd. Paris, France. p224–252 p.

Taibi R .1993. Contribution à l'étude de l'écoulement des cours d'eau de l'Algérie septentrionale : essai de régionalisation. Montpellier : ORSTOM, multigr. Mém. DEA.

Taibi S, Meddi M, Mahé G.2015. Evolution des pluies extrêmes dans le bassin du Chéouli (Algérie) au cours des 40 dernières années 1971-2010. Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci. 369, 175p.

Taibi S, Meddi M, Souag D, Mahé, G, 2013. Évolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). Clim. Land Surf. Chang. Hydrol. IAHS Publ 359, 191–197 p.

Talia A. 2002. Evolution des régimes pluviométrique et hydrologique du Nord de l'Algérie. Mémoire de magister, Centre Universitaire de Mascara, Algérie, 162 p.

Tams, Wallingford H. 1998. Tarbela Dam Sediment Management Study". Main report. Volume 2.

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, loughmane, soubella et chemorah (algérie orientale). Thèse de doctorat à l'université de Constantine.251p.

Tatar.H et Regad. N. 2015. Variabilité climatique et ressources en eau en milieu semi-aride : Cas des bassins versants des Oueds Chemora, Reboa et Gueiss (Hauts plateaux constantinois. Algérie), Rev Analele de Géographie Bucuresti n°925.19-36 p.

Therond R. 1980. Recherche sur l'étanchéité des lacs de barrage en pays karstique. Collection du centre de recherches et essais de Chatou. Editions Eyrolles Paris.

Tootle G. A, Piechota T. C, Singh A. 2005. Coupled oceanic.atmospheric variability and US streamflow. Water Resources Research, 41(12).

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.

Tremplay L.2009. Analyse de la variabilité interannuelle de séries temporelles des niveaux d'eau souterraine dans trois régions du Canada. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de la terre .Université du Québec à Montréal.61 p.

Touahir S, Asri A, Remini B, Saad H. 2018. Prédiction de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Zeddine et de l'envasement du barrage Ouled Mellouk (Nord-Ouest algérien). Journal Géomorphologie vol 24 n° 2. 167-182 p.

Touaibia B, Aidaoui A, Gomer D, et Achite M. 2001.Quantification et variabilité temporelle de l'écoulement solide en zone semi-aride de l'Algérie du Nord , Hydrological Sciences Journal 46(1).15 p.

Touaibia B. 2010. Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. Revue de science et changements planétaires / sécheresse. Volume 21 n° 4.1-6 p.

Touati B, 2010, Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable, Thèse de doctorat d'Etat, Université Mentouri de Constantine, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire, 385 p.

- Toumi A, Remini B. 2004. Le Barrage de foug el gherza face au problème de fuites d'eau, laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, Larhyss Journal. 25-38 p.
- Toumi A, Remini B. 2006. La problématique des fuites d'eau du barrage Hammam-Grouz (Algérie). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05, Juin 2006, 41-48 p.
- Turki I, Laignel B, Laftouhi, N, Nouaceur Z, Zamrane Z , 2016a. Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in Marrakech (Morocco). Arab. J. Geosci. 9-243 p.
- Turki I, Laignel B, Massei N, Nouaceur Z, Benhamiche N, Madani K., 2016b. Hydrological variability of the Soummam watershed (Northeastern Algeria) and the possible links to climate fluctuations. Arab. J. Geosci. 9-477 p.
- Valembois J, Migniot C .1975.Rejets des produits de dragages à l'aval d'un barrage sur l'Oued Hamiz. Revue Houille Blanche N° 2-3. 155-172 p.
- Vanoni V. 1977. Sédimentation Engineering. American Society of Civil Engineers .418 p.
- 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.
- Voute C.1967. Essai de synthèse de l'histoire géologique des environs d'Ain Fakroun, Ain Babouche et des régions limitrophes, 255 p.
- Wallingford H. 2011. Tarbela 4th extension. Sedimentation study. HR Wallingford report EX6486.
- White R. 2001. Evacuation of sediments from reservoir. Thomas Telford Publishing.London.
- Whittington D, Guariso G. 1983. Water Management Models in Practice: a Case Study of the Aswan High Dam. Development in Environmental Modelling, 2. Amsterdam: Elsevier Pub. Co., 246 p.
- 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.
- Zamrane Z, Turki I, Laignel B, Mahé G, Laftouhi N.-E. 2016. Characterization of the Interannual Variability of Precipitation and Streamflow in Tensift and Ksob Basins (Morocco) and Links with the NAO. Atmosphere 7 .22 p.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation de la zone d'étude en Algérie et répartition géographique des barrages de l'Est algérien.....	4
Figure 2 : Organigramme du plan de la thèse	6
Figure 3 : Les grands ensembles orographiques de la zone d'étude vus à travers un Modèle Numérique de Terrain (MNT à maille de 100 m, coordonnées métriques Lambert Nord Algérie, traité par REZAK, 2014).....	10
Figure 4 : Bassins des Côtiers constantinois et localisation des barrages.....	13
Figure 5 : Le bassin versant de la Soummam et localisation des barrages Ain Zada et Tichy Haf.....	15
Figure 6 : Le bassin versant de Kébir Rhumel et localisation des barrages Hammam Grouz, Boussiaba et Béni Haroun	15
Figure 7 : Le bassin de la Seybouse et localisation des barrages Hammam Debagh et Foum El Khanga	16
Figure 8 : Le bassin de la Medjerda et localisation du barrage Ain Dalia	17
Figure 9 : Le bassin des hauts plateaux et localisation des barrages Foum El Gueiss et Koudiat Medouar	19
Figure 10 : Le bassin de Hodna et localisation du barrage K'sob.....	19
Figure 11 : Le bassin de Chott Melrhir et localisation des barrages Babar, Foum El Gherza et Fontaines des Gazelles.....	20
Figure 12 : Esquisse géologique et structurale de la région d'étude (échelle 1/1 000 000) (Kieken, 1983).....	21
Figure 13 : Esquisse géologique et structurale du bassin de Mexa (échelle 1/500 000) (Vila, 1978) ..	22
Figure 14 : Coupe géologique dans l'axe du barrage de Mexa (ANBT, 2014)	23
Figure 15 : Extrait du carte structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale (Benchabane, 2015).....	25
Figure 16 : Les fondations du barrage de Tichy Haf (Frossard, 2015)	26
Figure 17 : Coupe transversale du site du barrage Hammam Grouz (ANBT, 2014).....	27
Figure 18 : Coupe géologique du bassin de Foum El Khanga (carte géologique au 1/50000 de Sedrata) (Vila, 1980).....	28
Figure 19 : Coupe géologique longitudinale du barrage principal (à droite) et de la digue de col (à gauche) d'après ANBT, 2014	29
Figure 20 : Coupe géologique à l'emplacement de site du barrage Foum El Gueiss (Savornin, 1941).....	29
Figure 21 : Coupe géologique à l'emplacement de site du barrage Foum El Gherza (ANBT, 2014) ..	30
Figure 22 : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (établie d'après A.N.R.H., 1993 in MEBARKI, 2005 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989).....	32
Figure 23 : Températures moyennes annuelles (°C) de l'Est algérien (ANRH, 2002).....	33
Figure 24 : Evapotranspiration potentielle annuelle moyenne (mm) de l'Est algérien (ANRH, 2002)	34
Figure 25 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (D'après Côte, 1998 in Mebarki, 2005).....	35
Figure 26 : Evolution de l'infrastructure de mobilisation des eaux superficielles dans l'Est algérien de 1938 à 2015.....	36
Figure 27 : Localisation des barrages de la période 1938 -1963	37
Figure 28 : Localisation des barrages mis en exploitation de 1938 à 2000.....	39
Figure 29 : Localisation des barrages de la période de 1938 à 2015	41
Figure 30 : Séries chronologiques des données de bilan d'eau des barrages	43
Figure 31 : Localisation de l'échantillon de dix barrages	44

Figure 32 :L'oscillation Nord-Atlantique et son incidence sur les conditions hydrologiques en Europe (source : https://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/NAO/)	45
Figure 33 :Schéma théorique du bilan d'eau d'un barrage.....	47
Figure 34 :Ondelettes de Morlet à l'échelle $a = \frac{1}{2}, 1, 2$ (partie réelle) où a est le paramètre de forme. (Perrier et al, 2005).....	51
Figure 35 :Exemple de transformée en ondelettes continue obtenue pour les apports du barrage Hammam Grouz	52
Figure 36 :Exemple d'analyse de la cohérence par ondelettes entre apport et pluie du barrage Hammam Grouz (1990-2013).....	53
Figure 37 :Rangement par ordre croissant des superficies des bassins de 25 barrages de l'Est algérien	57
Figure 38 :Répartition par classes de superficies des bassins aux barrages.....	57
Figure 39 :Carte des pentes de la zone d'étude (Est algérien)	58
Figure 40 :Carte des écoulements moyens annuels de l'Est algérien et répartition des bassins aux barrages (apports simulés à l'aide de LOIEAU, période : 1965/66 -1994/95, « étude de synthèse ANRH, 2003)	60
Figure 41 :Exemple de tracé cartographique sous Surfer des lignes d'iso-écoulement (en mm/an). Bassin du barrage Béni Haroun.....	61
Figure 42 :Rangement par ordre croissant des lames d'eau écoulée dans 25 bassins (modèle LOIEAU :période 1965/66 à 1994/95).....	62
Figure 43 :Répartition comparative des apports simulés aux barrages (ANRH) et des apports calculés par les études d'APD (ANBT).	63
Figure 44 :Indices centrés réduits des apports moyens simulés à l'échelle des bassins aux barrages	67
Figure 45 :Exemple de profil de petit barrage en remblai étanche homogène (Durand, 1998).	69
Figure 46 :Exemple de profil d'un barrage à zones (Lepetit, 2002)	70
Figure 47 :Barrage en enrochements à masque amont (Durand, 1998).	70
Figure 48 :Barrage en enrochement à noyau interne en béton bitumineux cyclopéen (Durand, 1998). .	71
Figure 49 :Les trois principaux types de barrages rigides (Derdous, 2016).....	72
Figure 50 : Répartition des barrages de l'Est algérien selon la nature de leur digue.	72
Figure 51 :Répartition des barrages de l'Est algérien selon la nature de leur digue.	73
Figure 52 :Exemples de barrages en terre et en enrochement dans l'Est algérien (d'après ANBT, 2014)	76
Figure 53 :Exemples de barrages- poids dans l'Est algérien (d'après ANBT, 2014).....	78
Figure 54 :Variation des superficies à la cote normale de retenues (RN).....	89
Figure 55 :Exemple de lac de retenue de Béni Haroun	89
Figure 56 :Rangement par ordre croissant de la capacité de 25 barrages.	90
Figure 57 :Capacité et volume régularisable des barrages en exploitation dans l'Est algérien.....	91
Figure 58 :Relations surface-volume-hauteur de la retenue de Cheffia	92
Figure 59 :Relations surface-volume-hauteur de la retenue de Zardezas	93
Figure 60 :Relations surface-volume-hauteur de la retenue de Guénitra	93
Figure 61 :Relations surface-volume-hauteur de la retenue de Hammam Grouz	94
Figure 62 :Relations surface-volume-hauteur de la retenue d'Ain Zada.....	94
Figure 63 :Variation du niveau normal de retenues	95
Figure 64 :Variation du niveau des plus hautes eaux de retenues.....	95
Figure 65 :Répartition spatiale des dix barrages aux séries de mesures communes (23 ans).....	99
Figure 66 :Présentation schématique des termes du bilan d'eau d'un barrage	100
Figure 67 :Variations annuelles des apports, des réserves (en fin d'année) et des pluies sur dix	

<i>barrages de l'Est algérien</i>	107
<i>Figure 68 :Régime mensuel (apports, pluies et réserves) en année humide et sèche sur dix barrages de l'Est algérien</i>	114
<i>Figure 69 :Matrice MGCTI appliquée aux apports hydrologiques annuels observés dans les barrages (1990/91-2012/13)</i>	115
<i>Figure 70 :Matrice MGCTI appliquée à la pluviométrie annuelle mesurée</i>	117
<i>Figure 71 :Matrice MGCTI appliquée sur le taux de remplissage des barrages (1990/91-2012/13). ...</i>	118
<i>Figure 72 :Spectres locaux de l'analyse en ondelettes continues des précipitations sur les dix barrages (1990/91-2012/13)</i>	120
<i>Figure 73 :Spectres locaux de l'analyse en ondelettes continues des apports hydrologiques sur les dix barrages (1990/91-2012/13)</i>	123
<i>Figure 74 :Spectres locaux de l'analyse de la cohérence par ondelettes des apports/pluies</i>	126
<i>Figure 75 : Spectres locaux de l'analyse en ondelettes continues de l'indice climatique NAO (1950-2018)</i>	128
<i>Figure 76 :Spectres de cohérence par ondelettes NAO- Apport et NAO-Pluie pour dix barrages</i>	132
<i>Figure 77 :Distribution géographique des moyennes interannuelles des volumes évaporés des retenues (période : 1990/1991 -2012/2013)</i>	139
<i>Figure 78 :Caractérisation statistique de l'évaporation interannuelle des retenues de l'Est algérien. Les différents box plots : La boîte en couleur avec tirets horizontaux en haut (maximum) et en bas (minimum) correspond à l'amplitude de la dispersion, le trait rouge à l'intérieur de la boîte représente la médiane.</i>	140
<i>Figure 79 :Variation annuelle de l'évaporation cumulée sur les neuf retenues de l'Est algérien</i>	141
<i>Figure 80 :Variations annuelles des évaporations des barrages (période : 1990/1991 -2012/2013)</i> 143	
<i>Figure 81 :Variations mensuelles et saisonnières des évaporations (période : 1990/91- 2012/13)</i> ... 145	
<i>Figure 82 :Moyennes interannuelles des fuites d'eau de barrages de l'Est algérien (période : 1990/1991 - 2012/2013)</i>	148
<i>Figure 83 :Variations annuelles des fuites d'eau de barrages (période : 1990/1991 - 2012/2013)</i> .. 152	
<i>Figure 84 :Moyennes interannuelles des volumes des déversements de crue et des vidanges de fond des retenues de barrages (période : 1990/1991 - 2012/2013)</i>	153
<i>Figure 85 :Variations annuelles des déversements de crue et des vidanges de fond des retenues de barrages (période : 1990/1991 - 2012/2013)</i>	158
<i>Figure 86 :Exemples de chroniques de crues au barrage Cheffia</i>	162
<i>Figure 87 :Exemples de chroniques de crue au barrage Zardezas</i>	164
<i>Figure 88 :Chronique de crue exceptionnelle du 28 au 31 Octobre 2011 au barrage Foum El Gherza .</i>	166
<i>Figure 89 :Capacité et envasement des barrages en Afrique du Nord (d'après Rémini, 2003)</i>	171
<i>Figure 90 :Rangement par ordre décroissant de l'envasement de 19 barrages en exploitation, selon le levé bathymétrique de 2004</i>	177
<i>Figure 91 :Réduction de la capacité des retenues entre la date de mise en eau et le levé bathymétrique réalisé en 2004</i>	178
<i>Figure 92 :Taux d'envasement entre la mise en eau et le levé bathymétrique de 2004 réalisé sur 19 barrages.</i>	179
<i>Figure 93 :Extraction des sédiments par dragage et soutirage dans le barrage de K'sob entre 1990/91 et 2012/13 .</i>	180
<i>Figure 94 :Evolution de l'envasement du barrage d'Ighil Emda depuis sa mise en eau jusqu'à 2004</i>	181
<i>Figure 95 :Evolution du volume de sédiments entrants et de sédiments soutirés dans le barrage</i>	

<i>d'Ighil Emda (période de 1990 - 2010)</i>	182
<i>Figure 96 :Extraction des sédiments par dragage et soutirage dans le barrage de Zardezas entre 1975/76 et 2012/13</i>	182
<i>Figure 97 :Taux d'envasement des barrages, entre leur mise en eau respective et le levé bathymétrique de 2014 réalisé sur 22 barrages</i>	185
<i>Figure 98 :Rangement par ordre décroissant de la perte de capacité des barrages, entre leur mise en eau respective et le levé bathymétrique de 2014</i>	185
<i>Figure 99 :Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de Zadezas (1975, 1986 et 2004)</i>	187
<i>Figure 100 : Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de K'sob entre 1986 et 2004</i> ..	190
<i>Figure 101 :Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de Cheffia depuis sa mise en eau (Affoun Ikhlef et al, 2019)</i>	191
<i>Figure 102 :Evolution de la courbe Capacité- Hauteur du barrage de Béni Haroun (2013)</i>	193
<i>Figure 103 :Prévision de volume de la vase et du taux de sédimentation du barrage Béni Haroun</i>	193
<i>Figure 104 :Modélisation de la fonction $v(a)$ pour la Tafna (Laborde et al, 2013)</i>	199
<i>Figure 105 :Variation des volumes régularisés, théoriques et réels, de dix barrages (période commune : 1990/91-2012/13)</i>	202
<i>Figure 106 :Variation du ratio VR réel/VR théorique et déficit de régularisation à travers dix barrages (période commune : 1990/91-2012/13)</i>	203
<i>Figure 107 :« Boîtes à moustaches » des ratios volume régularisé réel / volume régularisé théorique de dix retenues (période: 1990/91-2012/13)</i>	204
<i>Figure 108 :Répartition par secteur d'utilisation du volume total régularisé de dix barrages de l'Est algérien (période: 1990/91-2012/13)</i>	205
<i>Figure 109 :Répartition par secteur d'utilisation du volume régularisé par chacun des barrages (période: 1990/91-2012/13)</i>	206
<i>Figure 110 :Variations annuelles par secteur d'utilisation des volumes régularisés du barrage de Cheffia (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	208
<i>Figure 111 :Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Zardezas (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	209
<i>Figure 112 :Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Guénitra (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	210
<i>Figure 113 :Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Hammam Debagh (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	211
<i>Figure 114 :Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Ain Dalia (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	211
<i>Figure 115 :Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Hammam Grouz (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	212
<i>Figure 116 :Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Ain Zada (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	213
<i>Figure 117 :Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de K'sob (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	213
<i>Figure 118 :Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Foum El Gueiss (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	214
<i>Figure 119 :Variations annuelles des volumes régularisés du barrage de Foum El Gherza (période : 1990/1991 à 2012/2013)</i>	215
<i>Figure 120 :Grands transferts hydrauliques de l'Est algérien (d'après A.N.B., 2005 in Mebarki)</i> ..	217
<i>Figure 121 :Schéma du système interconnecté Mexa-Bougous (d'après PNE 2010, modifié)</i>	218

<i>Figure 122 :Schéma du système de transfert des eaux du barrage d'Ain Dalia :.....</i>	<i>219</i>
<i>Figure 123 : Schéma du système interconnecté des barrages Zardezas, Guénitra et Zit Emba (ONID Skikda et ANB Zardezas, 2019).</i>	<i>221</i>
<i>Figure 124 :Schéma du périmètre de la vallée Saf Saf et de la plaine d'Emjez Edchich (d'après AGID, 2002, modifié).</i>	<i>222</i>
<i>Figure 125 :Schéma régional du transfert hydraulique de Beni Haroun (d'après ANBT 2019, modifié).</i>	<i>224</i>
<i>Figure 126 :Situation générale du système Sétif Hodna (PNE, 2010, modifié).....</i>	<i>225</i>
<i>Figure 127 :Schéma du transfert Ighil Emda – Mahouane (d'après PNE 2010, modifié).....</i>	<i>226</i>
<i>Figure 128 :Schéma du transfert Erraguene – Drâa Diss (d'après PNE 2010, modifié).....</i>	<i>227</i>
<i>Figure 129 :Schéma du transfert des eaux du barrage de Tichy Haf (d'après ANBT 2017, modifié).228</i>	

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Coordonnées géographiques des barrages et séries des bilans d'eau journaliers disponibles	42
Tableau 2 : Les données disponibles des apports mensuels simulés (hm ³) (période : 1965/66-2007/08).	46
Tableau 3 : Bilan hydraulique interannuel du barrage de Béni Haroun (2003/04 – 2014/15).....	48
Tableau 4 : Synthèse de la variabilité des apports simulés des bassins d'alimentation (Période commune : 1965/66-2007/08).....	68
Tableau 5 : Récapitulatif des principales caractéristiques des digues et des ouvrages annexes.....	87
Tableau 6 : Récapitulatif des principales caractéristiques des lacs de retenue.....	96
Tableau 7 : Quantification des relations entre apports et pluies à l'échelle des barrages.....	127
Tableau 8 : Quantification des relations entre la variabilité de l'indice climatique NAO et les apports/pluies de chaque barrage (données mensuelles).	130
Tableau 9 : Quelques exemples de crues au barrage Cheffia (période 1990/91 – 2012/13).....	160
Tableau 10 : Quelques exemples des crues au barrage de Zardezas (période 1990/91 – 2012/13).....	163
Tableau 11 : Quelques exemples des crues au barrage de Foum El Gherza (période 1990/91–2012/13)	165
Tableau 12 : Résultats des mesures d'envasement de six barrages tunisiens (Claude et Chartier, 1977)	172
Tableau 13 : Résultats de dépouillement des données de la bathymétrie du barrage de Saboun (Abdellaoui et al, 2002)	173
Tableau 14 : Les barrages surélevés en Algérie (Remini, 2008).....	174
Tableau 15 : Envasement des barrages de l'Est Algérien.....	176
Tableau 16 : Evolution de la capacité et de la tranche morte du barrage de Zardezas	187
Tableau 17 : Evolution de la capacité et de la tranche morte du barrage K'sob	189
Tableau 18 : Evolution de la capacité et de la tranche morte du barrage Cheffia.....	191
Tableau 19 : Evolution de la capacité et de la tranche morte du barrage Béni Haroun.....	192
Tableau 20 : Variation des volumes régularisés, théoriques et réels, des barrages en exploitation de l'Est algérien (périodes d'observation variable et commune)	201
Tableau 21 : Ventilation par type d'usage des volumes régularisés de 1990/91 à 2012/13.....	207

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES PHOTOS

<i>Photo 1 : Les barrages à multivoûtes (d'après ANBT, 2014)</i>	79
<i>Photo 2 : Exemples d'évacuateurs de crues des barrages de l'Est algérien (ANBT, 2014)</i>	82
<i>Photo 3 : Exemples de vidanges de fond des barrages de l'Est algérien (d'après l'ANBT, 2014).</i>	84
<i>Photo 4 : Exemples des prises d'eau (d'après ANBT, 2014)</i>	86
<i>Photo 5 : Bac classe A installé à proximité de la retenue du barrage de Foum El Gherza (Rémini, 2005)</i>	138
<i>Photo 6 : Bac Colorado installé à proximité de la retenue du barrage de Zardezas (ANB, 2018)</i>	138
<i>Photo 7 : Le premier gouffre karstique (avril 2003) au sein de la cuvette de Hammam Grouz (Mihoubi et al 2013 et 2017)</i>	149
<i>Photo 8 : Inondation de l'agglomération de Bouhllallah. (Daira de Ben M'Hidi) RN 44 vers Annaba. (Wilaya d'El Tarf, 2012) (d'après Affoun Ikhlef et al, 2019)</i>	161
<i>Photo 9 : Inondation du nouvel aéroport d'Annaba vers la commune El Chat (Wilaya d'El Tarf, 2012) (d'après Affoun Ikhlef et al, 2019)</i>	161
<i>Photo 10 : Rejet de la vase lors de l'opération de dragage de 2005 (Rémini, 2018).....</i>	180
<i>Photo 11 : Dragage suceuse/ refouleuse en activité dans la retenue de Foum El Gherza (IME, 2010).</i>	180

ANNEXES

Annexe 1 : Quelques bilans d'eau des barrages

Tableau 1 : Bilan hydraulique interannuel du barrage de **Babar** (2002/03 – 2015/16)

Année	Capacité début d'année (hm ³)	Irr (hm ³)	Vidange de fond (hm ³)	Déversement de crue (hm ³)	Evaporation (hm ³)	Fuite (hm ³)	Défluent (hm ³)	Capacité fin d'année (hm ³)	affluents (hm ³)	Pluie (mm)
2002/03	38,46	1,72	12,68	7,11	3,08	0,33	24,92	37,47	23,94	310,70
2003/04	37,47	4,49	9,76	12,56	4,03	0,37	31,21	36,27	30,00	390,10
2004/05	36,27	6,27	11,54	6,89	4,08	0,37	29,14	33,83	26,70	348,00
2005/06	33,83	4,74	2,29	0,90	3,30	0,37	11,59	34,29	12,06	315,70
2006/07	34,29	6,07	0,35	0,00	3,42	0,37	10,20	32,94	8,84	250,60
2007/08	32,94	4,76	0,51	0,00	3,47	0,37	9,11	36,12	12,28	323,70
2008/09	36,12	1,71	16,06	19,60	3,31	0,37	41,03	36,12	41,03	420,90
2009/10	36,12	7,90	0,04	0,00	3,75	0,37	12,05	31,14	7,07	299,90
2010/11	31,14	4,88	0,12	0,00	3,37	0,37	8,74	34,29	11,89	406,60
2011/12	34,29	6,37	0,05	0,00	3,32	0,37	10,10	30,06	5,86	149,30
2012/13	30,06	6,42	0,29	0,00	3,03	0,37	10,11	30,22	10,28	270,90
2013/14	30,22	7,93	1,60	5,51	3,52	0,37	18,93	32,55	21,27	113,90
2014/15	32,55	5,81	2,54	1,78	3,74	0,37	14,24	36,57	18,25	311,50
2015/16	36,57	4,68	5,90	4,06	4,97	0,37	19,97	30,80	14,20	191,10

Tableau 2: Bilan hydraulique interannuel du barrage de **Kissir** (2010/11 – 2015/16)

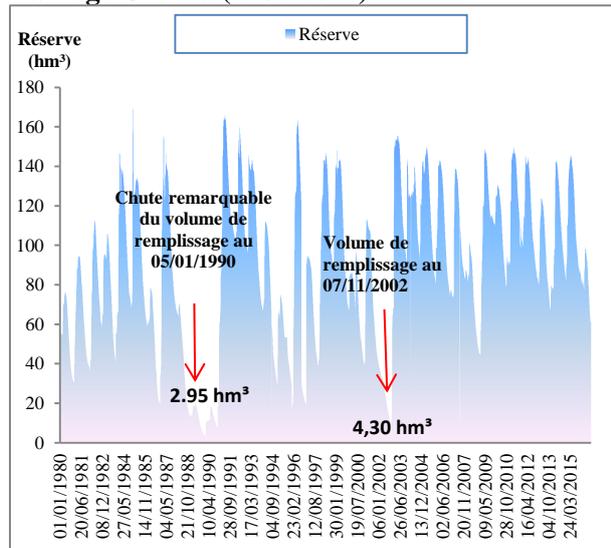
Année	Capacité début (hm ³)	AEP (hm ³)	Vidange de fond (hm ³)	Déversement de crue (hm ³)	Evaporation (hm ³)	Défluent (hm ³)	Capacité fin (hm ³)	Affluents (hm ³)	Pluie (mm)
2010-2011	67,62	2,25	0,00	114,85	0,24	117,34	66,60	116,32	1033,31
2011-2012	66,60	8,70	42,67	122,92	3,76	178,04	62,02	173,46	1084,66
2012-2013	62,02	19,95	3,79	109,50	3,47	136,71	62,84	137,53	623,80
2013-2014	62,84	18,33	23,31	95,61	3,46	140,71	60,81	138,68	876,16
2014-2015	60,81	19,11	35,33	112,13	3,58	170,15	60,14	169,49	924,17
2015-2016	60,14	17,86	16,80	44,04	3,26	81,96	61,58	83,40	848,56

Tableau 3 : Bilan hydraulique interannuel du barrage de **Koudiat Medouar** (2004/05 – 2014/15)

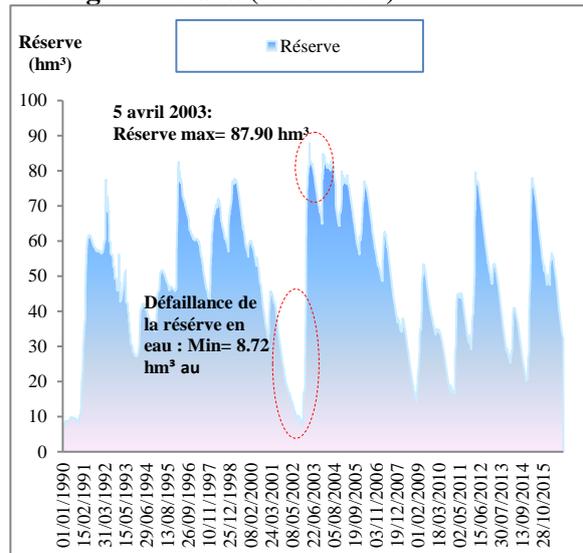
Année	Capacité début d'année (hm ³)	AEP (hm ³)	Irr (hm ³)	Vidange de fond (hm ³)	Déversement (hm ³)	Evaporation (hm ³)	Fuite (hm ³)	Deffluent (hm ³)	Affluents (hm ³)	Capacité fin d'année (hm ³)	Pluie (mm)
2004-2005	40,02	0,00	0,00	41,82	0,00	8,36	0,00	50,18	60,30	50,14	382,30
2005-2006	50,14	0,00	0,00	3,72	0,00	9,50	0,06	13,28	27,34	64,21	300,60
2006-2007	64,21	3,13	0,00	3,42	0,00	8,82	0,61	15,98	11,41	59,63	277,30
2007-2008	59,63	16,80	2,22	0,28	0,00	10,59	0,73	30,62	29,77	58,79	318,30
2008-2009	58,79	18,67	0,00	1,67	24,03	8,63	0,73	53,73	62,54	67,60	501,60
2009-2010	67,60	19,77	5,05	0,40	0,00	7,34	0,73	33,29	15,12	49,43	325,70
2010-2011	49,43	21,52	0,00	0,23	0,00	5,85	0,73	28,32	19,11	40,22	372,10
2011-2012	40,22	23,60	0,00	0,87	0,00	6,79	0,73	32,00	33,52	41,74	318,80
2012-2013	41,74	24,45	0,00	0,00	0,00	4,80	0,73	29,98	3,54	15,29	181,30
2013-2014	15,29	19,69	0,00	0,00	0,00	4,32	0,73	24,74	27,04	17,60	433,70
2014-2015	17,60	22,55	0,00	0,00	0,00	4,06	0,73	27,34	30,82	21,08	316,90
2015-2016	21,08	26,12	0,00	0,00	0,00	4,59	0,73	31,44	31,38	21,01	260,10

Annexe 2 : Variation journalière des réserves de quelques barrages

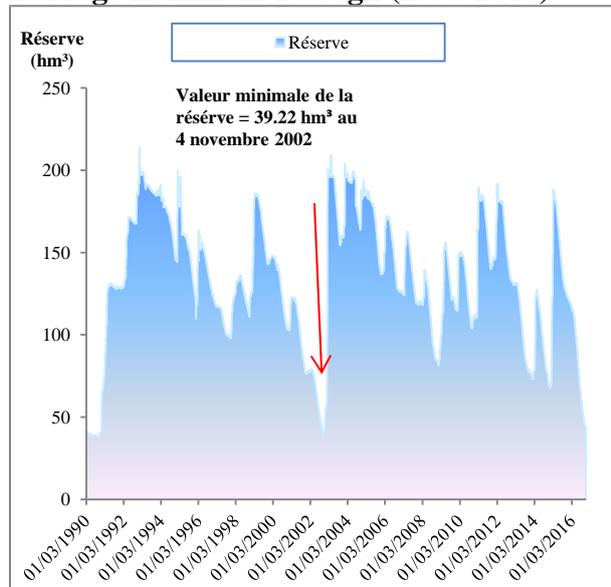
Barrage Cheffia (1980-2015)



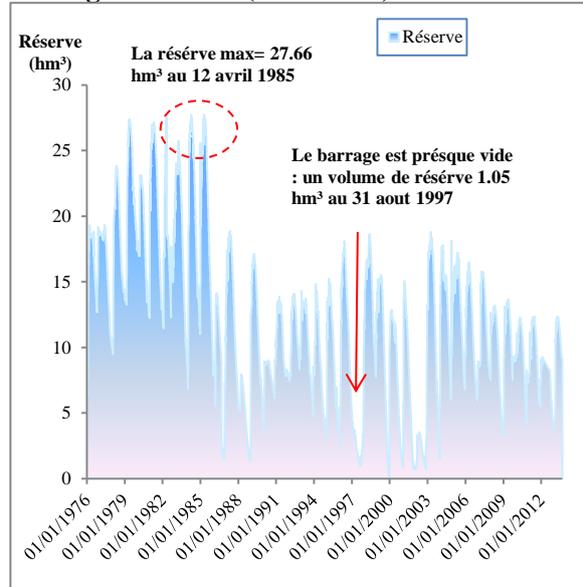
Barrage Ain Dalia (1990-2015)



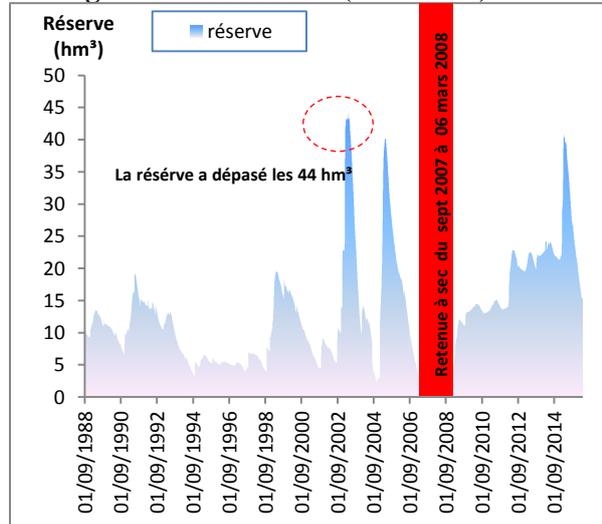
Barrage Hammam Debagh (1990-2016)



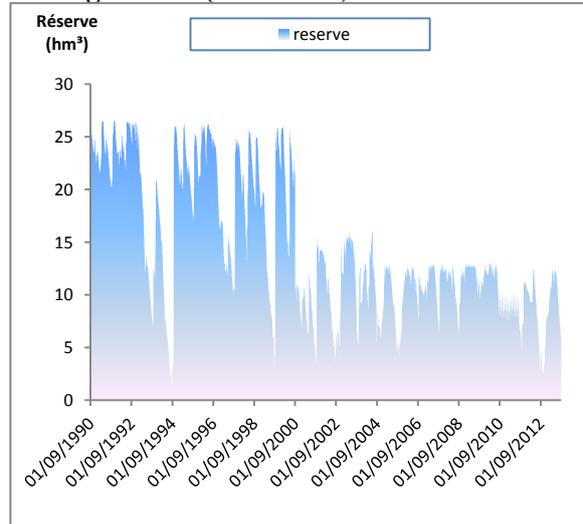
Barrage Zardezas (1976-2012)

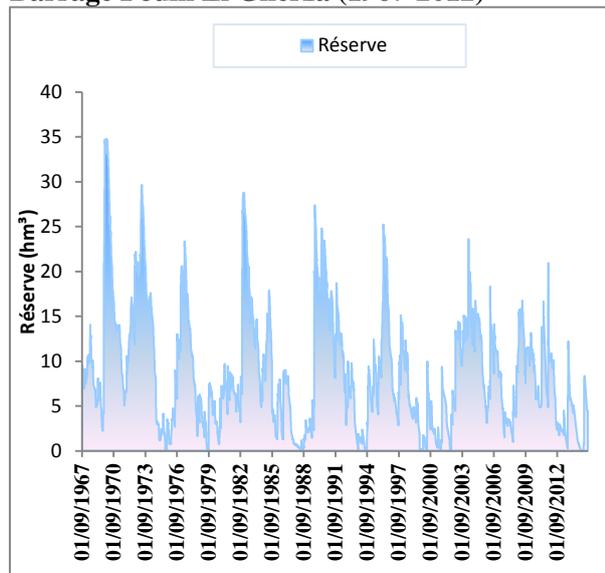
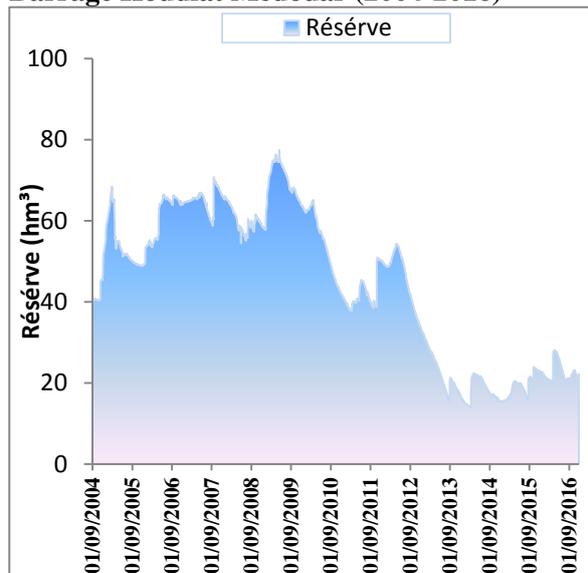
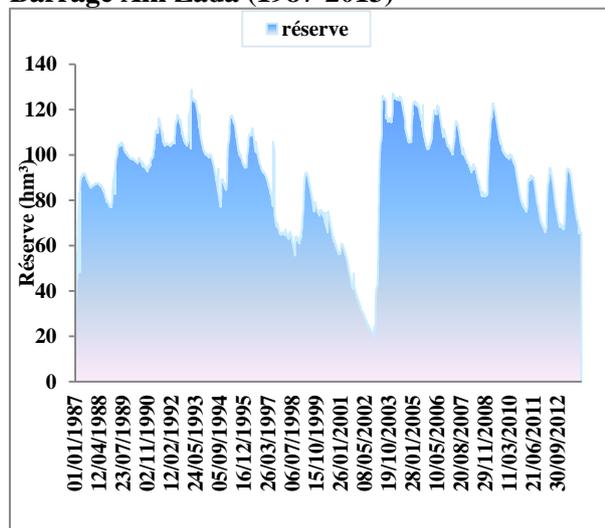
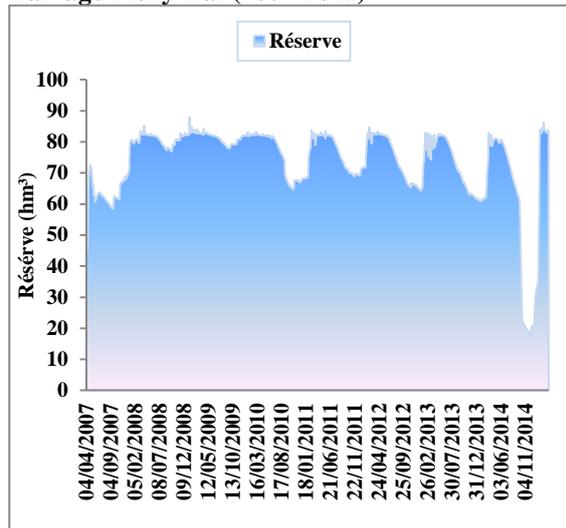
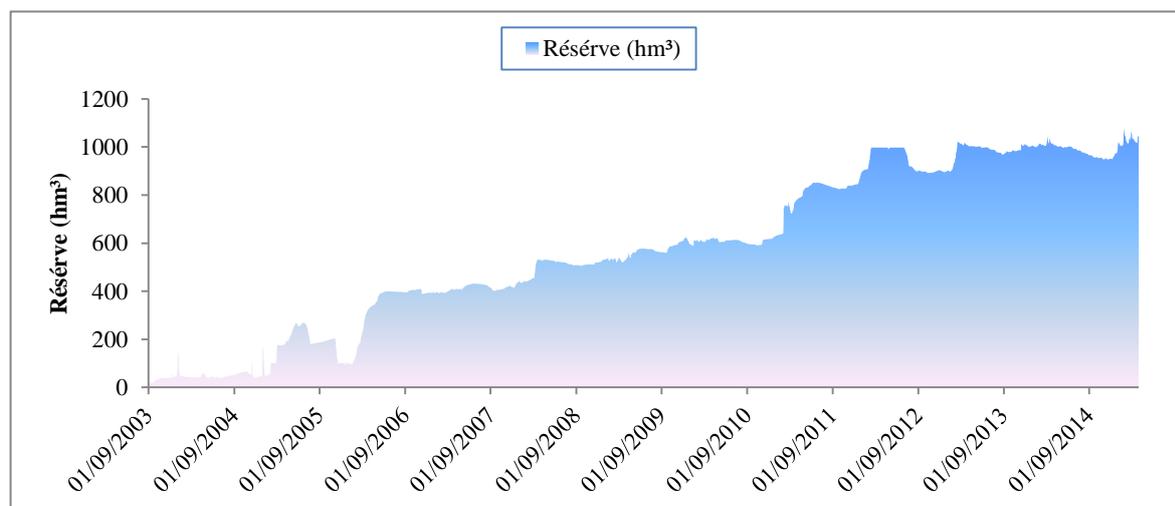


Barrage Hammam Grouz (1988-2014)



Barrage K'sob (1990-2012)



Barrage Foum El Gherza (1967-2012)**Barrage Koudiat Medouar (2004-2016)****Barrage Ain Zada (1987-2013)****Barrage Tichy Haf (2007-2015)****Barrage Béni Haroun (2003-2014)***Figure 1 : Variation journalière des réserves de quelques barrages*

Annexe 3 : Les crues de l'oued El kébir au barrage béni haroun

Tableau 5 : Quelques exemples des crues au barrage de Béni Haroun

Date de la Crue	Débit de pointe (m ³ /s)	Durée totale de la crue (heures)	Apport (ou affluent) pendant la crue (hm ³)	Le volume lâché pendant la crue (hm ³)	Pluie pendant la crue (mm)
Crue du 25 au 27 janvier 2003	2029 (27 janvier à 9 h)	51		/	/
Crue du 01 au 10 janvier 2004	1934 (04 janvier à 0 1h 30)	232	263.93	263.81	52.20
Crue du 30 décembre 2004 au 08 janvier 2005	2011(30 décembre à 14 h 40)	240	296.86	282.56	60.20
Crue du 31 mars au 02 avril 2008	355.83 (01 avril à 18 h 20)	72	40.80	41.11	45.00
Crue du 12 au 15 janvier 2009	976 (13janvier à 21 h 40)	82	64.8	65.12	87.30
Crue du 30 janvier au 18 mars 2012	/	18 jours	672.5	550.98	261.50
Crue du 22 au 27 janvier 2015	914 (26 janvier entre 22 h et 00h)	125	196.6	127.09	128.50

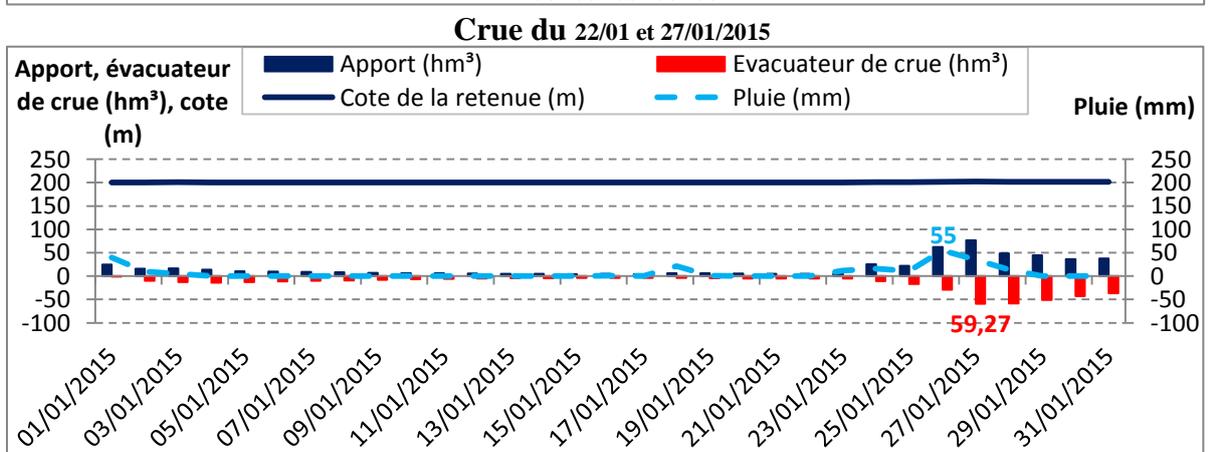
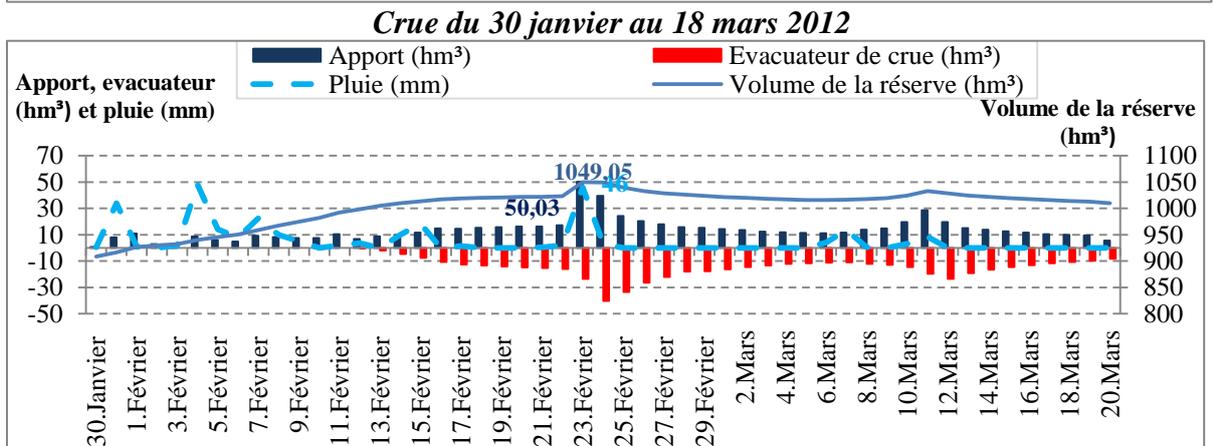
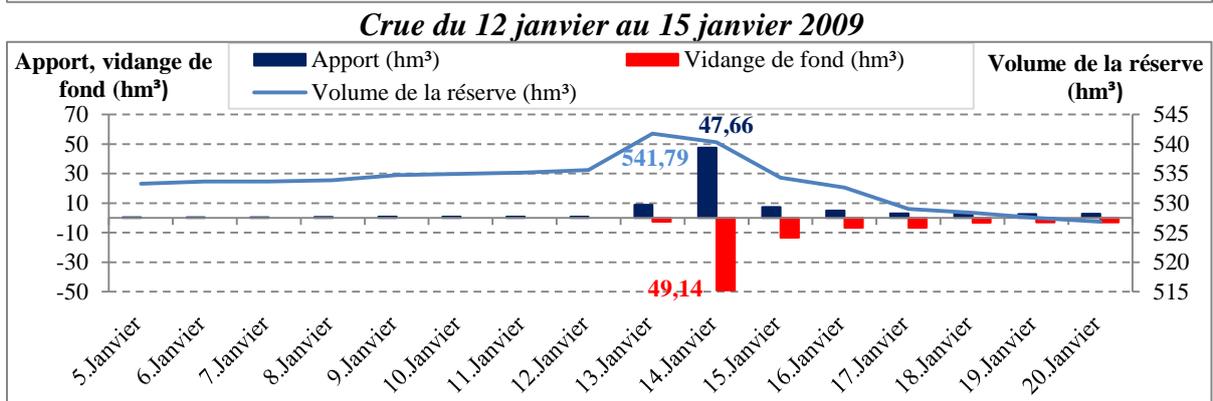
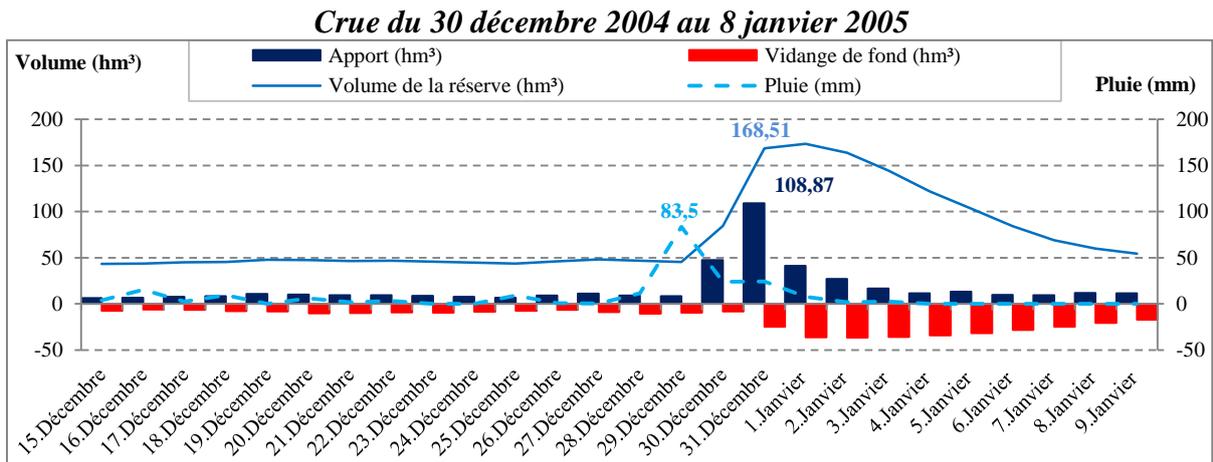


Figure 2: Exemples de chroniques de crue au barrage Béni Haroun