

**République algérienne démocratique et populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**École Nationale Supérieure d'Agronomie**  
**El Harrach (ENSA)**



**Thèse**

*En vue de l'obtention du diplôme Doctorat en sciences en Génie Rural*

**THÈME**

**QUANTIFICATION DE L'IMPACT D'ACTIVITÉ HUMAINE  
SUR LE BILAN HYDROLOGIQUE D'UNE  
NAPPE ALLUVIALE EN ZONE ARIDE  
(Cas de la vallée du M'Zab à Ghardaïa, sud Algérien)**

**Présentée par Mr : OULED BELKHIR Cheikh**

Soutenue publiquement le 12/07/2018

Devant le jury composé de:

Mr: BEN MEBAREK A.	Professeur ENSA	Président
Mr :CHABACA Md.N.	Professeur ENSA	Examineur
Mr :HARTANI T.	Professeur C.U. Tipaza	Examineur
Mr :HAMMOUDI S A.	Professeur Univ. Chlef	Examineur
Mr :ZELLA L.	Professeur Univ. Blida1	Examineur
Mr :REMINI B.	Professeur Univ. Blida1	Directeur de thèse

**Année universitaire 2017/2018**

## Résumé

Depuis des siècles, les habitants de la vallée du M'Zab profitent des eaux de crues rares pour réalimenter la nappe phréatique grâce à des retenues réalisés le long d'Oued M'Zab. Au cours des 20 dernières années la vallée a connue une croissance démographique importante ce qui a entraîné une multiplication à la demande en eau et une intense urbanisation qui a été étendue dans la palmeraie et les zones inondables. Actuellement la vallée est soumise aux problèmes liés à la remontée de la nappe phréatique, la pollution des eaux superficielles et les catastrophes dues aux crues exceptionnelles. L'objectif de cette étude est de quantifier les termes du bilan hydrologique de la nappe phréatique, et de déterminer la variabilité d'apport climatique durant la période d'observation 2005-2015, ainsi que d'étudier l'impact de l'activité humaine (effet anthropique) sur le régime hydrologique de cette nappe. Pour atteindre cet objectif, et pour préciser chaque terme du bilan hydrologique, diverses données hydrologiques et méthodes expérimentales ont été employées. L'étude fait ressortir que les hauteurs des pluies journalières du M'Zab de fréquence décennale, centennale et millénaire sont respectivement à 40 mm, 73 mm et 128 mm. On a évalué à 2 ans le période de retour des crues qui atteignent les barrages amont de la vallée. L'emploi des méthodes analogiques sur l'exutoire amont de la vallée (Daya B D.) a permis d'évaluer les volumes suivants :  $V_{10}=11 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{100}= 22 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{1000}= 37 \text{ Hm}^3$ . Après la réalisation des barrages de rétention amont, le laminage des crues a réduit considérablement les débits de différentes fréquences par un coefficient de 2,7 à 4. A la lumière des résultats acquis, la piézométrie de la nappe phréatique est en relation aux apports climatiques et à l'action anthropique (le recharge de la nappe par infiltration des eaux de restitutions urbains et agricoles). La baisse et la hausse de la nappe phréatique ont une amplitude variable dans l'espace et dans le temps. La période d'avril 2005- avril 2008 montre une stabilité saisonnière entre la période Hautes eaux et la période Basses eaux, avec un volume d'eau moyen fluctué de  $14 \text{ Hm}^3$ . La période humide allant de 2009 jusqu'à la fin de 2011 se caractérise par une remontée importante due aux fortes crues de cette période, avec un volume d'eau en surplus de  $50 \text{ Hm}^3$ . Une autre période de sécheresse allant de 2012 jusqu'à la fin de 2015, qui est caractérisée par une nouvelle phase d'abaissement avec une amplitude de 1 à 4 m/an et un volume moyen perdu de  $55 \text{ Hm}^3$ . Les essais du bilan effectués sur la nappe phréatique montrent que le bilan annuel décrit clairement les phénomènes hydrologiques interannuels. L'effet anthropique est très remarquable que soit dans les apports (l'effet de la restitution des eaux urbaines et agricoles) ou dans les pertes (prélèvement pour l'irrigation). Cependant les termes du bilan : apport des nappes amonts et diversement vers les nappes avals restent largement méconnus. Ces éléments devront faire l'objet d'une amélioration des connaissances aux futurs projets de recherche.

**Mots clés :** Vallée du M'Zab, nappe phréatique, bilan hydrologique, anthropique, crues, piézométrie, infiltration, retenue, recharge, pluie journalière.

## Abstract

For centuries, in the M'Zab valley, the inhabitants have taken advantage of rare floodwaters to replenish the water table thanks to reservoirs built along Wed M'Zab. Over the past 20 years, the valley has experienced significant population growth, which has resulted in an increase in demand for water, and an intense urbanization, which has been extended to the palm grove and flood zones. Currently the valley is subject to problems related to the rise of the water table, pollution of surface water and disasters due to exceptional floods. The objective of this study is to quantify the terms of the water balance of the water table, and to determine the variability of climatic input during the observation period 2005-2015, as well as to study the impact of the activity human (anthropogenic effect) on the hydrological regime of this water table. To achieve this objective, and to specify each term of the water balance, various hydrological data and experimental methods were used. The study shows that the daily rainfall levels in M'Zab with a ten-year, one-hundred-year and one-year frequency are respectively 40 mm, 73 mm and 128 mm. The return period of floods reaching the dams upstream of the valley has been estimated at 2 years. The use of analog methods on the outlet upstream of the valley (Daya B D.) made it possible to evaluate the following volumes:  $V_{10} = 11 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{100} = 22 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{1000} = 37 \text{ Hm}^3$ . After the construction of the upstream retention dams, the flood rolling has considerably reduced the flows of different frequencies by a coefficient of 2.7 to 4. In the light of the results obtained, the piezometry of the water table is related on the one hand to climatic inputs and on the other hand to anthropogenic action (groundwater recharge by infiltration of urban and agricultural restitution water). The drop and rise in the water table have a variable amplitude in space and time. The period from April 2005 to April 2008 shows seasonal stability between the high water period and the low water period, with an average volume of water fluctuated by  $14 \text{ Hm}^3$ . The wet period from 2009 until the end of 2011 is characterized by a significant rise due to the strong floods of this period, with a volume of water in excess of  $50 \text{ Hm}^3$ . Another period of drought from 2012 until the end of 2015, which is characterized by a new phase of lowering with amplitude of 1 to 4 m by year and an average volume lost of  $55 \text{ Hm}^3$ . The balance tests carried out on the water table show that the annual balance clearly describes inter-years hydrological phenomena. The anthropogenic effect is very remarkable, whether in inputs (the effect of restoring urban and agricultural water) or in losses (abstraction for irrigation). However, the terms of the balance sheet: contribution from upstream aquifers and variously to downstream aquifers remain largely unknown. These elements should be the subject of improved knowledge in future research projects.

**Key words:** M'Zab Valley, water table, hydrological balance, anthropogenic, floods, piezometry, infiltration, reservoir, recharge, daily rainfall

## ملخص:

كان سكان وادي مزاب يستخدمون مياه الفيضان لتجديد المياه الجوفية من خلال السدود على طول الوادي. على مدى السنوات العشرين الماضية، شهد الوادي نمواً كبيراً في عدد السكان مما أدى إلى زيادة الطلب على المياه والتوسع الحضري المكثف الذي امتد في بستان النخيل والمناطق الفيضية والأودية. يتعرض وادي مزاب حالياً لمشاكل تتعلق بارتفاع المياه الجوفية وتلوث المياه السطحية والكوارث بسبب الفيضانات الاستثنائية. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد شروط التوازن الهيدرولوجي للمياه الجوفية، وتحديد التقلبات المناخية المساهمة خلال فترة المراقبة 2005-2015، وكذلك دراسة تأثير تغير المناخ والنشاط البشري (تأثير الإنسان) على إعادة تغذية هذه الطبقة. ولتحقيق هذا الهدف، ولتحديد كل عنصر في الحوصلة، استعملنا عدة بيانات هيدرولوجية وطرق تجريبية معرفة علمياً. أظهرت الدراسة أن كميات الأمطار اليومية ذات الترددات العشرية والمئوية والألفية قدرت بـ 40 ملم و 73 ملم و 128 ملم على التوالي. وتقدر فترة عودة الفيضانات التي تصل إلى السدود العلوية للوادي إلى 2 سنوات. وقد استخدمنا الطرق التناظرية في أعلى الوادي (ضاية بن ضحوة) لحساب الكميات التالية: ح = 11 هـ<sup>3</sup>، ح = 22 هـ<sup>3</sup>، ح = 37 هـ<sup>3</sup>. بعد بناء سدود الحماية العلوية في وادي، انخفضت الفيضانات ذات الترددات المختلفة بمعدل يتراوح معامل ما بين 2.7 و 4. وتوضح الدراسة أيضاً إن تقلبات المناخية المساهمة في تغذية الطبقة المائية تنسم بتناوب مراحل رطبة وجافة خلال الفترة 2005-2015. وفي ضوء النتائج المكتسبة، يرتبط قياس مستوى المياه الجوفية بكل من المساهمات المناخية ومساهمات مياه الري والمياه المستعملة الحضرية (فعل الإنسان). إن انخفاض وارتفاع منسوب المياه الجوفية لهما مجال متغير في المكان والزمان. تظهر الفترة من أبريل 2005 إلى أبريل 2008 استقراراً موسميًا بين فترة ارتفاع المياه وفترة المياه المنخفضة، مع متوسط حجم مياه يتذبذب بنسبة 14 هـ<sup>3</sup>. تتميز الفترة الرطبة من عام 2009 وحتى نهاية عام 2011 بارتفاع كبير بسبب الفيضانات القوية لهذه الفترة، مع ارتفاع حجم المياه يقارب 50 هـ<sup>3</sup>. فترة جفاف أخرى من عام 2012 حتى نهاية عام 2015، والتي تتميز بمرحلة جديدة من الانخفاض بـ 1 إلى 4 متر / سنة وخسارة متوسطة من 55 هـ<sup>3</sup>. تظهر اختبارات الحوصلة المائية الجوفية أن الحوصلة السنوية تصف بوضوح الظواهر الهيدرولوجية بين السنين. أدى العجز المشترك في الأمطار والتدفقات سطحية إلى انخفاض في منسوب المياه الجوفية خلال الفترة 2006-2007. تتميز السنة الهيدرولوجية 2008 - 2009 بفائض في كامل المنطقة. إن التأثير البشري واضح جدا سواء في المساهمات (تأثير المياه الحضرية والزراعية) أو في الخسائر (استخراج مياه السقي). ومع ذلك، فإن بعض عناصر الحوصلة المائية: كمساهمة الطبقات الجوفية المجاورة والعلوية وكذا التدفق نحو الطبقات السفلى تظل غير معروفة إلى حد كبير، مما يقلل من دقة تقدير الحوصلة النهائية. يجب تحسين معرفة هذه العناصر مشاريع الأبحاث المستقبلية.

**الكلمات المفتاحية:** وادي مزاب، المياه الجوفية، التوازن الهيدرولوجي، تأثير الإنسان، الفيضانات، القياس، التسلسل، الخزان، التغذية، المطر اليومي.

## Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce travail. Toutefois, ma gratitude va d'abord à mon directeur de thèse Mr Remini B. qui m'a fait profiter de ses connaissances et de son soutien moral et scientifique, et qui n'a pas hésité, un seul instant à m'encourager, et pour tous les conseils et l'aide précieux qu'il m'a transmis.

Je remercie vivement aussi les membres de jury:

- Mr le professeur BEN MEBAREK, pour avoir collaboré avec Mr Remini et accepté de présider notre jury.
- Mr le professeur CHABACA, Mr le professeur HARTANI, Mr le professeur HAMMOUDI, Mr le professeur ZELLA, ses connaissances et ses expériences, font d'eux des examinateurs déterminants pour le jugement de ce travail. Je les remercie pour avoir acceptés de participer au jury.

Je n'oublie pas aussi de remercier :

- Le personnel de l'ANRH et de la DRH de Ghardaïa, en particulier Mr Achour et Mr Chouireb pour avoir bien voulu mettre à ma disposition toutes les données disponibles sur la région d'étude.
- L'équipe de l'ONM de Ghardaïa, pour les informations météorologiques ils m'ont transmis.
- Les équipes de : LTPSud, ADE, DSA et l'ONA de Ghardaïa.
- Tout le personnel de l'université de Ghardaïa, en particuliers mes collègues enseignants : Garbati, Benadda, Alliwa, Kamaci, Daher, Chebihi, Bouamere et les autres.
- Mes étudiants de Master Ressources Hydriques : Krimate, Rahali, Zakaria, Bouchareb, Bouchenga, Rostom, Guessoume et Garbati.
- Mes amis : Mustapha, Schamsdine, Djemai, Hichame et Dahmane.
- Les doctorants de l'université de Ghardaïa, en particulier, Mlle Araba, Ben Abderrahmane...

Je tiens aussi à exprimer mes reconnaissances à ma grande famille ; ma mère, mon père, ma femme, mes frères et mes enfants pour leurs aides et encouragement. Devant tous je répète Merci.

---

## Liste des abréviations

ADE: Algérienne Des Eaux ;  
DRE : Direction des Ressources en Eau ;  
ANRH: Agence National Ressources hydraulique ;  
DPAT: Direction de planification et d'aménagement des territoires ;  
DSA: Direction des services agricoles;  
OMS: Organisation Mondiale de la Santé ;  
ONM: Office National Météorologique ;  
AEP: Approvisionnement en eau potable ;  
CE: Conductivité électrique ;  
C.T : Complexe Terminal ;  
C.I : Continental Intercalaire ;  
D B D, Daya B D : Daya B. D.  
pH : Potentiel d'Hydrogène ;  
SAR: Sodium Absorption Ratio ;  
S.A.S.S : Système Aquifère du Sahara Septentrional ;  
ZNS: Zone non saturée;  
ASAL : Agence spatiale algérienne ;  
CNRS : Centre nationale des recherches scientifiques ;  
IRD : L'institut de recherche pour le développement ;  
ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer ;

# Table de matières

RESUMES	
REMERCIEMENTS	
LISTE DES ABREVIATIONS	
TABLE DE MATIERES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET HUMAIN DU M'ZAB.....	6
I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE	6
I.1.1. WILAYA DE GHARDAÏA	6
I.1.2. VALLEE DU M'ZAB	6
I.2. LE PAYSAGE GENERALE DU M'ZAB	7
I.3. APERÇUE HISTORIQUE DE LA REGION DU M'ZAB	8
I.4. CADRE SOCIO-ECONOMIQUE	10
I.5. ACTIVITES ET EMPLOIS	11
CHAPITRE II: ASPECT HYDRO-CLIMATIQUE DE LA REGION DU M'ZAB.....	13
II.1. INTRODUCTION	13
II.2. ETUDE DES FACTEURS CLIMATIQUES	13
II.2.1. LA TEMPERATURE DE L'AIRE	13
II.2.2. L'HUMIDITE RELATIVE	14
II.2.3. LE VENT	14
II.2.4. DEMANDE CLIMATIQUE (EVAPORATION EVAPOTRANSPIRATION)	15
II.2.5. SYNTHÈSE CLIMATIQUE	16
II.2.5.1. DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE DE GAUSSEN	16
II.2.5.2. CLIMAGRAMME D'EMBERGER	17
II.3. REGIME PLUVIOMETRIQUE DE LA REGION DU M'ZAB	18
II.3.1. INTRODUCTION	18
II.3.2. ORIGINE DES PRECIPITATIONS DANS LA VALLEE DU M'ZAB	18
II.3.3. PRECIPITATION MOYENNE ANNUELLE	19
II.3.4. PRECIPITATION MOYENNE MENSUELLE	20
II.3.5. LES PRECIPITATIONS MAXIMALES JOURNALIERES	21
II.3.5. 1. FREQUENCES DU NOMBRE DE JOURS DE PLUIE JOURNALIERE EN FONCTION DE LEUR HAUTEUR	22
II.3.5. 2. REPARTITION DES PLUIES JOURNALIERES ET PERIODES DE SECHERESSES ( 1970-2015 )	24
II.3.6. ÉTUDE STATISTIQUE DE PRECIPITATIONS MAXIMALES JOURNALIERES	26
II.3.6. 1. CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE L'ECHENILLONS ANALYSEE	27
II.3.6. 2. AJUSTEMENT DE LA SERIE PLUVIOMETRIQUE AUX LOIS DE PROBABILITE	27
II.3.6. 3. TEST DE KHI2	28
II.3.7. PLUIES DE COURTES DUREES (COURBES IDF)	28
II.4. CONCLUSION ET SYNTHÈSE	30
CHAPITRE III : ASPECT HYDROLOGIQUE DE LA REGION DU M'ZAB.....	32
III.1. INTRODUCTION	32
III.2. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DU M'ZAB	32
III.2.1. DIMENSIONS GEOMETRIQUES	32
III.2.2. INDICE DE COMPACITE $K_G$	32
III.2.3. RECTANGLE EQUIVALENT	33
III.2.4. COURBE HYSOMETRIQUE	34
III.3. INDICES DE PENTE, DENIVELEE SPECIFIQUE ET TYPE DE RELIEF	34
III.3.1. PENTE MOYENNE $I_M$	34
III.3.2. INDICE DE PENTE GLOBALE $I_G$	34
III.3.3. INDICE DE PENTE DE ROCHE $I_P$	35
III.3.4. DENIVELEE SPECIFIQUE DS	35
III.3.5. TYPE DE RELIEF	35
III.4. CARACTERISTIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE	36
III.4.1. LOIS DE HORTON (RAPPORT DE CONFLUENCE ET LONGUEUR DES TALWEGS).	36
III.4.2. DENSITE DE DRAINAGE	37
III.4.3. RECAPITULATION DES DONNEES CARACTERISTIQUES DU BASSIN DU M'ZAB	37
III.5. HISTORIQUE DES CRUES DU M'ZAB	37
III.5.1. ARCHIVES ET DONNEES	37
III.5.2. PERIODE DE RETOUR DES CRUES SUR LE M'ZAB	41
III.5.3. REPARTITION SAISONNIERE DES CRUES	42
III.6. RECONSTITUTION DES CRUES SUR OUED M'ZAB	43
III.6.1. GENERALITE	43
III.6.2. TEMPS CONCENTRATION $T_C$	45
III.6.3. TEMPS DE BASE (TB) ET TEMPS DE MONTEE (TM)	45
III.6.4. COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT $K_R$	46
III.6.5. COEFFICIENT DE POINTE A	47
III.6.6. COEFFICIENT D'ABATTEMENT DES ECOULEMENTS $K_E$	47
III.6.7. VITESSES D'ECOULEMENT INSTANTANES	48

III.6.9. APPLICATION ET ESTIMATION DES DEBITS SUR OUED M'ZAB	54
III.6.10. HYDROGRAMMES DES CRUES	55
III.6.11: CORRELATION PLUIE-DEBIT.	57
III.7. ÉTUDE DE LA CRUE D'OCTOBRE 2008	59
III.7.1. CIRCONSTANCES DE LA CRUE	60
III.7.2. IMAGES SATELLITAIRES	60
III.7.3. IMPACTS IMMEDIATS DES INONDATIONS	60
III.7.4. ESTIMATION DU DEBIT MAXIMUM DE LA CRUE D'OCTOBRE 2008	61
III.7.5. ZONES INONDABLES DE LA CRUE OCTOBRE 2008	62
III.8. VULNERABILITE AUX INONDATIONS EN QUELQUES SITES DANS LA VALLEE	63
III.8.1. CHOIX DE SECTIONS	64
III.8.2. SIMULATION NUMERIQUE DE LA CRUE A L'HEC-RAS	64
III.9. CONCLUSION ET SYNTHESE	66
CHAPITRE IV: ASPECT GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU M'ZAB .....	69
IV.1. GEOLOGIE DU M'ZAB	69
IV.1.1. INTRODUCTION	69
IV.1.2. GEOMORPHOLOGIE GENERALE DE LA REGION DU M'ZAB	69
IV.1.2.1. LA REGION DES DAÏA	69
IV.1.2.2. LES PLAINES DE LA DALLE HAMADIENNE	69
IV.1.2.3. LES REGIONS ENSABLEES	70
IV.1.2.4. LA CHEBKHA.	70
IV.1.3. TYPE DE RELIEF	71
IV.1.4. ASPECT GEOLOGIQUE REGIONAL DU M'ZAB	72
IV.2. ASPECT GEOTECHNIQUE DE LA VALLEE DU M'ZAB	74
IV.2.1. INTRODUCTION	74
IV.2.2. METHODES DE MESURE DE LA PERMEABILITE	74
IV.2.2.1. METHODE MUNTEZ (TEST DE LA PERMEABILITE PAR DOUBLE ANNEAUX)	74
IV.2.2.2. METHODE DU PUITTS OU PORCHET	79
IV.2.2.3. ESSAI DE PERMEABILITE LUGEONS	79
IV.2.3. INVESTIGATION SUR TERRAIN DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES ET GEOTECHNIQUES	80
IV.2.3.1. L'INFILTRATION EFFICACE	80
IV.2.3.2. MESURE IN SITU DE LA PERMEABILITE	83
IV.3. CONCLUSIONS ET SYNTHESSES	87
CHAPITRE V. ASPECT HYDROGEOLOGIQUE DU M'ZAB .....	90
V.1. GENERALITE SUR LES RESSOURCES HYDRIQUES SOUTERRAINES DU M'ZAB	90
V.1.1. NAPPES PHREATIQUES (ALLUVIONNAIRE ET DU TURONIEN)	90
V.1.2. NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE (CI)	90
V.2. ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT DE LA NAPPE PHREATIQUE DU M'ZAB	92
V.2.1. INTRODUCTION	92
V.2.2. FORMATION DE LA NAPPE PHREATIQUE	92
V.2.5. CHRONOLOGIE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE	94
V.2.5.1. LE RESEAU DES PUITTS TRADITIONNELS DANS LA VALLEE DU M'ZAB	94
V.2.5.2. MESURES IN-SITU	96
V.2.5.3. L'APPROCHE GEOSTATISTIQUE	96
V.2.5.4. ANALYSE DES DONNEES PIEZOMETRIQUES	97
V.2.5.5. FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES	108
V.2.5.6. SYNTHESE CHRONOLOGIQUE	117
V.3. CONCLUSION ET SYNTHESE	119
CHAPITRE VI: IMPACT DE L'ACTIVITE HUMAINE SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE DE LA VALLEE DU M'ZAB .....	122
VI.1. INTRODUCTION	122
VI.2. UTILISATION DES BARRAGES ET RETENUES POUR LA PROTECTION DANS LA VALLEE	122
VI.2.1. FONCTIONNEMENT GENERALE	122
VI.2.2. OUVRAGES DE RETENTION D'AMONT	123
VI.2.3. BARRAGES ET SEUILS A TRAVES LA VALLEE (LES AHBAS).	123
VI.3. IMPACT DES OUVRAGES AMONTS SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE D'OUED M'ZAB	125
VI.3.1 IMPORTANCE DES OUVRAGES	125
VI.3.2. SIMULATION DE L'EFFET DE LAMINAGE DES CRUES	126
VI.4. IMPACT DES TRAVAUX D'AMENAGEMENT DU LIT D'OUED SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE DU M'ZAB.	128
VI.4.1. ETAT DE FAIT DE LA VALLEE	128
VI.4.2. HISTORIQUE DES TRAVAUX D'AMENAGEMENT DANS LA VALLEE DU M'ZAB	128
VI.4.3. CONSEQUENCE DES TRAVAUX DE RECALIBRAGE	128
CHAPITRE VII : ETABLISSEMENT DU BILAN HYDROLOGIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE DU M'ZAB .....	131
VII.1. INTRODUCTION	131
VII.2. METHODOLOGIE	131
VII.2.1. L'ANNEE HYDROLOGIQUE	131
VII.2.2. ÉQUILIBRE DU BILAN	132
VII.2.3. ÉLÉMENTS D'UN BILAN D'UNE COUCHE AQUIFERE LIBRE	132
VII.2.4. EXPRESSION GENERALE DU BILAN D'EAU D'UNE COUCHE AQUIFERE	133
VII.2.5. INFILTRATION EFFICACE	133
VII.2.6. EVAPOTRANSPIRATION ET EVAPORATION A TRAVERS LA ZONE NON SATUREE	133

---

VII.2.7. RELATION AVEC LES COUCHES AQUIFERES PROFONDES ET ADJACENTES	135
VII.3 ÉTABLISSEMENT DU BILAN HYDROLOGIQUE : APPLICATION SUR LA NAPPE PHREATIQUE DU M'ZAB	135
VII.3.1. CADRE HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU SYSTEME ETUDIE	135
VII.3.2. CHOIX DES PERIODES DE REFERENCES	136
VII.3.3. ELEMENTS DU BILAN HYDROLOGIQUE	136
VII.3.4. BILANS MOYENS PERIODIQUES DE 2005-2009 ET 2010-2015	138
VII.3.4.1. LES APPORTS	138
VII.3.4.2. LES PERTES	141
VII.3.4.3. BALANCE D'EAU DEFINITIVE	143
VII.3.4.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS	144
VII.3.5. BILAN POUR UNE ANNEE DETERMINEE	144
VII.3.5.1. LES APPORTS	145
VII.3.5.2. LES PERTES	146
VII.3.5.3. BALANCE D'EAU DEFINITIVE	147
VII.3.5.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS	147
CONCLUSION GENERALE .....	149
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	153

## Liste des tableaux

TABLEAU I.1: ÉVOLUTION DE LA POPULATION PAR COMMUNE DES VALLEES DU M'ZAB.....	10
TABLEAU II.1: TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES, MINIMALES ET MAXIMALES.....	13
TABLEAU II.2 : FREQUENCES DES VENTS SELON LEUR DIRECTION (ONM GHARDAÏA 1990-2015) .....	15
TABLEAU II.3 : VITESSE MOYENNE DU VENT (ONM GHARDAÏA 1990-2015) .....	15
TABLEAU II.4 : EVAPORATION ET INSOLATION MENSUELLES (ONM GHARDAÏA 1990-2015).....	15
TABLEAU II.5: PLUIES JOURNALIERES MAXIMALES OBSERVEES A GHARDAÏA (1970-2015).....	26
TABLEAU II.6 : CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE LA SERIE .....	27
TABLEAU II.7: TEST DE KHI 2 APPLIQUE A LA SERIE DES PJMAX.....	28
TABLEAU II.8: ESTIMATION DE LA PERIODE DE RETOUR SUR LA STATION DE GHARDAÏA 1970-2015.....	28
TABLEAU II.9: INTENSITES MAXIMALES EN MM/H DE DUREE T (H) ET DE PERIODE DE RETOUR T(AN) .....	29
TABLEAU III.1: CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DES BASSINS ELEMENTAIRES DU M'ZAB .....	32
TABLEAU III.2: VALEURS DE $K_g$ ESTIMES SUR LES BASSINS ELEMENTAIRES DU M'ZAB .....	33
TABLEAU III.3: CALCUL DES SURFACES ET LARGEURS INTERVALLES .....	33
TABLEAU III.4 : CLASSIFICATION DU RELIEF SELON ORSTOM .....	35
TABLEAU III.5 : RESULTATS DE L'HIERARCHISATION DU BASSIN DU M'ZAB.....	36
TABLEAU III.6 : DONNEE MORPHOLOGIQUES ET HYDROGRAPHIQUES DU BASSIN DU M'ZAB.....	37
TABLEAU III.7: HISTORIQUE DES CRUES SUR LE M'ZAB .....	38
TABLEAU III.8: TEMPS DE CONCENTRATION SUR LE BASSIN DU M'ZAB .....	45
TABLEAU III.9: TEMPS DE BASE $T_B$ ET TEMPS DE MONTEE $T_M$ .....	46
TABLEAU III.10: COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT DES SOUS BASSINS DU M'ZAB.....	46
TABLEAU III.11 : COEFFICIENT DE POINTE DES SOUS BASSINS DU M'ZAB.....	47
TABLEAU III.12 : COEFFICIENT D'ABATTEMENT SPATIALE DE L' AVERSE POUR CHAQUE SOUS BASIN .....	51
TABLEAU III.13 : RECAPITULATIF DU CALCUL DE DEBIT MAXIMAL, MOYEN ET VOLUME.....	54
TABLEAU III.14 : DEBITS MAX DE CRUE POUR DIFFERENTES PERIODES DE RETOUR .....	57
TABLEAU III.15 : CHRONOLOGIE DES CRUES EN FONCTIONS DE LEURS PJ MAX .....	58
TABLEAU III.16.: ESTIMATION DU DEBIT MAX DE LA CRUE 01 OCTOBRE 2008 SUR LE M'ZAB ET METLILI .....	62
TABLEAU IV.1 : CLASSES DE PERMEABILITE EN FONCTION DE LA VALEUR DE K .....	78
TABLEAU IV.2 : VALEURS DE K EN M/S MESUREES PAR LA METHODE DE MUNTEZ.....	85
TABLEAU IV.3 : VALEURS DE K EN M/S MESUREES PAR LA METHODE DE PORCHET .....	85
TABLEAU IV.4: PROFONDEURS DES SONDAGES CAROTTES REALISEES PAR LE LTPS SUR OUED LABIOUDH.....	86
TABLEAU V.1: ÉTAT D'EXPLOITATION DE LA NAPPE CI DANS LA VALLEE DU M'ZAB (ANRH, 2011).....	91
TABLEAU V.2: CALCUL DES VOLUMES DE LA FLUCTUATION SAISONNIERE DE LA NAPPE PHREATIQUE DU M'ZAB .....	111
TABLEAU V.3: CALCUL DES VOLUMES DE LA FLUCTUATION ANNUELLE DE LA NAPPE PHREATIQUE DU M'ZAB .....	115
TABLEAU VI.1: CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET HYDRAULIQUES DES OUVRAGES DE RETENTION AMONT .....	123
TABLEAU VI.2: CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET HYDRAULIQUES DES AHBAS.....	126
TABLEAU VI.3: DEBITS MAXIMALES AUX DIFFERENTES CONFLUES D'OUED M'ZAB AVANT ET APRES L'AMENAGEMENT.....	126
TABLEAU VII.1: BILAN HYDROLOGIQUE DANS LES CONDITIONS NATURELLES (CASTANY, 1968) .....	132
TABLEAU VII.2: BILAN HYDROLOGIQUE TENANT COMPTE DE L'INTERVENTION DE L'HOMME (CASTANY, 1968).....	132
TABLEAU VII.3: BILAN HYDROLOGIQUE POUR UNE NAPPE PHREATIQUE.....	137
TABLEAU VII.4: VOLUMES DE CRUES INFILTREES DE 2005-2009 ET 2010-2015.....	138
TABLEAU VII.5: VOLUMES INFILTRES SUR LES PLUIES EFFICACES (2005-2009 ET 2010-2015).....	139
TABLEAU VII.6: CALCUL DES BESOINS EN EAU POUR UN SYSTEME ETAGE DANS LA VALLEE DU M'ZAB .....	140
TABLEAU VII.7 : ESTIMATION DES VOLUMES D'EAU DE DRAINAGE RESTITUES (2005-2009 ET 2010-2015).....	140
TABLEAU VII.8: VOLUMES RESTITUEES DES EAUX URBAINES DANS LA NAPPE PHREATIQUE. (2005-2009 ET 2010-2015) .....	141
TABLEAU VII.9: DEBITS MOYENS ANNUELS DEVERSEES DANS LA NAPPE PHREATIQUE AVAL (2005-2009 ET 2010-2015).....	142
TABLEAU VII.10: BALANCE D'EAU MOYENNE ANNUELLE DE PERIODES 2001-2009 ET 2010-2015 .....	143
TABLEAU VII.11: VOLUMES INFILTRES SUR LES PLUIES EFFICACES (10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 ET 10/12-09/13).....	145
TABLEAU VII.12: VOLUMES DE CRUES INFILTREES POUR LES PERIODES: 10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 ET 10/12-09/13 .....	145
TABLEAU VII.13: VOLUMES RESTITUEES DES EAUX URBAINES(10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 ET 10/12-09/13).....	145
TABLEAU VII.14: DEBITS ANNUELS DEVERSEES (10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 ET 10/12-09/13).....	146
TABLEAU VII.15: BALANCE D'EAU ANNUELLE DES ANNEES: 10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 ET 10/12-09/13 .....	147



## Liste des figures

FIGURE I.1: SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA WILAYA DE GHARDAÏA	6
FIGURE I.3: PAYSAGE GEOMORPHOLOGIQUE DU M'ZAB	8
FIGURE 1.4: COUPE SCHEMATIQUE DE LA VALLEE DU M'ZAB	8
FIGURE 1.5 : SITUATION DES ANCIENNES KSOURS DANS DE LA VALLEE DU M'ZAB	9
FIGURE 1.6 : PERSPECTIVE ET CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE	10
FIGURE II.1 : VARIATIONS DES TEMPERATURES (MOY, MAX, MIN) (ONM GHARDAÏA 1990-2015)	13
FIGURE II.2: HUMIDITE MOYENNE MENSUELLE ET ANNUELLE DE STATION DE GHARDAÏA (1990-2014)	14
FIGURE II.3: EVAPORATION, EVAPOTRANSPIRATION PENMAN ET INSOLATION (ONM GHARDAÏA 1990-2015)	16
FIGURE II.4: DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE DE GAUSSENDE LA REGION DE GHARDAÏA (1970-2015)	17
FIGURE II.5: ETAGE BIOCLIMATIQUE DU M'ZAB SELON LE CLIMAGRAMME D'EMBERGER	17
FIGURE II.6: LES DEFERENTES SITUATIONS METEOROLOGIQUES DE LA REGION DU M'ZAB	18
FIGURE II.7 : CARTE DES ISOHYETES DE LA PLUIE MOYENNE ANNUELLE DU SAHARA (DUBIEF, 1953)	19
FIGURE II.8: GRAPHIQUE DES CUMULS PLUVIOMETRIQUES ANNUELS (1970-2015)	19
FIGURE II.9: HISTOGRAMME DES CUMULES ANNUELLES ET PLUIES JOURNALIERES MAXIMALES 1970-2015	20
FIGURE II.10: REPARTITION DES MOIS LES PLUS PLUVIEUX DE L'ANNEE (DUBIEF, 1963)	21
FIGURE II.11: HISTOGRAMME DE LA PLUIE MOYENNE MENSUELLE SUR LA PERIODE 1970-2015	21
FIGURE II.12: NOMBRE DE JOURS DES PLUIES JOURNALIERES (1970-2015)	22
FIGURE II.13: TOTAUX ANNUELS MOYENS DES PLUIES SUPERIEURES A 5 MM EN 24 HEURES (DUBIEF, 1959)	23
FIGURE II.14: TOTAUX ANNUELS MOYENS DES PLUIES SUPERIEURES A 10 MM EN 24 HEURES (DUBIEF, 1959)	23
FIGURE II.15: TOTAUX ANNUELS MOYENS DES PLUIES SUPERIEURES A 20 MM EN 24 HEURES (DUBIEF, 1959)	24
FIGURE II.16: GRAPHIQUE DES PRECIPITATIONS JOURNALIERS INTER ANNUELLES DU M'ZAB POUR LA PERIODE 1970-2015	24
FIGURE II.17: AJUSTEMENT GRAPHIQUE A LA LOI DE GALTON ET GUEMBEL PAR HYDROLAB LOGICIEL	27
FIGURE II.18: COURBE IDF DE LA STATION DE GHARDAÏA (1970-2015)	29
FIGURE III.1: TOPOGRAPHIE ET HYDROGRAPHIE DU BASSIN VERSANT DU M'ZAB	32
FIGURE III.2 : RECTANGLE EQUIVALENT D'OUED M'ZAB	33
FIGURE III.3 : COURBE HYPOMETRIQUE D'OUED M'ZAB	34
FIGURE III.4 : GRAPHE DE LA LOI DE HORTON DU BASSIN DU M'ZAB	36
FIGURE III.5: FREQUENCES MENSUELLES DES CRUES D'OUED M'ZAB	43
FIGURE III.6: LES CRUES EXCEPTIONNELLES ENREGISTREES SUR LE M'ZAB	43
FIGURE III.7: DECOUPAGE DES SOUS-BASSINS VERSANT DU M'ZAB	44
FIGURE III.8: SYSTEME HYDROGRAPHIQUE DE LA PARTIE AMONT ET CENTRALE DU M'ZAB	44
FIGURE III.9 : HYDROGRAMMES RECONSTITUES PAR LA METHODE DE SOKOLOVSKY SUR LES EXUTOIRES DU M'ZAB	56
FIGURE III.10 : PLUIES JOURNALIERES FREQUENTIELLES EN FONCTION DES DEBITS	57
FIGURE III.11 : OUED M'ZAB EN CRUE (PONT MLIKA 01 OCTOBRE 2008)	59
FIGURE III.12: OUED METLILI EN CRUE (PONT CENTRE VILLE 01 OCTOBRE 2008)	59
FIGURE III.13: IMAGES SATELLITE DE L'EVENEMENT (ONM 2009) : A GAUCHE DU 30/09/2008 ET A DROITE AU 01/10/2008	60
FIGURE III.14: SITUATIONS A LA SURFACE (ONM 2009) : A GAUCHE DU 30/09/2008 ET A DROITE AU 01/10/2008	60
FIGURE III.15 : QUELQUES EXEMPLES DE DEGATS DE LA CRUE 01 OCTOBRE 2008	61
FIGURE III.16 : SITUATION DES SECTIONS D'ESTIMATION DE DEBIT DE LA CRUE OCTOBRE 2008	62
FIGURE III.17 : ZONES INONDABLES DE LA CRUE D'OCTOBRE 2008 DANS LA VALLEE DU M'ZAB (ASAL 2008)	63
FIGURE III.18: SITUATION DES SITES VULNERABLES	64
FIGURE III.27 : CARTE DE VULNERABILITE AUX INONDATIONS POUR LES CRUES DECENNALE, CENTENNALE, MILLENALE GH	65
FIGURE III.28 : CARTE DE VULNERABILITE AUX INONDATIONS POUR LES CRUES DECENNALE, CENTENNALE, MILLENALE MTL	66
FIGURE IV.1: LES FORMATIONS GEOMORPHOLOGIQUES DE LA WILAYA DE GHARDAÏA (DELTA, 2006)	70
FIGURE IV.2: LES GRANDS ENSEMBLES GEOMORPHOLOGIQUES DU M'ZAB ET DE SES ABORDS (BOHART, 1977)	71
FIGURE IV.3: COUPE E-W DES PRINCIPAUX ELEMENTS DE RELIEF COMPOSANT LES PAYS DU M'ZAB (BOHART, 1977)	72
FIGURE IV.4: CARTE GEOLOGIQUE REGIONALE DE LA REGION DU M'ZAB (BUSSON, 1970)	73
FIGURE IV.5: COUPE LITHOLOGIQUE REPRESENTATIVE DE LA VALLEE (ANRH, 2011)	73
FIGURE IV.6: EFFET DU COMPARTIMENT TAMPON SUR LES MESURES DE PERMEABILITE	75
FIGURE IV.7 : APPAREILLAGE ET PRINCIPE DE LA MESURE (BOURDAROT G., 1996)	75
FIGURE IV.8: COURBE CUMULATIVE DE LA VITESSE D'INFILTRATION	76
FIGURE IV.9 : VARIATION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE LA TEXTURE DU SOL (CASSAN, 1980)	78
FIGURE IV.11 : EQUIPEMENTS D'UN ESSAI LUGEON (DAVIAUF, 1986)	79
FIGURE IV.12 : PARAMETRES DU BILAN HYDROLOGIQUE DE L'AVERS 6 ET 7 NOVEMBRE 1997 (BEKHOUCHE, 1998)	81
FIGURE IV.13 : SITUATION DES SITES DE MESURE DE LA PERMEABILITE EN AMONT DE LA VALLEE DU M'ZAB	83
FIGURE IV.14 : DIAPOSITIF MUNTEZ FABRIQUE LOCALEMENT	83
FIGURE IV.15 : MESURE SUR TERRAIN : A GAUCHE CELLE DE MUNTEZ ET A DROITE CELLE DE PORCHET (AVRIL 2012)	84
FIGURE IV.16: COURBE VOLUME D'EAU INFILTRE EN ML/MIN	84
FIGURE IV.17: COUPE LITHOLOGIQUE D'OUED LABIOUDH (LTPSUD-BG, 2012)	86
FIGURE IV.18 : COURBE DEBIT - PRESSION (12-42 M) POUR LE SONDRAGE LAB-SC4 A OUED LABIOUDH (LTPSUD-BG, 2012)	87
FIGURE V.1: RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES DU SAHARA SEPTENTRIONAL CI ET CT (ANRH, 2011)	90
FIGURE V.2: CARTE PIEZOMETRIQUE DU CI A LA PARTIE NORD DE LA WILAYA DE GHARDAÏA (ANRH, 2011)	91
FIGURE V.3: SCHEMA EXPLICATIF DES PROBLEMES LIES A LA GESTION DE LA NAPPE PHREATIQUE DANS LA VALLEE DU M'ZAB	92
FIGURE V.4: COUPE HYDROGEOLOGIQUE SYNTHETIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE DE LA VALLEE DU M'ZAB	93
FIGURE V.5: SUPERPOSITION DES NAPPES SUPERFICIELLES DANS LA VALLEE DU M'ZAB	94
FIGURE V.6: CARTE DE SITUATION DES PUIITS (PIEZOMETRES) DANS LA VALLEE DU M'ZAB	95
FIGURE V.7: MENU DE LOGICIEL SURFER 11	96
FIGURE V.8 : LA CARTE PIEZOMETRIQUE DU M'ZAB A LA PERIODE AVRIL 2005	98
FIGURE V.9 : LA CARTE PIEZOMETRIQUE DU M'ZAB A LA COMPAGNE SEPTEMBRE 2006	98
FIGURE V.10 : LA CARTE PIEZOMETRIQUE DU M'ZAB A LA PERIODE AVRIL 2007	101
FIGURE V.11: LA CARTE PIEZOMETRIQUE DU M'ZAB A LA COMPAGNE SEPTEMBRE 2007	101
FIGURE V.12 : LA CARTE PIEZOMETRIQUE DU M'ZAB A LA PERIODE AVRIL 2008	103
FIGURE V.13 : LA CARTE PIEZOMETRIQUE DU M'ZAB A LA COMPAGNE MAI 2011	103
FIGURE V.14: LA CARTE PIEZOMETRIQUE DU M'ZAB A LA COMPAGNE MAI 2013	105
FIGURE V.15: CARTE DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE SUR BOUNOURA ET EL ATTEUF (11/2015)	107
FIGURE V.16: CARTE DE LA FLUCTUATION SAISONNIERE AVRIL 2005-SEPTEMBRE 2006 (BASSES EAUX)	109
FIGURE V.17 : CARTE DE LA FLUCTUATION SAISONNIERE SEPTEMBRE 2006- AVRIL 2007 (HAUTES EAUX)	109
FIGURE V.18: CARTE DE LA FLUCTUATION SAISONNIERE AVRIL 2007-SEPTEMBRE 2007 (BASSES EAUX)	110

---

FIGURE V.19: CARTE DE LA FLUCTUATION SAISONNIERE SEPTEMBRE 2007- AVRIL 2008 (HAUTES EAUX) .....	110
FIGURE V.20: CARTE DE LA FLUCTUATION ANNUELLE SEPTEMBRE 2006-SEPTEMBRE 2007 .....	113
FIGURE V.21: CARTE DE LA FLUCTUATION ANNUELLE AVRIL 2007- AVRIL 2008.....	113
FIGURE V.22: CARTE DE LA FLUCTUATION ANNUELLE AVRIL 2008-MAI 2011 .....	114
FIGURE V.23: CARTE DE LA FLUCTUATION ANNUELLE MAI 2011- MAI 2013 .....	114
FIGURE V.24: EVOLUTION DU NIVEAU D'EAU DANS LES PIEZOMETRES DE DIFFERENTES LOCALITES DE LA VALLEE DU M'ZAB.....	117
FIGURE V.25: FLUCTUATION MOYENNE SAISON AIRE DE LA PERIODE 2005-2008.....	117
FIGURE V.26: FLUCTUATION MOYENNE CYCLIQUE DE LA PERIODE 2006-2013 .....	118
FIGURE V.27: FLUCTUATION MOYENNE MESUREE ET SIMULEE DE LA NAPPE PHREATIQUE DE LA VALLEE DU M'ZAB .....	118
FIGURE VI.1 : PROCESSUS DE STOCKAGE ET RECHARGE DE LA NAPPE PHREATIQUE .....	122
FIGURE VI.2: SITUATION DES BARRAGES ET AHBAS A TRAVES LA VALLEE DU M'ZAB.....	124
FIGURE VI.3: PHOTOS DES PRINCIPAUX BARRAGES ET AHBAS DANS LA VALLEE DU M'ZAB .....	125
FIGURE VI.3: SCHEMA EXPLICATIF DE L'EFFET DE LAMINAGE DES CRUES DANS LE SYSTEME HYDROGRAPHIQUE DU M'ZAB.....	127
FIGURE VI.4: DALLAGE ET MURE DE SOUTENEMENTS EN BETON SUR OUED M'ZAB AU CENTRE VILLE DE GHARDAÏA .....	129
FIGURE VII.1: LE PLAN DE FLUX NUL .....	134
FIGURE VII.2: VARIATION DU TAUX D'EVAPORATION EN FONCTION DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE.....	134
FIGURE VII.3: DIFFERENTS FACTEURS ENTRANTS DANS L'ETABLISSEMENT DU BILAN HYDROLOGIQUE.....	136
FIGURE VII.4: CARTE DE ZONING DE LA VALLEE DU M'ZAB .....	137

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## Introduction Générale

La vallée du M'Zab, à laquelle se rattache cette étude, est située dans la partie septentrionale du Sahara algérien. Elle abrite la célèbre palmeraie et les anciennes agglomérations (Ksour) qui remontent au XI<sup>e</sup> siècle. La science hydraulique des Mozabites peut encore être appréciée à travers les ouvrages réalisés dans le passé pour utiliser avec parcimonie les eaux trop rares des Oueds. C'est ainsi que les vallées de dorsale du M'Zab sont fréquemment barrées par des levées en terre revêtues ou par des barrages entièrement en maçonnerie afin que l'eau des crues rares soit ralentie, stockée et infiltrée dans le sous-sol. Grâce à ces ouvrages un réseau complexe de canaux, conduites et répartiteurs permet de conduire l'eau aux parcelles et de réalimenter la nappe, qui est exploitée par de nombreux puits à l'architecture caractéristique (Capot-Rey, 1939). Jusqu'à cette époque, les palmeraies ont été suffisamment irriguées par des eaux de la nappe phréatique rechargé lui-même par le passage des crues de la vallée.

Au cours des vingt (20) dernières années la vallée a connues plusieurs problèmes liés notamment à la remontée des eaux, au phénomène de pollution, et aux catastrophes dues aux crues. La croissance démographique entraînant une intense urbanisation, qui a été étendue - sous l'influence du relief défavorable- dans la palmeraie et les zones inondables, et parfois même dans le lit mineur de l'Oued.

Devant cette croissance, et pour satisfaire les besoins en eau (AEP, industrie et même l'irrigation des jardins), l'état fait appel aux forages qui exploitent les nappes profondes notamment l'Albien, ce qui a induit l'abandonnement presque total de la nappe phréatique, ajoutant à celle-ci, la mauvaise maîtrise de la collecte des eaux usées, entraînant ainsi une importante infiltration vers la nappe phréatique alluvionnaire. Cette situation a entraîné la remontée et la pollution de cette nappe.

Cependant, et pour maîtriser le risque lié aux crues d'Oued M'Zab et ces affluents, les autorités locales et les services techniques depuis l'année 2006 ont proposés de mettre en place des grands ouvrages de rétention à Dayat Ben Dahoua en amont de la vallée, et des ouvrages de petits et moyennes dimensions sur les affluents les plus potentiels de la vallée. D'autres travaux d'aménagement ont été proposés notamment le calibrage du lit d'Oued afin de lui permettre de faire transiter la crue laminée.

L'objectif de cette étude est de quantifier les termes du bilan hydrologique de la nappe phréatique du M'Zab, et de mettre en évidence l'existence d'une variabilité d'apport climatique durant la

période d'observation (2005-2015), ainsi que d'étudier son impact et celles de l'activité humaine sur l'alimentation de cette nappe superficielle.

À ce jour, aucune étude hydrologique n'a abordée ces phénomènes et ces problématiques d'une façon intégrale, mise à part les observations historiques qualitatives des crues qui ont été traversés la vallée, ou quelques applications des méthodes empiriques pour l'estimation des caractéristiques des ces crues pour différentes période de retour.

L'établissement du bilan d'une nappe exige la connaissance précise de ses alimentations et de ses pertes. Or celles-ci sont multiples, directes ou indirectes, superficielles ou profondes. Il est indispensable en premier lieu de savoir à quel cadre hydrologique se reportent : limites et dimensions hydrologiques et géologiques du bassin versant en surface et en profondeur, régimes des eaux de surfaces et souterraines, apportes climatiques... Nous insisterons ici sur l'étude hydro-climatique et l'étude hydrogéologique et piézométrique (Castany, 1982).

Pour atteindre cet objectif, et pour préciser chaque terme du bilan hydrologique, diverses données et méthodes numériques et empiriques ont été employées. Les données climatiques notamment les précipitations et l'évaporation sont ceux de la station météorologique de l'aéroport de Noumeratte à 18 km vers le sud de la vallée. Ces données sont disponibles sur une long période (1975-2015). Les résultats utilisés pour identifier la climatologie de la région proviennent d'une part de l'ouvrage de Jeun Dubief publié en 1963, et concernent généralement la période 1926 à 1963, et d'autre part, ils ont pu être étendus de 1975 à 2015 pour certaines caractéristiques. De même, quelques cartes d'isovaleurs du nord du Sahara tracés par Dubief en 1963, permettront d'apprécier les gradients climatologiques qui existent dans la région, à grande échelle bien entendu. Il paraît malgré tout, difficile de spéculer sur telles variations compte tenu du manque total d'observations de ce type. On verra cependant, en ce qui concerne l'hétérogénéité spatiale des précipitations sur le bassin du M'Zab, que les orages qui arrosent le plateau des Dayas en été, intéressent plus en nord que en sud la où s'installe la station de Noumeratte (Pierre A.R, 1996). Concernant les données de crues, aucune mesure hydrométrique n'existe sur Oued M'Zab, Néanmoins des observations *qualitatives* de ces crues ou leur trace ont depuis longtemps existerais. Parmi ces observations notons celles des savants religieux Mozabite ou celles enregistrés dans l'archives français depuis 1884 jusqu'a 1962 (Capot-Rey, 1939 et Dubief 1959). Une liste complémentaire a été obtenue jusqu'à 2015 grâce à l'archive des services de la protection civile de Ghardaïa, ainsi que les résultats des enquêtes et mesures personnelles réalisées sur terrain sur la période 2005-2015. Lorsque l'on manque d'observations hydrométriques, et notamment d'observations de grandes crues, comme notre cas, il est

important d'utiliser les différentes méthodes, analogiques et empiriques afin de pouvoir comparer et recouper entre elles les valeurs hydrologiques auxquelles on aboutit. Des évaluations de débits peuvent aussi être faites par des formules hydrauliques en certains sites où les hauteurs d'eau et les pentes maximales sont repérables comme des traces (laissais) après les dernières crues.

Une analyse des chroniques piézométriques sur la période 2005-2015 a été réalisé afin d'identifier les secteurs d'alimentation et celles de prélèvement de la nappe phréatique, ainsi que l'état quantitatif de celle-là. Le réseau piézométrique visité est constitué de 87 puits traditionnels bien réparti sur l'ensemble de la vallée.

En effet l'étude s'articule comme suite : Un premier chapitre présente la région du M'Zab de point de vue Géographique, Paysage, Historique et Socio-economique. Les caractéristiques climatiques de la région sont présentées dans le chapitre 2. Le chapitre 3 expose et synthétise l'aspect hydrologique et le régime des crues dans le M'Zab. Les caractéristiques géologiques, ainsi que les techniques et méthodes d'investigation géotechniques employées sont traitées respectivement au Chapitre 4. Les caractéristiques hydrogéologiques, le comportement piézométrique de la nappe phréatique et les fluctuations saisonnières sont traitées au chapitre 5. L'évaluation de l'impact d'activité humaine sur le régime hydrologique de la vallée du M'Zab et les divers d'aménagements installées actuellement pour lutter contre les inondations sont traités au Chapitre 6. Un dernier chapitre sera consacré aux essais du bilan hydrologique de la nappe phréatique, tous d'abord nous donnerons un bref aperçu sur la méthodologie d'établissement des bilans hydrologues. Par la suite nous essayons d'appliquer ces notions pour l'ensemble de la nappe phréatique de la vallée. Nous finalisons notre étude par une conclusion générale et quelques recommandations et perspectives nécessaires pour la valorisation de ce travail.

*CHAPITRE I*

**CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET  
HUMAIN DU M'ZAB**

## Chapitre I : Contexte géographique et humain du M'Zab

### I.1. Situation géographique

#### I.1.1. Wilaya de Ghardaïa

La wilaya de Ghardaïa se situe au centre de la partie Nord du Sahara Septentrional. Elle est issue du découpage administratif du territoire de 1984. Il est composé de 13 communes et 8 daïras.

La wilaya de Ghardaïa est limitée par (Fig. I.1):

- Au Nord par la wilaya de Laghouat (200 Km) ;
- A l'Est par la wilaya de Ouargla (200 Km) ;
- Au Sud par la wilaya de Tamanrasset (1470 Km) ;
- A l'Ouest par la wilaya d'El-Bayadh (350 Km).

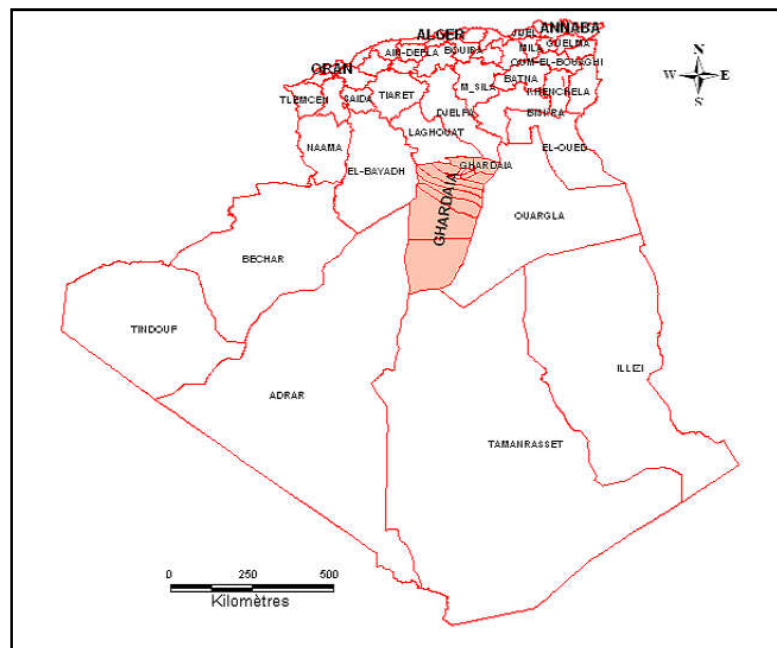


Figure I.1: Situation géographique de la Wilaya de Ghardaïa

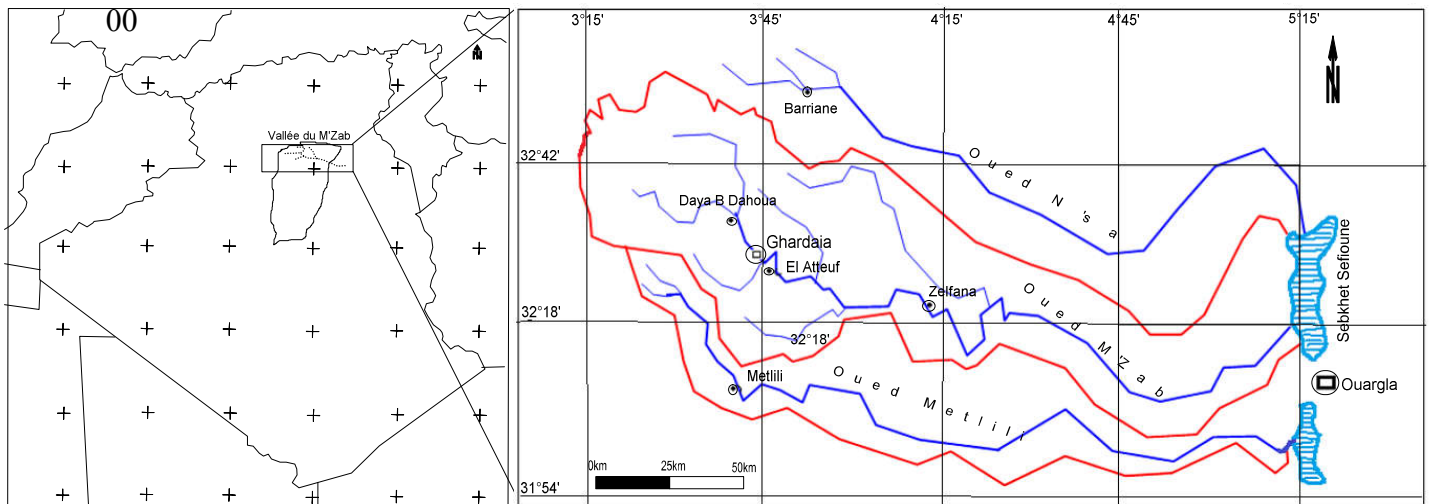
#### I.1.2. Vallée du M'Zab

Oued M'Zab, le principale parcours du bassin versant du M'Zab passe par la ville de Ghardaïa. La vallée comprend les communes et les agglomérations suivantes de l'amont à l'aval : Daya Ben Dahoua, Ghardaïa, Mlika, Ben Isghuen, Bounoura et El Atteuf.

Oued M'Zab constitué à l'amont par la confluence de deux importants Oueds: Labioudh et Laadira; A une dizaine de kilomètres en aval de Ghardaïa se trouve un deuxième centre de rencontre (Zelfana), à droite Oued Noumeratte et à gauche Oued Lahsay. L'Oued M'Zab prend naissance dans la région de Botma Touila à une altitude 750 m, coule sensiblement d'Ouest en



Est sur 325 km environ, et se termine à la Sebkhete Sefioune (côte 110m) (Dubief, 1963 ; Ouled Belkhir, 2002).



**Figure I.2: Situation géographique de la vallée du M'Zab**

## I.2. Le paysage générale du M'Zab

La vallée du M'Zab fait partie de la région centrale de la Chebkha (Dorsale du M'Zab), cette dernière se caractérise par un relief cisailé, ravine et serpenté d'innombrables Oueds. Le substratum géologique est constitué de calcaire dolomitique et de marne d'âge Turonien. On distingue aussi, le long de la vallée des dépôts alluvionnaires d'âge quaternaire. Ces alluvions sont constituées de sables fins et grossiers (mêlés à des limons et des argiles), gravillons, galets consolidés. Cette formation superficielle, contient une nappe phréatique plus ou moins profonde, exploitée par des puits traditionnels à faibles débits. En profondeur la formation de continental intercalaire réserve la nappe albienne qui constitue actuellement la ressource principale d'eau potable dans la vallée du M'Zab (Ouled Belkhir, 2002).

Le tissu urbain de Ghardaïa se prolonge le long d'Oued M'Zab e même dans les affluents et les Chaabats. En effet on peut distinguer :

- Le plateau de la chebkha : caractérisé par une faible pente ( $i=3\%$ ) comportant quelques micros dépressions.
- Les versants des chaabats : caractérisés par une pente importante ( $i=25\%$ ) et d'une faible capacité d'infiltration.
- Les fonds des chaabats ( $i=2-3\%$ ) : pouvant comporter un léger remplissage alluvionnaire ou détritique (Ouled Belkhir, 2002).

Une nouvelle extension de la ville vienne s'installée sur le plateau vers Alger et vers le sud, pour desservir les nouveaux projets d'urbanisme et de l'activité économique dans la région.

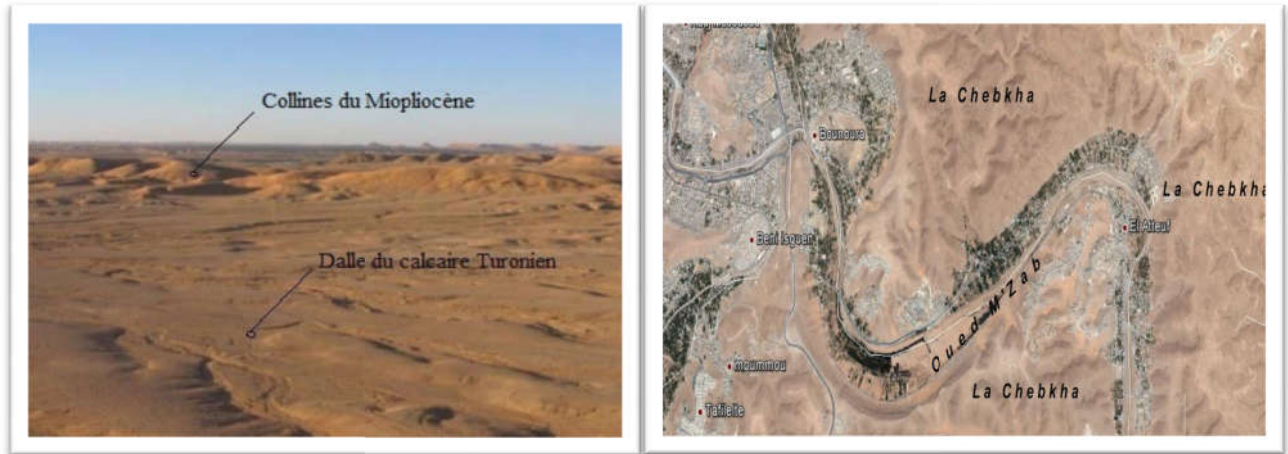


Figure I.3: Paysage géomorphologique du M'Zab

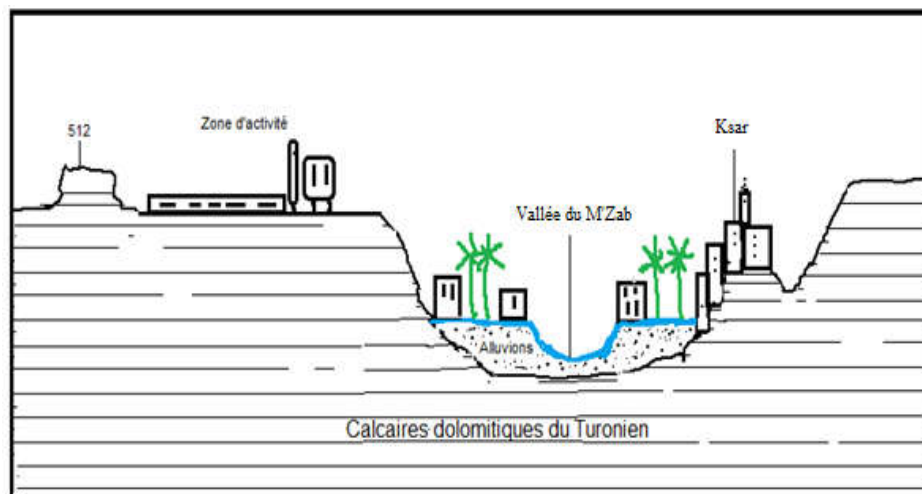


Figure I.4: Coupe schématique de la vallée du M'Zab

### I.3. Aperçue historique de la région du M'Zab

La Vallée du M'Zab, qui représentait une région fortement déshéritée avant la mise en exploitation de la nappe albienne, ne pouvait être que traversée par des caravanes ou parcourue par des nomades. Pour que des populations s'y établissent il a fallu qu'elles soient poussées par leur seule volonté : sont des nomades qui se sédentarisent d'une part et des populations cherchant refuge d'autre part (Delta, 2006).

Les Ibadites, fondateurs de l'état Rustumide Tihert au VIII<sup>ème</sup> siècle, qui s'étalait sur presque l'ensemble de l'espace Zénète (les hauts plateaux et le Nord du Sahara), a connu une décadence en l'an 909 a .J.C. Après la chute de Tihert, les Ibadites ont fondé une nouvelle civilisation de transition basée à Sadrata vers le sud-est de Ouargla ; qui est connu par sa grande richesse et le raffinement de son architecture (Delta, 2006).

Dans la démarche volontariste de vie introvertie, suites aux différentes percussions des ennemis, les Ibadite, ont définitivement choisi la vallée du M'Zab pour concrétiser leur nouvelle civilisation. Les premiers bâtisseurs du M'Zab étaient en pleine maîtrise de tous le raffinement de l'art islamique de l'époque. En trois siècles et demi, du XIII<sup>ème</sup> siècle au XVII<sup>ème</sup> siècle, un processus d'urbanisation de la vallée a donné lieu à la création de cinq cités : El-Atteuf, Bounoura , Ghardaïa, Ben-igue et Mélia. Chaque cité dispose d'une palmeraie, d'un système d'irrigation et des cimetières. L'activité humaine dans la région du M'Zab a connu plusieurs étapes historiques, commencer par la préhistoire en passant par la période islamique qui ont légué des vestiges existant de nos jours. Toutes ces données historiques et ces valeurs de civilisation elles ont plaidé pour le classement de la région du M'Zab comme patrimoine national en 1971 et faisant partie du patrimoine universel par l'UNESCO en 1982 (Delta, 2006).

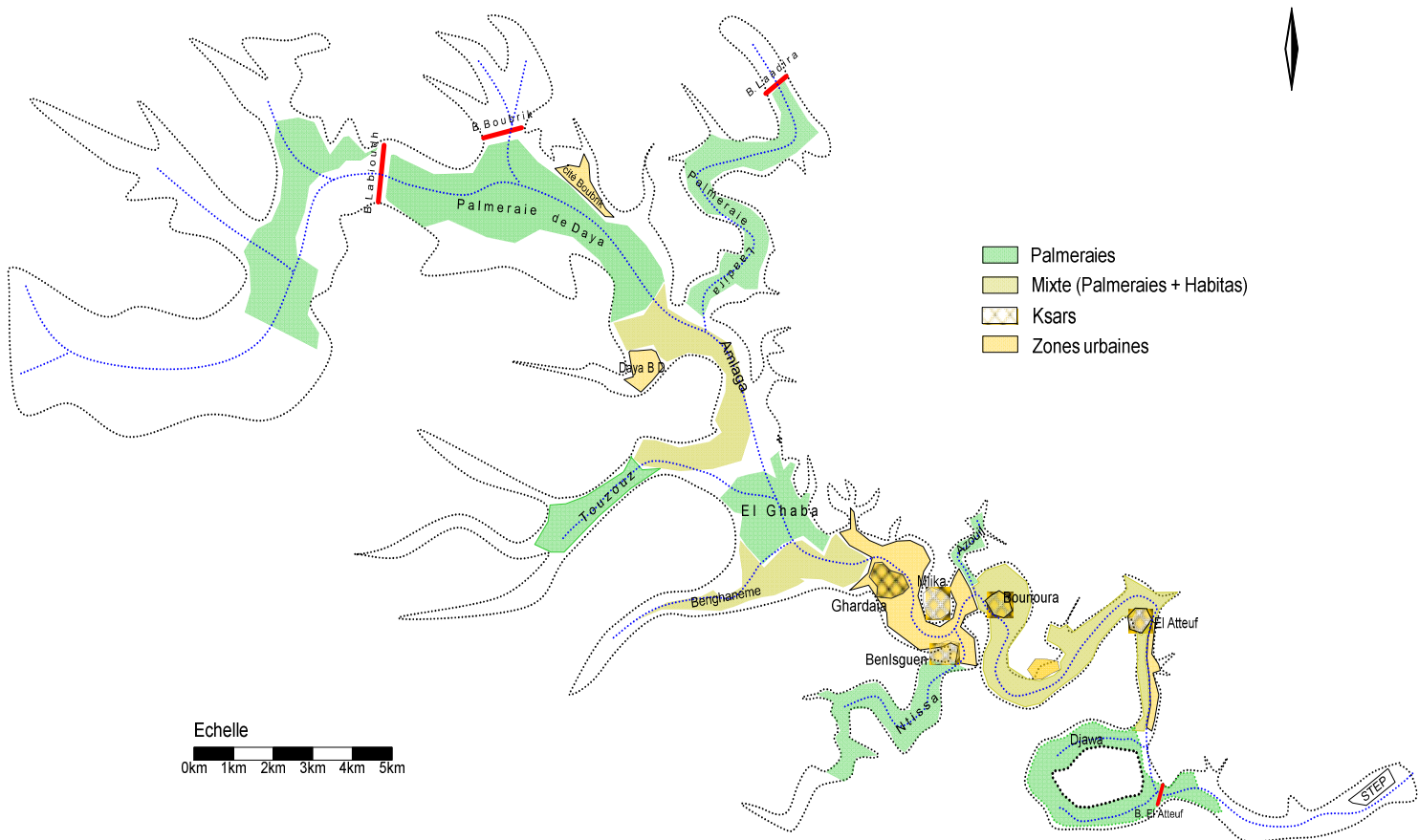


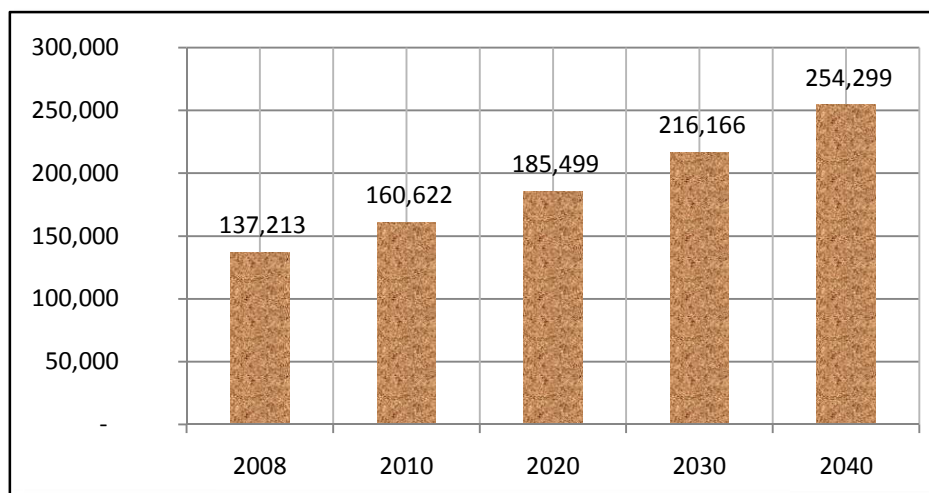
Figure I.5 : Situation des anciennes Ksours dans de la vallée du M'Zab

## I.4. Cadre socio-économique

La Wilaya de Ghardaïa a été créée en 1984 lors du redécoupage administratif. Avant cette date, l'ensemble de son territoire dépendait de la Wilaya de Laghouat. A cette occasion, huit nouvelles communes ont été créées. La population de la Wilaya à différents horizons a due d'être estimée sur la base des données du taux de croissance de l'année 2008. Les conclusions générales pour la période 2008-2040 sont les suivantes (DPAT-Ghardaia 2015):

**Tableau I.1: Évolution de la population par commune des vallées du M'Zab sur la période 2008-2040**

Commune	2008	Croissance %	2010	2020	2030	2040
Ghardaïa	93 423	0,7	94 735	101 580	108 919	116 788
Bounoura	35 405	2,5	37 197	47 616	60 952	78 024
El Atteuf	14 752	1,5	15 198	17 638	20 469	23 756
Daya B D	12 643	3,3	13 491	18 666	25 826	35 732
Total	137 213	-	160 622	185 499	216 166	254 299



**Figure I.6 : Perspective et croissance démographique de la vallée du M'Zab à l'horizon 2040**

D'après les figures au-dessus il ressort que :

- Le rythme de croissance de la population de la Wilaya est supérieur à celui de l'Algérie.
- La densité moyenne de peuplement sur la vallée est de 116 habitants / km<sup>2</sup>, soit 379,83 habitants / km<sup>2</sup> à Ghardaïa, 49,24 habitants / km<sup>2</sup> à Bounoura, 23,87 Habitants / km<sup>2</sup> à El-Atteuf et 18.25 habitants / km<sup>2</sup> à Daya B. D.
- Le taux de croissance à la commune de Ghardaïa est trop faible par le faite que cette commune est dépourvue des extensions urbanistiques.
- La Population de la vallée du M'Zab est fortement agglomérée (97 %).

- Un déséquilibre dans la répartition spatiale : 3 communes concentrent plus de 80 % de la population : Ghardaïa, Bounourah et El Atteuf.

L'exploitation des données de l'État civil sur l'ensemble de la vallée a donné les résultats suivants pour l'année 2016 (DPAT-Ghardaïa 2015) :

- Taux de natalité : 2,20%.
- Taux de mortalité : 0.26 %.
- Taux de mortalité infantile : 2,72 %.
- Taux de croissance moyenne: 2,53 %.

### 1.5. Activités et emplois

Malgré la configuration du relief souvent contraignante pour l'aménagement de l'espace, les efforts d'investissements consentis depuis plus de deux décennies ont entraîné de grandes mutations au plan socio-économique. La Wilaya dispose aujourd'hui d'infrastructures et d'équipements de base nécessaires à un développement harmonieux et intersectoriel.

La population active est estimée à la fin de 2015 à 111726 actifs, soit un taux d'activité de 41 %. La population occupée se chiffre à 97 790 employés, soit 87,86 % de la population active, les sans travail qui sont de l'ordre de 13 936 personnes représentent donc 12,47 % de la population active (DPAT-Ghardaïa 2015).

La population occupée estimée à 97 790 est répartie comme suit (DPAT-Ghardaïa 2015) :

- 20,61 % dans le commerce, soit : 20155 emplois
- 17,15 % dans l'agriculture (exploitants agricoles), soit : 16771 emplois.
- 19,91 % dans la branche administration (fonction publique), soit : 16536 emplois.
- 10,02 % dans le B.T.P.H, soit : 9800 emplois.
- 8,20 % dans l'industrie, soit : 8018 emplois.
- 8,29 % dans les services, soit : 8106 emplois.
- 3,49 % dans l'artisanat, soit : 3410 emplois.
- 15,33 % dans les diverses autres activités, soit : 14994 emplois.

*CHAPITRE II*

**ASPECT HYDRO-CLIMATIQUE DE LA  
RÉGION DU M'ZAB**

## Chapitre II: Aspect hydro-climatique de la région du M'Zab

### II.1. Introduction

La station météorologique la plus proche de la vallée du M'Zab est celle de l'ONM à aéroport de Noumeratte (à 18 km vers le sud). Elle est repérée par les coordonnées suivantes :

- Latitude : 32°,40 N
- Longitude : 3°,81 E
- Altitude : 450 m

Les données disponibles sur la station qu'on peut les exploiter sont :

- De la période 1990-2015 pour les paramètres : Température, Humidité, Vent, Evaporation.
- De la période 1970-2015 pour la pluviométrie.

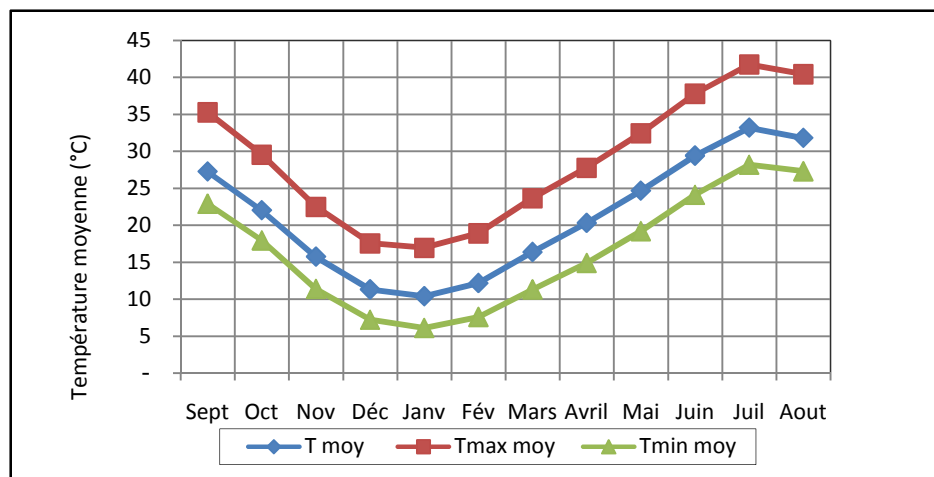
### II.2. Etude des facteurs climatiques

#### II.2.1. La température de l'aire

Les données de la température de l'aire sur la période d'observation 1990-2015 sont résumés sur le tableau et la figure suivants :

**Tableau II.1: Températures moyennes mensuelles, minimales et maximales (ONM Ghardaïa 1990-2015)**

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
T moy	27.3	22.0	15.7	11.3	10.4	12.2	16.4	20.3	24.7	29.4	33.2	31.8
T max	35.3	29.5	22.5	17.6	16.9	18.9	23.7	27.8	32.4	37.8	41.8	40.4
T min	22.9	17.9	11.4	7.2	6.1	7.6	11.3	14.9	19.2	24.1	28.2	27.3
Moy saisonniers	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	21.67			11.29			20.45			31.47		



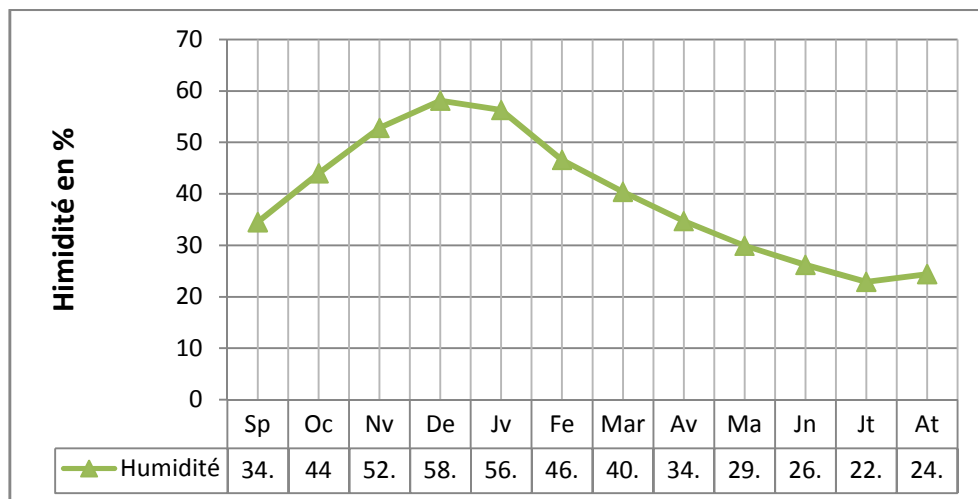
**Figure II.1 : Variations des températures (moy, max, min) (ONM Ghardaïa 1990-2015)**

A partir des données exposées, on peut déduire que :

- La valeur moyenne annuelle enregistrée pour la période considérée est de 22.3 °C.
- La période chaude s'étend du mois mai à octobre pendant lequel les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle.
- La période froide commence du mois de novembre jusqu'au mois d'avril.
- La température la plus basse apparaît au mois de janvier avec -2 °C, alors que la plus élevée se présente en juillet où elle atteint 57 °C.
- Les plus fortes amplitudes thermiques sont rencontrées en période estivale oscillant entre 13 à 15 °C. Ceci est l'une des caractéristiques du climat désertique.

### II.2.2. L'humidité relative

L'humidité relative représente le rapport de la tension de vapeur à la tension maximum correspondant à la même température. Les données recueillies de la station de Ghardaïa donnent une moyenne annuelle de l'ordre de 39,2%. Les moyennes mensuelles varient de 46,6% à 58,1% en hiver et de 22,9 à 26,2% en été.



**Figure II.2: Humidité moyenne mensuelle et annuelle de station de Ghardaïa (1990-2014)**

On constate que les valeurs de l'humidité mensuelle sont inversement proportionnelles à la température moyenne mensuelle.

### II.2.3. Le vent

Le vent est l'un des facteurs déterminant du climat. Il se caractérise par sa vitesse et sa direction. La région de Ghardaïa est régie d'une part, par les circulations des masses d'air propres à la méditerranée occidentale amenant l'humidité d'origine Atlantique nord, et d'autre part, à l'ouverture des vents sahariens chauds (Sirocco).



**Tableau II.2 : Fréquences des vents selon leur direction (ONM Ghardaïa 1990-2015)**

Mois	Temps	Fréquences en % des vents en direction du :							
	Calme	SE	S	SO	O	NO	N	NE	E
Janvier	34				15	17	18		
Février	29				14	18	17		
Mars	21				11	15	25		
Avril	17				10	10	25	15	
Mai	15					10	22	14	
Juin	20		11				18	20	12
Juillet	23		15				11	17	14
Août	23		15				12	17	11
Septembre	24						17	20	13
Octobre	30						22	15	
Novembre	34				12	14	17		
Décembre	33				17	18	14		

Les vents dominants soufflent du NO. Les vents d'hiver sont froids secs et humides de direction NO et ONO, les vents d'été sont secs et chauds de direction NE, les siroccos soufflent en moyenne 11 jours par année pendant la période qui va du mois de mai au mois de septembre, avec un pourcentage de vents calmes de 25%.

**Tableau II.3 : Vitesse moyenne du vent (ONM Ghardaïa 1990-2015)**

Mois	Sp	Oc	Nv	De	Jv	Fe	Mar	Av	Ma	Jn	Jt	At	Ans
Vitesse (m/s)	3,6	3,2	3,3	3,5	3,6	3,7	4,4	4,8	4,5	4,2	3,6	3,3	3,8

Les vitesses moyennes mensuelles observées au niveau de la station de Ghardaïa, montrent une répartition assez régulière comprise entre 3,3 et 4,8 m/s sur toute l'année, ce qui nous permettrait de les classées dans la catégorie des vents modérés. Les vitesses les plus élevées s'observent en printemps avec un maximum au mois d'avril de 4,8 m/s. En période sèche le sirocco prédomine, il s'agit d'un vent sec et chaud qui souffle du continent vers la méditerranée desséchant ainsi l'atmosphère.

#### II.2.4. Demande climatique (évaporation évapotranspiration)

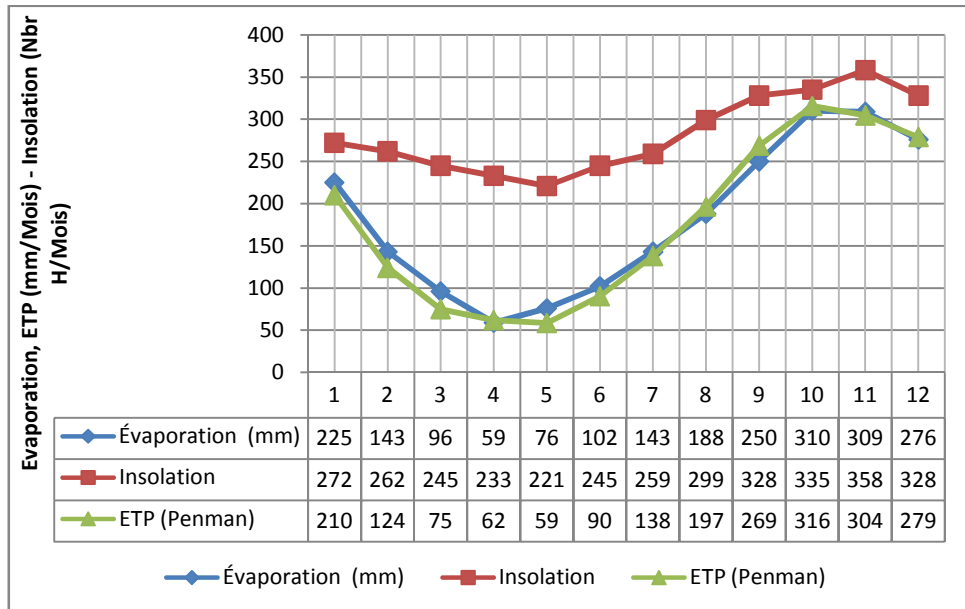
Les données de l'évaporation et l'insolation de la période 1990-2015 sont mentionnées sur le tableau suivant :

**Tableau II.4 : Evaporation et insolation mensuelles (ONM Ghardaïa 1990-2015)**

Mois	Sp	Oc	Nv	De	Jv	Fe	Mar	Av	Ma	Jn	Jt	At	AN
Évaporation (mm)	225	143	96	59	76	102	143	188	250	310	309	276	2178
Insolation (Nbr h/mois)	272	262	245	233	321	245	259	299	328	335	358	328	3400

On constate généralement des valeurs élevée de l'évaporation (276-310 mm) pendant les périodes chaudes (juin- août). Les valeurs les moins élevées sont enregistrées au cours du mois de janvier. L'évaporation annuelle à la station de Ghardaïa est de l'ordre de 2178 mm.

Les exigences hydriques des cultures dépendent essentiellement des facteurs climatiques ainsi que de l'évapotranspiration potentielle calculée à partir des données climatiques (méthode de Penman). Par l'usage du logiciel Cropwat-Fao, les calculs des demandes climatiques ETP ont été effectués sur la période 1990-2015, les résultats sont résumés sur la figure II.3



**Figure II.3: Evaporation, Evapotranspiration Penman et insolation mensuelles (ONM Ghardaïa 1990-2015)**

## II.2.5. Synthèse Climatique

La température et les précipitations représentent les facteurs les plus importants pour caractériser le climat d'une région donnée. Les périodes humides et sèches sont mises en évidence grâce au diagramme ombrothermique de Gauss, alors que l'étage bioclimatique est déterminé par le climagramme pluviométrique d'Emberger.

### II.2.5.1. Diagramme Ombrothermique de Gausson

Afin de préciser les périodes sèches et humides durant l'année, nous avons établi le diagramme Ombrothermique qui caractérise les interactions entre les précipitations moyennes mensuelles et les températures moyennes mensuelles ( $T=2P$ ). La représentation du diagramme ombrothermique de Gausson de la région du M'Zab montre qu'il y a une période sèche qui s'étale l'année (Fig II.4).

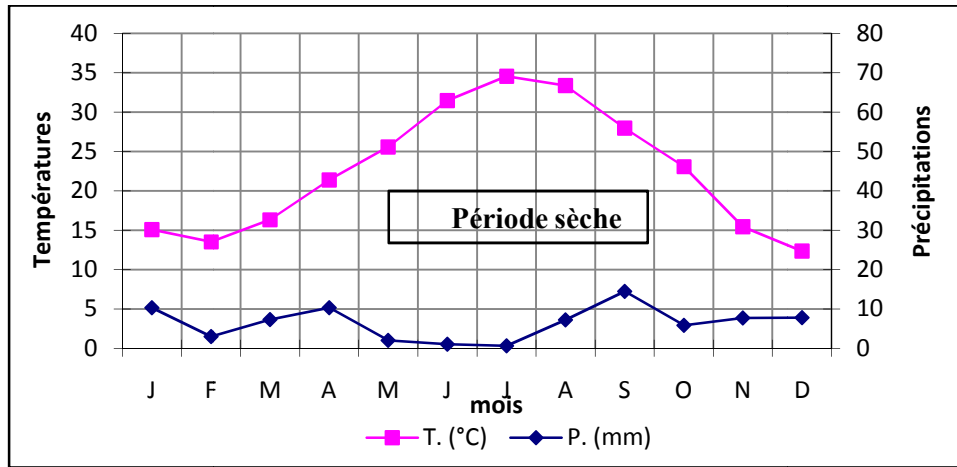


Figure II.4: Diagramme Ombrothermique de Gausсен de la région de Ghardaïa (1970-2015)

### II.2.5.2. Climagramme d'Emberger

Pour étudier et classer le climat mondiale, Emberger en 1939 a employé un climagramme synthétisant de différents types de climat aux quel sont associés des groupes végétaux à aptitude écologique, appelés étages climatiques. Sur l'axe des ordonnées est porté la valeur du quotient pluviométrique ( $Q_2$ ), qui se calcul par la formule suivant :

$$Q_2 = \frac{3,43 \cdot P}{(M - m)} \quad (2.1)$$

Avec  $Q_2$  : Quotient thermique d'Emberger.

$P$  : Pluviométrie moyenne annuelle en mm.

$M$  : Moyenne des maxima du mois le plus chaud en °C.

$m$  : Moyenne des minima du mois le plus froid en °C.

Selon l'équation (2.1), le quotient  $Q_2$  de la région est égal à 9.8. Cette valeur est portée ainsi sur le climagramme d'Emberger. Il montre que notre région d'étude est située dans l'étage bioclimatique saharien à hiver doux (Fig. II.5)

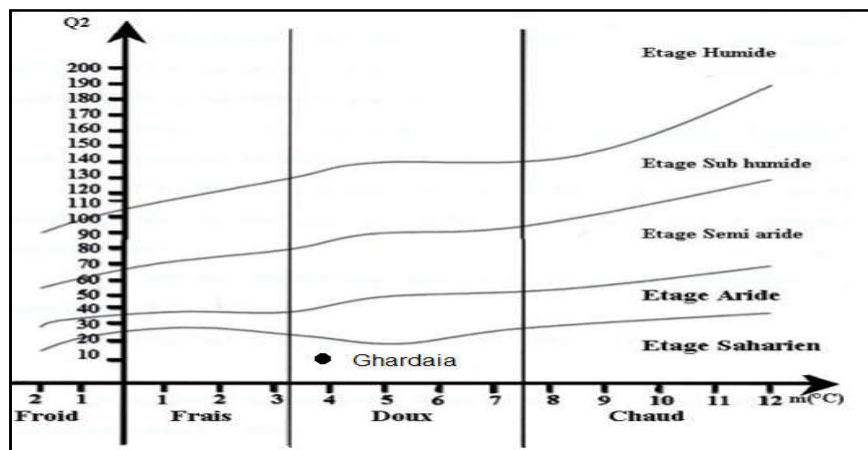


Figure II.5: Etage bioclimatique du M'Zab selon le climagramme d'Emberger

## II.3. Régime pluviométrique de la région du M'Zab

### II.3.1. Introduction

Les différentes caractéristiques des précipitations à Ghardaïa sont d'origine de la station de Noumeratte à 18 km vers le sud de la vallée. Aucune autre station pluviométrique n'a été observée sur les bassins versants du M'Zab. L'extrémité amont la plus éloignée du bassin du M'Zab se situe en ligne droite à 60 km à l'Ouest de Ghardaïa et à 120 km de Laghouat, pour laquelle se trouve la station de Hassi Rmel (peu de données sont disponibles). Les autres stations météorologiques de la région sont relativement plus éloignées de Ghardaïa. C'est ainsi celle de Ouargla à 180 km au sud-ouest, Laghouat à 200 km au nord-nord-ouest, El Goléa à 250 km, Touggourt à 280 km au nord-est.

### II.3.2. Origine des précipitations dans la vallée du M'Zab

Trois grands types de situations météorologiques sont à l'origine de précipitations importantes et intenses sur le bassin du M'Zab (figure II.6.). Ce sont les passages de fronts polaires venus directement du secteur nord ou nord-ouest, et les orages parfois violents qui se déplacent selon une composante orientée sud-est. D'autre part, ce sont les fronts polaires venus de l'ouest et associés avec une dépression circulaire dont le centre se déplace de l'ouest du Maroc vers l'est, ou vers le nord. Ces fronts s'accompagnent d'un appel d'air chaud et humide depuis le Sénégal et la Mauritanie. Ce sont les dépressions saoudano-sahélienne du Dubief. Ces systèmes s'accompagnent parfois de violentes convections, à l'origine de précipitation et de crues rares (Dubief, 1959 ; Michel A.R., 1996).

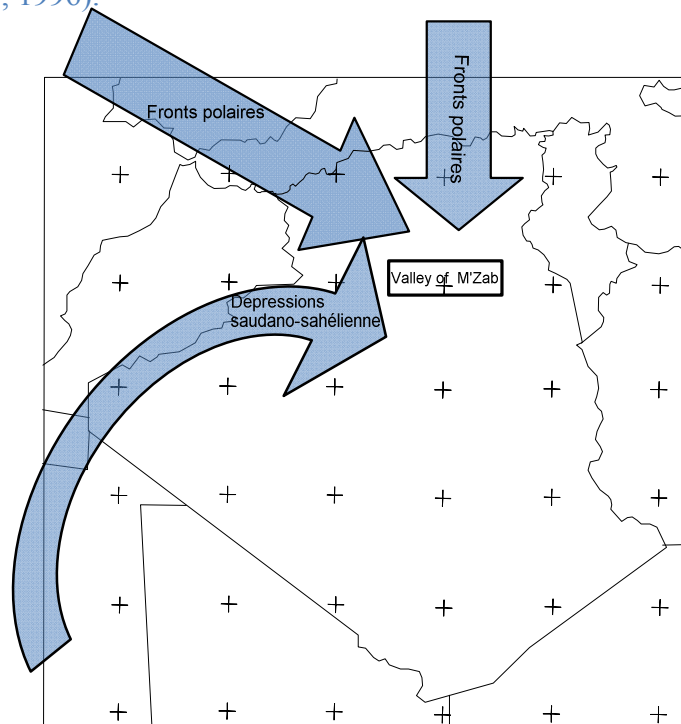


Figure II.6: Les différentes situations météorologiques de la région du M'Zab

### II.3.3. Précipitation moyenne annuelle

Les systèmes des perturbations entraînant des précipitations sur la région du M'Zab sont liés, généralement, aux déplacements des fronts polaires, méditerranéens et des alizés méridionaux. Les précipitations engendrées peuvent être des importantes averses orageuses. Dubief (1959) a localisé la vallée du M'Zab entre l'isohyète 100 et 50 mm (Figure II.7). Conventionnellement, l'isohyète 100 mm est pris comme limite nord du domaine du désert. Le trait essentiel qui s'en dégage, une évolution latitudinale des précipitations avec une diminution du nord vers le sud.

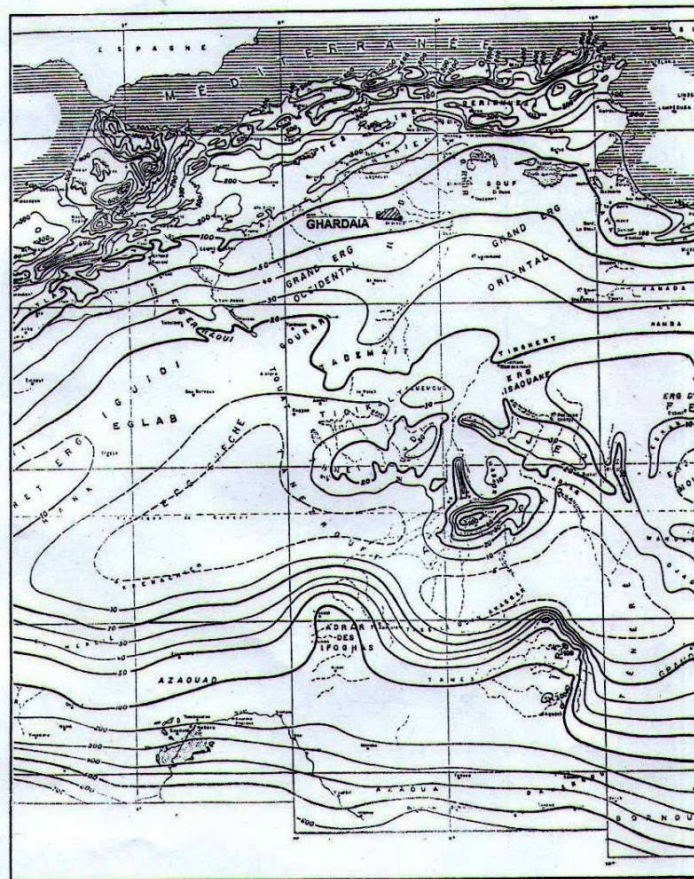


Figure II.7 : Carte des isohyètes de la pluie moyenne annuelle du Sahara (Dubief, 1959).

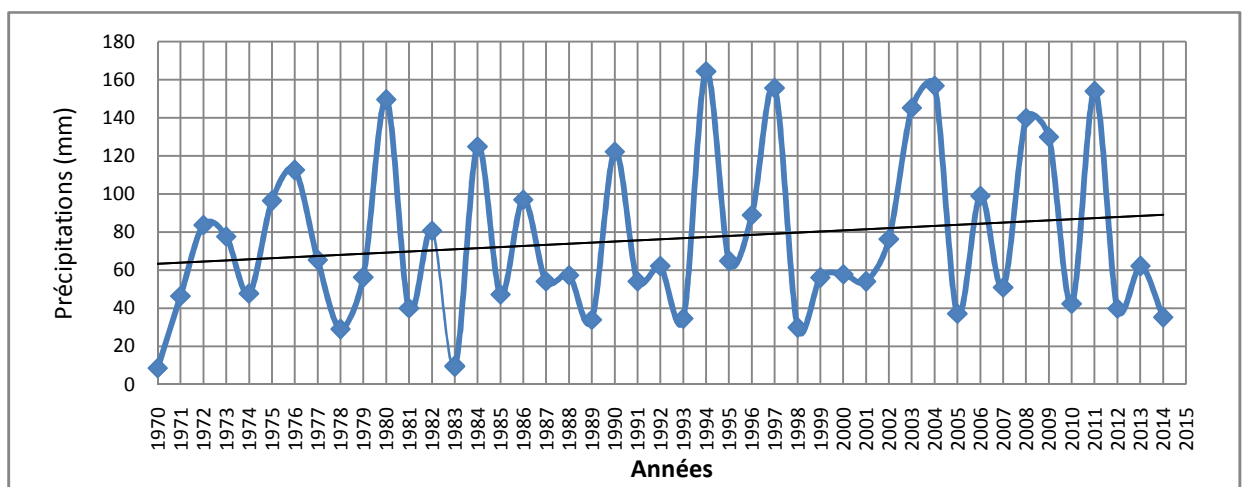
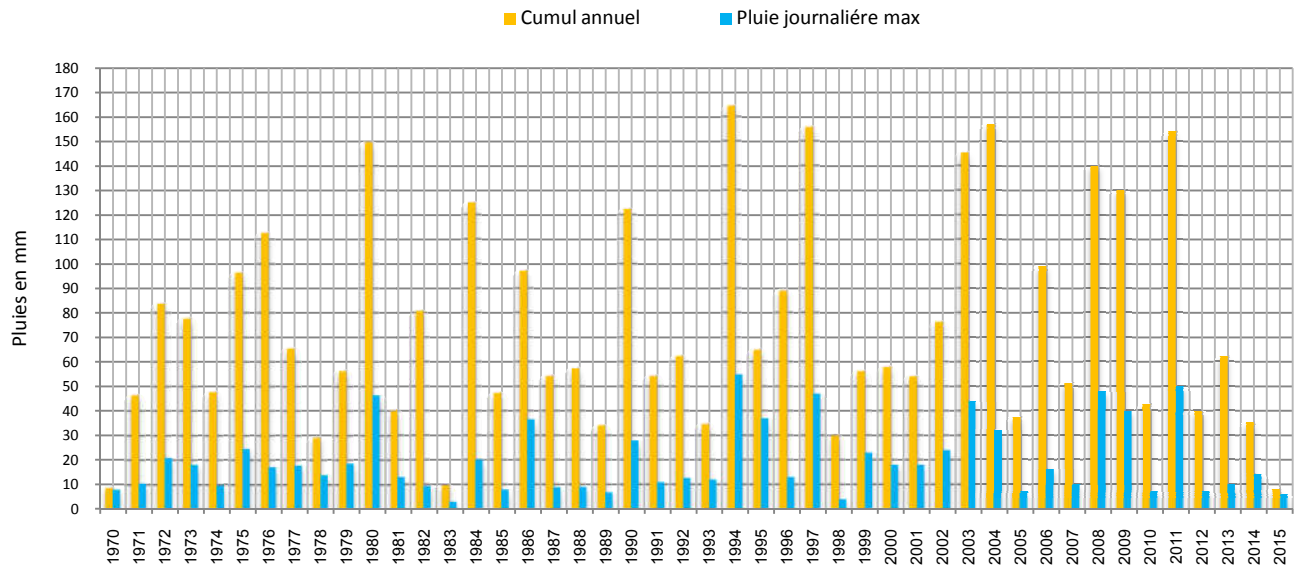


Figure II.8: Graphique des cumuls pluviométriques annuels (1970-2015).

**La moyenne annuelle calculée durant la période 1970-2015 est de 66 mm.** Les pics les plus remarquables sont ceux de 1994 représentant l'année la plus pluvieuse de la série, et celui de 1983 qui représente l'année la plus sèche (moins pluvieuse). Les pics du graphique sont plutôt, hétérogènes à l'exception de certaines années présentant des lames de précipitations annuels proches les uns aux autres. Nous remarquons que les années allant de 1981 à 1991 reçoivent le même cumul annuel. La Figure II.9 représente l'Histogramme de pluies journalières maximales des années étudiées et leurs cumules annuels (44 ans).



**Figure II.9: Histogramme des cumules annuelles et les pluies journalières maximales 1970-2015**

D'après cette figure on remarque que :

- Sur la période de 44 ans, 69% des pluies annuelles sont inférieures à 20 mm, et 24 % sont entre 60 mm et 80 mm.
- La plus forte pluie journalière relevée à Ghardaïa est de 54,8 mm du 28 septembre 1994, il est à l'origine de la forte crue du 28 septembre 1994 qui a inondé l'oasis de Ghardaïa, sa cumulée annuel est de 164.5mm.
- La plus faible pluie annule a été enregistrée en 1983 avec une valeur de 9 mm.

### II.3.4. Précipitation moyenne mensuelle

Sur la figure II.10, Dubief nous-a-présenté les mois les plus pluvieux de l'année d'après les recensements de 1959.

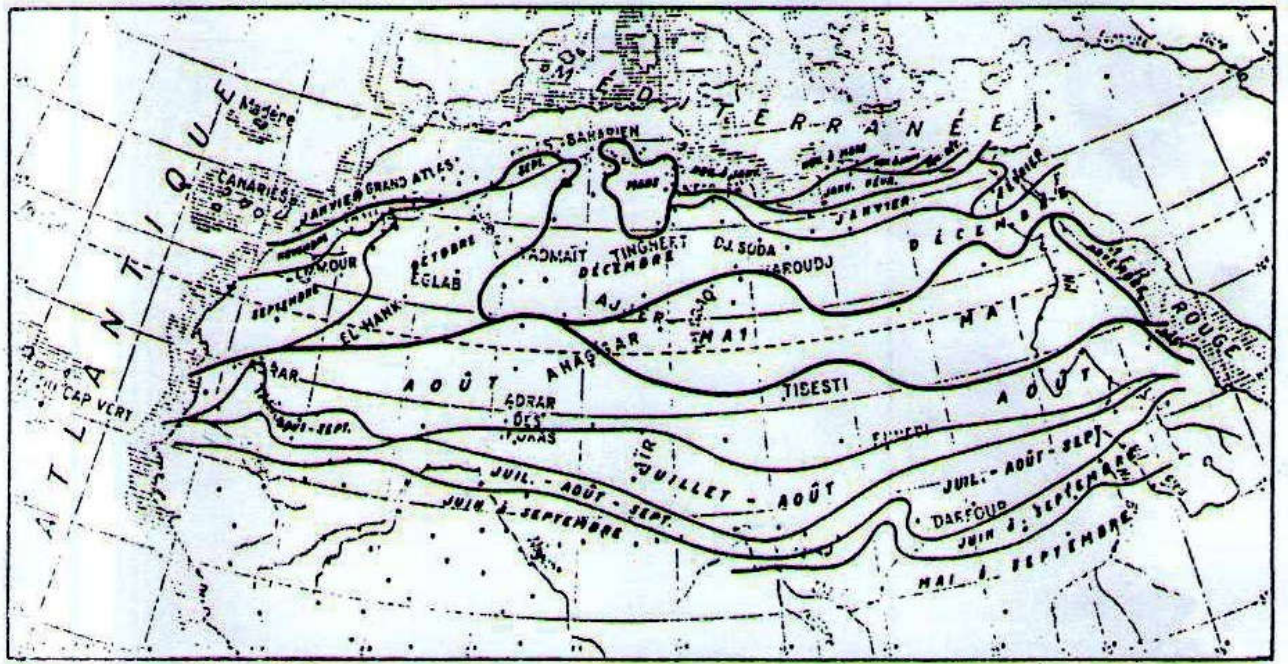


Figure II.10: Répartition des mois les plus pluvieux de l'année (Dubief. 1959)

La figure II.11 ci-dessous montre la répartition des hauteurs moyennes mensuelles de la station de Ghardaïa sur la période 1970-2015.

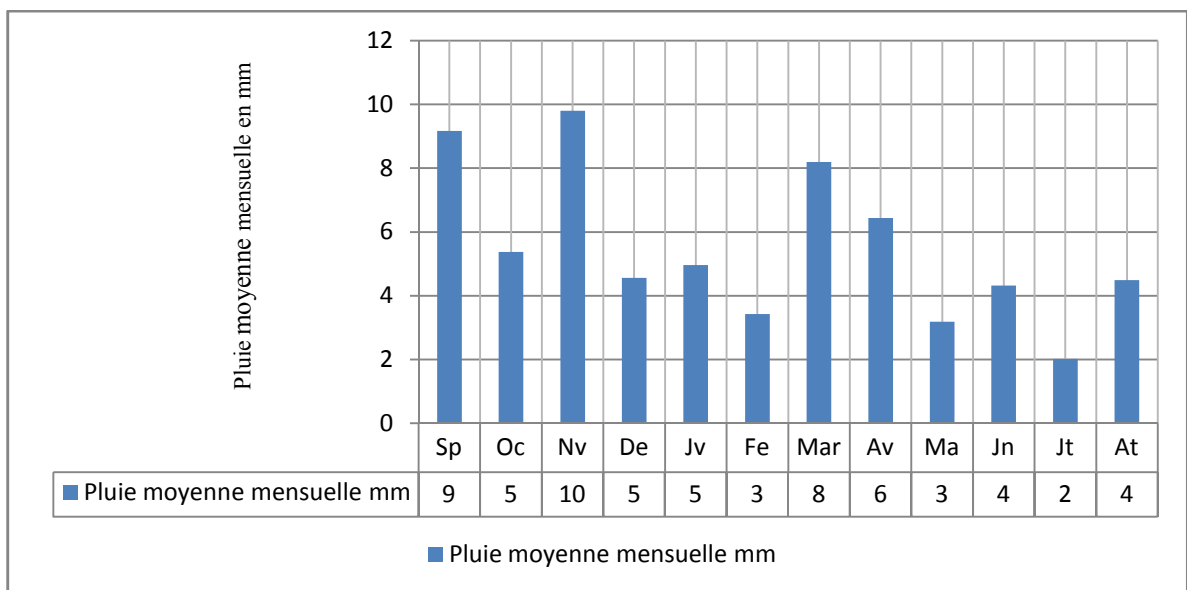


Figure II.11: Histogramme de la pluie moyenne mensuelle sur la période 1970-2015

D'après cette figure, la période allant du mois de septembre jusqu'au mois de janvier est la plus humidifiée de toute l'année. Les faibles hauteurs de la pluie sont enregistrées en été.

### II.3.5. Les précipitations maximales journalières

Dans les régions arides le caractère exceptionnel de certaines pluies tombées en 24h est très important à considérer, puisqu'elles peuvent être à l'origine du ruissellement des Oueds (Michel A.R., 1996). Il s'agit des hauteurs de pluie tombées de 6 heures du matin le jour *j* jusqu'à 6

heures le lendemain  $j + 1$ , la hauteur étant reportée au jour  $j$ . Elles peuvent être assimilées à une intensité de pluie en 24h. Plusieurs méthodes d'évaluation des crues utilisent ce type de données comme une caractéristique importante. Ces pluies sont généralement plus disponibles que les intensités par intervalles de temps plus petits.

### II.3.5. 1. Fréquences du nombre de jours de pluie journalière en fonction de leur hauteur

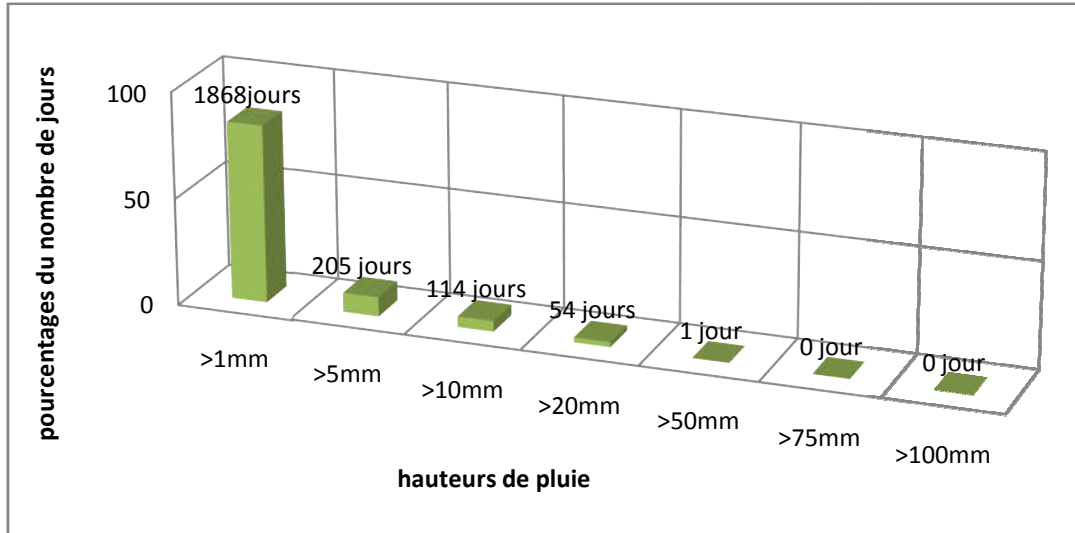


Figure II.12: Nombre de jours des pluies journalières (1970-2015)

Il s'agit des pourcentages du nombre de jours de pluie durant lesquels la hauteur d'eau tombée est supérieure à une certaine limite : 1, 5, 10, 25, ... mm. Le nombre de jours de pluie au moins égale à 0,1 mm est pris comme référence. La Figure II.13 ce dessus indique ces fréquences pour la station de Ghardaïa. Sur cette histogramme de fréquences cumulées des jours, on constate la rapide diminution des pourcentages de pluies en 24 heures lorsque la hauteur journalière augmente. Ainsi à Ghardaïa, 83% des pluies journalières ont des hauteurs supérieures à 1 mm, 9% supérieures à 5 mm, 5 % supérieures à 10 mm, et 2.4% supérieures à 25 mm. Rappelons que le nombre moyen de jours de pluie mesurable est de 12 j / an à Ghardaïa sur la période 1970-2015. Le nombre de fortes pluies journalières par rapport au nombre total de pluies est donc faible. Ces fréquences sont légèrement inférieures sur la période 1970-2015 (45 ans) en raison du nombre supérieur de pluies mesurables observés (17 jours).

Dubief en 1959 a référant à la fréquence des pluies égales ou supérieures à 5 mm/j, comme hauteur limite susceptible de provoquer un écoulement dans le M'Zab. Une telle évaluation demeure imprécise compte tenu des autres facteurs conditionnels, mais elle constitue néanmoins une approche intéressante des événements.



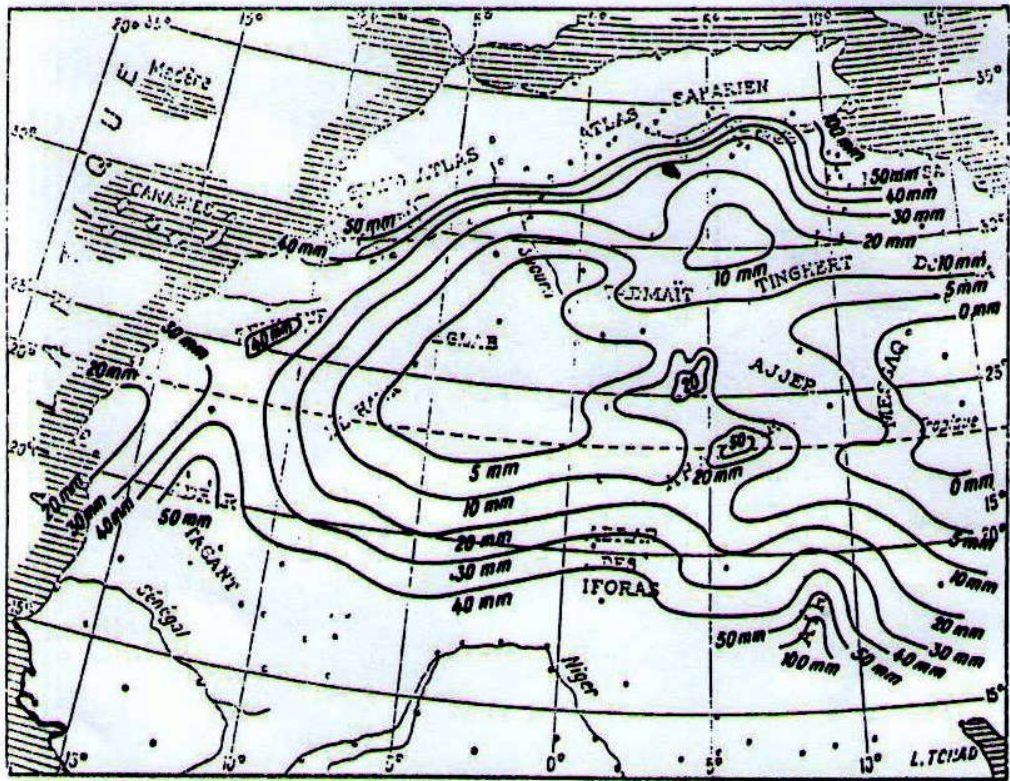


Figure II.13: Totaux annuels moyens des pluies supérieures à 5 mm en 24 heures (Dubief, 1959)

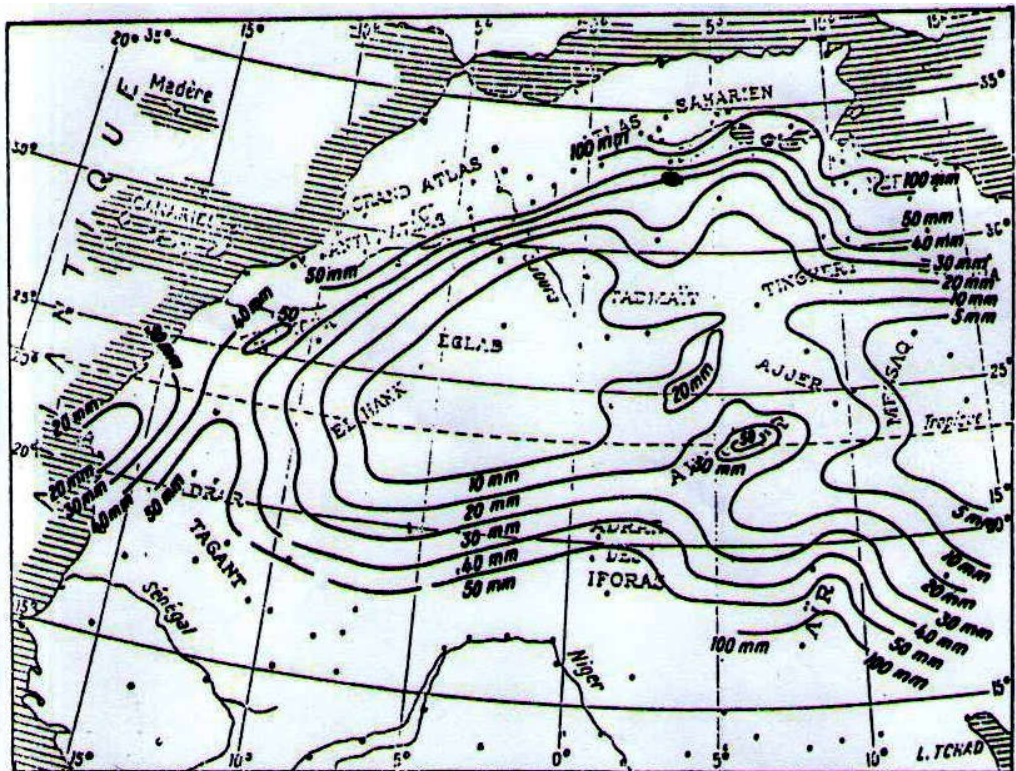
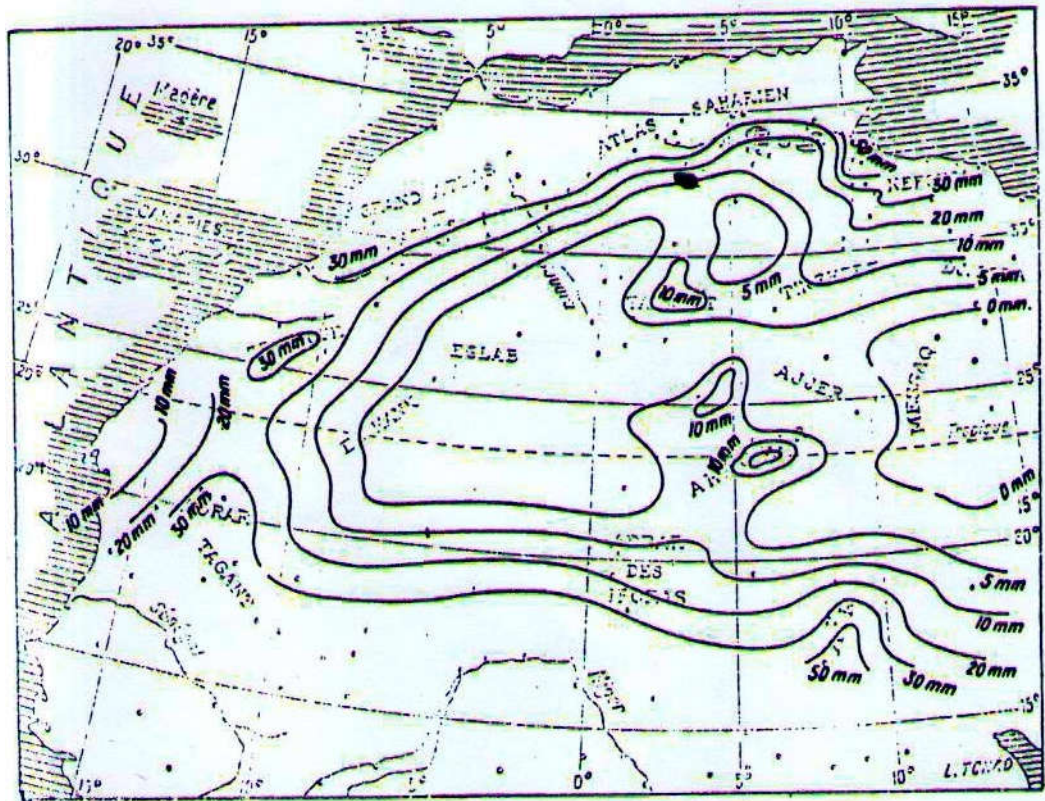


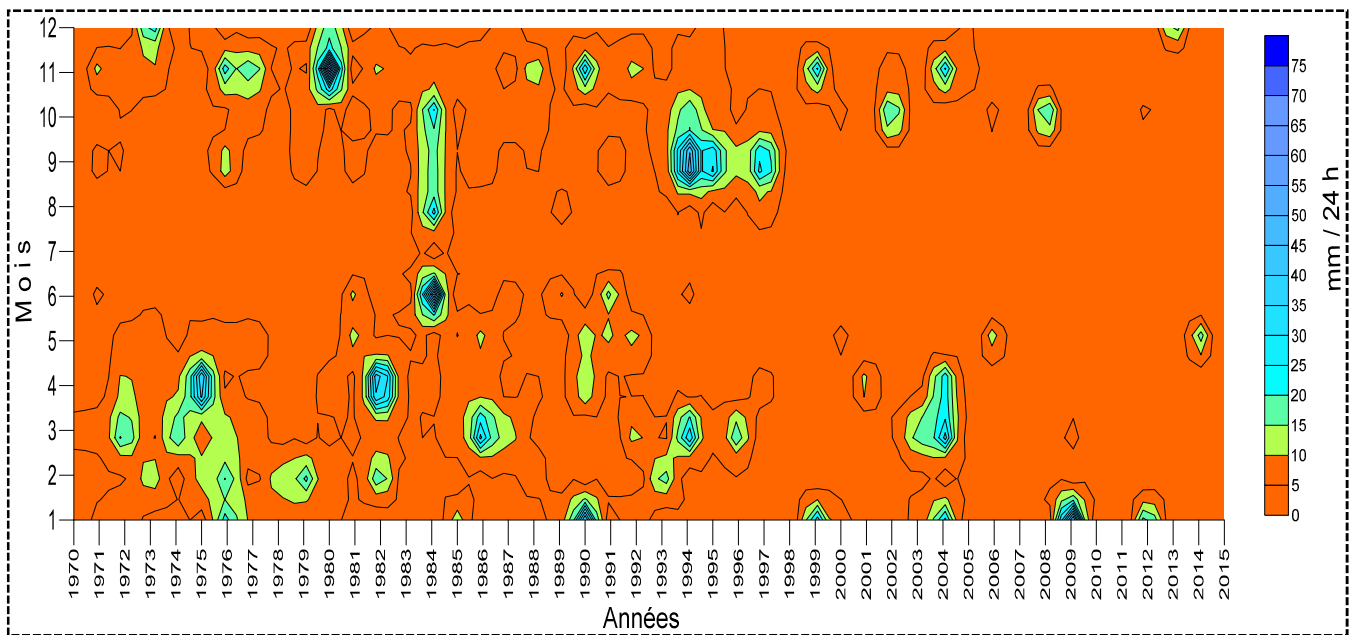
Figure II.14: Totaux annuels moyens des pluies supérieures à 10 mm en 24 heures (Dubief, 1959)



**Figure II.15: Totaux annuels moyens des pluies supérieures à 20 mm en 24 heures (Dubief, 1959)**

**II.3.5. 2. Répartition des pluies journalières et périodes de sécheresses ( 1970-2015 )**

On distingue la « sécheresse météorologique » ou la durée des périodes sans précipitations (inférieures ou égales à 0,1 mm) qui séparent les phases pluvieuses. D'autre part la « sécheresse efficace », c'est la durée qui séparant des pluies égales ou supérieures à 10 mm en 24 heures (Michel A.R., 1996).



**Figure II.16: Graphique en nuances de couleurs des précipitations Journaliers inter annuelles de la région du M'Zab pour la période 1970-2015**

Pour tracer le graphique si dessus (Figure II.17), nous avons utilisé le logiciel Serfur11 comme outil de simulation. On reporte sur les Xs les années de 1970 à 2015, aux Ys les deuze (12) mois, et aux Zs les lames de pluies journalières maximales tombées durant le mois concerné. La différenciation de couleur permettra d'interpréter les phénomènes climatiques marquant la période étudiée. La coloration orange est correspond à la saison sèche à largeurs différentes, ces saisons sont séparées par intervalles de courtes durées pluvieuses et humides. D'après cette figure : les saisons sèches sont comme suite :

- 1970 à 1974 (3 ans).
- 1977-1980 (3 ans).
- 1987 à 1990 (3 ans).
- 1991 a 1994 (3ans).
- 1997 à 2004 (7 ans).
- 2004 à 2008 (4 ans).
- 2009 à 2015 (6 ans ou plus).

Durant ces périodes nous remarquons qu'il y a un nombre important des mois secs ainsi qu'un cumul pluviométrique très faible, ce qui assure le prolongement de la saison sèche, et également le rétrécissement de la période humide. On observe sur le graphique aussi, cinq périodes à pluviométries intenses. Elles sont caractérisées par des colorations jaunes à bleu foncé (cercles en pointillés jaunes et Bleus) :

- L'hiver et le printemps de 1975.
- L'automne de 1980.
- Le Printemps et l'automne de 1984.
- L'automne de 1994.
- L'hiver et le printemps de 2004.
- L'automne de 2008.

La période d'automne 1994, et celle de 1984 sont considérées comme périodes les plus pluvieuses de toute la série du M'Zab. Elles sont caractérisées par de fortes précipitations et un taux d'humidité relativement haut. Un autre phénomène climatique est observé sur le graphique :

- Il s'agit du prolongement d'une saison par rapport à une autre, à savoir la saison sèche par rapport à la saison humide, cela est mis en évidence par la coloration orange dominant l'air des autres colorations bleutée.
- On remarque aussi que la période de sécheresse devient plus en plus longue, elle passe de 3 ans pour la période 1970-1994 aux 5 ans (ou même plus) pour la période 1997-2015.
- Une période de sécheresse générale est très nette sur le graphique sa-commence de l'année 1995 jusqu'à nous jours.

**L'événement du 29 et 30 septembre 1994** a été étudiée par Mr A. Roche dans le cadre de l'étude BG. Elle a été mise en relation avec une pluie qui commence, en tenant compte de la précision temporelle tri-horaire des données, à partir de 21.00 h le 28 septembre 1994. D'un total de 37,8 mm, elle est particulièrement intense : 28,2 mm/3h de 21.00 à 00.00. C'est la plus forte intensité du genre relevée sur les 6 ans d'observation. Elle est suivie, de 8,6 mm/3h de 00.00 h à 03.00 h le jour de 29 septembre, puis d'une traîne de 1,0 mm/3h. Cette averse a été précédée les deux nuits d'avant par deux pluies importantes, l'une de 11,7 mm le 27 septembre de 0.00 h à 6.00 h, l'autre de 18,9 mm de 18.00 h à 3.00 h le 28 septembre, avec une pointe finale d'intensité relativement élevée de 18,0 mm/3h. L'épisode pluvieux totalise ainsi 68,4 mm. Il faut encore souligner que les conditions de ruissellement ont été encore favorisées par des pluies antérieures : 2,3 mm, le 22 novembre et 2,9 mm le 25 novembre. L'épisode pluvieux de fin novembre 1994 est dû, selon le type défini par Dubief, à une dépression soudano-saharienne (Michel A.R., 1996).

### II.3.6. Étude statistique de précipitations maximales journalières

Selon Dubief (1959), les précipitations sur le Sahara Septentrionale ont pratiquement toujours lieu sous forme des pluies. Ces dernières sont caractérisées par leur faible importance quantitative et les pluies torrentielles sont rares. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes. Cette insuffisance de pluies sahariennes est accompagnée d'une irrégularité très marquée du régime pluviométrique et d'une variabilité interannuelle considérable, ce qui accentue la sécheresse (Dubief, 1959).

La série d'observation enregistrée pour la station de Ghardaïa entre 1970 jusqu'à 2015 nous a permis de déduire la pluviométrie maximale journalière qui est de 54.8 mm.

**Tableau II.5: Pluies journalières maximales observées à Ghardaïa (1970-2015)**

Année	Pluie j maximale (mm)	Année	Pluie j maximale (mm)	Année	Pluie j maximale (mm)	Année	Pluie j maximale (mm)	Année	Pluie j maximale (mm)
1970	4	1981	13	1992	12,6	2003	44	2014	2
1971	10,5	1982	9,4	1993	11,9	2004	32	2015	3
1972	21	1983	3	1994	<b>54,8</b>	2005	7		
1973	18,1	1984	20,07	1995	37	2006	16,2		
1974	9,8	1985	7,87	1996	13	2007	10		
1975	24,7	1986	36,6	1997	47	2008	48		
1976	17,2	1987	8,8	1998	4	2009	40		
1977	17,9	1988	8,9	1999	23	2010	2,8		
1978	11,3	1989	6,7	2000	18	2011	50		
1979	18,6	1990	27,9	2001	18	2012	10		
1980	46,5	1991	10,9	2002	24	2013	5		

### II.3.6. 1. Caractéristiques statistiques de l'échantillon analysé

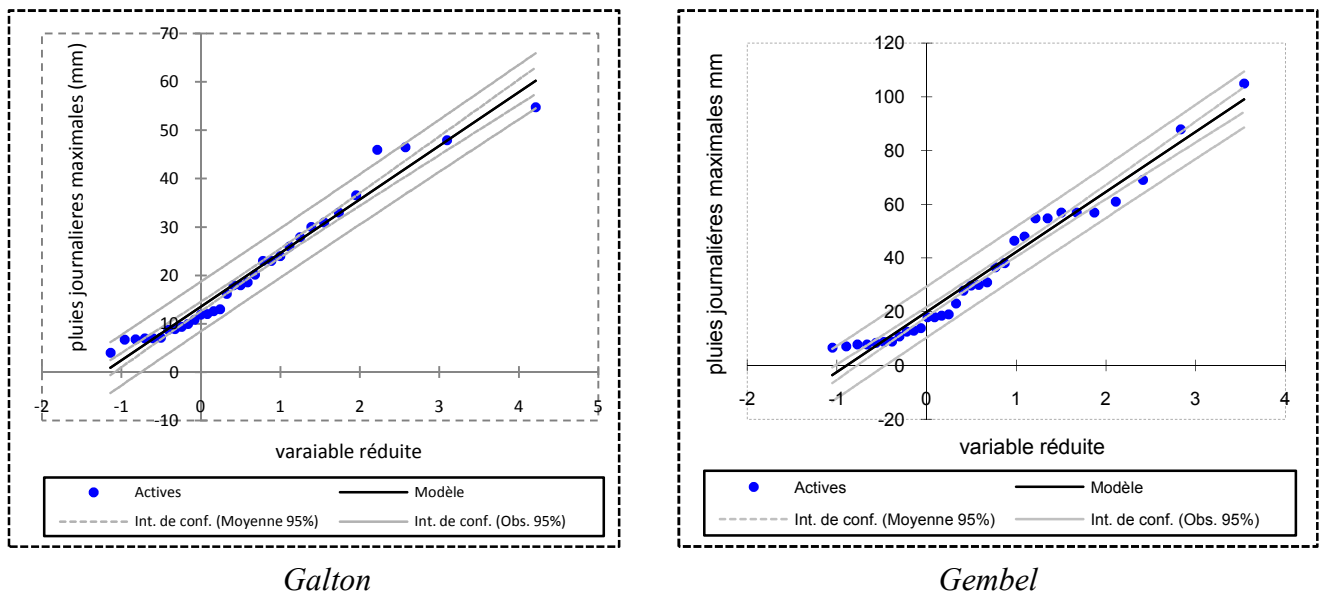
**Tableau II.6 : Caractéristiques statistiques de la série des pluies maximales journalières de la période 1970-2015**

Paramètres	Valeur
Taille de la série	44
Moyenne arithmétique	19,59
L'écart type	12,70
Coefficient de variation	0,65
L'exposant climatique	0.15
Moyenne log(P) 4,193	2,79
L'écart type log(P) 0,635	0,60

La répartition de cette série présente un coefficient de variation supérieur à 0.50 qui indique une nette dissymétrie, et qui traduit l'irrégularité pluviométrique dans les régions arides. Celle-ci nous a permis de tester la loi de Galton et celle de Gumbel, afin de déterminer l'ajustement adéquat à ces lois.

### II.3.6. 2. Ajustement de la série pluviométrique à la loi Log-Normal (Galton) et la loi de Guembel

On a procédé à un ajustement graphique par l'utilisation du logiciel HydroLab qui peut employer diverses lois statistiques, notamment la loi de Galton et la loi de Guembel, et qui conviennent aux régions arides tel que le M'Zab. Les graphes d'ajustement sont exposés ci-dessous.



**Figure II.17: Ajustement graphique à la loi de Galton et Guembel par HydroLab logiciel (Station de Ghardaïa 1970-2015)**

### II.3.6. 3. Test de Khi2

	Lois	Galton	Gumble
Khi <sup>2</sup> (Valeur calculé)		3,27	21,10
Khi <sup>2</sup> (Valeur théorique)		9,49	9,49
DDL		4	4
P-value		<0,070	<0,070
$\alpha$		0,05	0,05

**Tableau II.7: Test de Khi 2 appliqué à la série des P<sub>jmax</sub> (Station de Ghardaïa 1970-2015)**

D'après le test de Khi<sup>2</sup> appliqué à la série des P<sub>jmax</sub> de station de Ghardaïa (1970-2015), cette série s'ajuste mieux à la loi de **Galton**. Pour des fréquences choisies, nous avons déterminé à partir du graphique d'ajustement les valeurs des pluies journalières pour chaque pas de temps. Sur le tableau II.8 nous avons représenté les valeurs des pluies obtenues.

**Tableau II.8: Estimation de la période de retour sur la Station de Ghardaïa 1970-2015**

Temps de retour (an)	FND	P j max fréquentielle (mm)
2	0,5	18
5	0,8	30
10	0,9	<b>40</b>
50	0,98	49
100	0,99	<b>73</b>
500	0,998	96
1000	0,999	<b>128</b>
10000	0,9999	201

### II.3.7. Pluies de courtes durées et intensité

L'intensité des pluies est un des facteurs primordiaux du ruissellement. En l'absence d'enregistrement, l'intensité moyenne est calculée par le quotient de la hauteur de la pluie par sa durée effective. Selon la relation (2.2) la pluie de durée t(h) et de fréquence donnée (f) s'écrit (Michel A.R., 1996 ; Jean-Paul L , 2000) :

$$P_t = P_{jf} \left( \frac{t}{24} \right)^b \quad (2.2)$$

- P<sub>jf</sub> : pluie journalière maximale annuelle de fréquence f (en mm),
- P<sub>t</sub> : pluie maximale annuelle de durée (t) et de fréquence (f) (en mm),
- t : durée de pluie (en heure),
- b : exposant climatique de la station pluviométrique : b = 0,45.

Les intensités moyennes annuelles de durée t(h) et de période de retour T (an) sont calculées par la relation suivante (Sari, 2002) :

$$I = \frac{P_t}{t} \quad (2.3)$$

Au cours d'une même averse, l'intensité des précipitations varie à chaque instant suivant les caractéristiques météorologiques de celle-ci. Plutôt que de considérer l'averse entière et son intensité moyenne, on peut s'intéresser aux intensités observées sur des intervalles de temps au cours desquels on aura enregistré la plus grande hauteur de Pluie. On parle alors d'intensité maximale (Sari, 2002) :

$$I_{\max} = \frac{H_{\max}}{t} \quad (2.3)$$

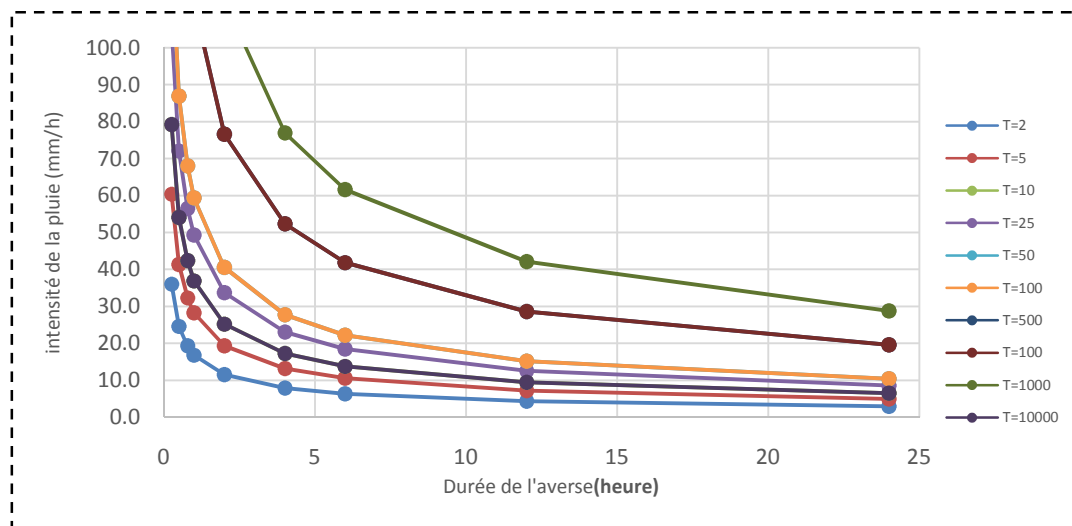
- $I_{\max}$  : Intensité maximale de la pluie (mm/h)
- $H_{\max}$ : Hauteur maximale de pluie en mm

Les calculs ont donné les résultats présentés sur le tableau II.9, pour des périodes de retour (2 ans, 5ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans) et pour des durées d'averse de 15 min jusqu'à 1 jour.

**Tableau II.9: Intensités maximales en mm/h de durée t (h) et de période de retour T(an).**

Durée de L'averse (h)	Période de retour (an)						
	2	5	10	20	50	100	1000
0,25	9,23	15,39	19,49	25,13	33,34	40,01	67,19
0,5	6,31	10,51	13,31	17,17	22,77	27,33	45,89
0,78	4,85	8,09	10,24	13,21	17,52	21,02	35,31
1	4,31	7,18	<b>9,09</b>	<b>11,72</b>	<b>15,55</b>	<b>18,66</b>	<b>31,35</b>
2	2,94	4,90	6,21	8,01	10,62	12,75	21,41
4	2,01	3,35	4,24	5,47	7,26	8,71	14,62
6	1,61	2,68	3,39	4,38	5,81	6,97	11,70
12	1,10	1,83	2,32	2,99	3,97	4,76	7,99
24	0,75	1,25	1,58	2,04	2,71	3,25	5,46

En trace finalement la courbe IDF suivante :



**Figure II.18: Courbe IDF de la station de Ghardaïa (1970-2015)**

Les pluies journaliers supérieures ou égales à 5 mm et dont l'intensité moyenne est supérieure à 2 mm/h et de durée moins de 15 mn pour une période de retour décennale, représente plus de 60%

des pluies individuelles et totalisent à la station de Ghardaïa 30 mm sur l'année. Ce sont elles qui sont le plus susceptibles de donner lieu au ruissellement.

Les intensités de pluie aux régions sahariennes notamment au M'Zab sont faibles de décembre à février, ce sont les longues et lentes précipitations d'hiver. En fin de printemps et au début de l'automne, éventuellement en été, les intensités sont nettement plus fortes, car elles correspondent à des averses orageuses.

#### **II.4. Conclusion et synthèse**

Le climat de la région du M'Zab est de type saharien caractérisé par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver. Les moyennes générales, et celles des minima et des maxima sont : 22.3 °C, 8°C, 46°C. Les vents dominants sont Nord - Ouest en hiver et Sud -Ouest au printemps qui sont souvent chargés de particules de sable et le Siroco. Le vent du Sud très chaud souffle durant une bonne partie de l'été.

L'évaporation annuelle à la station de Ghardaïa est de l'ordre de 2178 mm. Les valeurs élevées d'évaporation sont enregistrées en périodes juin- août. Les valeurs les plus bas sont enregistrées au cours du mois de janvier.

La pluviométrie moyenne annuelle, à Ghardaïa sur la période 1970-2015 (soit 45 ans d'observation) est de 66 mm, avec un écart-type de 34,0 mm. La médiane est susceptible d'être dépassée une année sur deux, elle est de 62,4 mm.

La période pluvieuse sur le M'Zab va d'octobre à avril, avec quelques pluies d'intensité supérieure à 5 mm/24h qui sont favorables de déclencher des ruissellements. Les pluies journalières de hauteurs supérieures ou égales respectivement à 5 mm, 10 mm et 25 mm représentent respectivement 62 %, 39 % et 14 % du total annuel. Les hauteurs de pluies journalières du M'Zab de fréquence décennale, centennale et millénaire ont été évaluée respectivement à 40 mm, 73 mm et 128 mm.

Les pluies journaliers supérieures ou égales à 5 mm et dont l'intensité moyenne est supérieure à 2 mm/h totalisent à Ghardaïa 30 mm sur l'année. Elles sont susceptibles de déclencher un ruissellement.



*CHAPITRE III*

**ASPECT HYDROLOGIQUE  
DE LA RÉGION DU M'ZAB**

## Chapitre III : Aspect hydrologique de la région du M'Zab

### III.1. Introduction

Le bassin versant du M'Zab présente un réseau hydrographique très dense en amont que en aval. Ce réseau draine les eaux de crues jusqu'à l'exutoire final de Sebkhret Sefioune. En hydrologie l'étude morphométrique est très utile, elle nous permettra de classer les coures d'eau selon leur importance et de déciller leur caractéristiques géométriques et hydrographiques qui peut être exploitées par la suite pour l'estimation des apports et des écoulements (Jean-Paul L , 2000).

### III.2. Caractéristiques morphométriques du bassin versant du M'Zab

#### III.2.1. Dimensions géométriques

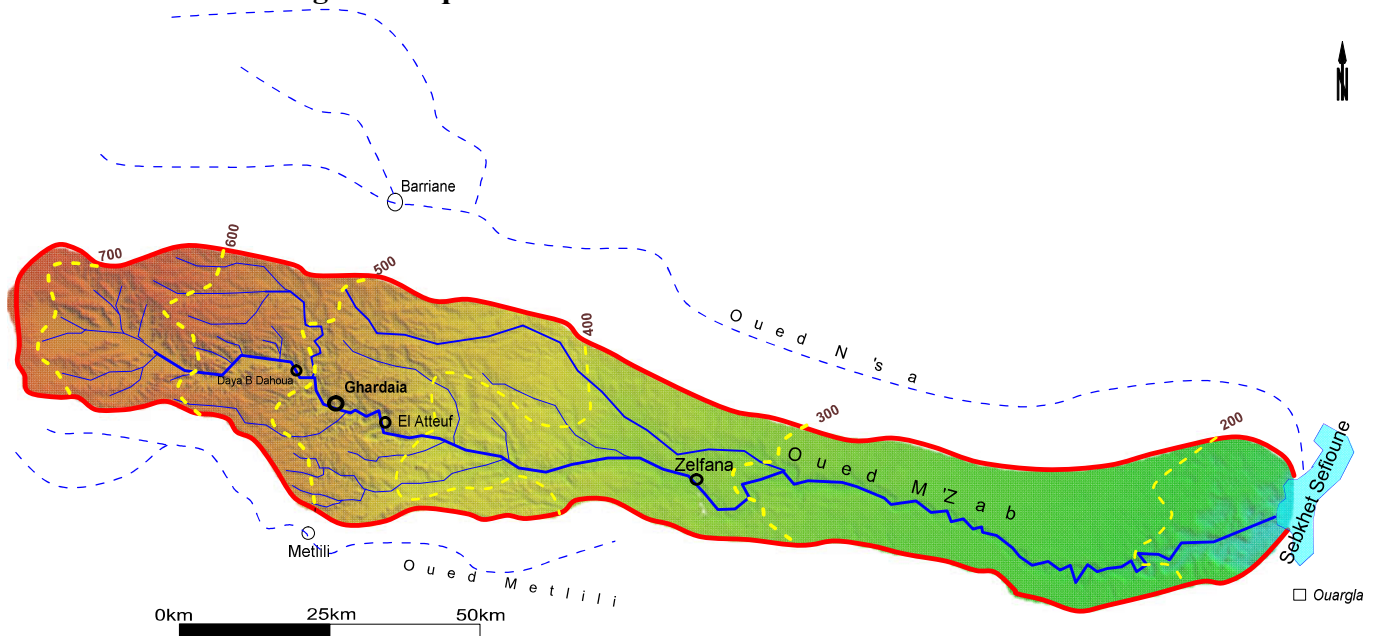


Figure III.1: Topographie et hydrographie du bassin versant du M'Zab

L'analyse numérique des données cartographiques du bassin du M'Zab (carte topographie, Modèle MNT), nous a permis de chiffrer les résultats suivantes selon chaque exutoire :

Tableau III.1: Caractéristiques morphométriques des bassins élémentaires du M'Zab

Désignation Exutoires	Daya B D	El Atteuf	Zelfana, Lahsay	Ouargla, Skt Sefioune
Superficie km <sup>2</sup>	1289	1573	2800	5620
Périmètre km	157	181	265	467
Longueur principal km (L)	41	58	131	224
Largeur équivalente km (l)	32	27	21	23

#### III.2.2. Indice de compacité $K_G$

L'indice  $K_G$  détermine la forme et la compacité d'un bassin versant. Sont expression est:

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3.1)$$

Où: P et A sont respectivement le périmètre et la superficie du bassin

**Tableau III.2: Valeurs de  $K_G$  estimés sur les bassins élémentaires du M'Zab**

Exutoires	Daya B D	El Atteuf	Zelfana, Lahsay	Ouargla, Skt Sefioune
Indice de capacité $K_G$	1,23	1,29	1,41	1,84

La valeur du  $K_G$  signifie que le bassin du M'Zab dans sa partie amont est compacté ( $K_G < 1.3$ ), par contre vers l'aval, il devient allongé.

### III.2.3. Rectangle équivalent

Ce paramètre permet de comparer facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Le principe est de transformer notre bassin versant en un rectangle de même périmètre et de même surface. On obtient la longueur  $L$  et la largeur  $l$  de ce rectangle a travers les formules suivante (Sari, 2002):

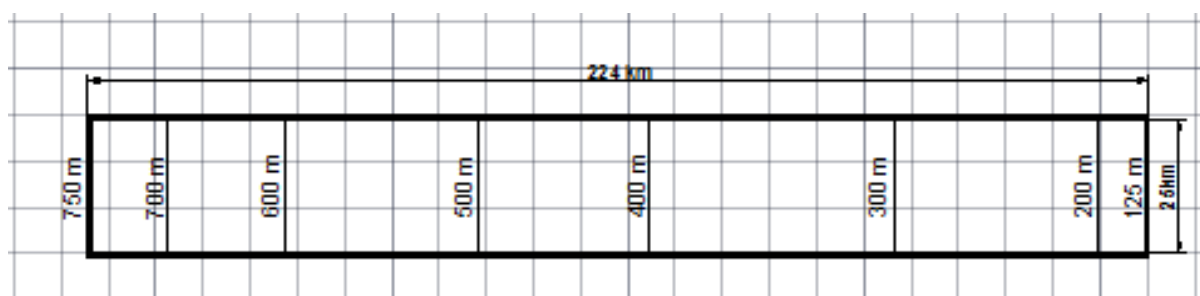
$$L = K_G \frac{\sqrt{A}}{1.12} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right) \quad (3.2)$$

$$l = K_G \frac{\sqrt{A}}{1.12} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right) \quad (3.3)$$

Ainsi la longueur et la largeur du rectangle équivalent du M'Zab, sont trouvées respectivement :  $L = 224$  km et  $l = 25$  km. Ayant déterminé les dimensions de rectangle équivalent, l'on détermine la répartition des courbes de niveaux.

**Tableau III.3: Calcul des surfaces et largeurs intervalles**

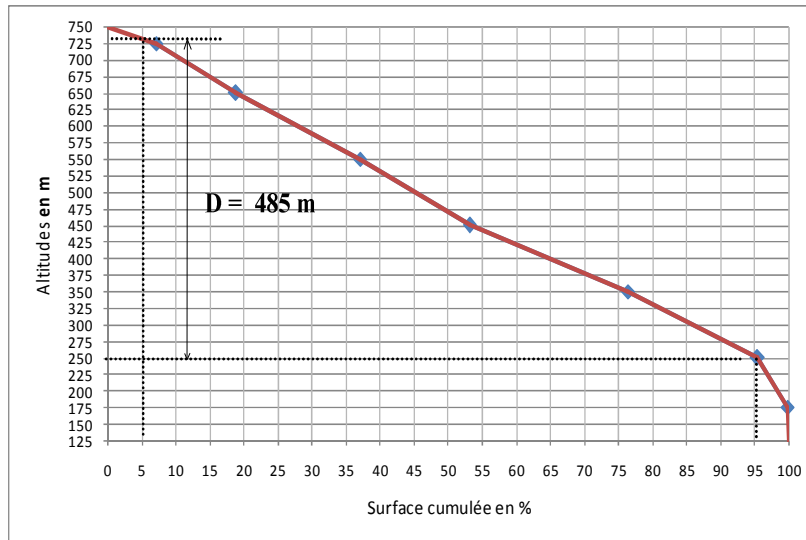
Altitude (m)	Surface intervalle (km <sup>2</sup> )	Surface Cumulée (km <sup>2</sup> )	Pourcentage ds surfaces cumulées %	Largeur d l'intervalle (km)
700-750	400.75	400.75	7.13	16.03
600-700	654.50	1055.25	18.78	26.18
500-600	1027.25	2082.50	37.07	41.09
400-500	904.00	2986.50	53.16	36.16
300-400	1307.25	4293.75	76.43	52.29
200-300	1072.00	5365.75	95.51	42.88
125-200	252.50	5618.25	100.00	10.10



**Figure III.2 : Rectangle équivalent d'Oued M'Zab**

### III.2.4. Courbe hypsométrique

Elle fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin en fonction de l'altitude.



**Figure III.3 : Courbe hypsométrique d'Oued M'Zab**

De cette courbe hypsométrique :

- L'altitude  $H_{5\%} = 735$  m,
- L'altitude  $H_{95\%} = 250$  m,
- $D = 735 - 250 = 485$  m.

### III.3. Indices de pente, Dénivelée spécifique et type de relief

Le relief et les caractéristiques physiques d'un bassin versant ont une influence directe sur le régime d'écoulement. Car une forte pente occasionne un écoulement aussi rapide en un temps de concentration très court et donc une montée plus rapide. Le relief se détermine au moyen d'indices de pente (Moyenne, Roche, globale) et de la dénivelée spécifique.

#### III.3.1. Pente moyenne $I_m$

Il se calcule par la formule suivante:

$$I_m = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \quad (3.3)$$

Avec:

- $I_m$ : pente moyenne en m/km,
- $H_{\max}$ : altitude maximal du bassin versant en m,
- $H_{\min}$ : altitude minimal du bassin versant en m,
- $L$ : longueur du rectangle équivalent en Km.

Pour le bassin du M'Zab la pente moyenne est estimée à 2,8 m/km

#### III.3.2. Indice de pente globale $I_g$

$I_g$  est calculé par la formule :

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} = \frac{D}{L} \quad (3.4)$$

Avec:

- $I_g$ : pente globale en m/km,
- $D$  : dénivelée en m,
- $L$ : longueur du rectangle équivalent en Km.

Pour le bassin du M'Zab, l'indice de pente globale est estimée à 2,16 m/km

### III.3.3. Indice de pente de Roche $I_p$

$I_p$  est la moyenne des racines carrées des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée à la surface. On peut le calculer aussi en fonction de  $I_g$  par la formule :

$$I_p = \sqrt{\frac{I_g}{0,8}} \quad (3.5)$$

Pour le bassin du M'Zab la valeur de  $I_p$  calculée est de 1,64 m/km.

### III.3.4. Dénivelée spécifique $D_s$

La dénivelée spécifique apparaît comme une correction de la dénivelée simple par application d'un coefficient qui dépend de la forme du bassin, ce qui donne la possibilité de comparaison entre ses valeurs pour différents bassins indépendamment de leur taille et surface.

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} \quad (3.6)$$

Avec :

- $I_g$  : Indice de pente globale. (m/km),
- $A$  : Surface de bassin versant ( $\text{km}^2$ ).

La valeur de  $D_s$  calculée pour le M'Zab est de 162 m.

### III.3.5. Type de relief

Le tableau suivant représente le classement de relief en fonction de  $D_s$  et de  $I_g$  (l'O.R.S.T.O.M).

**Tableau III.4 : Classification du relief selon ORSTOM**

Classes de relief	descriptions	Pentes $I_g$ en m/Km	$D_s$ en m
R1	Relief très faible	$I_g < 0.002$	$D_s < 10\text{m}$
R2	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$	$10\text{m} < D_s < 25\text{m}$
R3	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.010$	$25\text{m} < D_s < 50\text{m}$
R4	Relief modérée	$0.01 < I_g < 0.02$	$50\text{m} < D_s < 100\text{m}$
<b>R5</b>	<b>Relief assez fort</b>	<b><math>0.02 &lt; I_g &lt; 0.05</math></b>	<b><math>100\text{m} &lt; D_s &lt; 250\text{m}</math></b>
R6	Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$	$250\text{m} < D_s < 500\text{m}$
R7	Relief très fort	$0.1 < I_g$	$500\text{m} > D_s$

Le bassin versant du M'Zab est dans la classe **R5 (relief assez fort)**

### III.4. Caractéristiques du réseau hydrographique

#### III.4.1. Lois de Horton (rapport de confluence et longueur des talwegs).

La méthode de hiérarchisation celle de Strahler appliquée sur les documents topographiques du M'Zab, nous permet de définir 6 ordres.

**Tableau III.5 : Résultats de l'hiérarchisation du bassin du M'Zab**

Ordre	Nombre	Longueurs Moyenne des talwegs (km)
1	2354	1.2
2	423	2.7
3	78	10
4	22	20
5	5	35
6	1	284

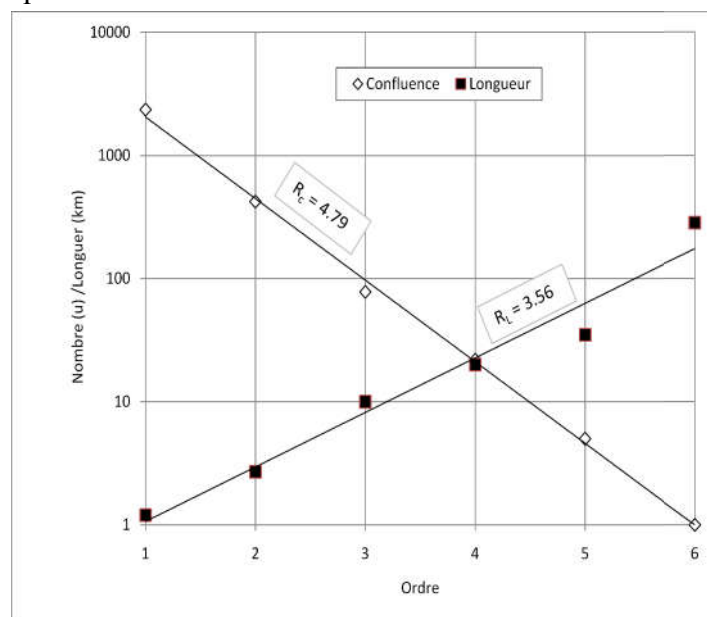
Pour un bassin versant homogène, le  $R_C$  (rapport de confluence) est le rapport du nombre  $N_i$  de cours d'eau d'ordre  $i$  au nombre  $N_{i+1}$  de cours d'eau d'ordre  $i+1$ . Il est sensiblement constant :

$$R_C = \frac{N_i}{N_{i+1}} = \text{cte} \quad (3.7)$$

De même, le  $R_L$  (rapport des longueurs) est le rapport de longueur  $L_i$  de cours d'ordre  $i$  à la longueur  $L_{i-1}$  de cours d'eau d'ordre  $i-1$ . Il est aussi presque constant.

$$R_L = \frac{L_i}{L_{i-1}} = \text{cte} \quad (3.8)$$

La détermination de  $R_C$  et  $R_L$  se fait par voie graphique en portant  $N_i$ ,  $l_i$  et  $i$  sur un graphique semi- logarithmique. Les pentes des droites moyennes permettent de déterminer la raison de la progression géométrique.



**Figure III.4 : Graphe de la loi de Horton du bassin du M'Zab**

D'après le graphe :  $R_C = 4,79$  et  $R_L = 3,56$

### III.4.2. Densité de drainage

C'est le rapport entre la longueur totale de tous les cours d'eau et la superficie du bassin versante.

$$D_d = \frac{\sum L_{Tatwags}}{A} \text{ en (km}^{-1}\text{)} \quad (3.9)$$

Pour le bassin du M'Zab  $D_d = 1 \text{ (Km}^{-1}\text{)}$

### III.4.3. Récapitulation des données caractéristiques du bassin du M'Zab

**Tableau III.6 : Donnée morphologiques et hydrographiques du bassin du M'Zab**

Caractéristique	Résultat
Surface totale S (km <sup>2</sup> )	5620
Périmètre total P (km)	467
Longueur totale L (km)	224
Larguer moyenne l (km)	25
H max (m)	775
H min (m)	125
H moy(m)	325
H <sub>5%</sub> (m)	735
H <sub>95%</sub> (m)	250
Coefficient de compacité K <sub>G</sub>	1.84
Dénivelée D (m)	485
Pente moyenne I <sub>m</sub> (m/km)	2.80
Indice de pente globale I <sub>g</sub> (m/km)	2.16
Indice de pente de Roche I <sub>p</sub>	1.64
Dénivelée spécifique D <sub>s</sub> (m)	162
Type de relief R	R5
R <sub>L</sub>	3.56
R <sub>C</sub>	4.79
Densité de drainage D <sub>d</sub> (km <sup>-1</sup> )	1

## III.5. Historique des crues du M'Zab

### III.5.1. Archives et données

Aucune mesure hydrométrique n'existe sur Oued M'Zab, Néanmoins des observations qualitatives de ces crues ou leur trace ont depuis longtemps existerais. Parmi ces observations notons celles :

- Des Tolbas (savants religieux) de Ghardaïa qui ont conservé des informations sur les crues qui traversent Oued M'Zab depuis 1728.
- L'archive français : les plus anciennes crues notées dans les archives françaises sont celles d'octobre 1884 et du 15 janvier 1886. De 1887 à 1900 il n'y a aucun document (Capot-Rey,1939).

- Les observations du Capot-Rey : publiées en 1939.
- Les observations du Dubief de 1921 à 1953.
- Une liste complémentaire a été obtenue jusqu'à 1959 par M.A.Roche (communication personnelle avec Jean Dubief 1996) (Michel A.R., 1996; Ouled Belkhir, 2002).

Par la suite, les informations dont nous disposons (depuis 1969 jusqu'à novembre 2016), ont été obtenus :

- A partir des archives de la protection civile de la Wilaya de Ghardaïa, selon leurs interventions (l'indice d'importance des crues est indiqué par le degré d'intervention).
- Les archives de la bibliothèque des pères blancs à Ghardaïa.
- Des enquêtes personnelles locales sur la période 1998-2015.
- Quelques mesures hydrométriques personnelles effectuées sur les laissées des crues exceptionnelles.

Nous récapitulons toutes ces informations dans le tableau III.7. La date de la crue est indiquée dans les colonnes 1 et 2, l'importance de la crue est reportée sur la colonne 3 et indiquée par les lettres: faible, moins importante, importante et très importante. Dans la colonne 4 les lettres M,N,Z signifient que des crues ont lieu simultanément dans les Oueds voisins Metlili (M), N'sa (N) et Zegrir (Z). La colonne 5 figure quelques observations accompagnant ces événements.

**Tableau III.7: Historique des crues sur le M'Zab**

de l'événement	Importance sur oued M'Zab	M ; N ; Z	Observation	
<i>D'après la liste de document Dubief (1953)</i>				
1921	14-15 mai	Faible	M-Z-N	-
	28 mai	Importante	-	La crue arrive au 3 <sup>ème</sup> barrage, la palmeraie de Ghardaïa est inondée.
	Octobre	Faible	-	-
1922	3-4 décembre	Faible	Z-N	-
1923	23 mai	Importante	-	Inondation des oasis de Ghardaïa, Melika, Bou Noura, El Atteuf. Atteint Zelfana à 64 km en aval de Ghardaïa, à 150 km de la source.
1924	Aucun écoulement		-	-
1925	15-17 mars	Importante	-	Dépasse Bou Noura après avoir rempli tous les barrages situés en amont.
1926	Aucun écoulement		-	-
1927	15 mai	Faible	M-Z-N	-
1928	Aucun écoulement		N	-
1929	7 septembre	Importante	M-N	Remplit tous les barrages.
1930	Aucun écoulement		N-Z	-
1931	28 mai	Importante	M	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
1932	8 novembre	Importante	M-Z-N	Coule jusqu'au barrage; oasis arrosée.
	Décembre	Importante	-	Remplit les barrages de Ghardaïa et s'arrête à celui de Melika.
1933	3 novembre	Très importante	-	Franchit les barrages de Ghardaïa, Melika, et BouNoura. S'arrête à celui d'El Atteuf qui n'a pas été atteint depuis 1932.
1934	Aucun écoulement		M-N-Z	-
1935	23 avril	Moins importante	M	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.



	12 mai	Moins importante	Z	
1936	1 mai	Importante	M-N-Z	
1937	Aucun écoulement		N-Z	
1938	17-18 avril	Importante	N-Z	Coule jusqu'à la ville de Ghardaïa
	25 novembre	Importante	-	Inondation totale des oasis de Ghardaïa, Beni Isguen, partielle de celle de Bou Noura (oued Zouil).
1939	Février	Importante	M-N-Z	Arrive jusqu'à El Atteuf, remplissant à moitié le barrage d'aval de l'oasis. Tous les barrages situés sur le parcours aval de l'oued ont été remplis.
1940	Mars	Faible	M-N-Z	Crues des affluents des oueds El Abiodh et M'Zab. Le barrage dit "Sed Edjedid" (dit aussi "Habbas Djedid") presque entièrement rempli.
1941	Mars	Importante	M-N-Z	Inondation de la palmeraie de Ghardaïa; premier barrage (à 1500 m en amont du Ksar) rempli.
	16 avril	Moins importante	N-Z	Inondation de l'oasis; barrage en parti rempli.
1942	07 juin	Moins importante	-	Crue des oueds secondaires.
1943	18 février	Faible	Z	Oued Adira au NW de Ghardaïa.
	Mars	Faible	M-N	Partie N de la palmeraie arrosée.
	Avril	Faible	M-N-Z	Inondation de l'oasis. Fortes crues des oueds secondaires.
	Octobre	Importante	N	Inondation de l'oasis de Ghardaïa; premier barrage rempli.
	Décembre	Moins importante	N-Z	Inondation de l'oasis de Ghardaïa.
1944	Février	Moins importante	N	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
	Mars	Moins importante	N-Z	-
1945	Aucun écoulement		-	-
1946	21 janvier	Très importante	N-Z	Inondation de toutes les oasis. L'oued M'Zab est arrivé à El Atteuf, tous les barrages ont été remplis sauf El Atteuf qui ne l'a été qu'en partie.
	24 avril	Importante	N-Z	Inondation de la partie nord de l'oasis de Ghardaïa.
	15 septembre	Faible	N	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
1947	6-7 avril	Moins importante	M-N	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
1948	30 avril	Faible	M	-
	Septembre	Importante	M-N-Z	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa Oueds secondaires
1949	24 mars	Faible	-	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
	24 avril	Importante	M-N-Z	Inondation de l'oasis de Ghardaïa. Barrages partiellement remplis.
1950	6 septembre	Importante	M-N-Z	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
	Octobre	Importante	N-Z	Inondation de l'oasis de Ghardaïa; barrage de Ghardaïa rempli.
1951	5 mars	Importante	M-N-Z	Inondation de l'oasis de Ghardaïa. La crue arrive jusqu'à El Atteuf.
<i>Liste publiée par Mr M.A.Roche (1996), avec l'autorisation de Mr Dubief</i>				
1951	13 et 19 septembre	Moins importante	M-N-Z	Crue moyenne des oueds secondaires Bouchamdne, Takdit, Touzouze, Argdane. Une partie de la palmeraie a été arrosée. Une crue de l'oued M'Zab a été signalée dans son cours inférieur (renseignement de l'annexe d'Ouargla).
	02 octobre	Très importante	M-N-Z	L'oued M'Zab est arrivé jusqu'à El Atteuf, après avoir rempli les barrages de Ghardaïa et Melika. Plus en aval, la crue alimentée par les affluents inférieurs du M'Zab atteint Hassi Chegga le 4 octobre. Le 17 le lit de l'oued était encore humide; un plan d'eau de 250 m <sup>2</sup> subsistait à Chaab M'Zab.
1952	24 avril	Très importante	M-N-Z	La chute de pluie a été considérable à partir d'un point situé à 15 km en amont de Ghardaïa et jusqu'au-delà de Zelfana. Les oueds du bassin supérieur du M'Zab n'ont pas ou peu coulé (oueds El Kekakh, El Abiod, Djaref). A Ghardaïa, la crue ne s'est fait sentir qu'à partir de la Daïa ben Dahoua; elle est de courte durée, mais violente par suite d'un ruissellement intense. A Zelfana, le débit maximum a pu être évalué entre 500 et 1000 m <sup>3</sup> seconde. La crue emporta des tentes, noya plus de 1200 têtes de bétail (renseignements d'Ouargla).
	23 septembre	Importante	M	Crue de l'oued M'Zab alimentée par les oueds immédiatement en amont; barrages remplis. Forte crue de l'oued N'Tissa qui remplit le barrage d'El Atteuf: léger déversement de celui-ci. <b>Le barrage de Beni-Isguen a été très endommagé.</b> L'oued coule en aval d'El Atteuf, grâce aux crues des oueds inférieurs et surtout Noumerate.

1953	Mars	Faible	Z	La palmeraie de Ghardaïa a été partiellement arrosée.
	12 juillet	Faible	M-N-Z	Oued Zouil. Quelques jardins de l'oasis de Bou Noura ont été arrosés.
	5 septembre	Faible	-	Oueds secondaires : Touzouze, Akhalkhal.
<i>Liste des archives du centre documentaire des pères blancs à Ghardaïa (2001)</i>				
1954	Aucun écoulement			
1955	25-26 janvier	Importante	M-N-Z	
	25 aout	Importante	-	
1956	04 novembre	Très importante	M-N-Z	
1957	Aucun écoulement		-	
1958	Aucun écoulement		-	
1959	21mars	Importante	N	
	octobre	Importante	-	
<i>Une lacune d'observation de 10 ans (1959-1969)</i>				
<i>Liste d'après l'archive d'intervention des services de la protection civil de département de Ghardaïa</i>				
1969	3 juin	Importante	M-N	
1970	Aucun écoulement		-	
1971	Aucun écoulement		-	
1972	15 mars	Très importante	M-Z	
	24 mars	Faible	N	
1973	12 novembre	Importante	Z	
	12 décembre	Faible	N	11 mm de Pluie à la station Ghardaïa (Noumeratte)
1974	Aucun écoulement		-	
1975	14 avril	Importante	M-N-Z	
1976	Aucun écoulement		-	
1977	14 mars	Importante	-	
1978	14 mai	Très importantes	M-N-Z	
1979	Aucun écoulement			
1980	16-17 novembre	Importante	M-N-Z	
1981	Aucun écoulement		-	
1982	Aucun écoulement		-	
1983	Aucun écoulement		-	
1984	17 octobre	Importante	-	
	30 octobre	Très importante	M-N-Z	Au moins le barrage en amont de la palmeraie de Ghardaïa est rempli.
1985	Aucun écoulement			
1986	5 mars	Moins importante	-	37 mm de pluie à la station de Ghardaïa
	31 mai	Importante	M-N-Z	
	9-8 octobre	Moins importante	-	27 mm de pluie à la station de Ghardaïa
1987	1-3 janvier	Importante	M-N-Z	
	21 mars	Importante	N-Z	8 mm de pluie à station de Ghardaïa
	10 juin	Importante	M	
	30 septembre	Très importante	M-N-Z	
	3 octobre	Importante	M	
1988	Aucun écoulement			
1989	Aucun écoulement			
1990	22 janvier	Faible	-	2 nuits de chute de faible pluie (28 mm à la station de Noumeratte)
	11 -12 Mais	Moins importante	N-Z	Laisse de crue repérée à l'altitude de 498,85 à la distance de 473,70 m en amont du pont Adaoud. 9 mm de pluie à la station de Noumeratte.
	Juins	Faible	Z	-
	Novembre	Faible	M-N-Z	-
1991	14-15 mars	Moins importante	Z	
	02 juin	Très importante	M-N-Z	Nombreux dégâts dans la vallée. La crue dépasse Zelfana est atteint Sebkheth Sefioun. 9 mm de pluie seulement à Noumeratte
1992	Aucun écoulement			
1993	29 Septembre	Moins importante	N-Z	
1994	15-16 mars	Moins importante	M	36 mm de pluie à station de Ghardaïa pendant 2 jours
	28-29 septembre	Très importante	M-N-Z	La crue dépasse Zelfana est atteint Sebkheth Sefioun. 52 mm de pluie à station de Ghardaïa pendant 3 jours
1995	24 Septembre	Moins importante	-	37 mm de pluie à station de Ghardaïa pendant 2 jours
1996	13-14 Mars	Faible	M-N-Z	13 mm de pluie à station de Ghardaïa
	4 Décembre	Moins importante	N-Z	-
1997	8-9 avril	Très importante	M-N-Z	47 mm de pluie à station de Ghardaïa pendant 2 jours, la

				crue atteint Sebkhet Sefioune.
	1-2 octobre	Moins importante	N-Z	11 mm de pluie seulement à Noumeratte
	6 Décembre	Faible	N-Z	13 mm de pluie seulement à Noumeratte
<i>Liste d'après des enquêtes et observations personnelles</i>				
1998	Aucun écoulement			
1999	15 janvier	Importante	M-N-Z	
	18-19 décembre	Faible	M-N-Z	2 nuits de chute de faible pluie (23 mm à la station de Noumeratte)
2000	07 octobre	Faible	-	-
	20 novembre	Moins importante	M-N	-
2001	Aucun écoulement			
2002	22 aout	Importante	M-N-Z	5 mm de pluie seulement à Noumeratte
	25 novembre	Moins importante	M	11 mm de pluie à Noumeratte, et 13 mm à la station de Hassi Rmel
2003	23-24 Mars	Faible	M-N	2 nuits de chute de faible pluie (44 mm à la station de Noumeratte)
2004	21 Janvier	Importante	M-N-Z	32 mm de pluie à Noumeratte, et 27 mm à la station de Hassi Rmel
	16 Avril	Moins importante	M-N-Z	30 mm de pluie à Noumeratte.
	29-30 Aout	Moins importante	M-N-Z	2 nuits de chute pluie (12 mm à la station de Noumeratte)
2005	29 Septembre	Faible	M-N-Z	-
2006	Aucun écoulement			
2007	Aucun écoulement			
2008	28-29-30 septembre	Très importante	M-N-Z	3 nuits de chute de forte pluie (48 mm à la station de Noumeratte et 70 mm à la station de Hassi Rmel), tous les oueds de la région ont été fortement écoulés. la crue a causée des dégâts matériels et humains importantes (plus de 150 morts). Les palmeraies et les ouvrages de rétention en aval ont été érodés. La crue au M'Zab a été principalement alimentée par Oued Laadira. Le débit maximum a pu être évalué 1200 m <sup>3</sup> /s à Ghardaia. L'écoulement a duré presque 03 jours et atteint largement Sebkhet Sefioune
2009	21-22 janvier	Moins importante	M-N-Z	2 nuits de chute pluie (40 mm à la station de Noumeratte)
	08 septembre	Moins importante	M-N	17 mm de pluie à Noumeratte, 42 mm à Hassi Rmel
	12 septembre	Moins importante	M-N	19 mm de pluie à Noumeratte, 40 mm à Hassi Rmel
2010	Aucun écoulement			
2011	12-13 Mars	Importante	M-N-Z	2 nuits de chute pluie (50 mm à la station de Noumeratte, 29 mm à Hassi Rmel)
	22 Avril	Faible	M-N	14 mm de pluie à Noumeratte, 17 mm à Hassi Rmel
	01-02 octobre	Faible	M-N	2 nuits de chute pluie (43 mm à la station de Noumeratte, 12 mm à Hassi Rmel)
2012	Aucun écoulement			
2013	25 novembre	Faible	M-N	10 mm de pluie à Noumeratte, la crue atteint Barrage Labyoudh à Daya B D
2014	Aucun écoulement			
2015	Aucun écoulement			

### III.5.2. Période de retour des crues sur le M'Zab

La liste des crues ainsi recensée d'après le tableau III.7, permet de faire les observations suivantes :

- **Sur la période 1921-1960 (47 crues) :**

	Daya B D	Ghardaia	Melika	BouNoura	El atteuf	Zelfana	Sbk Sifioune
Atteint	16	11	8	5	4	1	1
Rempli	13	10	5	-	1	-	-

▪ **Sur la période 1969-2015 (36 crues) :**

	Daya B D	El atteuf	Zelfana	Sbk Sifioune
Atteint	36	11	9	9
Rempli	33	9	-	-

▪ **Période de retour :**

	Daya B D	El atteuf	Zelfana	Sbk Sifioune
1921-1960	2 ans	4-5 ans	-	20 ans
1969-2015	1 année	5-6 ans	5-6 ans	5- 8 ans

On remarque que :

- Les mois de crue sont irrégulièrement espacés. Cette caractéristique est également observée dans les bassins sahariens par Dubief et M.A Roche. Ainsi, il peut y avoir plusieurs crues en une année réparties sur différents mois. Par contre, les périodes de sécheresse peuvent s'étendre sur plusieurs années (jusqu'à 10 ans) (Ouled Belkhir, 2002).

- Sur la période 1921-1960 les crues les plus fortes qui atteignent Sebkhet Safioune sont assez rares. Il y a celle de 1951. Ces crues exceptionnelles se sont produites au moins 1 fois sur 40 ans, soit selon une période de retour de l'ordre de 20 à 25 ans.

- Cependant, si l'on se réfère à la deuxième moitié du siècle (1969-2015), pour laquelle les observations dont nous disposons sont assurément plus complètes, la période de retour des crues qui atteignent Sebkhet Sefioune, est au moins de 8 ans ; d'après des renseignements sur site. Il y a celle de 03/1972, 05/1978, 10/1984, 09/1987, 06/1991, 09/1994, 04/1997, 06/2001, 04/2004 et au moins 10/2008.

### III.5.3. Répartition saisonnière des crues

La liste des crues recensées permet d'évaluer la fréquence des mois au cours desquels elles se produisent sur le M'Zab. Ces fréquences sont reportées sur la figure III.5. La variation au cours de l'année est caractérisée par deux maximums, l'un au printemps (mars), et l'autre en automne (septembre). Les deux minimums se situent en juillet-août et en février. Les fortes crues qui dépassent le barrage d'El Atteuf sont intervenues en septembre, octobre, novembre, janvier, février, mars, mai, juin (cas 1991, 2004 et 2008). Tenant compte de la durée d'observation relativement courte, les crues les plus importantes sont susceptibles de se produire à n'importe quelle date de l'année (Ouled Belkhir, 2002).

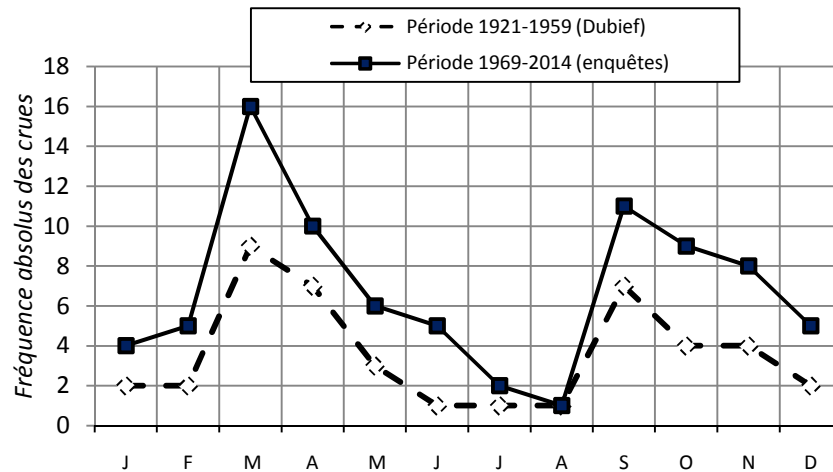


Figure III.5: Fréquences mensuelles des crues d'Oued M'Zab



Figure III.6: Crues exceptionnelles enregistrées sur le M'Zab, la photo de droite est celle de 01 octobre 2008, la photo de gauche est celle de 04 juin 1991

## III.6. Reconstitution des crues sur oued M'Zab

### III.6.1. Généralité

Les crues restent un domaine inconnu pour les régions arides et sahariennes, seules quelques indications très ponctuelles sont données dans les annuaires hydrologiques Algériens. En absence de données des mesures hydrométriques sur les crues du M'Zab, il est important d'utiliser les différentes méthodes analogiques, qui consiste à transporter les résultats acquis dans d'autres régions du monde aussi semblables que la région du M'Zab.

Les calculs seront effectués sur la base des données relatives aux caractéristiques pluviométriques et géomorphométriques de la partie amont et centrale du bassin du M'Zab, parce que nous avons constaté que les crues reconstitués sont les plus forts quand l'averse est

centrée sur l'amont et le centre du bassin, c'est le cas par exemple : la crue d'octobre 2008, (remarque aussi constaté par Mr Dubief en 1963).

A cet effet, pour Daya B. D. jusqu'à Zelfana, on distingue 06 sous-bassins principaux (fig III.7 et III.8) :

- À l'amont (avant El Atteuf) : parcours principale du M'Zab, Oued Labioudh, Oued Laadira et Oued Ntissa.
- Au centre (après El Atteuf jusqu'à Zelfana) : Oued Nimel, Noumerret et Lahsay.

La surface du bassin jusqu'à Zelfana est estimée à 2800 km<sup>2</sup>, soit 55% de la surface totale du bassin du M'Zab. Cette surface correspond au réseau hydrographique le plus actif et le plus dense du M'Zab.

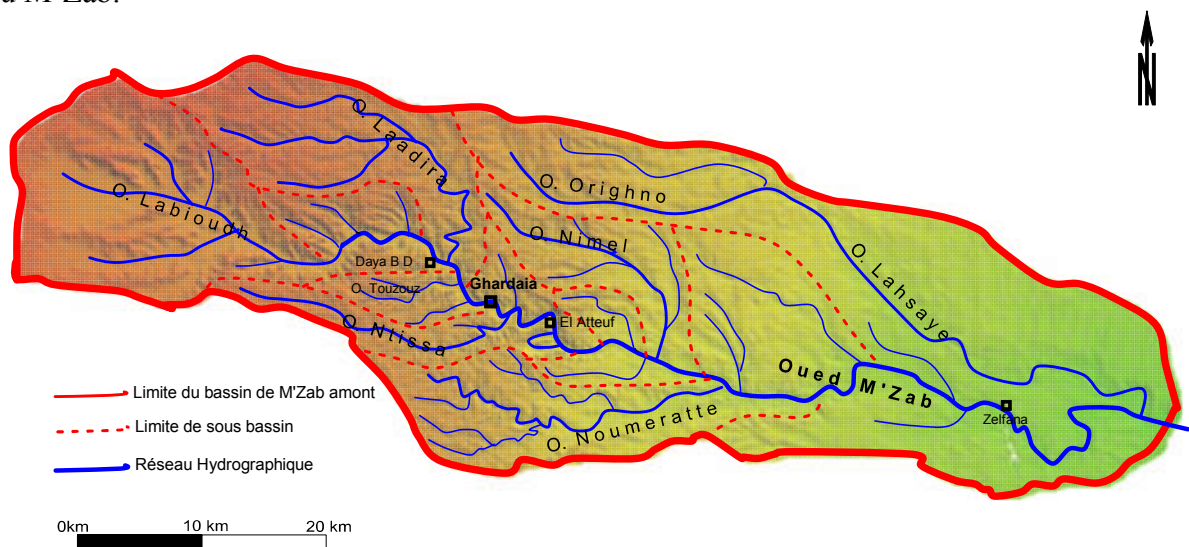


Figure III.7: Découpage des sous-bassins versant du M'Zab

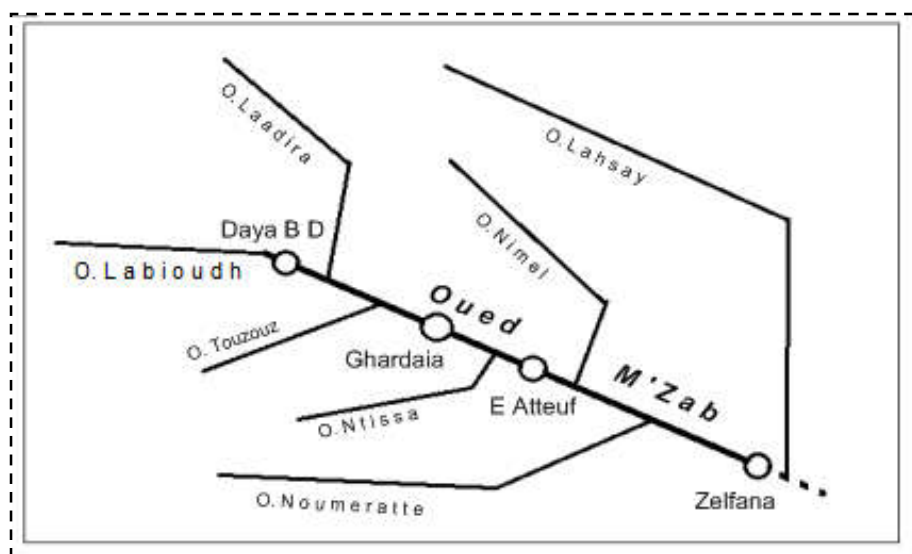


Figure III.8: Système hydrographique de la partie amont et centrale du M'Zab

### III.6.2. Temps concentration Tc

C'est le temps qui met l'eau tombée au point le plus éloigné en amont du bassin versant pour arriver à l'exutoire (Jean-Paul L, 2000). Il y a une multitude de formules empiriques pour estimer le Tc, nous choisissons ici trois méthodes qui conviennent à notre région :

#### A. Formule de Giandootti :

$$Tc = \frac{(4 \cdot A^{0.5} + 1.5 \cdot L)}{0.8 \cdot \sqrt{(H_{moy} - H_{min})}} \quad (3.10)$$

Ou

- A, en km<sup>2</sup> : est la superficie du bassin versant
- L, en km : est la longueur du thalweg principal.
- H<sub>moy</sub>, en m : est l'altitude moyenne du bassin versant ;
- H<sub>min</sub>, en m : est l'altitude minimale du bassin ;

**B. Formule de l'USTHB-IGC (Algérienne) :** cette formule à été déterminée à partir de l'analyse des événements « averse-crues » relèves sur 15 bassins versant au nord du pays (Sari, 2002).

$$Tc = 0,0055 \cdot A + 0,1657 \cdot L + 0,0078 \cdot (H_{moy} - H_{min}) + 0,821 \quad (3.11)$$

#### C. Formule de Kirpich:

$$Tc = 0,38 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{I}}\right)^{0.77} \quad (3.12)$$

Ou

- L, en km : est la longueur du thalweg principal.
- I : la pente moyenne du thalweg principal ;

L'application numérique de ces formules sur la partie amont du M'Zab, donne les résultats suivants :

**Tableau III.8: Temps de concentration sur le bassin du M'Zab**

Temps de concentration (heure)	Daya B D	El Atteuf	Zelfana, Lahsay	Ouargla, Skt Sefioune
Giandootti	24	25	34	43
USTHB-IGC	16	20	40	68
Kirpich	28	37	67	101
<b>Tc retenue (Giandootti)</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>34</b>	<b>43</b>

### III.6.3. Temps de base (Tb) et temps de montée (Tm)

Le temps de base est la durée pendant laquelle la partie ruisselée de l'averse s'écoule à travers l'exutoire. Tandis que, Le temps de montée est la durée entre le début de l'écoulement et le maximum de hauteur de la crue. Rodier et Auvray (1965, in Michel A.R., 1996) ont établi des abaques donnant le temps de base Tb et le temps monté Tm de la crue type d'une averse

décennale en fonction de la superficie A pour des bassins représentatives sahéliens et subdésertiques au Sahara (Michel A.R., 1996; Ouled Belkhir, 2002) :

$$T_b = 2.146 * A^{0.368} \quad (3.13)$$

$$T_m = 0.395 * A^{0.409} \quad (3.14)$$

Sur le Nordeste (Brésil), Cadier (1993) a évalué le  $T_b$  et le  $T_m$  par les formules suivantes (Michel A.R., 1996; Ouled Belkhir, 2002) :

$$T_b = 4.602 * A^{0.270} \quad (3.15)$$

$$T_m = 0.25 * T_b \quad (3.16)$$

L'application numérique de ces formules sur le M'Zab donne les résultats suivants :

**Tableau III.9: Temps de base  $T_b$  et temps de montée  $T_m$ .**

Caractéristiques	Daya B D	El Atteuf	Zelfana, Lahsay	Ouargla, Skt Sefioune
A (km <sup>2</sup> )	1289	1573	2800	5620
$T_b$ (Rodier) H	30	32	40	50
$T_b$ (Cadier) H	32	34	39	46
$T_b$ moyen H	31	33	40	48
$T_m$ (Rodier) H	7	8	10	13
$T_m$ (Cadier) H	8	8	10	12
$T_m$ moyen H	7,50	8,00	10,00	12,50

#### III.6.4. Coefficient de ruissellement $K_r$

C'est le rapport entre la lame d'eau moyenne coulé sur la surface du bassin et la lame d'eau moyenne apportée par la pluie. Au Sahara, il est extrêmement rare que la hauteur de pluie soit homogène de même que le ruissellement, mais les hydrologues procèdent en général à une estimation globale de ce coefficient par rapport à l'ensemble du bassin (Michel A.R., 1996 ; Bekhouche, 1998). Pour les bassins subdésertiques au sud du Sahara, Rodier et Ribstein ont établi des relations entre le  $K_r$  et la superficie A, en tenant compte des indices de relief et de la perméabilité (classe R5), pour de fortes pluies journalières comprises entre 60 mm et 110 mm (Michel A.R., 1996) :

$$K_r = 110.A^{-0.186} \quad (K_r \text{ en } \%) \quad (3.17)$$

L'application numérique de ces formules sur Oued M'Zab, donne les résultats suivants :

**Tableau III.10: Coefficient de ruissellement des sous bassins du M'Zab**

Caractéristiques	Daya B D	El Atteuf	Zelfana, Lahsay	Ouargla, Skt Sefioune
A (km <sup>2</sup> )	1289	1573	2800	5620
$K_r$ en %	29	27,97	25,13	22,47



### III.6.5. Coefficient de pointe $\alpha$

Le coefficient de pointe  $\alpha$  est le rapport du débit maximum au débit moyen. La crue est supposée uniformément répartie sur tout le temps de base  $T_b$ . Pour les sous-bassins du M'Zab on adopte la relation qui est en fonction de la superficie (au-delà 100 km<sup>2</sup>) ( Michel A.R., 1996 ; Bekhouche, 1998).

$$\alpha = 0.24 \ln(A) + 2 \quad (3.18)$$

**Tableau III.11 : Coefficient de pointe des sous bassins du M'Zab**

Caractéristiques	Daya B D	El Atteuf	Zelfana, Lahsay	Ouargla, Skt Sefioune
A (km <sup>2</sup> )	1289	1573	2800	5620
$\alpha$	3,70	3,80	3,90	4,00

### III.6.6. Coefficient d'abattement des écoulements $K_e$

Le coefficient d'abattement  $K_e$ , traduit la diminution de la quantité ruisselée, sur le parcours jusqu'à un exutoire donné par l'effet de l'évaporation et de l'infiltration. Comme les cas de la vitesse d'écoulement, le  $K_e$  est conditionné par les facteurs suivants (Ouled Belkhir, 2002) :

- L'importance du parcours ;
- La perméabilité et la rugosité du parcours ;
- L'étendue de la précipitation ;
- La période et l'importance des précipitations précédentes ;
- La saison d'écoulement.

Dans les Oueds sahariens le  $K_e$  augmente dans le parcours d'une façon exponentielle, c'est-à-dire, il augmente plus vite en aval qu'en amont.  $K_e$  ne peut être estimé, que s'il y a eu un suivi ou une mesure hydrométrique de la crue considérée (Ouled Belkhir, 2002).

D'après la liste communiquée par Dubief (1996), la vitesse de l'oued Nsa à Hassi Khefif, à son embouchure dans la Sebkhet Sefioune, coule « à la vitesse d'un cheval au trot », alors que la hauteur atteinte est de 1,60 m et la largeur est de 30 m. L'oued rempli la Sebkha Sefioune et atteint la hauteur du marabout de Sidi Abdelkader. D'après ces observations, on déduit une vitesse de 4,2 km/h. Pour une section d'environ 45 m<sup>2</sup>, le débit aurait ainsi été proche de 200 m<sup>3</sup>/s (Michel A.R., 1996).

D'après le BET OUED RIGH de Ouargla, la crue de septembre 1994 à la station de Ghardaïa, à un débit maximum de 1120 m<sup>3</sup>/s ; ce débit a subi un abattement de 80 % jusqu'à l'exutoire de Sebkhet Sefioune (230 m<sup>3</sup>/s) pour un parcours de 180 km. Ce taux d'abattement est valable pour la crue de 06/1991 et celle de 04/1997, et même pour toutes les crues qui ont une source à l'amont et qui atteignent Sebkhet Sefioune (Ouled Belkhir, 2002, B.E.T OUED RIGH, 1997).

Pour l'Oued N'sa, les débits maximums des crues de septembre 1994 et d'avril 1997 à la station de Berriane, sont respectivement :  $132 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $103 \text{ m}^3/\text{s}$  (Ouled Belkhir, 2002). Ces mêmes crues ont fait l'objet des mesures hydraulique sur les lissés des crues dans la partie aval d'Oued N'sa par le BET OUED-RIGH à Ouargla. Les débits ont été évalués par la méthode hydraulique dans une station amont et une station aval, écartées de 1 km de parcours environ. Pour les deux stations, les débits de la première crue, sont respectivement  $78 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $35 \text{ m}^3/\text{s}$ , et les débits de la deuxième crue, sont respectivement  $27 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $13 \text{ m}^3/\text{s}$  (Ouled Belkhir, 2002, B.E.T OUED RIGH, 1997). La comparaison entre les valeurs de la station de Berriane et celles des stations aval pour un parcours de 210 km, nous permet de déduire un coefficient d'abattement de 75 % à 85 %. Les valeurs de Ke entre les deux stations aval pour un parcours de 1 km sont 45% à 48 %. Si on admet le caractère exponentiel de ce coefficient, les dernières valeurs ne peuvent être acceptées.

Pour bien confirmer ces résultats, il est aussi intéressant de se référer au système de Guir – Zousfana – Saoura. Vanney (1960) rapporte les volumes de la crue exceptionnelle du 21 mars 1959, pour les sections d'Oued :

- A Abadlah : le volume total des eaux écoulées de Guir peut être estimé à 800 millions  $\text{m}^3$ .
- A Tarhit : le débit de la Zousfana est d'environ 150 millions  $\text{m}^3$ .
- Pour la Saoura il est par contre très inférieur au total de l'apport des deux Oueds affluents, à Béni-Abbés (180 km de parcours à partir de Albadla), il est d'environ 400 millions  $\text{m}^3$ , et à Kerzaz (170 km en aval de Béni-Abbés) il est de 350 millions  $\text{m}^3$ .
- A foug el Kheng(100 km au Sud de Kerzaz), il dépasse légèrement 150 millions  $\text{m}^3$ .

Vanney a constaté que la diminution du volume écoulé vers le Sud, fait caractéristique de l'hydrologie en pays aride. Les causes les plus importantes semblent être les suivantes :

- Le grand étalement de la crue vers l'aval qui a dû s'accompagner d'une très forte évaporation.
- Les formations du lit de la vallée sont affectées de grande porosité (alluvions et dunes) qui ont pu absorber un important volume d'eau.

L'auteur a estimé cette diminution à 85 % sur 450 km du parcours (Michel A.R., 1996). En tenant compte de ces deux références, nous pensons qu'il est très logique d'admettre un Coefficient d'abattement des crues de 80 % jusqu'à Sebkheth Sefioune (Ouled Belkhir, 2002).

### III.6.7. Vitesses d'écoulement instantanées

Les vitesses de déferlement des eaux dans les oueds sahariens ont fait l'objet de peu de mesures. Un front de propagation de la crue en forme de houle peut être observé lorsque le lit de l'oued est asséché. Ceci est parfois le cas pour l'oued M'Zab. Une crue, provoquée par des précipitations

localisées uniquement en amont, peut rencontrer vers l'aval un lit très asséché. C'est le cas pour les crues catastrophiques du 2 juin 1991 et du 01 Aout 2004 puisqu'il ne tomba en un jour successivement que 9 mm et 30 mm à Ghardaïa. Les premières eaux écoulées sont en effet absorbées par les sédiments détritiques, sables et graviers, qui couvrent le lit de l'Oued sur plusieurs mètres d'épaisseur. Les *Gueltas* (les dépressions) se remplissent successivement avec les premiers écoulements, contribuant ainsi à retarder également l'avancée des eaux. De plus, lors des faibles crues, le freinage relativement plus fort sur le fond du lit freine le déferlement des premières eaux. Dans le cas contraire, si l'eau n'est plus absorbée lorsqu'elle déferle dans le lit, elle s'écoule plus rapidement (Michel A.R., 1996; Ouled Belkhir, 2012).

Les crues exceptionnelles se produisent souvent à la suite de pluies importantes, intenses et générales, qui succèdent à des pluies elles-mêmes importantes survenues au cours des mois ou des jours précédents (novembre 1994, 28-29 Septembre et 01 octobre 2008). Le lit de l'oued peut donc déjà se trouver partiellement saturé. C'est souvent le cas dans la traversée urbaine en raison de nombreux obstacles de tout genre, tels que les barrages – déversoirs – rétrécissements des ponts, qui créent des retenues d'eau de superficie et de pérennité variables. Ces obstacles cependant ont globalement un effet retardateur du front de crue (Michel A.R., 1996; Ouled Belkhir, 2012).

D'après la liste communiquée par Dubief (1996), la vitesse de l'Oued Nsa à son embouchure dans la Sebkhet Sefioune, a atteint une vitesse moyenne de 4,2 km/h (Michel A.R., 1996). D'après nos observations locales sur la crue d'octobre 2008, au moment du débit maximal (08 : 00 de matin) à Melika-Bas, des troncs de palmiers et d'arbres ont traversés une distance de parcours de 200 m pendant 80 secondes soit une vitesse de 9 km/h. Cette valeurs estimée, semblent trop élevée, bien que se rapportant au maximum de débit de très fortes crues. Il est possible qu'en dehors de la ville, les plus grandes largeurs du lit du M'Zab déterminent un rayon hydraulique plus faible. Les vitesses en conséquence seraient diminuées.

En l'absence de mesures, il est aussi intéressant de se référer aussi au système de l'Oued Saoura. Dans le système de la Saoura, Dubief (1963) a évalué des vitesses moyennes de propagation de crue à 1,6 km/h entre Abadla et Igli et 1,3 km/h entre Igli et Béni-Abbès. Les pentes longitudinales sont d'environ 0,8 à 1 m/km donc plus faibles que celles de l'oued M'Zab. Les crues les plus lentes mettent 8 jours pour s'écouler d'Abdala à Béni-Abbès, soit à une vitesse de 0,7 km/h. Pour tenir compte des différences de pente entre les deux systèmes hydrologiques de la Saoura et du M'Zab, Mr A. Roche (1996) a proposée une valeur de 3 à 6 m/s soit 10 à 20 km/h (Michel A.R., 1996). Ces valeurs estimées, semblent aussi trop élevées.

A ce stade d'appréciation, il est nécessaire d'énoncer les formules hydrauliques qui permettent d'estimer des vitesses d'écoulement. Pour des sections d'écoulement semblables, la formule de Manning montre que la différence de rugosité des lits est capable de compenser celle des pentes.

#### **La formule de Manning - Strickler (Norme ISO 1070-1973)**

$$V = n * Rh^{0,667} * i^{0,5} \quad (3.19)$$

- V = vitesse moyenne dans la section, en m/s
- Rh = rayon hydraulique, soit S / P, avec S: section mouillée et P = périmètre mouillé, en m.
- i = pente hydraulique de la section.
- n = coefficient de rugosité qui varie avec la la nature du fond du lit et hauteur d'eau. Les valeurs de C sont les suivantes : pierres : 25, graviers grossiers : 35, graviers moyens : 40, graviers fins : 45, sable : 50.

#### **Application sur Oued M'Zab :**

- Le coefficient de rugosité d'oued M'Zab est évalué à 25 (Michel A.R., 1996).
- Les pentes correspondantes aux sections de mesure sont comprises ente 0,65 et 0,89 m/km (voire le paragraphe III.2. étude hydrographique).
- Rh : est la valeur moyenne de trois sections réparties sur le lit amont du M'Zab, dont on a calculé pour chacune la section et le périmètre mouille des laisses de la crue d'octobre 2008. La vitesse peut ainsi être évaluée de 4.5 km/h comme une valeur moyenne soit **1,25 m/s**.

### **III.6.8. Débits maximums d'écoulement**

Les caractéristiques des crues, et notamment les débits de pointe de fréquences rares, ont été évaluées par plusieurs méthodes analogiques sur l'ensemble des sous-bassins d'Oued M'Zab.

#### **III.6.8.1. Formules type Myer**

On obtient généralement une fonction de puissance qui conduit à des formules, appelées « formules Myer ». C'est le débit de fréquence décennale  $Q_{10}$ , en  $m^3/s$ , qui est évalué en fonction de la superficie A ( $km^2$ ), sous la forme :

$$Q_{10} = a . A^n \quad (3.20)$$

Les paramètres a et n dépendent des caractéristiques morphologiques et climatiques du bassin. Les observations sur plusieurs bassins identiques à celui du M'Zab, pour des pluies décennales, ont permis de déterminer ces paramètres. L'exposant n est souvent compris entre 0,7 et 0,8, et a compris entre 2 et 2.8 (Michel A.R., 1996).

Les paramètres de corrélation entre le débit décennale et centennale, ont été établis par Puech et Chabi-Gonni (1984, in Michel A.R., 1996), cela d'après les résultats obtenus sur plusieurs dizaines de bassins versants représentatifs observés par l'ORSTOM. La pluie journalière centennale y est comprise entre 60 et 110 mm (pour le M'Zab : la pluie journalière centennale est

de 78 mm). Le rapport du débit centennal au le débit décennal donné par les auteurs est égal à 2,2. La correspondance entre la fréquence décennale au Sahel et la fréquence centennale à Ghardaïa, a aboutie aux résultats d'une fréquence environ centennale (Michel A.R., 1996).

Les équations sont les suivantes :

$$\text{- Niger : } Q_{100} = 10,05 * A^{0,632} \quad (3.21)$$

$$\text{- Tchad + Nord Cameroun : } Q_{100} = 10,41 * A^{0,415} \quad (3.22)$$

$$\text{- Burkina Faso + le Niger, + Mali : } Q_{100} = 9,87 * A^{0,501} \quad (3.23)$$

$$\text{- Zone sahélienne et subdésertique au sud du Sahara : } Q_{100} = 10,76 * A^{0,678} \quad (3.24)$$

$$\text{- Maroc: } Q_{100} = 4.4 * A^{0,80} \quad (3.25)$$

Finalement, on peut retenir et appliquer aux sous-bassins du M'Zab les équations correspondants à la moyenne (Michel A.R., 1996; Ouled Belkhir, 2002) :

$$Q_{100} = 9.6.A^{0.59} \quad (3.26)$$

$$Q_{10} = 2.55.A^{0.665} \quad (3.27)$$

### III.6.8.2. Méthode analogique de Rodier – Auvray et l'ORSTOM(1988)

Le calcul des caractéristiques de ruissellement généré prend en compte un coefficient d'abattement Ka, qui traduit la diminution spatiale moyenne de la pluie par rapport à la pluie ponctuelle à la station de référence. Le Ka est variable en fonction de la surface du bassin versant (Michel A.R., 1996):

$$Ka = 1.1943 - 0.0604 \cdot \ln(A) \quad (3.28)$$

L'application pour le bassin du M'Zab donne :

**Tableau III.12 : Coefficient d'abattement spatiale de l'averse pour chaque sous bassin.**

Caractéristiques	Daya B D	El Atteuf	Zelfana, Lahsay	Ouargla, Skt Sefioune
A (km <sup>2</sup> )	1289	1573	2800	5620
ka	0,76	0,75	0,71	0,68

Le principe de calcul du débit maximum fréquentiel est le suivant :

- On estime la hauteur H de l'averse ponctuelle fréquentielle, sans prendre en compte son intensité, on calcule le volume total V<sub>p</sub> de la précipitation du bassin en multipliant la lame d'eau par un coefficient d'abattement ka (tient compte de la non-homogénéité spatial de l'averse), et par la superficie A du bassin (A supérieur en km<sup>2</sup>)

$$V_p = P_{jf} \cdot ka \cdot A \quad (3.29)$$

- On recherche la valeur du coefficient de ruissellement kr, à partir des caractéristiques topographiques, végétation et géologie du sol. V<sub>r</sub> c'est le volume ruisselé sur le bassin :

$$V_r = kr \cdot V_p \quad (3.30)$$

- A partir des caractéristiques du bassin, on évalue le temps de base Tb qui correspond à la durée effective du ruissellement sur le bassin. Le débit moyen Q<sub>m</sub> pour un crue décennale, pendant un temps de base Tb, est:

$$Q_{moy} = (kr \cdot Vp) / Tb \quad (3.31)$$

Le débit de pointe  $Q_{max}$  de la crue est égal au produit du débit moyen par un coefficient de pointe  $t$  égal au produit du débit moyen  $Q_{max} = \alpha \cdot Q_{moy}$ . L'analogie du débit centennal de la région du M'Zab avec les régions Sahiliennes et les zones subdésertiques au Sud du Sahara donne l'équation suivante (Michel A.R., 1996; Ouled Belkhir, 2002) :

$$Q_{100} = 32,6 \cdot A^{0,42} \quad (3.32)$$

Les résultats de calcul des autres fréquences, seront donnés dans le paragraphe (III.4.4.9).

### III.6.8.3. Méthode de Cadier et Aguiar (1993) et l'analogie avec le Nordeste de Brésil

La méthode utilisée par Cadier (1993. in Roche 1996) est basée sur le fait que le débit maximum  $Q_x$  et le volume écoulé  $V$  ne sont pas indépendants, ils sont liés par une fonction d'étalonnage de la crue. Cette fonction est définie par le temps pendant lequel le volume de crue s'écoule et par la loi de distribution des débits en fonction du temps, si l'on représente cette fonction d'étalement par un coefficient global  $k_x$  (en  $m^3/s/mm$ ) défini pour une lame écoulée : le (Michel A.R., 1996).

$$Q_x = le \cdot k_x \quad (3.33)$$

L'expression peut alors s'écrire

$$Q_x = k_x \cdot V / 1000 \cdot A \quad (3.34)$$

Ces relations ont été calées pour la région semi-aride du Nordeste au Brésil (Cadier 1993) par l'observation des bassins versants de superficie comprise entre 5 et 500  $km^2$ , pour une pluie de 105 mm en 24 h

$$Q_{100} = 12,5 \cdot A^{0,58} \quad (3.35)$$

Pour arrêter la formule définitive, M. Roche (1996) fait intervenir un facteur de correction  $F_c$  variant entre 0.5 et 1.5, il intègre des corrections dues aux facteurs suivants :

- Forme de contour du bassin versant.
- Forme du réseau de drainage.
- Relief.
- Perméabilité.

$$Q_{MAX 100} = 12,5 \cdot A^{0,58} \cdot F_c \quad (3.36)$$

Pour des superficies supérieures à 500  $km^2$  Aguiar (1940 in Michel A.R., 1996) a établi pour une pluie de 105 mm en 24 h la formule suivante : (Michel A.R., 1996).

$$Q_{x105} = 575 \cdot A / [(L \cdot C)^{0,5} \cdot (120 + K \cdot L \cdot C)] \quad (3.37)$$

où  $A$  = superficie du bassin en  $km^2$

$L$  = longueur en km du cours d'eau le plus long;

$K, C$  = coefficients qui dépendent du type de bassin.

Les coefficients sont ainsi définis :

- bassin bien accidenté, sans dépression évaporatoire :  $K=0,15$  et  $C=0,95$
- relief moyen :  $K=0,20$  et  $C=1,00$
- légèrement accidenté :  $K=0,30$  et  $C=1,05$

Les deux formules peuvent faire l'objet de comparaison entre 500 et 1000 km<sup>2</sup>.

#### III.6.8.4. Méthode de Sokolovsky (1965)

Selon cet auteur, la crue est considérée comme un débit maximal généré par une averse de courte durée correspondant au temps de concentration. Le temps de montée de la crue est donc pris égal au temps de concentration.

$$Q_{f\%} = \frac{0,28 \cdot P_{tc f\%} \cdot Kr \cdot K \cdot A}{tc} \quad (3.38)$$

Où,

- $Q_{f\%}$  : débit de pointe d'une fréquence « f » en m<sup>3</sup>/s ;
- $P_{tc f\%}$  : pluie de courte durée correspondant au temps de concentration  $tc$  et à une fréquence « f » en mm ;

$$P_{tc f\%} = P_{jf} \left( \frac{tc}{24} \right)^{0,15} \quad (3.39)$$

- $A$  : surface du bassin versant en km<sup>2</sup> ;
- $tc$  : temps de concentration en heures ;
- $Kr$  : Coefficient de ruissellement de la crue, il est égal à :

$$kr = 12 / (4 + 3\varphi) \quad (3.40)$$

Où, les valeurs de  $\varphi$  sont en fonction des caractéristiques des bassins versants.

Bassin versant	Valeurs de $\varphi$
Petits bassins versant $S \leq 50$ km <sup>2</sup>	2
Bassins versants non boisés et peu perméables	2 – 3
Bassins versants boisés et perméables	3 – 4

Comme le bassin est non boisé et peu perméable, alors  $\varphi = 3$ , d'où :  $Kr = 0,92$ . Sokolovsky a constaté que  $Kr$  est en fonction aussi de la période de retour ( $T$ ). Pendant la période d'une forte averse (orages), dont l'inondation peut être provoquée, pratiquement toute la pluie qui tombe, ruisselle sur le sol, à ce moment l'évaporation et l'infiltration sont négligeables. Le coefficient de ruissellement atteint dans ce cas les valeurs de 0,95 à 0,99 en fonction de la fréquence des orages. Enfin il a été adopté :  $Kr = 0,95$  pour  $T=2,5,10, 20$  et 50ans et  $Kr = 0,99$  pour  $T = 100$  ans et plus (Sokolovsky, 1968).

### III.6.8.5. Formule de Turraza (1965)

$$Q_{max} = \frac{P_{j \max} \cdot Kr \cdot A}{3,6 \cdot tc} \quad (3.41)$$

Avec,

- $tc$  : temps de concentration ;
- $Kr$  : coefficient de ruissellement pour une période de retour donnée (même définition pour la formule de Sokolovsky) ;
- $A$  : aire du bassin ;
- $P_{j \max}$  : pluie journalière maximale [mm] (Sari, 2002).

### III.6.9. Application et estimation des débits sur Oued M'Zab

Nous avons appliqué les différents méthodes pour évaluer le débit maximum, le débit moyen et le volume écoulée à l'exutoire en tenant compte de tous les paramètres qui ont été estimés sur le bassin du M'Zab. Au niveau de l'exutoire de Sebket Sefioune on admette que l'effet du phénomène d'abattement des crues atteigne son maximum (soit 80 % d'abattement sur débit maximal). Étant donné que les méthodes appliquées aboutissent à des résultats différents, des comparaisons seront faites afin d'adopter des valeurs moyennes. Le tableau III.13 résume l'application sur les exutoires d'Oued M'Zab.

#### Remarque :

- Le volume de la crue a été calculé par la formule:  $V_f = Q_{f \text{ moy}} \times \text{Temps de base}$ .
- Les débits maximaux et moyens sont donnés en  $m^3/s$ .
- Les volumes sont donnés en  $10^6 m^3$

**Tableau III.13 : Récapitulatif du calcul de débit maximal, moyen et volume sur les exutoires Oued M'Zab.**

Exutoir	Daya B D					El Atteuf					Zelfana, Lahsay					Ouargla, Skt Sefioune				
$A$ (km <sup>2</sup> )	1289					1573					2800					5100				
$\alpha$	3,7					3,8					3,9					4				
$L$ (km)	41					58					131					224				
$T_c$ (h)	24					25					34					43				
$T_b$ (h)	31					33					40					48				
$T_m$ (h)	7,50					8,00					10,00					12,50				
Méthode	Myer	Rodier-Auvray	Cadier-Aguiar	Sokolovsky	Turraza	Myer	Rodier-Auvray	Cadier-Aguiar	Sokolovsky	Turraza	Myer	Rodier-Auvray	Cadier-Aguiar	Sokolovsky	Turraza	Myer	Rodier-Auvray	Cadier-Aguiar	Sokolovsky	Turraza
$Q_{\max 2}$		170		237	255		190		279	311		242		382	554		-		-	-
$Q_{\max 5}$		283		394	425		317		465	519		404		637	924		-		-	-
$Q_{\max 10}$	298	358		499	539	341	402		589	657	500	511		807	1170	100	102		161	234
$Q_{\max 20}$		462		644	694		518		759	847		660		1040	1509		132		208	302
$Q_{\max 50}$		612		854	921		687		1007	1124		875		1380	2001		175		276	400
$Q_{\max 100}$	657	735	903	1068	1105	738	824	902	1259	1349	1038	1050	962	1726	2401	208	210	192	345	480
$Q_{\max 500}$		904		1315	1361		1014		1550	1660		1292		2124	2956		258		425	591
$Q_{\max 1000}$		1234		1794	1857		1384		2115	2266		1763		2899	4033		353		580	807
$Q_{\max 10000}$		1893		2753	2849		2124		3245	3476		2706		4448	6188		541		890	1238



Q moy 2		46		64	69		50		73	82		62		98	142		-		-	-
Q moy 5		76		107	115		83		122	137		104		163	237		-		-	-
Q moy 10	81	97		135	146	90	106		155	173	128	131		207	300	26	26		41	60
Q moy 20		125		174	188		136		200	223		169		267	387		34		53	77
Q moy 50		165		231	249		181		265	296		224		354	513		45		71	103
Q moy 100	177	199	244	289	299	194	217	237	331	355	266	269	247	443	616	53	54	49	89	123
Q moy 500		244		355	368		267		408	437		331		545	758		66		109	152
Q moy 1000		333		485	502		364		557	596		452		743	1034		90		149	207
Q moy 10000		512		744	770		559		854	915		694		1140	1587		139		228	317
V2		5		7	8		6		9	10		9		14	20		-		-	-
V5		9		12	13		10		15	16		15		24	34		-		-	-
V10	10	11		15	16	12	13		18	21	18	19		30	43	4	4		6	9
V20		14		19	21		16		24	26		24		38	56		5		8	11
V50		18		26	28		21		31	35		32		51	74		6		10	15
V100	20	22	27	32	33	23	26	28	39	42	35	39	36	64	89	7	8	7	13	18
V500		27		40	41		32		48	52		48		78	109		10		16	22
V1000		37		54	56		43		66	71		65		107	149		13		21	30
V10000		57		83	86		66		101	109		100		164	228		20		33	46

## Synthèse

Les différentes méthodes présentent un écart de 45%. Les méthodes Rodier-Auvray, Sokolovsky et Turraza ont l'avantage d'être reliées aux autres caractéristiques de la crue évaluée, et qui peuvent estimer le débit de n'importe quelle fréquence. Il semble que les coefficients de ruissellement utilisés par la méthode Sokolovsky et Turraza sont trop exagérés, par contre ceux utilisés par la méthode Rodier-Auvray sont plus réalistes. Toutefois, lorsque l'on tend vers des pluies journalières de moindre importance, avec un caractère d'hétérogénéité spéciale assez important, le coefficient de ruissellement peut diminuer rapidement. Si l'on doit ne retenir qu'une seule valeur, ce sera celle qui correspond à la méthode de **Rodier-Auvray** (Valeurs en gras), qui représente à la fois la moyenne de Myer et Cadier-Aguiar, et a en outre l'avantage d'être reliée aux autres caractéristiques de la crue évaluées par ce même modèle (Kr, Tc, Tb).

### III.6.10. Hydrogrammes des crues

Une tentative de modèle numérique de tracé de l'hydrogramme type des crues décennales et centennales a été faite. C'est également l'hydrogramme de la crue provoquée par une averse individuelle importante décennale et centennale sur l'ensemble du bassin versant du M'Zab. Le tracé de l'hydrogramme des crues est obtenu en utilisant la formule de Sokolovsky.

**Méthodologie :** Pour la construction d'un hydrogramme de crue, la méthode de Sokolovski permet de calculer les débits lors de la crue, et lors de la décrue (Sokolovsky 1968)

- La montée

$$Q_t = Q_{\max} * (t/t_m)^2 \quad (3.42)$$

$t_m$  : temps de montée de la crue,

- La décrue

$$Q_t = Q_{\max} * ((t_d - t')/t_d)^3 \quad (3.43)$$

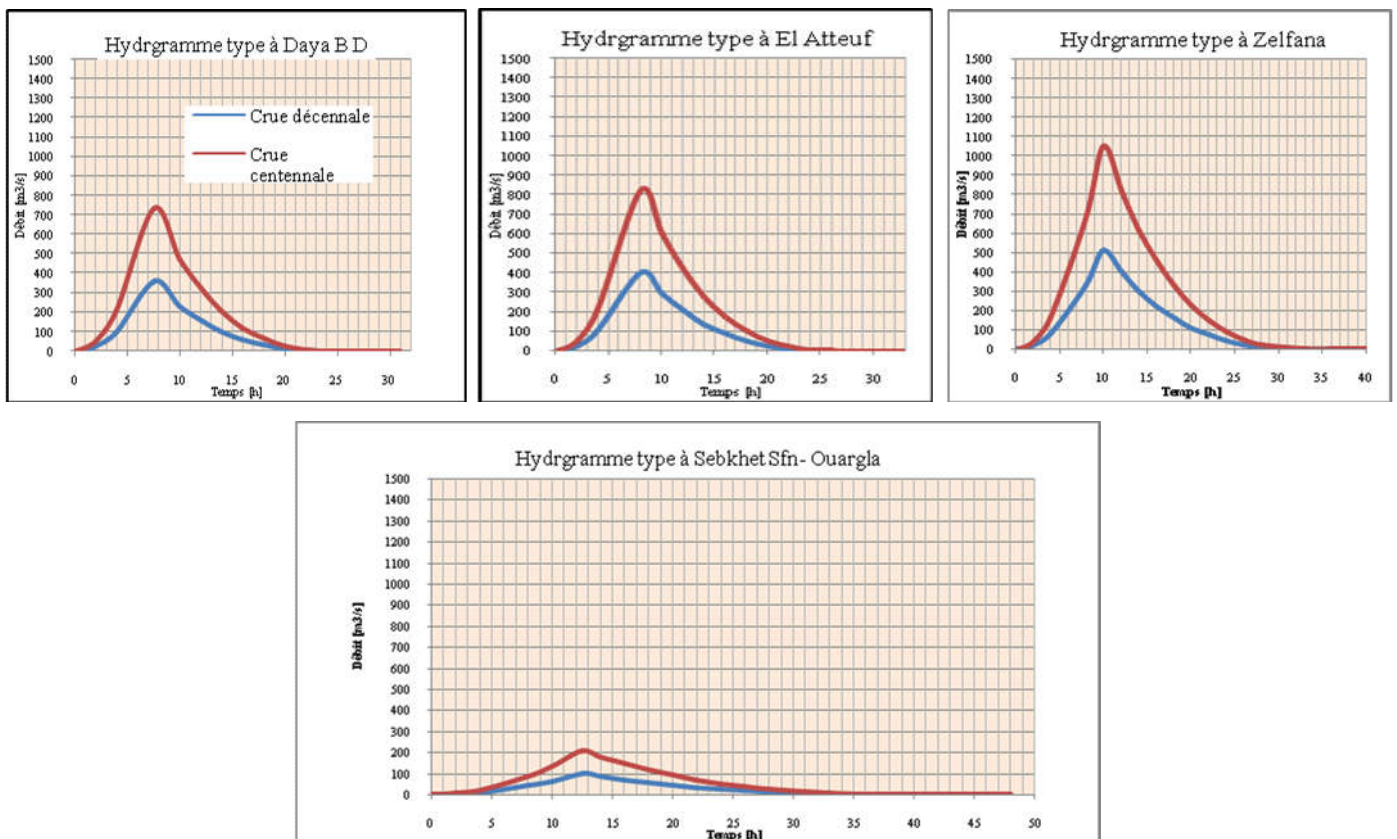
Avec,  $t' = t - t_c$  et  $t_d = \gamma * t_m$

$\gamma$  : étant un coefficient qui est fonction de la taille du bassin versant et de la perméabilité du sol, et a pour valeurs :

- $\gamma = 2$  pour les bassins versants dont la superficie est inférieure à  $5 \text{ km}^2$ .
- $\gamma = 2$  à  $3$  pour les bassins versants non boisés.
- $\gamma = 3$  à  $4$  pour les grands bassins versants boisés et perméables.

Pour le bassin versant de la vallée du M'Zab,  $\gamma$  prend une valeur de 2.5, donc :  $t_d = 2,5 * t_m$

Les résultats d'application de cette méthode sont présentés sur la figure suivante :



**Figure III.9 : Hydrogrammes reconstitués par la méthode de Sokolovsky sur les exutoires de la vallée du M'Zab (crues décennale et centennale)**

Les hydrogrammes tracés présentent un temps de montée inférieur au temps de décrue, ce qui reflète la repense rapide des sous bassin du M'Zab vis-à-vis aux averses exceptionnelles. Pour l'exutoire le plus en amont (Daya B D), la courbe de volume cumulé montre que la moitié du volume de la crue (soit 13 à 15 millions de  $\text{m}^3$  pour la crue centennale), passe dans les premières 10 h. Par contre à l'exutoire de Sebkhet Sefioune le passage de la moitié du volume prend 14h.

### III.6.11. Corrélation pluie-débit.

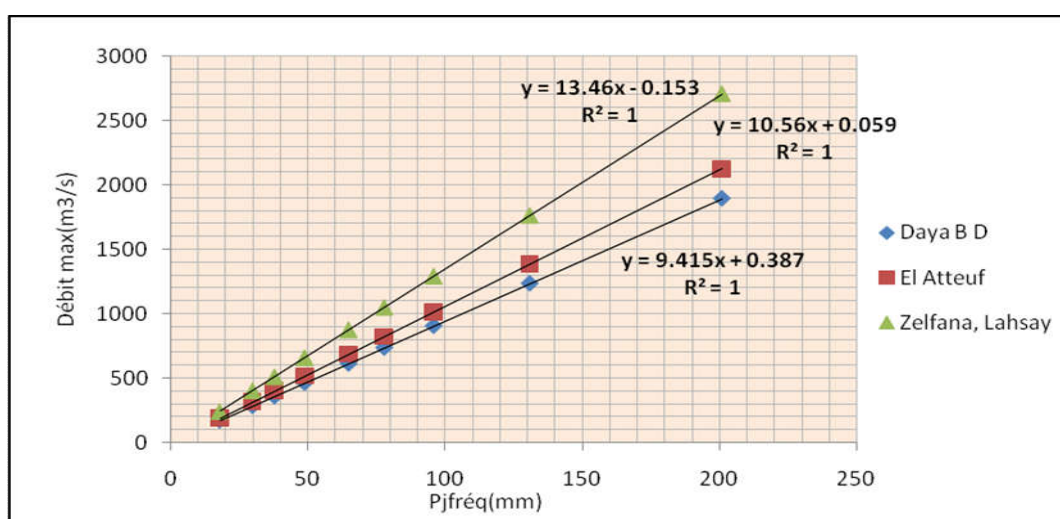
L'objectif de la modélisation Pluie-Débit est de représenter d'une façon simplifiée la réalité complexe entre le débit maximal écoulé et la pluie journalière fréquentielle à différentes périodes de retour. Les débits maximums de différentes périodes de retour ont été évalués par la méthode de Rodier-Auvray. Deux étapes sont essentielles pour reconstituer le trajet de l'eau de pluie à l'exutoire (Jacques, 1984) :

- La production qui assure le passage de la pluie brute en une partie infiltrée et une partie ruisselée (pluie nette).
- Le transfert qui représente l'acheminement de la pluie ruisselée à l'exutoire de l'unité hydrologique considérée.

**Tableau III.14 : Débits max de crue pour différentes périodes de retour.**

Fréquences	Pj-fréq (mm)	Débit max(m <sup>3</sup> /s)		
		Daya B D	El Atteuf	Zelfana, Lahsay
2	18	170	190	242
5	30	283	317	404
10	40	358	402	511
20	49	462	518	660
50	65	612	687	875
100	73	735	824	1050
500	96	904	1014	1292
1000	128	1234	1384	1763
10000	201	1893	2124	2706

Cependant nous avons cherché la relation entre la pluie journalière et la période de retour.



**Figure III.10 : Pluies journalières fréquentielles en fonction des débits max.**

Le meilleur ajustement correspond à l'équation suivante :

- Pour la section de Daya B D :  $Q_{\max} (\text{m}^3/\text{s}) = 13.45 P_j^{-0.153}$
- Pour la section de El Atteuf :  $Q_{\max} (\text{m}^3/\text{s}) = 10.56 P_j^{+0.059}$
- Pour la section de Lahsay-Zelfana :  $Q_{\max} (\text{m}^3/\text{s}) = 9.415 P_j^{+0.387}$

L'application de ces équations sur l'inventaire des crues donne la chronologie suivante :

**Tableau III.15 : Chronologie débits max des crues en  $\text{m}^3/\text{s}$  et leurs  $P_j$  max sur le M'Zab (1975-2011).**

Date de crue	PJ (mm)	Daya B D	El Atteuf	Zelfana, Lahsay
14/04/1975	24	226	253	323
14/03/1977	8	76	85	107
14/05/1978	11	104	116	148
17/10/1984	20	189	211	269
30/10/1984	27	255	285	363
05/1990	8	76	85	107
06/1990	3	29	32	40
11/1990	16	151	169	215
02/06/1991	18	170	190	242
09/1993	6	57	63	81
15/03/1994	10	95	106	134
09/1995	32	302	338	430
03/1996	16	151	169	215
08/04/1997	47	443	496	632
02/10/1997	11	104	116	148
12/1997	11	104	116	148
15/01/1999	25	236	264	336
24/12/1999	23	217	243	309
07/10/2000	16	151	169	215
22/08/2002	5	47	53	67
25/11/2002	11	104	116	148
03/2003	44	415	465	592
01/2004	32	302	338	430
04/2004	30	283	317	403
08/2004	12	113	127	161
01/10/2008	48	452	507	645
13/03/2011	50	471	528	672

Les équations que nous avons utilisées pour calculer les débits maximaux donnent des résultats assez acceptables. Cependant, dans le cas de la crue de 01 octobre 2008, la valeur résultant est différent à la valeur réelle qui a dépassé  $1350 \text{ m}^3/\text{s}$  au centre-ville de Ghardaïa. Du point de vue météorologique l'averse qui a déclencher cette crue est plus intense sur les parties amont et septentrionale que les parties aval et sud (70 mm à Hassi Rmel contre 48 mm à Noumeratte). La

pénurie des données pluviométriques sur la ville de Ghardaïa, et celle de station de Hassi Rmel, ainsi que l'extrémité de la station météorologique actuelle de Noumeratte (18 km vers le sud de la vallée) posent un réel problème pour la fiabilité des mesures concernant la précipitation. L'installation d'une station hydro climatologique à la vallée est devenue actuellement une nécessité.

### III.7. Étude de la crue d'octobre 2008

#### III.7.1. Les circonstances de la crue

De 28 septembre au 1<sup>er</sup> octobre 2008 (le jour de l'Aïd El Fitr), et suite à une averse de 48 mm à Ghardaïa (ONM de Noumeratte) et 70 mm à la station de Hassi Rmel, une importante crue ravageuse se produisit sur l'Oued M'Zab et les autres oueds dans les environs. L'écoulement a débordé les berges, provoquant un tsunami fluvial et inondant ainsi tout ce qui est avoisinant comme constructions, ponts et palmeraies. La hauteur d'eau dans l'Oued au centre de la ville de Ghardaïa a atteint 9 mètres et 6 m à Metlili. Plusieurs endroits qui se trouvent au bas lit d'oued ont été submergés, les raisons sont pour lesquelles il a été enregistré plusieurs pertes humaines (150 morts). Les principaux Oueds de la région (Nsa, Metlili) ont fonctionné à plein régime. Selon l'ANRH les débits à Ghardaïa et à Metlili atteignent respectivement 1200 m<sup>3</sup>/s et 900. Selon les sources locales, c'est une crue exceptionnelle puisque la première fois depuis 50 ans que les trois Oueds affluents atteignent la Sebkhia Séfiouane à 200 km en aval. Cet événement a entraîné l'effondrement de deux retenues collinaires : Laadhira et Touzouz, situées en amont de la ville de Ghardaïa.



Figure III.11 : Oued M'Zab en crue  
(Pont Mlika 01 octobre 2008)

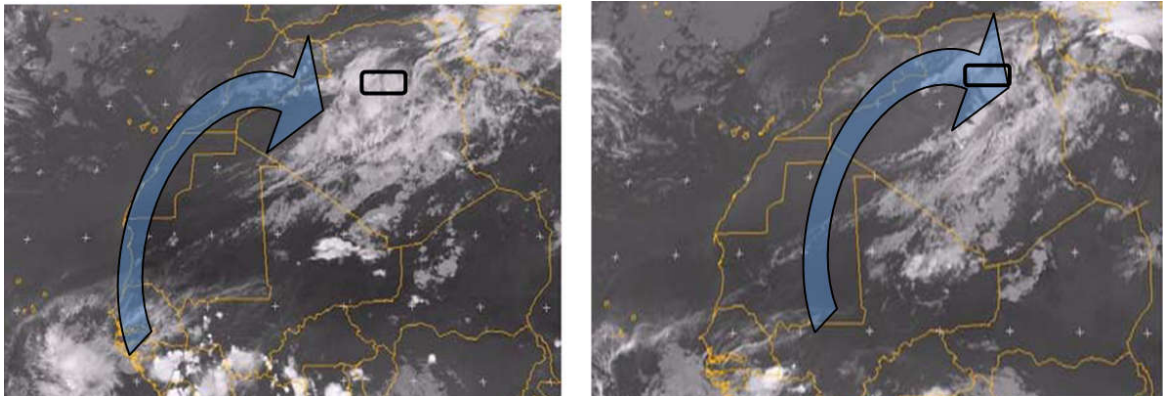


Figure III.12 : Oued Metlili en crue  
(Pont Centre ville 01 octobre 2008)

#### III.7.2. Images satellitaires

L'analyse des images satellitaires en infrarouge durant la période allant du 30 septembre au 1<sup>er</sup> octobre 2008 (figures III.13-14) montre une masse nuageuse convective qui englobe le Sahara

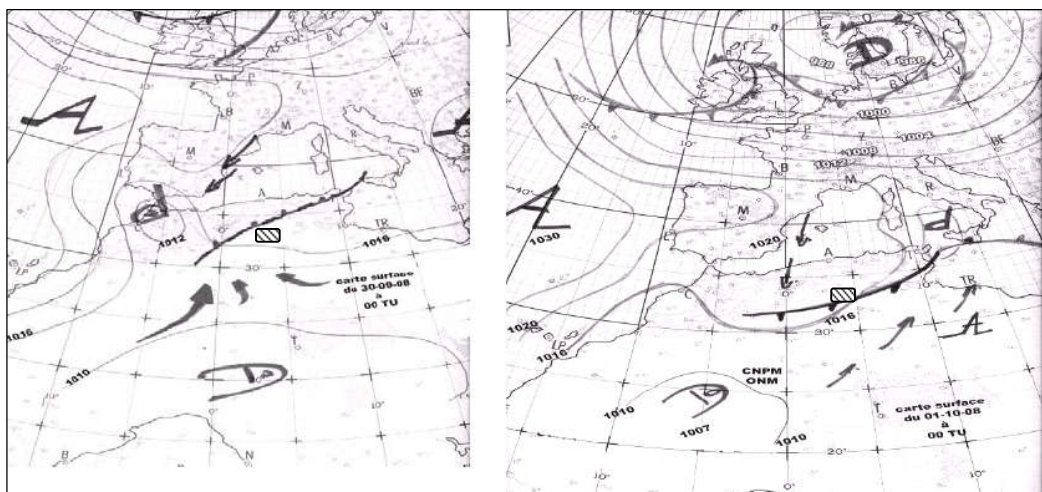
central, le Nord Sahara et l'Atlas Saharien. Le suivi de l'évolution des nuages montre bien leur concentration sur la région de Hassi Rmel – M'Zab et le Sahara central.



**Figure III.13: Images satellite de l'événement (ONM 2009) :**

**A gauche du 30/09/2008 et à droite au 01/10/2008**

La situation en surface a été caractérisée par des pressions moyennes sur le Sahara central avec l'extension d'un couloir dépressionnaire vers le nord du Maroc, favorisant ainsi la remonté d'air chaud, avec la présence d'une limite frontale séparant les deux masses d'air (ONM, 2009).



**Figure III.14: Situations à la surface (ONM 2009) :**

**A gauche du 30/09/2008 et à droite au 01/10/2008**

### III.7.3. Impacts immédiats des inondations

D'après les habitants et les autorités locales de la vallée du M'Zab, jamais la région n'a vu une telle catastrophe. Oued M'Zab, qui est sorti de son lit vers 4 h du matin, en effet, tout emporté sur son passage. Les dégâts sont énormes : décès de plus de 150 personnes, 89 blessés, 756 familles sinistrées, 19 établissements scolaires endommagés, 7200 foyers privés d'électricité et 2300 familles privées d'eau. Plus de 1200 Ha de cultures maraîchères, arboricoles et de palmeraies ont été laminés par les eaux. Plus de 1000 têtes de bétail ont péri et plus de 300

véhicules ont été emportés par les eaux. Une usine de fabrication de batteries sous licence (Tudor), employant plus de 200 ouvriers, a été complètement saccagée par les eaux. L'estimation des dégâts touchant les infrastructures avoisine les 20,1 Milliards de Dinars, soit environ 200 millions d'euros.



Figure III.15 : Quelques exemples de dégâts de la crue 01 octobre 2008

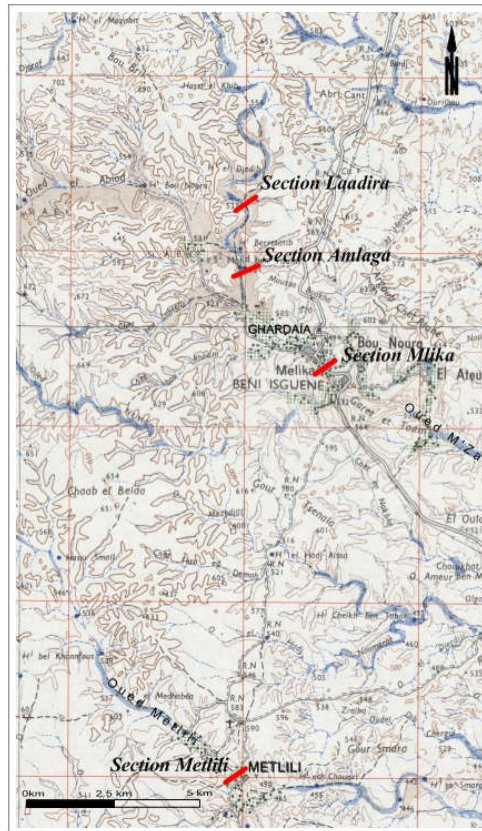
#### III.7.4. Estimation du débit maximum de la crue d'octobre 2008

Le relevé des laisses de la crue consiste à identifier sur le terrain les traces physiques laissées par les eaux après la crue. Les levés servent par la suite à délimiter les zones inondées. Cette évaluation est bien sûr peu précise mais permet d'obtenir rapidement un ordre de grandeur. Plusieurs sites où les laisses de crues étaient repérables ont fait l'objet de relevés topographiques permettant d'évaluer la section mouillée, le rayon hydraulique et la pente hydraulique. Après avoir évalué les pentes hydrauliques, l'estimation du débit la formule de Manning - Strickler peut être appliquée (Carlier,1986):

$$V = n * R_h^{0,667} * i^{0,5}, R_h = S_m/P_m \text{ et } Q_{\max} = S_m * V \quad (3.36)$$

A la date de 26/02/2009, et avec l'assistance du Professeur Remini Boualem, nous avons procédé au relevé topographique des laissées de la crue d'octobre 2008 sur les sections transversales suivantes :

- Pour Oued M'Zab : Laadira, Amlaga et pont de Mlika,
- Pour Oued Metlili : La section au pont centre ville.



**Figure III.16 : Situation des sections d'estimation de débit de la crue octobre 2008**

Les résultats d'application de la méthode du Manning, sont présentés sur le tableau suivant :

**Tableau III.16.: Estimation du débit max de la crue 01 octobre 2008 sur le M'Zab et Metlili**

Bassin Versant	M'Zab			Metlili
Caractéristiques	Laadira	Amlaga	Pont Mlika	Pont Centre Ville
Section mouillée (m <sup>2</sup> )	801	1292	1423	285
Périmètre mouillé (m)	441	426	521	145
Débit Maximale (m <sup>3</sup> /s)	1062	1181	<b>1286</b>	856

Si l'on se réfère à un débit maximum de 1286 m<sup>3</sup>/s, évalué par calcul hydraulique pour la crue octobre 2008, sa fréquence est millénaire selon le tableau III.14. C'est bien l'appréciation des habitants du M'Zab et les institutions professionnelles (ANRH, DRE). Toutefois, lorsque l'on tend vers des sections plus en aval le débit et les autres caractéristiques de la crue vont se chuter par l'effet d'abattement des crues dans les régions sahariennes.

### III.7.5. Zones inondables de la crue d'octobre 2008

Les laisses de l'investigation sur terrain réalisée par les services techniques de l'ASAL (agence spatiale algérienne) juste après l'événement permettent de fixer l'étendue de la crue d'octobre 2008 dans les divers quartiers de la ville, comme le montre la figure suivante :



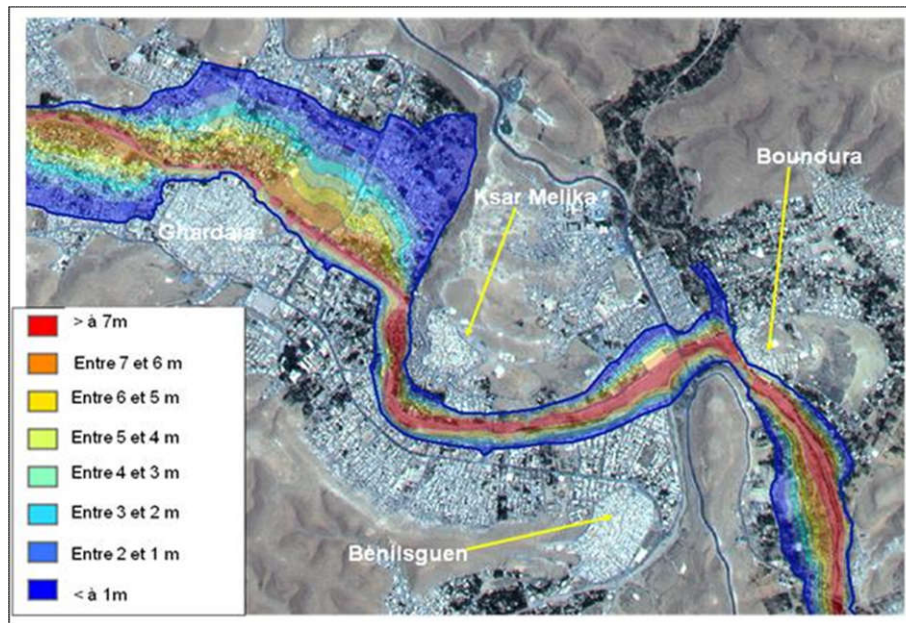


Figure III.17 : Zones inondables de la crue d'octobre 2008 dans la vallée du M'Zab (ASAL, 2008).

On remarque que les hauteurs d'eau sont de : 6 à 8m dans le lit mineur du Oued, 4 à 6m au bord du Oued, et de 1 à 4 m dans les autres quartiers inondés. La crue d'octobre 2008 a inondée plus de 65 % des zones urbaines de la ville de Ghardaïa.

### III.8. Vulnérabilité aux inondations en quelques sites dans la vallée (cas du pont d'Addaoued à Ghardaïa et pont du centre ville de Metlili)

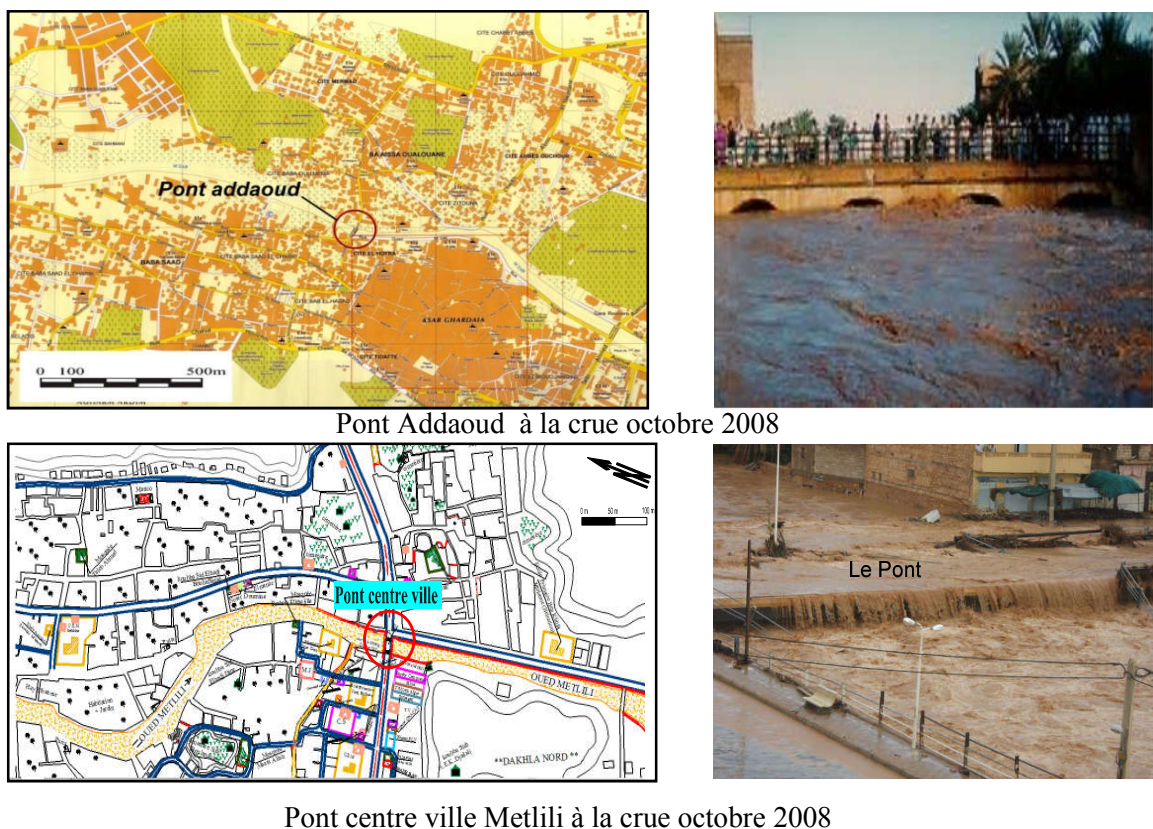
La vulnérabilité aux inondations a d'autant plus augmenté à nos jours, du fait de l'occupation anarchique du lit mineur des Oueds par les habitants. La crue d'octobre 2008 a mis en évidence ce danger notamment aux centres villes des grandes cités de chebkha du M'Zab (Ghardaïa, Metlili et Berriane). Ceci n'est pas dû forcément à une intensité plus grande des crues, mais à la croissance du facteur de vulnérabilité tel que l'installation des habitants proche au lit mineur des Oueds (Benssaad, 1998). La modélisation des inondations représente à nos jours un thème très important dans la thématique de l'eau, et à l'aménagement du territoire. Elle permet de décrire l'événement tel qu'il se produit, avec un certain degré de tolérance. Ainsi, elle permet de cartographier les zones à vulnérabilité importantes face à ces événements.

L'objectif de ce paragraphe est d'établir des cartes de vulnérabilité aux inondations d'Oued M'Zab et d'Oued Metlili aux endroits les plus vulnérables. La réalisation de cette carte passe par plusieurs phases afin de déterminer le débit maximum de différentes fréquences sur Oueds M'Zab et Metlili. L'utilisation du logiciel HEC-RAS, nous a permis de déterminer les niveaux d'eau atteints en fonction de la fréquence de crue et les conditions géométriques/topographiques des sections à traversées. C'est un outil de simulation des écoulements bidimensionnels très adopté au milieu urbain. Le logiciel ArcGis nous a permis aussi d'interpoler et simuler les

niveaux fréquentiels sur une carte d'aléa et de déterminer les zones inondables. Les crues ainsi utilisées dans cette modélisation sont celles déterminées dans le paragraphe : III.4.4. (Reconstitution des crues sur le M'Zab).

### III.8.1. Choix des sections

Nous avons choisi le Pont d'Addaoued pour Ghardaïa et le Pont du centre-ville pour Metlili. Les sites choisis sont caractérisés par leurs sensibilités et la densité très élevée du tissu urbain. Lors de la crue d'octobre 2008 nous avons constatés un phénomène de bouchage par des troncs d'arbres et des objets en suspension transportés par les eaux boueuses, aura lieu au niveau de ces deux sites. Cette situation a accentuée la montée des eaux vers le tissu urbain et la submersion totale des ruelles et placettes urbaines.



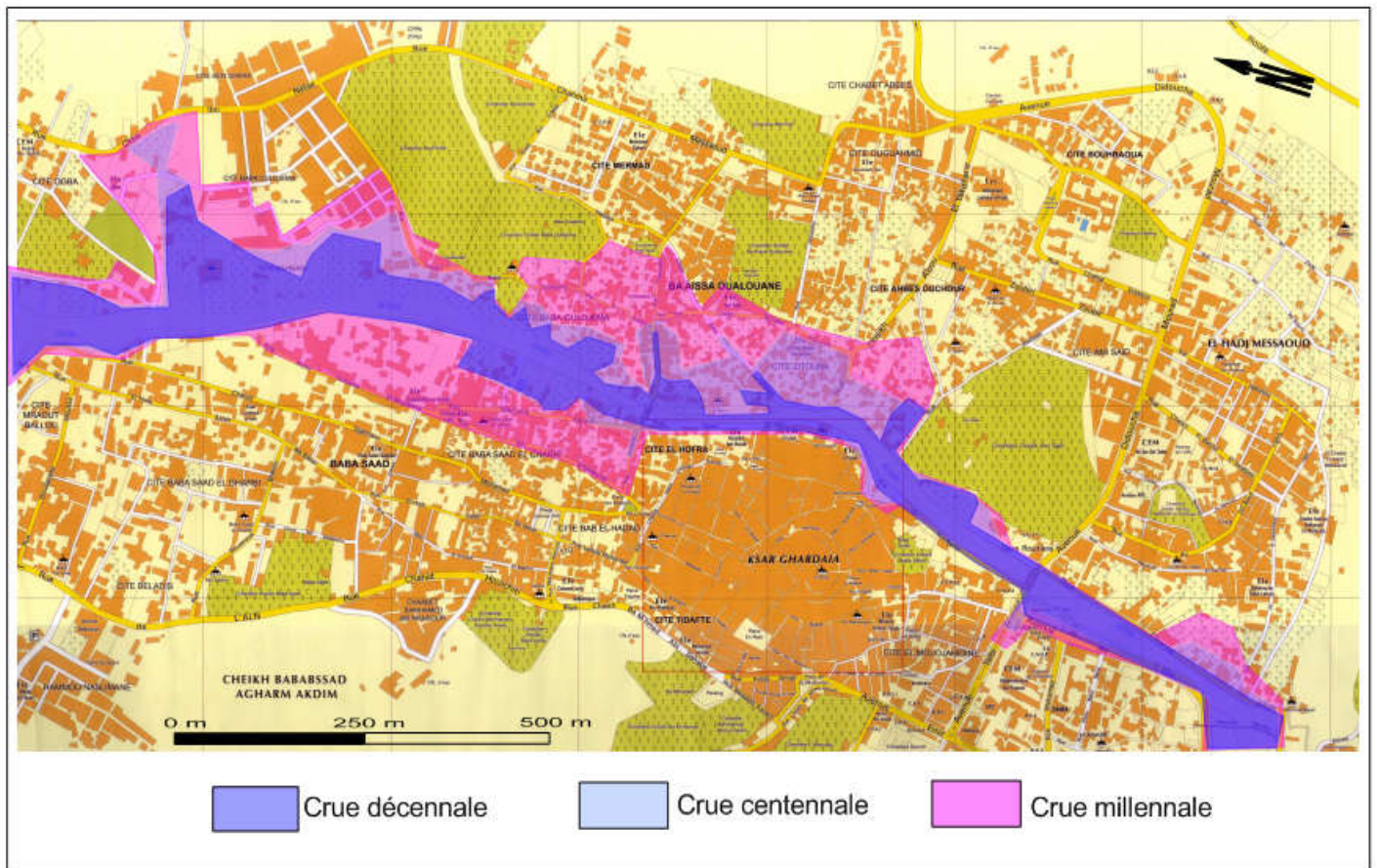
Pont centre ville Metlili à la crue octobre 2008

Figure III.18: Situation des sites vulnérables

### III.8.2. Simulation numérique de la crue à l'HEC-RAS

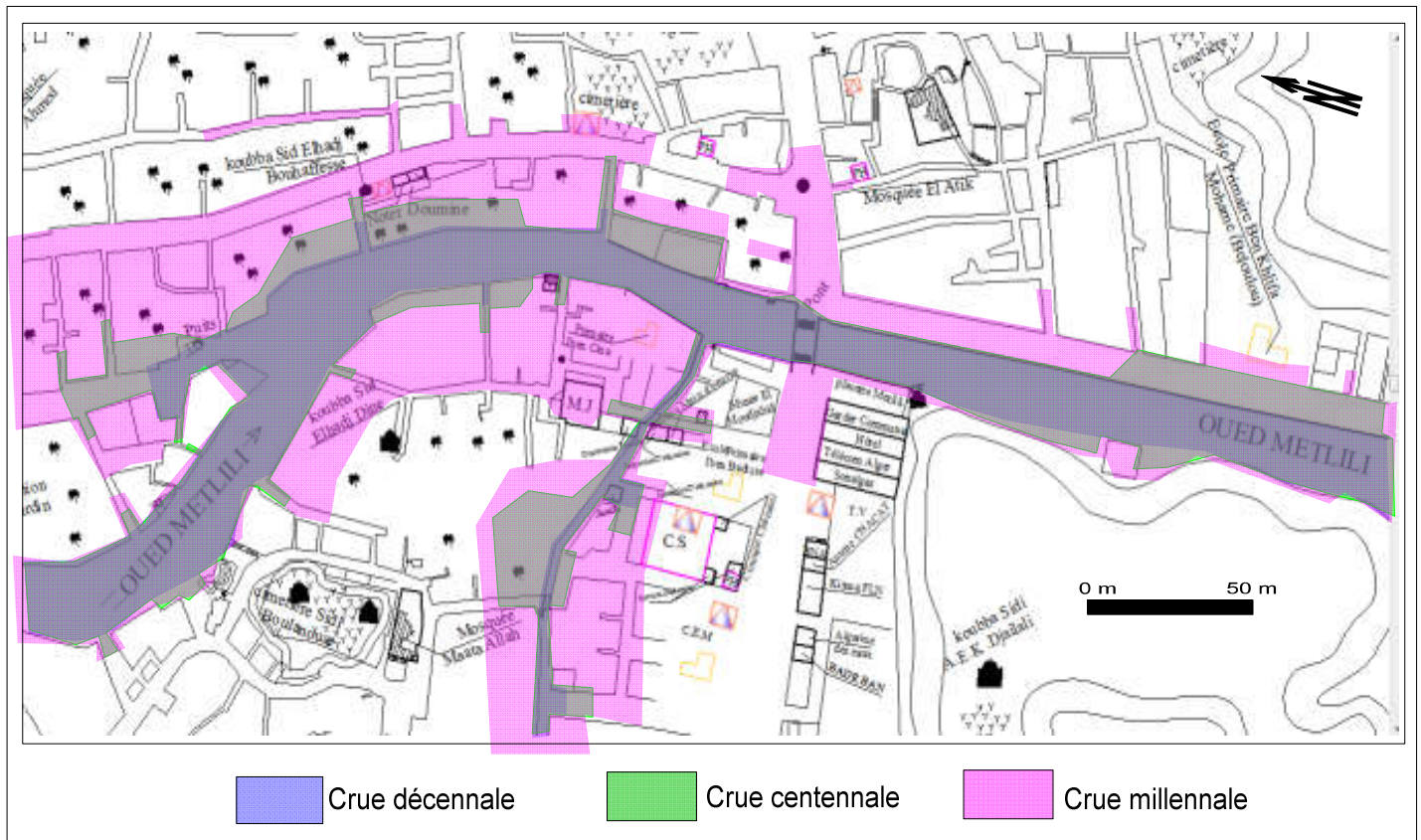
Le logiciel HEC-RAS est un logiciel de simulation hydraulique dans les cours d'eau et canaux. Il permet d'évaluer les débits et hauteurs d'eau sur l'ensemble des sections d'un cours d'eau. Ce logiciel a été utilisé dans plusieurs zones arides similaires. Après avoir tracé les sections d'études sur le levé topographique, nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS pour simuler l'écoulement de ces Oueds. La dernière étape passe par l'utilisation d'un logiciel dessinateur (Autocad, ArcGis, Surfer). Pour avoir la carte finale, nous avons utilisé la carte du levé topographique des deux

sites à l'échelle convenable. Les fréquences des crues modélisées sont : décennales, centennale et millénaire.



**Figure III.27 : Carte de vulnérabilité aux inondations pour les crues décennale, centennale, millénaire (pont d'Addaoud - vallée du M'Zab)**

La carte établie montre les différentes zones inondables du centre ville de Ghardaïa pour chaque période de retour. Les crues décennale, centennale et millénaire submergent respectivement le centre de ville de Ghardaïa sur une surface de 109 Ha, 180 Ha et 240 Ha. On remarque que la surface inondée par une crue millénaire atteint des quartiers plus en amont tel que Ben Smara, Mermed et El Hadj Messaoud. Elle est identique à la crue d'octobre 2008.



**Figure III.28 : Carte de vulnérabilité aux inondations pour les crues décennale, centennale, millénaire (Pont du centre ville - Metlili)**

La carte établie montre que les crues décennale, centennale et millénaire submergent le centre de la ville de Metlili respectivement pour une surface de 19 Ha, 23 Ha et 31 Ha. La crue millénaire submerge des quartiers plus en haut à savoir : Sebka, Sidi Boulannoir, El Batha et sur le pont. Donc cette crue correspond à la crue d'octobre 2008.

### III.9. Conclusion et synthèse

L'étude hydrologique pour l'ensemble de sous-bassins d'Oud M'Zab a fait appel à une série d'approches (analyse historique, paramètres caractéristiques, enquête de crues, formules analogique et mesure sur terrain). Elle a fixé des relations entre les divers coefficients et les débits des crues. Ces relations ont permis d'établir pour des sections bien choisies des hydrogrammes de crue de diverses fréquences. Les crues importantes se produisent le plus fréquemment de mars à mai et de septembre à décembre. Ainsi, elles peuvent intervenir en tout mois de l'année.

Les caractéristiques des crues du bassin du M'Zab, et notamment les débits et les volumes, ont été évalué par plusieurs méthodes analogiques avec d'autres régions semblables dans le monde. Après comparaisons, nous avons adopté pour la méthode Rodier-Auvray. Pour le M'Zab nous

avons évalué sur l'exutoire d'El Atteuf les débits maximaux  $Q_{\max 10} = 402 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{\max 100} = 824 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{\max 1000} = 1384 \text{ m}^3/\text{s}$ , et les volumes qui correspondent :  $V_{10} = 11 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{100} = 22 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{1000} = 37 \text{ Hm}^3$ .

Les observations réalisées lors des événements et les résultats de la modélisation permettent de conclure que la vallée du M'Zab présente une très forte vulnérabilité face aux risques météorologiques même pour des endroits plus en amont. Les zones inondables de la crue d'octobre 2008 sont similaires à celles d'une crue millénaire.

*CHAPITRE IV*

**ASPECT GÉOLOGIQUE ET  
GEOTECHNIQUE DU M'ZAB**

## Chapitre IV: Aspect géologique et géotechnique du M'Zab

### IV.1. Géologie du M'Zab

#### IV.1.1. Introduction

Le M'Zab fait partie du bassin mésozoïque saharien, ce bassin, connu aussi sous le nom de « province triasique saharienne », est un vaste domaine de 400 000 Km<sup>2</sup> à une structure complexe. Il est conventionnellement limité vers le Nord par la flexure saharienne, vers le Nord-Est par les accidents de la Djefara maritime et interrompu vers le Sud et vers l'Ouest par des limites d'érosion. Durant tout le Mésozoïque, le M'Zab a joué le rôle d'un glacis, le môle résistant de Hassi Rmel situé au Nord-Ouest de la région de Ghardaïa inflige une légère flexure à ce glacis : la flexure du M'Zab (Busson, 1970).

#### IV.1.2. Géomorphologie générale de la région du M'Zab

Géomorphologiquement, la région du M'Zab fait partie du plateau désertique du Nord Sahara. Elle est limitée par les deux grands ergs oriental et occidental. Dans la région du M'Zab, on peut distinguer quatre types de formations géomorphologique (figure IV.1.) ;

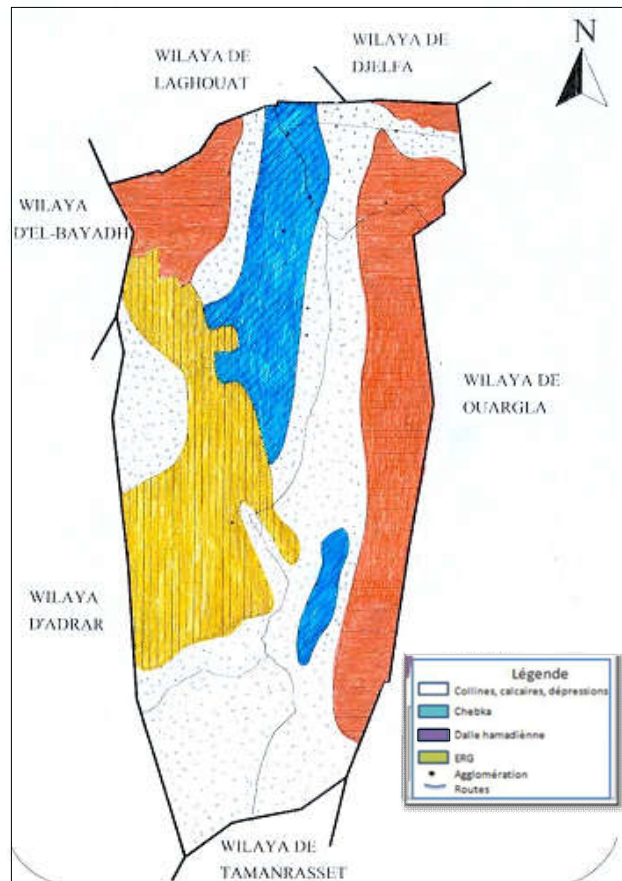
- La région des Daïa ;
- Les plaines de la dalle hamadienne ;
- Les régions ensablées ;
- La Chebkha du M'Zab.

##### IV.1.2.1. La région des Daïa

Les Daïa sont des petites dépressions qui parsèment la surface du plateau, où s'accumulent les minéraux argileux. Actuellement elles fonctionnent comme de petites mares temporaires sur le pourtour desquelles se développent les plantes des parcours sahariens (Bohart, 1977).

##### IV.1.2.2. Les plaines de la dalle hamadienne

Une plaine composée d'un plateau qui présente l'aspect des hamadas ou regs de déflation. Une pierraille anguleuse formée de polyèdres et résultant de la fragmentation de la roche qui parsème la surface (Bohart, 1977).



**Figure IV.1: Les formations géomorphologiques de la Wilaya de Ghardaïa (Delta, 2006)**

#### IV.1.2.3. Les régions ensablées

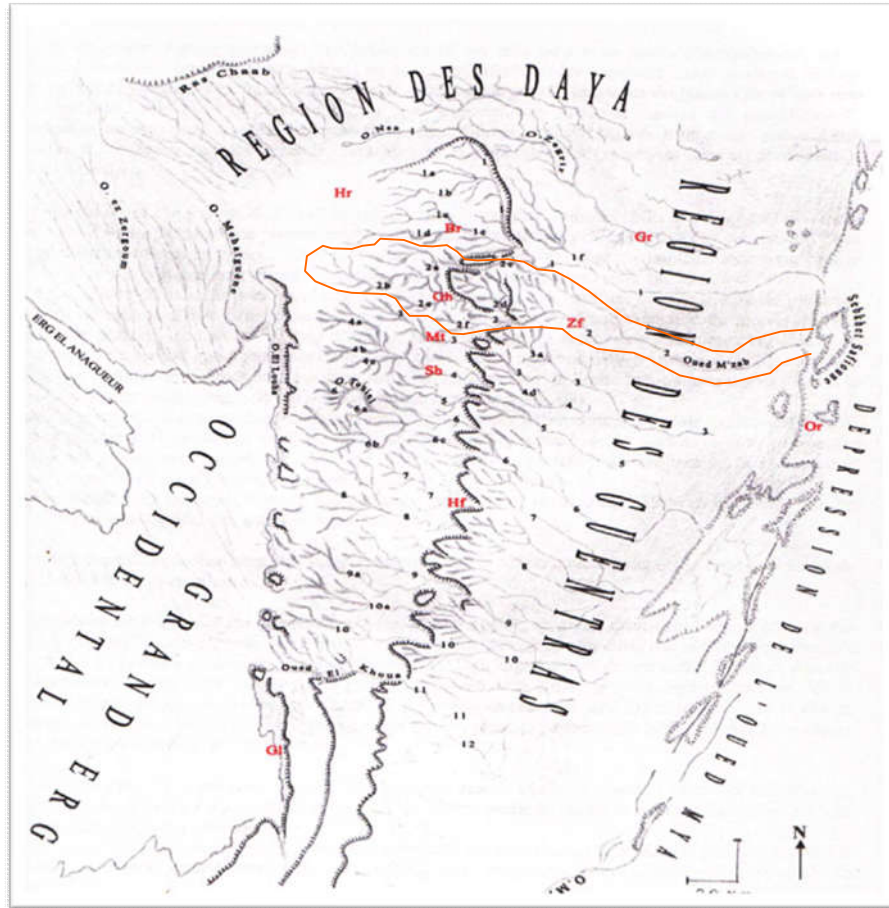
Les régions ensablées sont situées au Sud-Ouest de la vallée, et constituent d'une partie du grand erg occidental avec des cordons dunaires particulièrement denses et élevés.

#### IV.1.2.4. La Chebkha

Le pays des Chebkha est un vaste plateau carbonaté, aride et dénudé de toute végétation. Ce plateau est découpé latéralement par d'innombrables ravins plus ou moins profonds dessinant des réseaux réticulés qui ont valu à ce pays le nom arabe de « Chebkha » par analogie à un filet. Cette appellation géomorphologique tient compte dans le sens strict de ces trois conditions :

- Un plateau calcaire ;
- Un réseau de ravins enchevêtré ;
- Une certaine profondeur de ces ravin ;





**Ce schéma confectionné à l'aide des documents suivants :**

Cartes topographiques 1/200000 de Ghardaïa et Guerrara, 1/500000 de Ouargla, El Golea et Laghouat, et carte routière 1/1000000 de l'Algérie Nord (I.G.N. 1959 à 1970) ; carte géologique 1/2000000 du bassin mésozoïque du Sahara algéro-tunisien et ses abords (G. Busson, 1967) ; tracé hydrographique de la région Daïa M'Zab-Tougourt (A. Nedjari & al., 2001). Nom des villes (en rouge): Lg (Laghouat), Hr (Hassi R'mel), Br (Beniane), Gr (Guerrara), Gh(Ghardaïa), Zf(Zelfana), Mt (Metlili), Sb (Sebseb), Hf (Hassi El Fahl), Gl (Goléa). Nom des Oueds 1 (O. Nsa), 1a (O. Settafa), 1b (O. El Kebch), 1c (O. Soudan), 1d (O. Ballouh), 1e (O. El Bir), 1f (O. El erch), 2 (O. M'zab), 2a (O. El Haimour), 2b (O. El Abiod), 2c (O. Ourighnou), 2d (O. Nimel), 2e (O. N'tissa), 2f (O. Noumerat), 3 (O. Metlili), 3a (O. Gourfane), 4 (O. Sebseb), 4a (O. Mosk), 4b (O. Goullabene), 4c (O. Goufafa), 4d (O. Merabia), 5 (O. Chouikhhat), 6 (O. Touiel), 6a (O. Faraa en Naga), 6b (O. Damrane), 6c (O. khiar), 7 (O. El Fahl), 8 (O. Teghir), 9 (O. Bou Ali) . 9a (O. Sidi Ahmed), 10 (O. Gouiret Moussa), 10a (O. Zirara), 11 (O. El Khoua), 12 (O. Ben Barour). Les traits rouges (en tirets) délimitent géomorphologiquement, du nord au sud, les régions suivantes : La région de Ghardaïa (M'Zab septentrional) ; La région de Hassi El Fahl (M'Zab méridional) ; La région d'El Goléa (Tadmait septentrional).

**Figure IV.2: Les grands ensembles Géomorphologiques du M' Zab et de ses abords (Bohart, 1977)**

### IV.1.3. Type de relief

La dorsale du M' Zab, forme un relief monoclinale orienté Nord Nord-Est, et plongeant faiblement vers l'Est Sud-Est. Cette dorsale est composée de deux terrasses calcaires étagées couronnant deux séries d'escarpements marneux. Ces deux étages superposés, comptent une falaise inférieure avec plateau et une falaise supérieure avec plateau (Figure IV.3.). A la limite occidentale du premier plateau, la falaise montre à la base, un talus marneux de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, et une cuesta calcaire, au sommet d'une vingtaine de mètres de haut formant le plateau. En suivant, le long d'un val, le contact marnes-calcaires est visible sur plusieurs kilomètres de distance. On s'aperçoit que l'épaisseur de la corniche calcaire augmente dans la direction du Sud-Est au même temps que le talus des marnes sous-jacentes diminue. Loin en aval, la limite lithologique disparaît sous le sol, et les berges moins hautes du val sont entièrement calcaires (Bohart, 1977).

La coupe E-W de la figure IV.3 représente les régions suivantes : la région de Ghardaïa (M'Zab septentrional) et la région de Hassi El Fhal (M'Zab méridional) :

- Dans le M'Zab septentrional, le plateau inférieur compte d'Ouest en Est : une hamada occidentale ; puis une Chebkha occidentale qui, en s'avancant vers l'Est, rejoint la Chebkha orientale, celle affectant le haut bord du plateau supérieur. La hamada orientale, prise entre les deux Chebkha, se trouve alors plus ou moins réduite.
- Dans le M'Zab méridional, le plateau inférieur compte d'Ouest en Est : une Chebkha occidentale qui, en reculant progressivement à l'Ouest, affecte et réduit en miettes la hamada occidentale ; et de ce fait, une hamada orientale de mieux en mieux caractérisée.

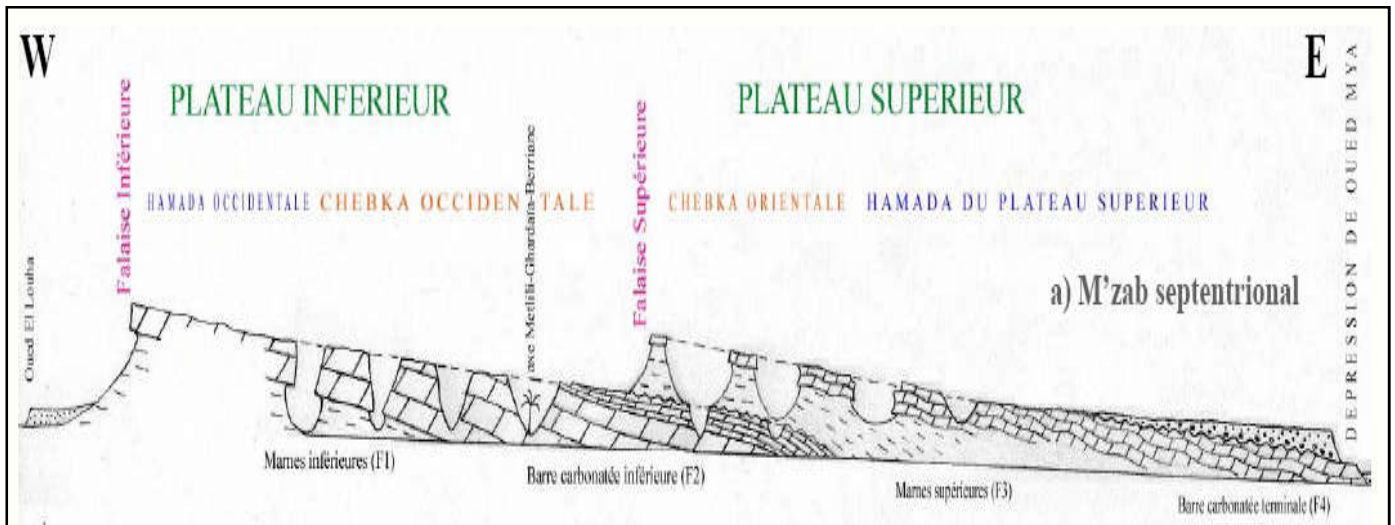


Figure IV.3: Coupe E-W des principaux éléments du relief composant le M'Zab (Bohart, 1977)

#### IV.1.4. Aspect géologique régional du M'Zab

Du point de vue géologique la wilaya de Ghardaïa est située aux bordures occidentales du bassin sédimentaire secondaire du Sahara, sur un grand plateau subhorizontal de massifs calcaires d'âge Turonien appelé couramment "la dorsale du M'Zab". L'épaisseur de ses massifs calcaires recoupés par les sondages est de l'ordre de 110 mètres. Sous les calcaires turoniens on recoupe une couche imperméable de 220 mètres formée d'argile verte et de marne riche en gypse et en anhydrite; elle est attribuée au Cénomaniens. L'étage de l'Albien est représenté par une masse importante de sables fins à grès et d'argiles vertes. Elle abrite des ressources hydrauliques considérables de l'Albien. L'épaisseur est de l'ordre de 300 mètres. Les alluvions quaternaires formées de sables, galets et argiles tapissent le fond des vallées des oueds de la dorsale, d'une épaisseur de 20 à 35 mètres. Ces alluvions abritent des nappes superficielles d'Inféro-flux (nappes phréatiques).

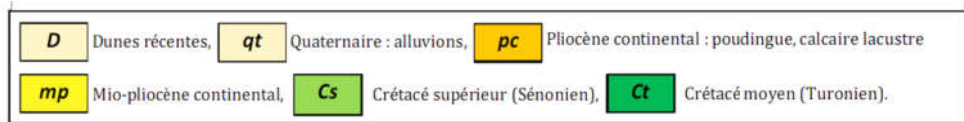


Figure IV.4. Carte géologique régionale de la région du M'Zab (Busson, 1970)

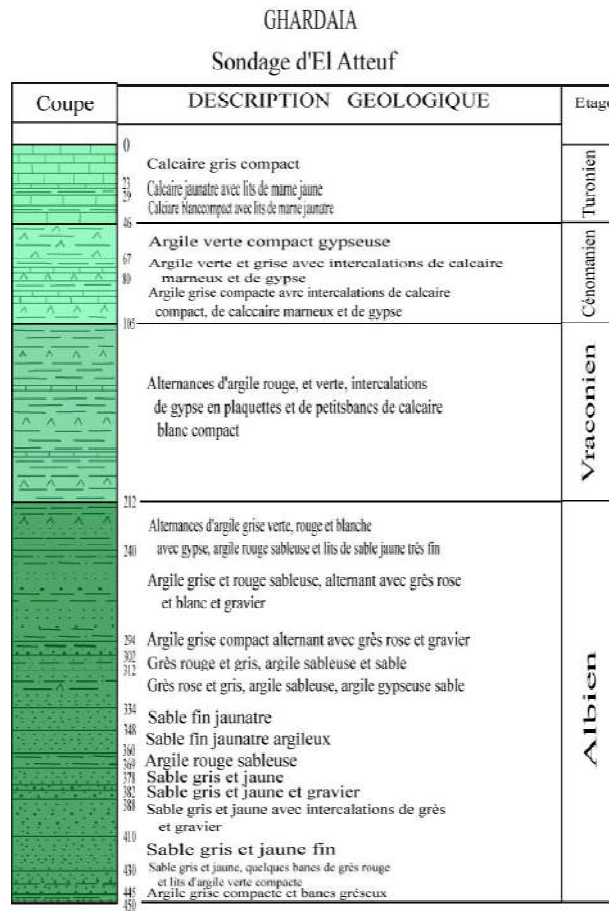


Figure IV.5: Coupe lithologique représentative de la vallée (ANRH, 2011)

## IV.2. Aspect géotechnique de la vallée du M'Zab

### IV.2.1. Introduction

La connaissance du processus d'infiltration est indispensable pour permettre une gestion efficace d'une aquifère d'eau. La maîtrise de l'infiltration est conditionnée par plusieurs facteurs, notamment la perméabilité du sol (Bodelle J., Margat J. 1980). En effet, selon les utilisateurs, l'emploi d'un coefficient de perméabilité est variable. Par exemple, l'ingénieur de Génie rural l'utilisera pour déterminer les possibilités et les modalités de l'irrigation et du drainage sur les sols travaillés. Pour les hydrologues, il s'agit essentiellement d'évaluer la capacité d'infiltration d'un sol travaillé ou naturel vis-à-vis de l'eau de pluie, et à l'occasion, d'évaluer les possibilités de déplacement de l'eau dans le sol au niveau des nappes phréatique (Pierre A.R.,2005).

Dans cette partie nous allons essayer d'estimer les caractéristiques hydrodynamique de la nappe phréatique notamment le taux d'infiltration, la porosité et de la perméabilité, tout en appliquant les différentes méthodes de mesure disponibles in situ et au laboratoire.

### IV.2.2. Méthodes de mesure de la perméabilité

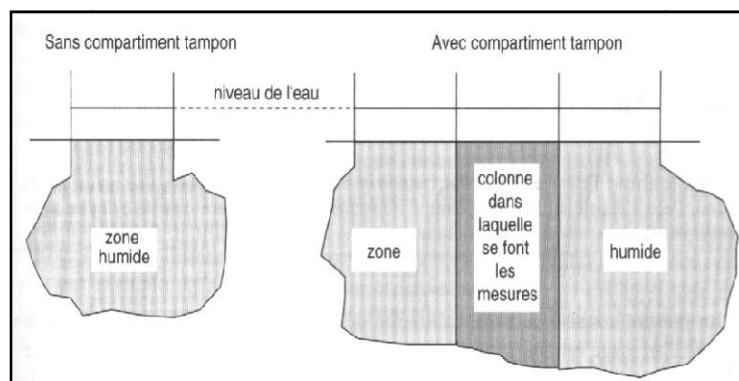
La perméabilité d'un matériau (une roche, un tissu, etc.) correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide de référence sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité  $k$  s'exprime généralement en Darcy (D). Un darcy correspond à la perméabilité d'un corps continu et isotrope au travers duquel un fluide de viscosité équivalente à celle de l'eau à 20 °C s'écoule à une vitesse de 1 cm·s<sup>-1</sup> lorsqu'il est soumis à une pression de 1 atm, ce qui correspond à la dimension d'une surface.  $1 D = 0,97 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ . Le terme de conductivité hydraulique (ou coefficient de perméabilité K) est le rapport entre cette perméabilité et la viscosité du fluide (généralement le fluide est l'eau). Plus un milieu est perméable plus le fluide s'écoulera vite. La conductivité hydraulique s'exprime en mètres par seconde (m/s).

L'essai de la perméabilité consiste à mesurer le temps nécessaire à un volume de fluide pour parcourir la longueur de l'échantillon, sous une pression d'injection donnée (à charge constante) ou sous une pression d'injection variable (à charge variable). Il n'est pas simple de mesurer la perméabilité. C'est une grandeur statistique du matériau. On peut la comparer à une vitesse d'infiltration et dans ce cas, la mesure peut être réalisée avec un infiltromètre. Les mesures de la perméabilité reposent sur plusieurs méthodes normalisés : les essais superficiels (Muntez et Porchet), et les essais de pompage (Lugeon et Lefranc) (Bourdarot G.,1996).

#### IV.2.2.1. Méthode Muntez (test de la perméabilité par double anneaux)

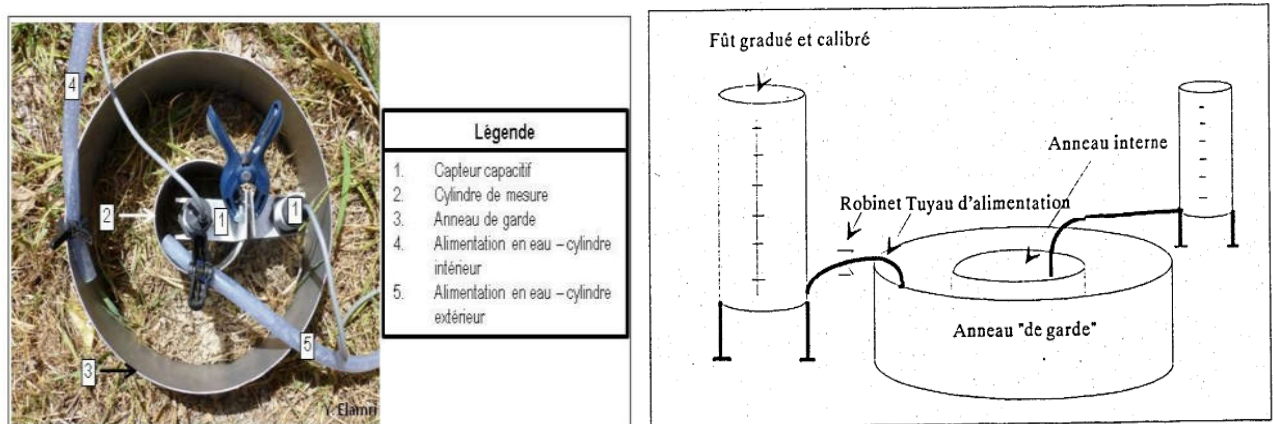
### a. Principe

C'est une mesure devenue extrêmement classique. Elle consiste à déterminer sur le terrain la vitesse d'infiltration de l'eau sous une charge constante de 3 cm. Cette charge constante est établie à l'intérieur d'un cylindre métallique de mesure de 1 cm enfoncé de 6 cm dans le sol. La forme du volume mouillée à la verticale d'un cylindre est du fait d'infiltrations latérales, celle d'une espèce de champignon renversé. Aussi, autour du cylindre de mesure, on maintient une charge identique dans un cylindre de garde (diam : 32 cm), dont le rôle est d'assurer l'humectation latérale parasite du sol, et afin d'assimiler le débit du cylindre de mesure à une infiltration cylindrique verticale. Il convient aussi d'assurer dans l'anneau de garde un débit identique, voire plus important que dans celui du cylindre de mesure pour alimenter l'infiltration parasite (figure IV.6).



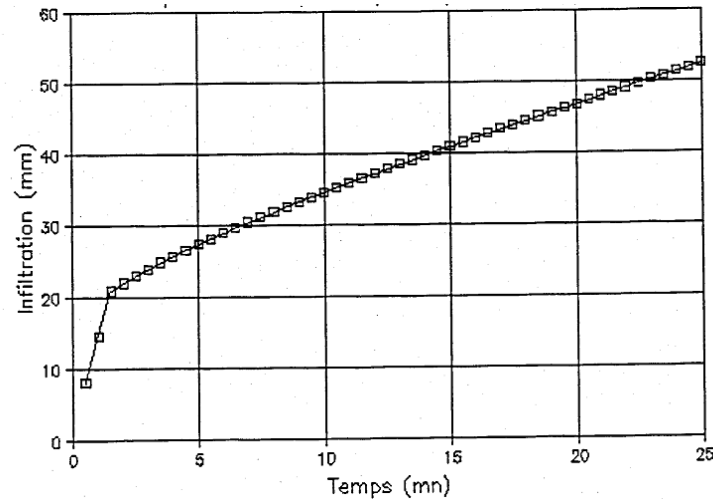
**Figure IV.6 : Effet du compartiment tampon sur les mesures de perméabilité**

L'installation comprend un système d'alimentation en eau susceptible d'assurer un niveau constant et permettant la mesure du débit : c'est une Mariotte gradué et équipée d'un tube de mesure. Dès que le niveau d'eau s'abaisse d'une fraction de mm, suite à l'infiltration, l'air rentre dans le flacon, l'eau s'écoule du flacon et ramène immédiatement la surface dans le cylindre à son niveau initial (figure IV.7).



**Figure IV.7 : Appareillage et Principe de la mesure (Bourdarot G.,1996).**

La mesure consiste à tracer la courbe de la quantité infiltrée en fonction du temps (figure IV.8.). L'arrosage est poursuivi jusqu'à ce qu'on obtienne avec certitude une vitesse d'infiltration stable : on estime alors le milieu saturé sur une hauteur telle que la pente motrice est égale à l'unité et on applique la loi de Darcy. La pente motrice correspondant au régime stable donnant directement le degré de perméabilité du sol. Il est équivalent à la vitesse de filtration qu'on exprime en cm/heure ou m/seconde (Hillel D.,1998).



**Figure IV.8: Courbe cumulative de la vitesse d'infiltration**

La courbe totalise l'infiltration telle que l'enregistre l'appareil de Muntez. C'est elle qui donne les renseignements d'ordre pratique. Ainsi, on peut trouver rapidement le temps pendant lequel il faudra laisser infiltrer l'eau pour qu'une tranche de hauteur donnée soit absorbée. L'infiltration, en centimètre, donnée par l'ordonnée peut se traduire en dose à l'hectare, 1cm correspondant à  $100\text{m}^3/\text{ha}$  (Hillel D.,1998).

La première partie de la courbe à partir de son origine exprime la perméabilité d'arrosage. La seconde partie de la courbe avec une pente régulière exprime une perméabilité stabilisée. Elle a une importance certaine pour juger la valeur de la terre, principale au point de vue filtration (Hillel D., 1998).

Pour avoir des résultats fiables, la méthode doit respecter strictement le protocole et les normes définies : la charge de 3 cm d'eau et l'enfoncement du cylindre de 6 cm dans le sol, mais surtout le diamètre standard de 11.2 cm ( $S=100\text{ cm}^2$ ) et un diamètre de l'anneau de garde voisin de trois fois celui-ci. Il existe de nombreux plans pour construire des infiltromètres de Muntez permettant des manipulations commodes.

Il faut surtout prévoir un modèle avec support pour le flacon de Mariotte car lors de l'humectation du sol, si le flacon est simplement posé sur le cylindre son poids « écrasera » le sol humide et l'ensemble se renversera.

La méthode a l'inconvénient d'être grosse consommatrice d'eau en sol perméable et longue en sol peu perméable. Elle a l'avantage de bien mesurer la perméabilité verticale, et de bien chiffrer l'effet de différenciations superficielles comme les croûtes de battance : on peut par exemple opérer avec la croûte et l'ayant enlevée. Elle est applicable en marche d'escalier sur les horizons successifs d'un profil et la variation des valeurs obtenues est généralement intéressante. Lorsque les points s'alignent ; la vitesse d'infiltration est alors stable, ce qui est couramment obtenue après 10 minutes dans les sols perméable mais peut nécessiter plus d'une heure en sols peu perméable (Hillel D., 1998).

#### b. Interprétation de résultat et calculs

Si on applique la loi de darcy au cylindre central on a le diamètre :

$$D = K \cdot \frac{H}{L} \quad (4.1)$$

Dans les conditions de mesure, L est suffisamment grand pour  $H \approx L$  d'où

$$D = K \quad (4.2)$$

K (exprimé en cm/h, m/s) est égal à la pente de la droite  $h=f(t)$

#### Remarque :

- Débit de l'anneau de garde : il est toujours intéressant de mesurer parallèlement le débit de l'anneau central. La comparaison peut renseigner sur l'importance de l'infiltration latérale et sur la façon dont s'établit, puis se maintient, le régime d'infiltration stable ;
- L'enfoncement du cylindre dans le sol est parfois difficile mais n'est jamais un problème insurmontable, sauf en sol très caillouteux ou en présence de grosse racine ; il faut alors moins enfoncer le cylindre ;
- Cette méthode permet des mesures à différentes profondeurs du sol, sur larges marches d'escaliers de profil. A ce niveau, lorsqu'on prépare une surface d'infiltration sur une marche d'escalier, on doit procéder au nettoyage de débris d'agrégats (par soufflage de préférence) susceptibles de se disperser l'eau et de colmater les pores ;
- On sait aussi que ces résultats ne correspondent pas directement au comportement du sol dans ses conditions naturelles d'évolution, mais la technique est précieuse pour l'irrigation par submersion, pour obtenir un test de valeur comparative en conditions normalisées et les variantes qu'elle autorise.

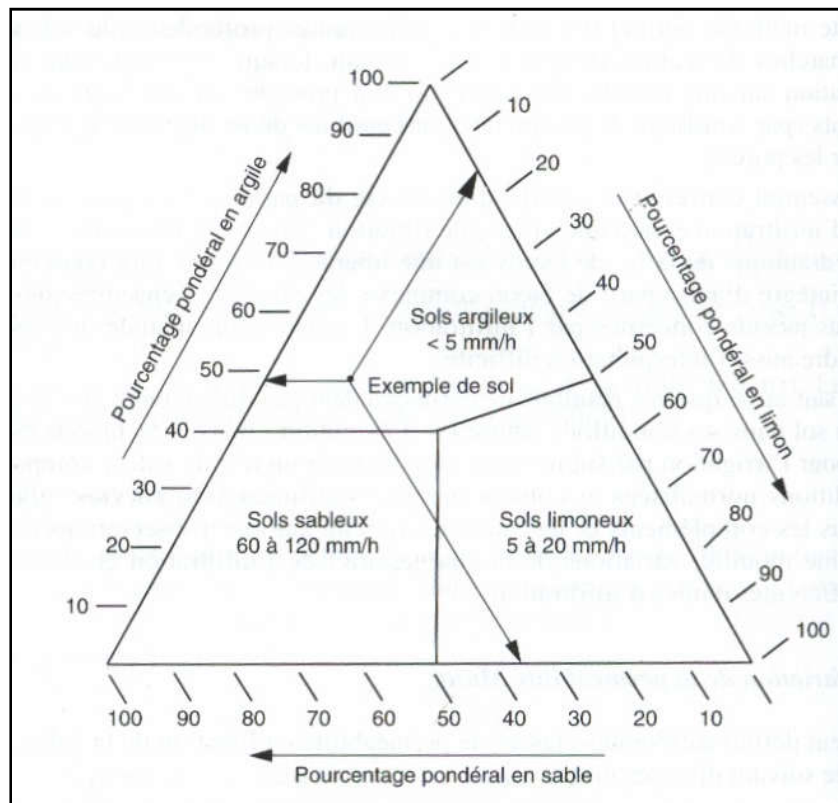
### c. Variation de la perméabilité Muntez

On peut définir différentes classes de perméabilité en fonction de la valeur de K exprimée suivant diverses unités. Les chiffres ci-dessous correspondent aux limites des diverses classes de perméabilité. Le Tableau suivant présente les classes de perméabilité en fonction de la valeur de K (Cassan, 1980).

**Tableau IV.1 : Classes de perméabilité en fonction de la valeur de K**

cm.s <sup>-1</sup>	mm.h <sup>-1</sup>	m.s <sup>-1</sup>	m.j <sup>-1</sup>
Sols imperméables			
10 <sup>-5</sup>	0,36	10 <sup>-7</sup>	0.0087
Sols peu perméables			
10 <sup>-4</sup>	3,6	10 <sup>-6</sup>	0.0864
Sols moyennement perméables			
10 <sup>-3</sup>	36	10 <sup>-5</sup>	0.864
Sols perméables			
10 <sup>-2</sup>	360	10 <sup>-4</sup>	8.64
Sols très perméables			
10 <sup>-1</sup>	3500	10 <sup>-3</sup>	90

La perméabilité d'un sol dépend beaucoup de sa texture, les sols à texture fine étant les moins perméables (figure IV.9). Mais, pour un sol donné, la perméabilité dépend également de sa structure.

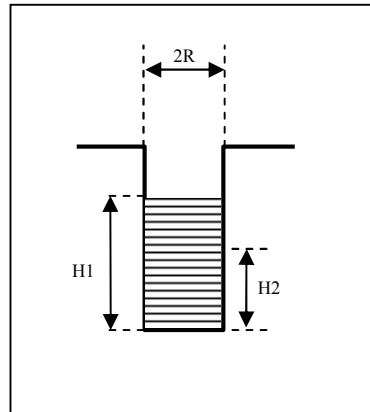


**Figure IV.9 : Variation de la perméabilité en fonction de la texture du sol (Cassan, 1980)**



### IV.2.2.2. Méthode du puits ou Porchet

Cette Méthode consiste à creuser un trou cylindrique (par exemple à la tarière), de 10 cm de diamètre et de 50 cm de profondeur environ. Après l'avoir rempli d'eau, on observe la variation de niveau (figure IV.10).



**Figure IV.10 : Mesure de la vitesse d'infiltration par la méthode de Porchet**

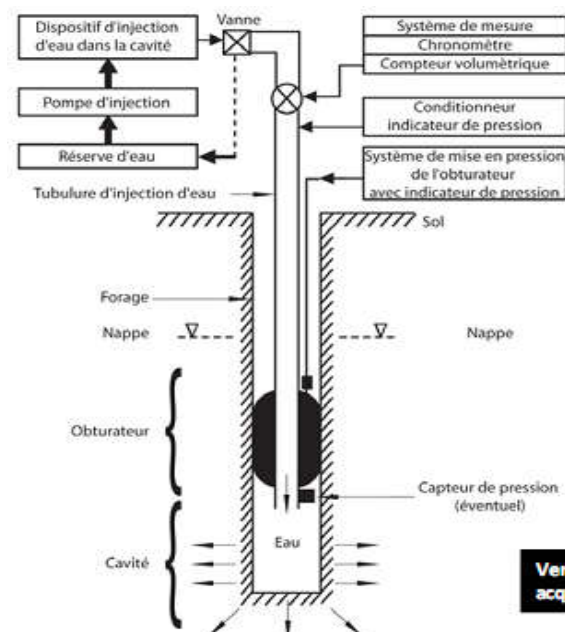
On note la hauteur  $H_1$  de l'eau à l'instant  $t_1$  et la hauteur  $H_2$  à l'instant  $t_2$ . Soit  $r$  le rayon du puits, la vitesse d'infiltration  $K$  est donnée par la formule :

$$K = \log \left[ \left( \frac{H_1 + r/2}{H_2 + r/2} \right) \right] * r/2 * (t_2 - t_1) \quad (4.3)$$

### IV.2.2.3. Essai de perméabilité Lugeon

L'essai d'eau Lugeon est un essai de perméabilité in-situ réalisé dans un sondage. Il s'applique aux roches fracturées, maçonneries et aux sols cohérents de résistance mécanique compatible avec la pression d'eau imposée pendant l'essai.

L'ensemble de mesure est constitué, conformément à la norme NFP 94-131, d'un coffret de commande destiné au gonflage de l'obturateur et au pilotage du détendeur d'injection d'eau, d'une ligne d'injection complète équipée entre autre d'un détendeur d'injection, d'un débitmètre et d'un capteur de mesure de la pression d'injection (Daviauf, 1986).



**Figure IV.11 : Équipements d'un essai Lugeon (Daviauf, 1986)**

### IV.2.3. Investigation sur terrain des paramètres hydrodynamiques et géotechniques

A l'échelle régional, très peu d'étude ont traité la mesure des caractéristiques hydrodynamiques et géotechniques de la nappe phréatique et les résultats in situ sont très rares. Vu cette carence en matière d'évaluation. On se propose d'utiliser quelques mesures personnelles réalisées sur terrain sur la période 2008-2014, ainsi que les résultats des mesures géotechniques du laboratoire des travaux publics au sud (LTPS) réalisées sur la partie amont de la vallée du M'Zab (2002-2015).

#### IV.2.3.1. l'infiltration Efficace

Nous exposons dans ce paragraphe les résultats de certaines études réalisées au Sahara septentrional sur les essais d'évaluations du taux d'infiltration :

##### a. Sable dunaire du grand Erg occidental (Michel A. R. 1973)

L'estimation est effectuée sur la base de l'expression générale du bilan d'eau. L'auteur admet que seules les pluies efficaces alimentent la nappe, ainsi il néglige l'évaporation et les pertes au profit des nappes profondes. Donc il suffit de mesurer la variation de la lame d'eau drainée d'une part, et la lame de précipitation correspondante. L'auteur adopte les valeurs suivantes (Michel A.R., 1996):

- Pour une pluviométrie moyenne annuelle de 41 mm et une lame d'eau débitée de 2 à 4 mm, il adopte un coefficient d'infiltration de 5 à 10%.
- Pour des pluies de 5 à 20 mm, le coefficient d'infiltration moyen est de 40%.

##### b. Chott d'Ouargla (P.Dutil et C.Samie 1960)

Un essai d'estimation de l'infiltration efficace sur le chott d'Ouargla a été effectué par P. Dutil et C. Samie en 1960 pour deux années hydrologiques consécutives 1958/58 et 1958/59. L'expression du bilan global de l'ensemble chott-couche aquifère est (Ouled Belkhir, 2002) :

$$Q_s = E + Q_{ex} + I_w \pm dW \quad (4.4)$$

Avec :

- $Q_s$  : apports des drains : eaux d'irrigation et domestique.
- $E$  : évaporations.
- $Q_{ex}$  : exploitation par pompage.
- $I_w$  : infiltration efficace.
- $dW$  : variation de la réserve en eaux de surface, elle est évaluée directement
- par planimétrie de la surface du chott. D'où :

$$I_w = Q_s - (E + Q_{ex} \pm dW) \quad (4.5)$$

Les auteurs ont adopté les valeurs suivantes :

- Pour l'année 1957/58 :  $I_w = 6.07 - (2 + 0.13 - 0.02) = 3.92 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ .
- Pour l'année 1958/59 :  $I_w = 3.65 - (1.53 + 0.76 - 0.02) = 1.38 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ .

L'infiltration efficace est estimée à 64% des apports pour l'année 1957-58, et à 37% pour l'année 1958/59. Le pourcentage le plus élevé (64%) est justifié par le fait que l'année 1957/58 est une année pluvieuse et qu'il y a eu un excès d'eaux dans le chott (Ouled Belkhir, 2002).

### c. Au M'Zab d'après le BET BG (Bekhouché et Valentina, F 1998)

Lors de l'épisode pluvieux du 6-7 novembre 1997, les auteurs ont arrivé à estimer le taux d'infiltration sur la vallée du M'Zab. L'observation et les mesures ont été faite sur une petite retenue collinaire de 50 m<sup>3</sup> environ et un bassin versant de 6 Ha. Les auteurs ont proposé l'équation du bilan sur la retenue (Bekhouché, 1998):

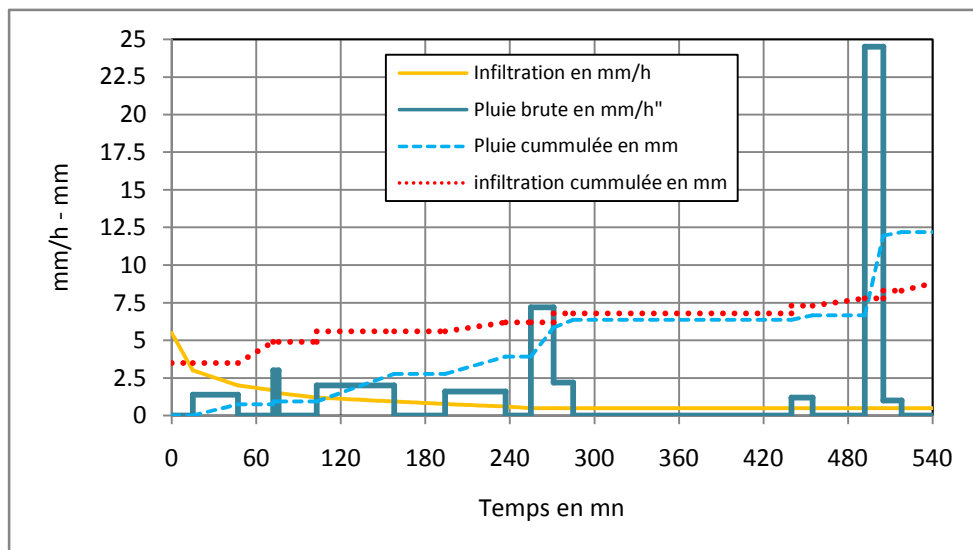
$$P_{\text{tot}} = I_0 + E_{6-7} + I_c + R \quad (4.6)$$

$$V_{\text{stock}} = T_c \times (P_{\text{tot}} - E_{6-7} - I_c - R) \quad (4.7)$$

$$V_{\text{inf}} = V_{\text{stock}} - V_E - V_R \quad (4.8)$$

- $P_{\text{tot}}$ : pluie brute totale.
- $I_0$ : infiltration initiale de mouillage du sol, estimé à 5.5 mm.
- $E_{6-7}$ : perte par évaporation entre la date 6 et 7 novembre 1997.
- $I_c$ : infiltration contenue durant la deuxième averse: 07/11/1997, estimé à 0.5 mm/h.
- $R$ : lame d'eau ruisselée : débit à l'aval de l'ouvrage.
- $T_c$  durée de l'averse

La figure (IV.12) suivante résume les données de l'investigation sur la retenue



**Figure IV.12 : Paramètres du bilan hydrologique de l'avers 6 et 7 novembre 1997 (Bekhouché, 1998)**

Ces observations permettent d'estimer les paramètres d'infiltration par l'utilisation des équations du bilan volumétrique. Cette estimation conduite aux valeurs suivantes :

- Le volume total stocké est de 12.2 mm.
- Le volume total infiltré est de 9 mm.

- Le taux d'infiltration est de 73%.

La valeur très élevée du taux d'infiltration peut être expliquée par les conditions climatiques de l'essai, ainsi que les dimensions réduites de l'ouvrage de rétention (Bekhouche, 1998).

#### **d. A Oued Labioudh en amont du M'Zab (Ouked Belkhir, 2009)**

A l'aval proche du Barrage de Labioudh, la nappe phréatique est située au moins de 10 m. La rétention temporaire des eaux de crues va favoriser leur infiltration et entraîner une remontée de cette nappe. C'est une conséquence indirecte des ouvrages de rétention amont, qui sera une utilisation prolongée des eaux de la nappe phréatique pour l'irrigation des palmeraies durant toute l'année. En novembre 2008, juste après la crue exceptionnelle d'octobre 2008 qui a affectée l'ensemble de la région (remplissage entier du barrage de Labioudh), une enquête personnelle a lieu sur la zone des périmètres agricoles en amont de Daya B. D. Les résultats obtenus lors de notre investigation montrent que la nappe phréatique a remontée de 3 m en moyenne sur la totalité de la palmeraie de Daya B. D., soit une superficie de 1580 Ha. En parallèle, le volume stocké dans le barrage de Labioudh (le seul barrage réalisé à l'époque) est estimé à 14 Hm<sup>3</sup>. Si on adopte une valeur moyenne de porosité de 15% sur l'amont du M'Zab (selon l'étude LTPS 2001), le volume ainsi infiltré dans le nappe est de 7.12 Hm<sup>3</sup>. Donc le taux d'infiltration estimé à l'amont du M'Zab est de 51%.

#### **Synthèse**

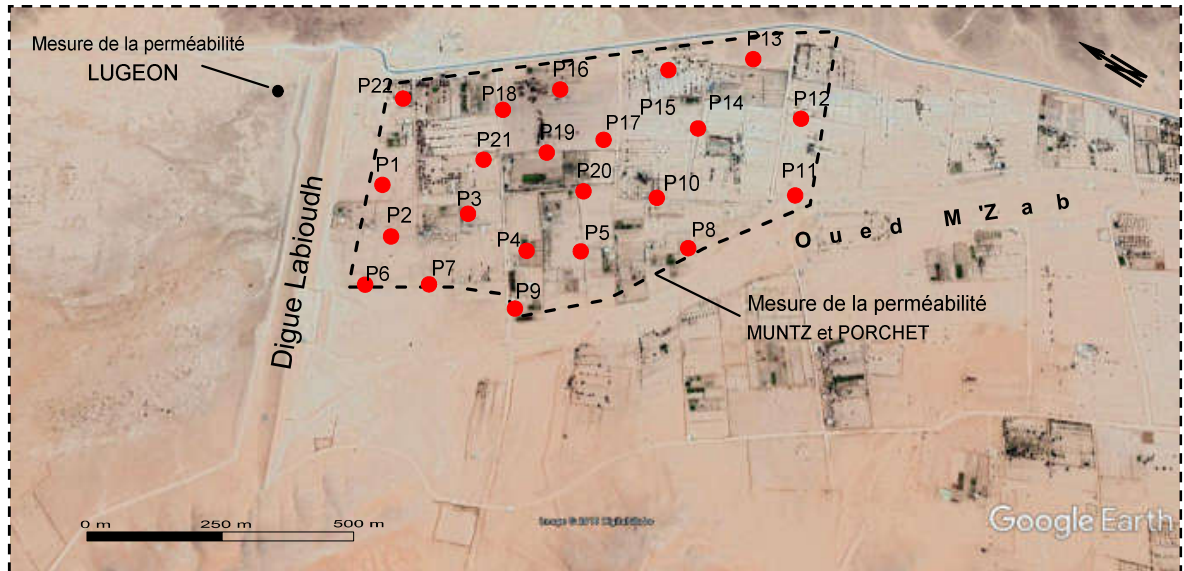
Les diverses méthodes d'estimation du taux d'infiltration ont en commun l'hypothèse implicite que l'expérience et la mesure sur terrain constitue une base raisonnable pour prévoir les grandeurs du phénomène. Cependant, les comparaisons entre les divers valeurs montrent que les résultats sont plus au moins regroupées, sauf la valeur du Bureau d'étude BG (1998) qui est un peu plus élevée par rapport aux autres. Si l'on doit ne retenir qu'une seule valeur, ce sera la valeur moyenne des trois autres expériences :

- Pour les pluies journalières ponctuelles supérieures à 5 mm/h, l'infiltration efficace est de 40%.
- Pour l'infiltration des eaux de ruissellement et des eaux d'épandage, l'infiltration efficace est de 50%.

### IV.2.3.2. Mesure in situ de la perméabilité

#### a. Site de mesure

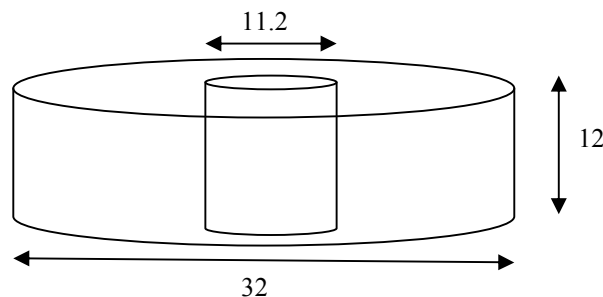
Le site de mesure de la perméabilité est localisé en amont de la ville de Daya B. D., exactement à la zone agricole près du Barrage Labioudh. Le site est composé de deux endroits : le premier correspond à une ferme en aval du barrage, dont-on a creusé 23 petits puits pour l'essai de Muntez et celle de Porchet. Le deuxième site est situé juste en amont du barrage, là où se réalisent des sondages pour l'essai Lugeon.



**Figure IV.13 : Situation des sites de mesure de la perméabilité en amont de la vallée du M'Zab**

#### b. Dispositif Muntez

Le dispositif est fabriqué localement. Il est composé de deux cylindres, un cylindre de garde ( $\varnothing=32$  cm et  $A= 800$  cm<sup>2</sup>) et un cylindre de mesure ( $\varnothing=11.2$  cm et  $A= 100$  cm<sup>2</sup>). Les deux ont une hauteur de 12 cm avec le bord inférieur chanfreiné permettant ainsi leur enfoncement dans le sol d'une manière aisée (figure IV.14).



**Figure IV.14 : Dispositif Muntez fabriqué localement**

Les accessoires du dispositif comprennent :

- Système d'alimentation en eau ;
- Une masse de 1 kg et 1 planche pour enfoncer le cylindre ;

- Une réserve d'eau dans jerricans (30 l) ;
- Une éprouvette de 200 ou 500 ml ou pissette ;
- Un chronomètre ;
- Papier millimètre et fiches de mesure ;

### c. Dispositif Porchet

Il comprend les matériels suivants :

- Une tarière (tube en PVC de  $\varnothing$  110 mm) ;
- Une règle et un chronomètre ;
- Une planche pour enfoncer le cylindre ;
- Une réserve d'eau dans jerricans (30 l) ;
- Papier millimètre et fiches de mesure ;



Figure IV.15 : Mesure sur terrain : à gauche celle de Muntez et à droite celle de Porchet (Avril 2012)

## d. Résultats et discussions

### 1. Méthode de Muntez

Les courbes du volume d'eau infiltré en fonction du temps sont ainsi tracées dans la figure suivante :

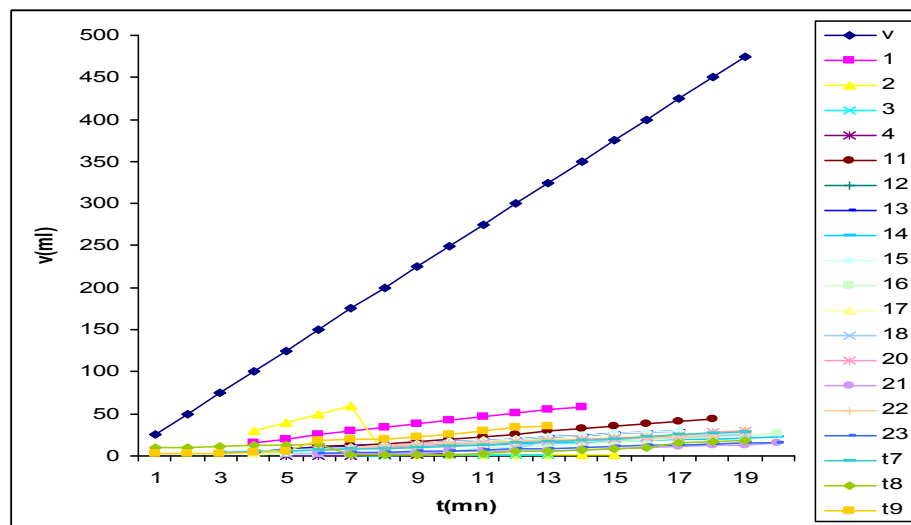


Figure IV.16: Courbe volume d'eau infiltré en ml/min

Les valeurs de la perméabilité indiquent que le sol est légèrement perméable à très perméable. Le coefficient de perméabilité  $k$  varie de  $2.03 \times 10^{-6}$  m/s pour l'échantillon P4 à  $1.68 \times 10^{-4}$  m/s pour l'échantillon P6 selon l'échelle de la perméabilité (tableau IV.2). Les échantillons P4 –P3 – P2 sont peu perméables. Les échantillons P1 - P19 - P11 - P18 - P7 - P17 - P13 - P15 - P16 -P20 - P8 - P9 - P12 - P14 - P21 - P22 sont perméables. Enfin les échantillons P23 - P10 – P5 – P6 sont très perméables.

**Tableau IV.2 : Valeurs de  $k$  en m/s mesurées par la méthode de Muntez**  
Selon le classement de Cassan et Hillel

Degré de la perméabilité	Sol imperméable	Sol peu perméable, à irriguer prudemment	Sol perméable	Sol très perméable
Coefficient de la perméabilité	$K < 10^{-7}$	$1. 10^{-7} < K < 5. 10^{-6}$	$5. 10^{-6} < K < 510^{-5}$ .	$5. 10^{-5} < K < 6. 10^{-4}$
Échantillon		P4 –P3 – P2	P1 - P19 - P11 - P18 - P7 - P17 - P13 - P15 - P16 -P20 - P8 - P9 - P12 - P14 - P21 - P22	P23 - P10 – P5 – P6

La variation de la perméabilité Muntez, montre une forte perméabilité dans la partie Est de la parcelle notamment au p6 avec une valeur de  $6 \times 10^{-4}$  m/s. Les faibles valeurs, cette fois-ci, sont localisée à l'Ouest de la parcelle avec une moyenne de  $1 \times 10^{-5}$  m/s.

## 2. Méthode de Porchet

Les valeurs de la perméabilité indiquent que le sol est imperméable à perméable. Le coefficient de perméabilité  $k$  varie de  $6.9 \times 10^{-8}$  m/s pour l'échantillon P2 à  $1.7 \times 10^{-5}$  m/s pour l'échantillon P18. Selon l'échelle de la perméabilité (tableau IV.3), les échantillons P2 - P8 - P17 - P11 - P12 - P23 - P5 - P15 - P7 - P16 - P21 - P19 - P20 - P22 - P10 - P13 - P14 - P6 sont imperméables et les échantillons P1 et P4 sont peu perméable. Enfin les échantillons P9 – P3 – P18 sont perméables.

**Tableau IV.3 : Valeurs de  $k$  en m/s mesurées par la méthode de Porchet**  
Selon le classement de Cassan et Hillel

Degré de la perméabilité	Sol imperméable	Sol peu perméable, à irriguer prudemment	Sol perméable	Sol très perméable
Coefficient de la perméabilité	$K < 10^{-7}$	$1. 10^{-7} < K < 5. 10^{-6}$	$5. 10^{-6} < K < 510^{-5}$ .	$5. 10^{-5} < K < 6. 10^{-4}$
Échantillons	P2 - P8 - P17 - P11 - P12 - P23 - P5 - P15 - P7 - P16 - P21 - P19 - P20 - P22 - P10 - P13 - P14 - P6	P1- P4	P9 – P3 – P18	

D'après le tableau, les valeurs de la perméabilité Porchet augmentent dans la partie extrêmement Nord-Ouest de la parcelle, qui peut atteindre  $6 \times 10^{-5}$  m/s au p3. Par contre elles sont moins importantes sur la partie centrale, notamment au p9 qui atteindra  $9 \times 10^{-6}$  m/s. Les perméabilités

les plus faibles sont enregistrées sur la partie Sud-Ouest de la parcelle (les berges d'oued Labioudh), avec une valeur de  $1 \times 10^{-6}$  m/s.

#### IV.2.3.4. Essai Lugeon Appliqué au site Oued Labioudh (LTPS 2012)

##### a. Sondages carottés

Le site d'Oued Labioudh a fait l'objet d'une campagne de reconnaissance par sondages carottés par le laboratoire LTPS en 2012. Huit sondages ont été exécutés le long de l'axe à 35 m l'aval de la digue existante. Le tableau ci dessous en donne les principales caractéristiques (LTPSud-BG, 2012)

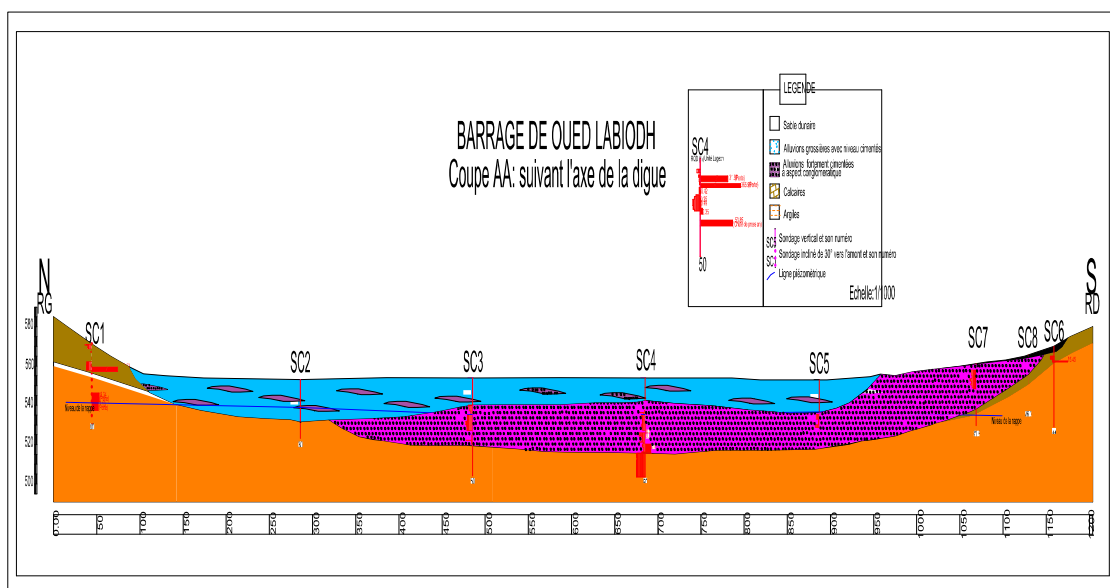
**Tableau IV.4: Profondeurs des sondages carottés réalisées par le LTPS sur Oued Labioudh**

N°	Sondage	Profondeur	Situation
1	Labsc1	40.0 m incliné 30° Amont	Rive gauche
2	Labsc2	30.0 m Vertical	Fond d'oued
3	Labsc3	50.0 m Vertical	Fond d'oued
4	Labsc4	50.0 m Vertical	Fond d'oued
5	Labsc5	30.0 m Vertical	Fond d'oued
6	Labsc6	41.0 m Vertical	Rive droite
7	Labsc7	31.5 m Vertical	Rive droite (Entre 5 et 6)
8	Labsc8	26.3 m Vertical	Rive droite (Entre 6 et 7)
Total linéaire		298.8 m	

Cinq sondages destructifs de 25 ml de longueur ont également été foncés autour du LabSC3 en vue de réaliser un essai de pompage. Celui-ci n'a pu être fait, vu que la nappe phréatique actuellement est très basse et ne permet pas de tester l'ensemble des horizons rencontrés.

##### b. Lithologie des terrains rencontrés

Les sondages réalisés ont permis de tracer une coupe géologique en travers de la vallée relativement précise. On rencontre :

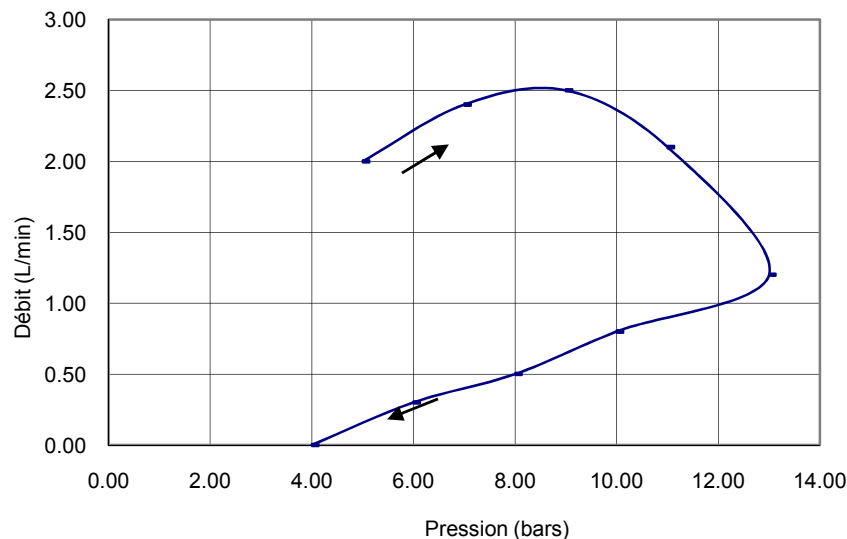


**Figure IV.17: Coupe Lithologique d'Oued Labioudh (LTPSud-BG, 2012)**



### c. Résultats d'essais Lugeon dans la roche Turonien d'Oued Labioudh

Dans le programme de reconnaissance, il avait été demandé d'effectuer de façon systématique des essais Lugeon dans le rocher. Trois essais ont été réalisés dans le Lab SC4 en phase montante et descendant avec les paliers de pression demandés donnent des valeurs de perméabilité très basses inférieures à une unité Lugeon. Ils caractérisent une zone de calcaires compacts à aspect conglomératique. Le reste des essais donne des absorptions totales sous de faible pression.



**Figure IV.18 : Courbe débit – pression (12-42 m) pour le sondage LAB-SC4 à Oued Labioudh ( $k = 0.10 \text{ UL} = 3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ) (LTPSud-BG, 2012)**

Les essais Lugeon effectués montrent que les calcaires et les alluvions cimentés sont relativement peu perméables quand ils sont sains. Ils accusent par contre des niveaux de perméabilités élevés dans les zones fracturées. La perméabilité de ces matériaux mesurée est de l'ordre de  $3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  (LTPSud-BG, 2012).

### IV.3. Conclusions et synthèses

La région du M'Zab se caractérise par un relief cisailé, ravine et serpenté d'innombrables oueds (la Chebkha). Le substratum géologique est constitué de calcaires, dolomies et de marnes d'âge Turonien. On distingue aussi, au fond de la vallée des dépôts alluvionnaires d'âge quaternaire. En première couche on rencontre sur 10- 20 m des alluvions grossières sablo - graveleuses. Ces alluvions comportent parfois des lentilles de sable d'épaisseur importante (2 à 3.5 m). Sous ce niveau viennent ensuite sur une épaisseur d'une quinzaine de mètres des alluvions grossières fortement cimentées (aspect conglomératique). L'ensemble des horizons supérieurs est baigné

par une nappe phréatique importante avec un niveau piézométrique pratiquement horizontale qui témoigne de leur forte perméabilité.

La synthèse des données et informations sur le taux d'infiltration permettent de fixer les grandeurs suivantes :

- Pour les pluies journalières ponctuelles supérieures à 5 mm/h, l'infiltration efficace est de **40%**.
- Pour l'infiltration des eaux de ruissellement et des eaux d'épandage, l'infiltration efficace est de **50%**.

Les essais d'identification des terrains rencontrée lors d'investigation relèvent une porosité efficace moyenne de **20%**.

Les essais in-situ Muntz et Porchet effectuée sur les couches superficielles prêt du barrage Labioudh montrent que le sol est perméable à très perméable, avec des valeurs entre  $5 \times 10^{-6}$  m/s et  $6 \times 10^{-4}$  m/s. Cette perméabilité superficielle importante peut être expliquée par l'existence des travaux de labour saisonnier pratiqués sur les parcelles agricoles de l'essai.

Les essais Lugeon effectués sur l'amont du M'Zab montrent que les calcaires et les alluvions cimentés sont relativement peu perméables quand ils sont sains. Ils accusent par contre des niveaux de perméabilités élevés dans les zones fracturées. Les niveaux d'argile de base sont totalement étanches La perméabilité relativement importante des alluvions et des calcaires générera nécessairement des pertes d'eau importantes. Ces eaux de toutes les façons reviendront dans la vallée à l'aval. La perméabilité de ces matériaux mesurée est de l'ordre de  **$3 \times 10^{-4}$  m/s**.

*CHAPITRE V*

**ASPECT HYDROGEOLOGIQUE  
DU M'ZAB**

## Chapitre V. Aspect hydrogéologique du M'Zab

### V.1. Généralité sur les ressources hydriques souterraines du M'Zab

Les principales ressources en eau de la wilaya Ghardaïa sont d'origine souterraine. Elles sont contenues dans deux types d'aquifères ; la nappe superficielle (la nappe phréatique), et la nappe profonde captive du Continental Intercalaire (CI).

#### V.1.1. Nappes phréatiques (alluvionnaire et du Turonien)

Elles sont constituées dans les alluvions d'Oued et le calcaire dolomitique massif d'une épaisseur de 40 à 50 mètres. Cette nappe se réalimente des eaux d'infiltration des précipitations, des crues et eaux de restitutions. Elle constitue la principale source d'irrigation des palmerais dans la vallée. Dans le paragraphe V.2, nous allons détailler d'avantage la description de cette nappe.

#### V.1.2. Nappe du Continental Intercalaire (CI)

La nappe du Continental Intercalaire draine, d'une façon générale, les formations gréseuses et grès-argileuses du Barrémien et de l'Albien. Elle est exploitée, selon la région, à une profondeur allant de 250 à 1000m. Localement, l'écoulement des eaux se fait d'Ouest vers l'Est. L'alimentation de la nappe bien qu'elle soit minime, provient directement des eaux de pluie au piémont de l'Atlas Saharien en faveur de l'accident Sud-Atlasique.

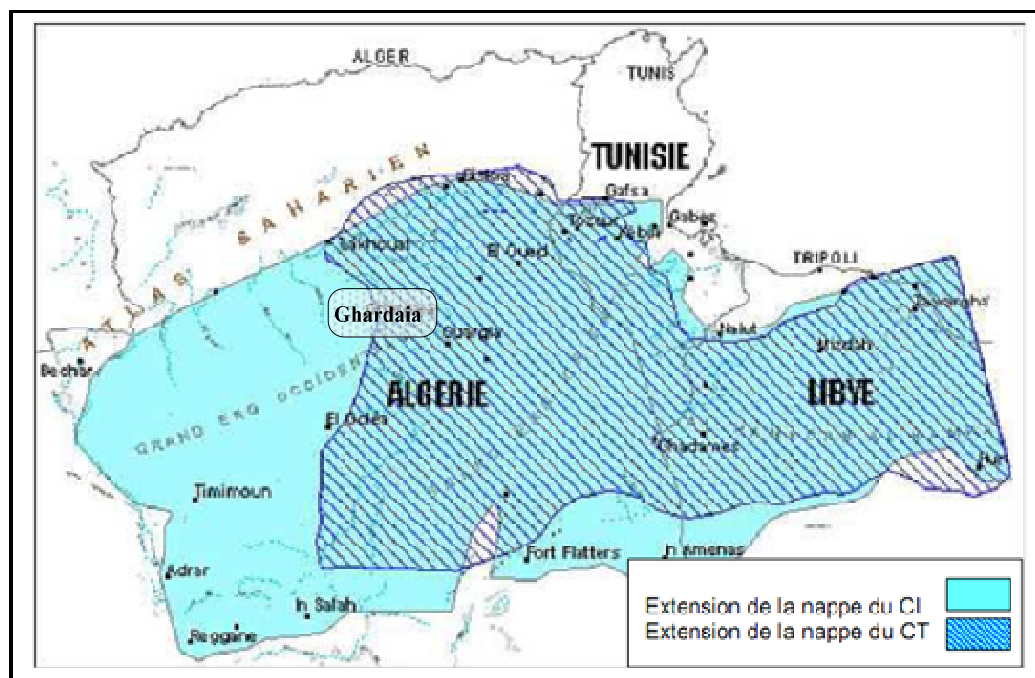


Figure V.1: Ressources en eau souterraines du Sahara septentrional CI et CT (ANRH, 2011)

Les débits unitaires moyens sont de 80 l/s et peuvent s'élever jusqu'à 150 l/s. La nappe est artésienne, mais le niveau de refoulement n'atteint le haut du puits qu'en quelques endroits.

À la wilaya de Ghardaïa la nappe du CI présente une vaste variation spatiale selon l'altitude et l'épaisseur des formations postérieures, elle est :

- Jaillissante et admet des pressions en tête d'ouvrage de captage (Zelfana, Guerrara et certaines régions d'El Menia).
- Exploitée par pompage à des profondeurs importantes, dépassant parfois les 120m (Ghardaïa, Metlili, Berriane et certaines régions d'El Menia).

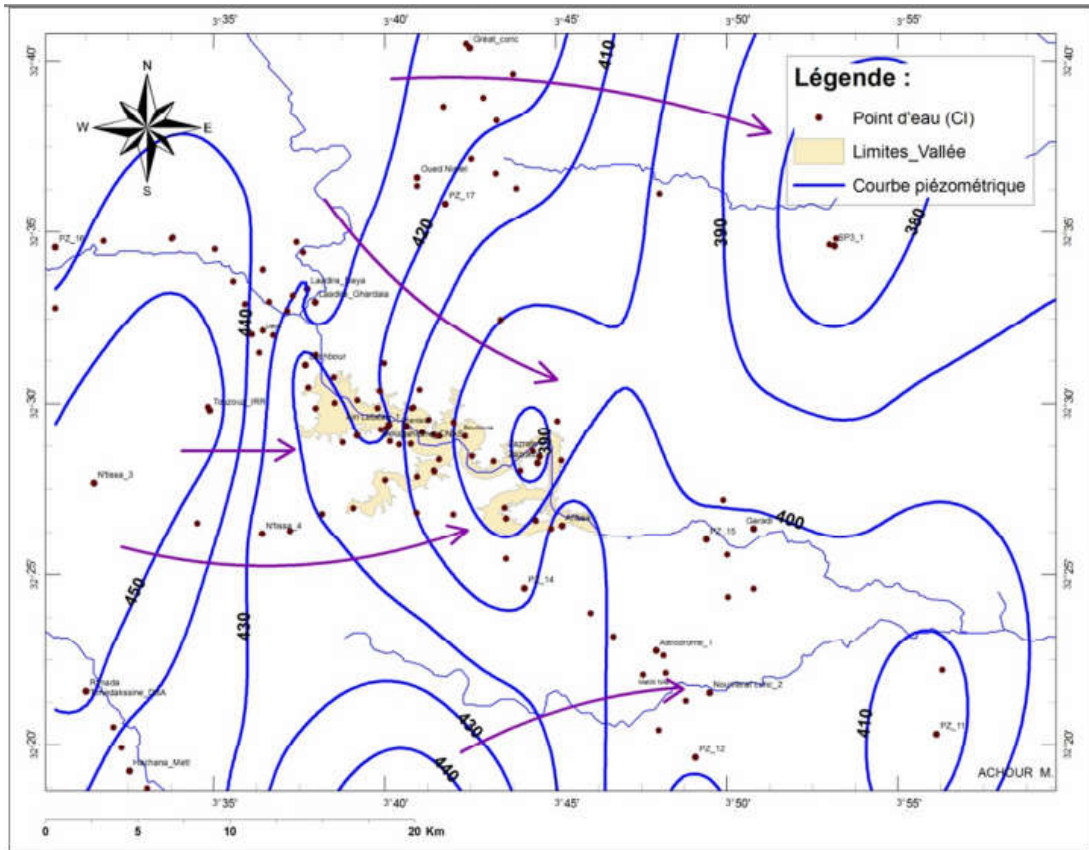


Figure V.2: Carte piézométrique du CI à la partie nord de la Wilaya de Ghardaïa (ANRH, 2011)

Cette nappe a permis de faire face à l'accroissement des besoins en eau dans la wilaya mais on peut également inverser la remarque et dire que c'est la mise en exploitation de cette nappe qui a permis la poursuite du développement de la wilaya de Ghardaïa.

Tableau V.1: État d'exploitation de la nappe CI dans la vallée du M'Zab (ANRH, 2011)

Communes	Nombre de forages		Débit moyen (l/s)	Volume soutiré (hm <sup>3</sup> /an)	Profondeur moyen (m)	Destination
	Total	Exploités				
Atteuf	19	16	30p	8.26	500	AEP+IRR+AEI
Berriane	17	12	25p	6.71	500	AEP+IRR
Bounoura	15	10	30p	7.61	500	AEP+IRR+AEI
Daya	13	4	20p	3.02	500	AEP+IRR
Ghardaïa	36	26	30p	15.46	500	AEP+IRR+AEI

## V.2. Étude du fonctionnement de la nappe phréatique du M'Zab

### V.2.1. Introduction

Dans la région du M'Zab, deux types d'aquifère superficiel sont connus : l'un est alluvionnaire et l'autre est carbonaté fissuré, leur mur commun est l'argile cénomanienne. Les deux nappes sont alimentées essentiellement par les eaux météorologiques et les eaux issues de d'irrigation (ANRH, 2011). Compte tenu de l'aridité de la région, les habitants du M'Zab au passé ont été toujours considérés la nappe phréatique comme seul ressources en eau. L'accès jadis à cette ressources se limité uniquement sur la nappe alluviale, et cela à l'aide des puits creusés manuellement dont leurs profondeurs varient entre 15 et 50 m. Devant la croissance des besoins en eaux pour l'irrigation, notamment à l'amont de la vallée (Daya B D, Laadira et Touzouz), les agriculteurs fait appel aux forages plus profonds pour exploiter la nappe de calcaire situé à partir de 80 m de profondeur.

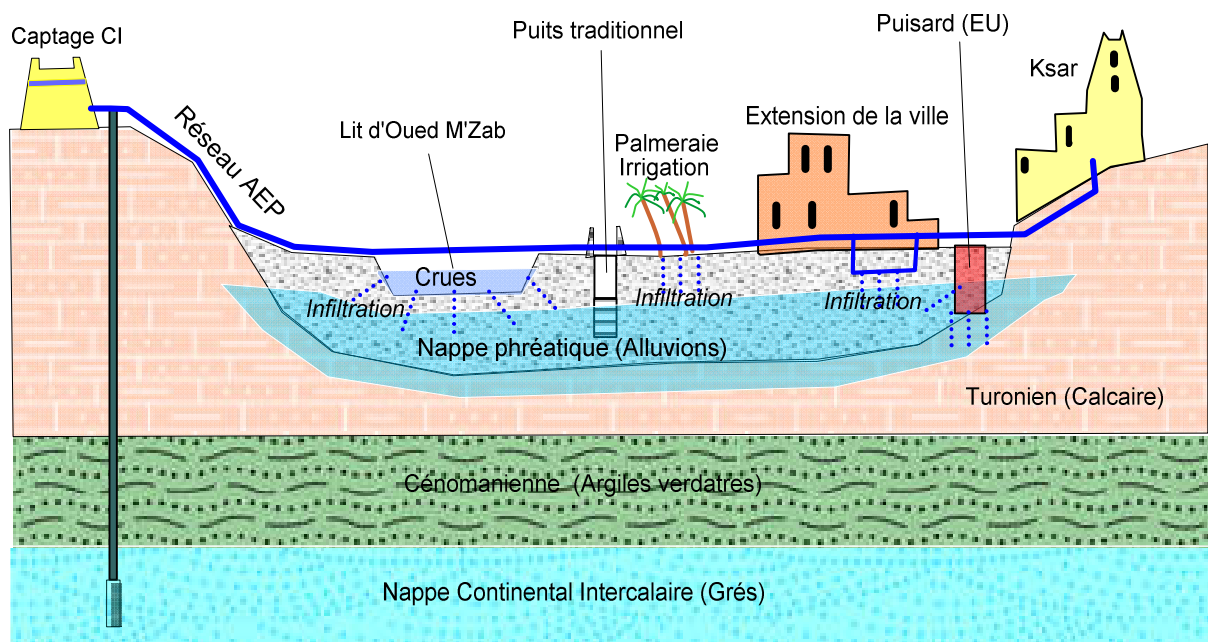
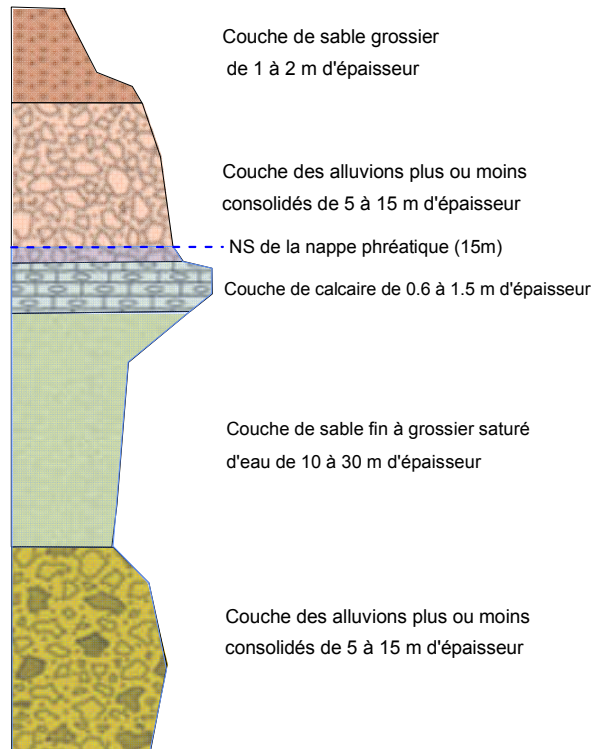


Figure V.3: Schéma explicatif des problèmes liés à la gestion de la nappe phréatique dans la vallée du M'Zab

### V.2.2. Formation lithologique et faciès hydro-chimique

Dans la région du M'Zab les nappes phréatiques s'étendent notamment dans les dépôts alluvionnaires (sable plus moins grossiers, galets et argile limoneux), et le calcaire fissuré du Turonien. Sous l'ensemble, on rencontre une épaisse couche imperméable d'argile bariolée et de marnes gypseuses d'une épaisseur d'environ de 300 à 350 mètres appelée Cénomanienn. Notons que la nappe carbonatée est considérée comme l'extension naturelle de la nappe alluvionnaire dans le calcaire, et les deux nappes ont la même surface piézométrique à travers toute la vallée.



**Figure V.4: Coupe hydrogéologique synthétique  
de la nappe phréatique de la vallée du M'Zab**

D'après l'ANRH et l'ADE de Ghardaïa, les analyses effectuées pour différentes époques (1995, 2003, 2007 et 2011) montrent la prédominance des faciès suivants :

- Eaux sulfatées calciques et sodiques au Nord-Ouest de la Chebkha du M'Zab ;
- Eaux sulfatées magnésiennes au Sud-Est de la Chebkha.

Les résidus secs augmentent dans le sens d'écoulement de la nappe, il évolue du Nord Ouest (500 mg/l) vers le Sud - Est avec des valeurs dépassant 2000 mg /l.

### V.2.3. Nappe phréatique alluvionnaire

D'une manière générale, les vallées des oueds et les dépressions sont le siège de la nappe phréatique alluvionnaire. Cette nappe est exploitée par un grand nombre de puits traditionnels en nombre de 5000 environ à travers la vallée, dont le débit varie de 3 à 5 l/s. L'eau captée par les puits d'une vingtaine de mètres de profondeur, permet l'irrigation des cultures pérennes et de palmiers dattiers. Elle est alimentée essentiellement par les eaux de pluie, les crues infiltrées et par les eaux de la nappe profonde (albien) restituées de l'irrigation et de l'alimentation en eau potable. La qualité chimique des eaux est comme suit :

- A l'amont, elle est bonne à la consommation.
- A l'aval, elle est mauvaise et impropre à la consommation, contaminée par les eaux urbaines.

### V.2.4. Nappe du Turonien

Elle est constituée de calcaire dolomitique massif d'une épaisseur de 40 à 50 mètres. On note que les premiers mètres de ces assises calcaires présentent des fissures dans lesquelles on peut trouver de l'eau. Ces eaux ont pour origine l'infiltration de la nappe alluvionnaire et les eaux météorites. La plupart des puits en amont de la vallée (Daya B D, Laadira et Touzouz) ont été creusés plus profondément que les alluvions quaternaires (de 80 à 120 m). Ils atteignent les calcaires du Turonien ; expliquant ainsi la baisse du niveau de la nappe qui est provoquée par son exploitation intensive d'une part, et les faibles apports des crues d'autre part. Le débit de ces forages peut atteindre 8 l/s (figure V.5).

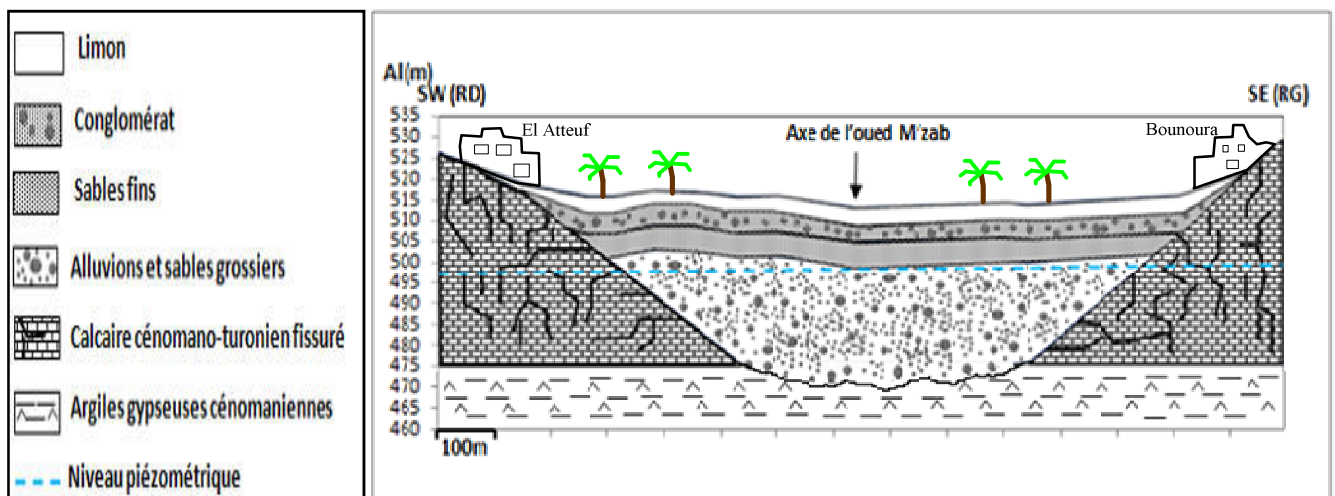


Figure V.5: Superposition des nappes superficielles dans la vallée du M'Zab

### V.2.5. Chronologie piézométrique de la nappe phréatique

#### V.2.5.1. Le réseau des puits traditionnels dans la vallée du M'Zab

D'après l'ANRH et les services d'Hydraulique de la wilaya de Ghardaïa, le nombre de puits traditionnels à travers la vallée dépasse les 5000 puits, dont la majorité date de plus de 50 ans. Un nombre important de ces puits cours un risque d'effondrement, d'autres sont mal entretenus ou quasiment abandonnés en l'occurrence les puits situés à proximité des écoulements des rejets urbains. Lors de recensement des puits depuis 2005 nous avons constaté que 230 puits seulement sont fonctionnels.

Au vu du nombre important de puits dans la vallée, et étant confronté à l'impossibilité d'analyser l'ensemble de ces puits, nous avons procédé à la sélection d'un nombre géostatistiquement tolérable. La sélection a été guidée par plusieurs critères qui sont :

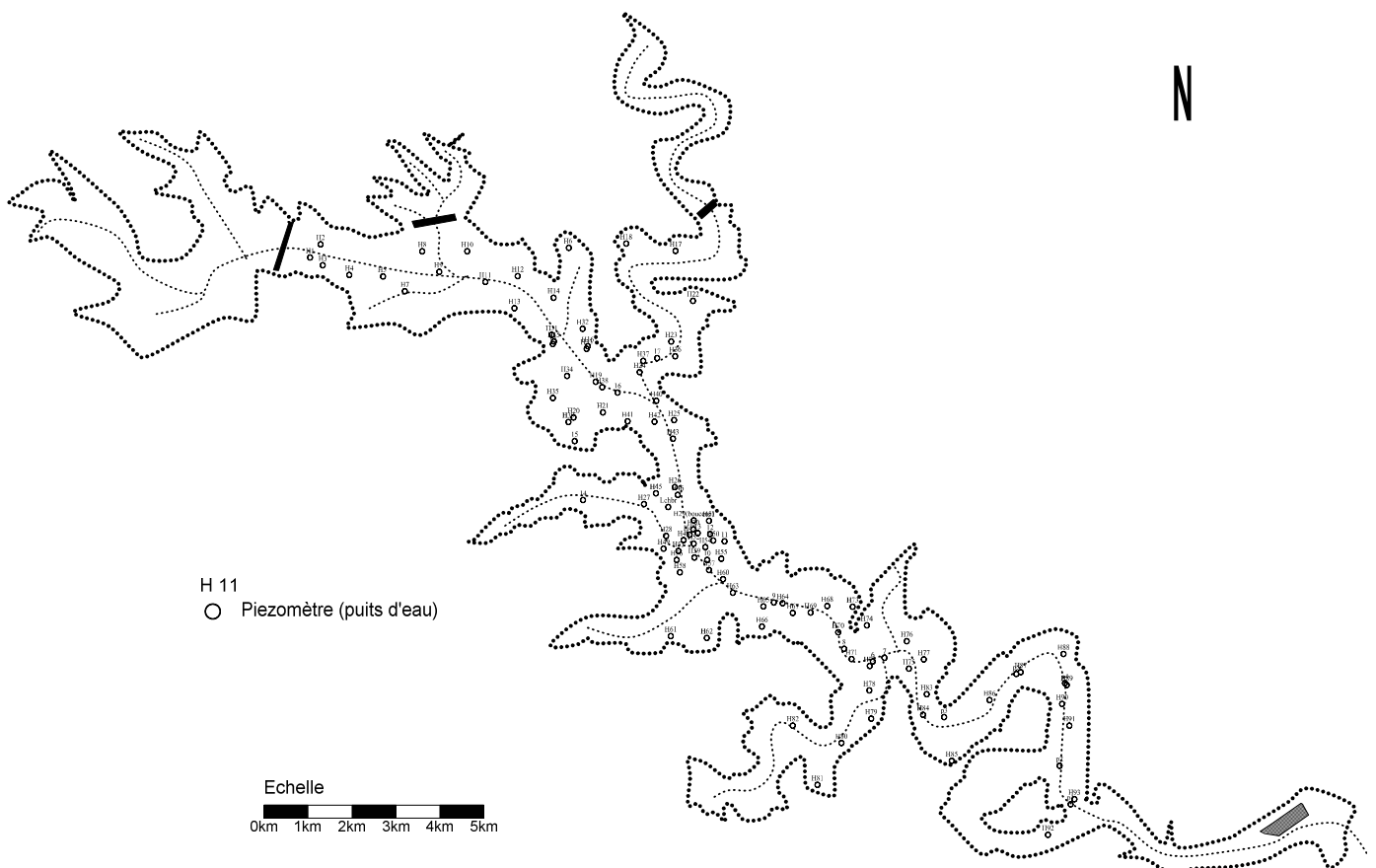
- Bonne accessibilité.
- Etat physique des puits notamment la propreté et la visibilité du niveau statique.



- Disponibilité d'un système d'exhaure notamment un pompe.
- Les puits choisies présentent un écartement entre eux de 150 à 400 m.

Ces conditions nous ont permis de sélectionner plus de 87 puits représentatifs sur toute la vallée, et qui vont faire par la suite l'objet de toutes les campagnes piézométriques. Au cours de l'étude de prospection nous avons mesurés périodiquement le niveau statique des eaux de la nappe phréatique. Selon le régime hydrologique de l'année, les mesures sur terrain nous ont permis de fixer huit (8) campagnes piézométriques de surveillance et une campagne d'échantillonnage pour l'analyse hydro-chimique :

- 1<sup>ère</sup> campagne piézométrique en avril 2005, correspondant au régime des hautes eaux.
- 2<sup>ème</sup> campagne piézométrique en septembre 2006, correspondant au régime des basses eaux.
- 3<sup>ème</sup> campagne piézométrique en avril 2007, correspondant au régime des hautes eaux.
- 4<sup>ème</sup> campagne piézométrique en septembre 2007, correspondant au régime des basses eaux.
- 5<sup>ème</sup> campagne piézométrique en avril 2008, correspondant au régime des hautes eaux.
- 6<sup>ème</sup> campagne piézométrique en mai 2011, correspondant au régime des hautes eaux.
- 7<sup>ème</sup> campagne piézométrique en mai 2013, correspondant au régime des hautes eaux.
- 8<sup>ème</sup> campagne piézométrique et d'échantillonnage hydro-chimique en novembre 2015.



**Figure V.6: Carte de situation des puits (piézomètres) dans la vallée du M'Zab**

### V.2.5.2. Mesures in-situ

Les mesures in-situ sur terrain sont:

- La position géographique des puits: cette position est déterminée à l'aide d'un GPS de terrain (Garmin).
- Le niveau statique : mesuré à l'aide d'une sonde piézométrique lumineuse de 50 ml de profondeur.

### V.2.5.3. L'approche géostatistique

La géostatistique consiste à étudier les phénomènes corrélés dans l'espace, au moyen d'un outil probabiliste : " la théorie de variables régionalisées ". Le but initial de la géostatistique est donc d'estimer (prédire, évaluer) la répartition de ces variables régionalisées dans un espace connu. Typiquement, on ne connaît que les mesures de la variable en certains points (stations de mesure) ou le long de lignes, mais on dispose également d'une information qualitative importante (géologie, conditions d'échantillonnage, expérience...). On cherche alors à prévoir une quantité qui dépend, bien évidemment, de la variable en dehors des points de données. Or les variables régionalisées étudiées en géostatistique présentent très souvent un comportement irrégulier, aléatoire, rendant la prévision incertaine. C'est en étudiant ce comportement, en dégagant la structure, puis en faisant usage de celle-ci. Alors que la géostatistique parvient à une meilleure connaissance de son phénomène.

#### A. Le logiciel Surfer 11

Le logiciel Surfer 11, conçu par Golden Software, permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données récoltées sur le terrain via DGPS. Le principe de Surfer est de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières des points  $x,y,z$ , afin de les ordonner suivant plusieurs méthodes ( inverse distance, 3 points, krigeage etc...) . C'est à partir de ces grilles que l'on pourra créer plusieurs types de cartes : base map, contour map, 3D surface, Vector ou bien d'autres...

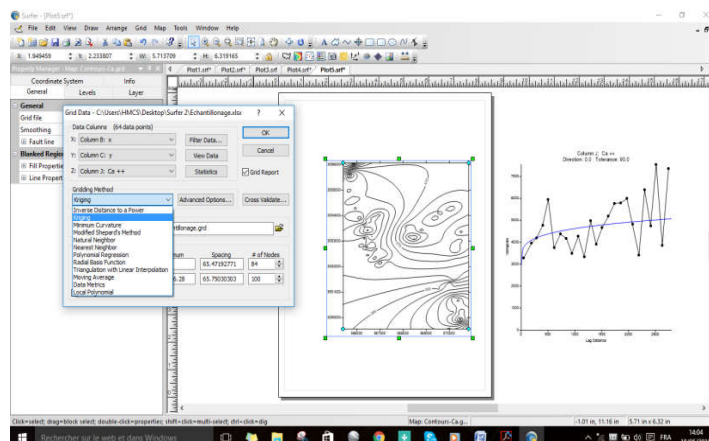


Figure V.7: Menue du Logiciel Surfer 11

## **B. Interprétation géostatistique des résultats**

L'interprétation des cartes via surfer pourrai se faire par plusieurs méthodes interpolations. Dans notre études on utilisera le krigeage (reconnue comme étant le meilleur estimateur linéaire non-biaisé). Il se base sur l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental. Cela est obtenue par l'ajustement du variogramme estimé, qui n'est pas prédictif et ne respecte le plus souvent les contraintes de krigeage, C'est pourquoi il est primordial de modéliser le variogramme estimé par une fonction continue (exponentiel, cubique, logarithmique, etc...).

### **V.2.5.4. Analyse des données piézométriques**

Une étude des chroniques piézométriques a été réalisée pour identifier les secteurs d'alimentation et celles de prélèvement de la nappe phréatique. A l'échelle de la vallée du M'Zab, aucune étude piézométrique n'a été faite, mise appart les observations locales de l'ANRH dans la période 2001-2004. Cependant, des cartographies ont été effectuées localement pour des besoins spécifiques mais aucune à l'échelle de toute la vallée. C'est pourquoi, cette étude visait la réalisation de nouvelles cartes piézométriques, à l'échelle de toute la vallée en périodes hautes-eaux et basses-eaux,.

L'utilisation de l'outil géostatistique et du logiciel Surfer.11 nous-ont permis d'exploiter les données des campagnes piézométrique de la période 2005-2015 et de dresser des cartes qui lui correspond. La dernière étape de l'étude consistait en l'appréciation du régime des fluctuations saisonnières et annuelles, ainsi que l'estimation des volumes de ces fluctuations. Parmi les différentes approches pouvant être mises en œuvre pour apprécier ces volumes, nous allons tester l'approche basée sur la réalisation d'un bilan hydrogéologique à l'échelle annuelle ou inter-annuel, s'est avérée applicable et pertinente. Une approche de modélisation mathématique pourrait également être mise en œuvre comme, mais il a été jugé que les données actuellement disponibles pourraient être insuffisantes.

### **A. La carte piézométrique d'avril 2005**

La carte réalisée à l'échelle de la vallée pour la période avril 2005 est présentée sur la figure V.8. La carte établie montre que le sens général de l'écoulement des eaux s'effectue du Nord-Ouest vers le Sud-Est, mettant nettement en évidence un drainage souterrain de Daya B. D. vers El Atteuf.

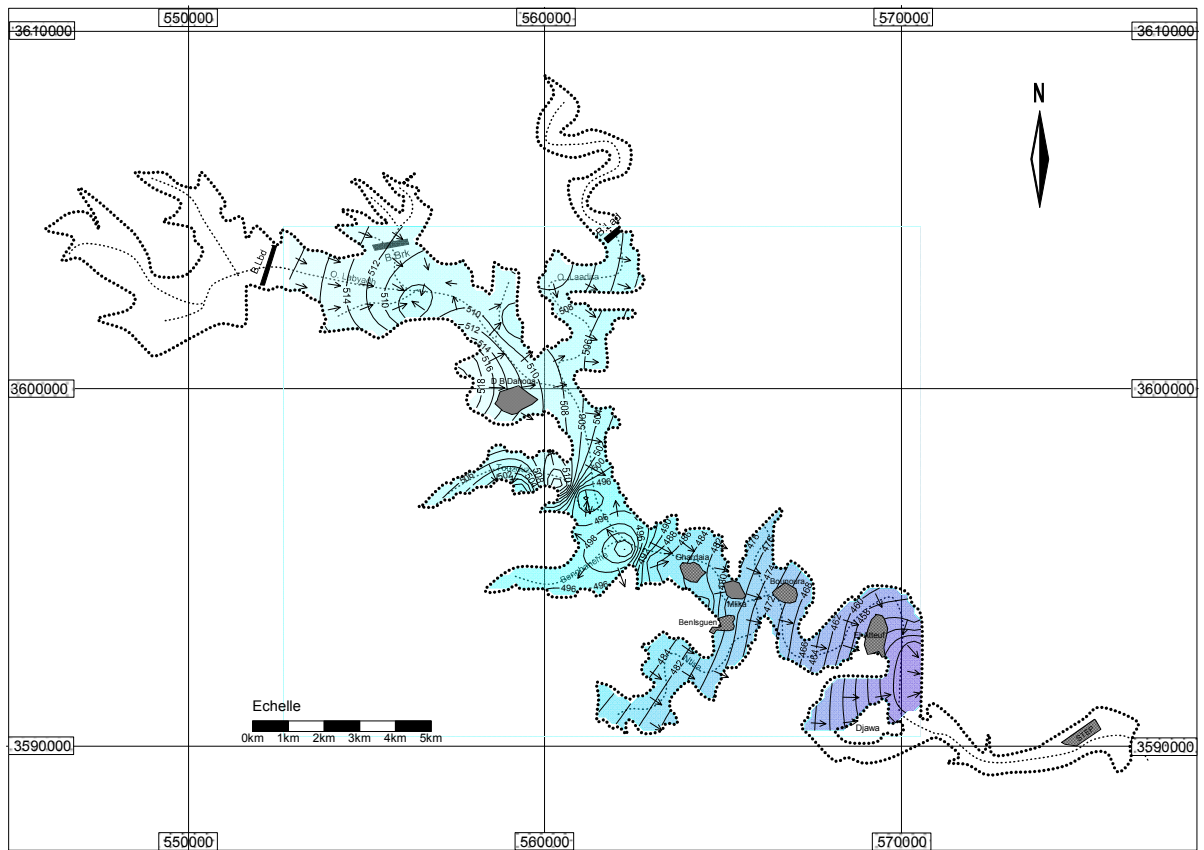


Figure V.8 : La carte piézométrique du M'Zab à la période avril 2005

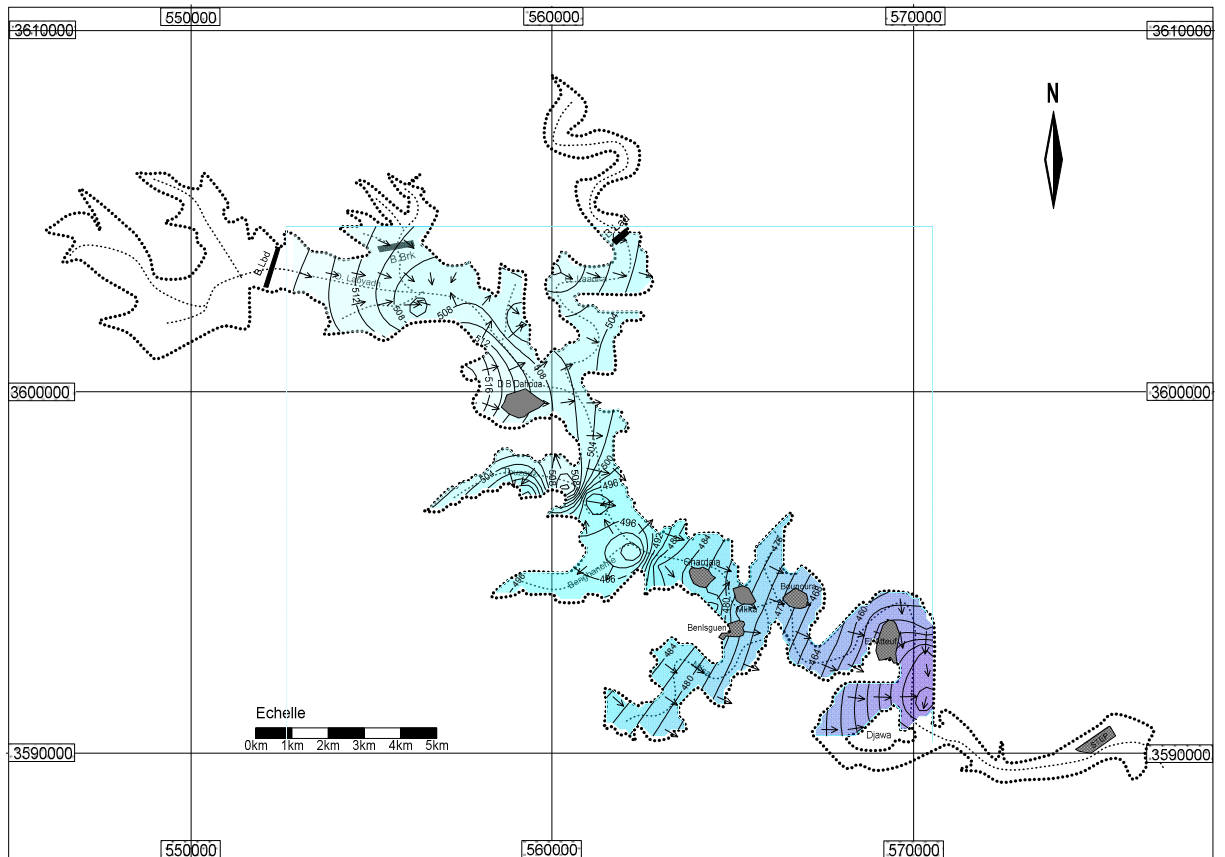


Figure V.9 : La carte piézométrique du M'Zab à la campagne septembre 2006

La côte piézométrique la plus élevée en amont est de 520 m, elle s'abaisse progressivement vers l'aval, où elle atteint un peu moins de 450 m. La carte met en évidence aussi l'existence de deux dômes de recharge dans la partie post-centrale de la vallée. Ces dômes sont le résultat de recharge intensif de la nappe phréatique par l'infiltration des eaux d'irrigation dans les deux régions : Touzouz et El Ghaba.

- Le premier est situé à la partie aval d'Oued Touzouz (Bouchéne) avec un diamètre de 600 m.
- Le deuxième est situé au niveau du confluent d'Oued M'Zab et Oued BenGhaneme (El Ghaba) avec un diamètre de 1600 m.

Quartres zones de prélèvement sont figurées comme des cônes de dépression et sont situées comme suite :

- Le premier cône est situé à l'amont de la vallée notamment au débouchement d'Oued Boubrik sur Oued Labioudh sur un diamètre de 1500 m.
- Le deuxième est de forme ellipsoïdale, d'un diamètre maximale de 600 m, situé sur la rive extrême droite d'Oued Labioudh notamment au-dessous de la city Boubrik à Daya B D.
- Le troisième, de diamètre 350, est situé en aval de Touzouz notamment au niveau de la source Bouchene (Source d'El Ghaba).
- Le quatrième est situé en aval de la vallée notamment au sud d'El Atteuf, de forme allongé (1200 m).

Le premier et le troisième cône sont dus certainement à l'action de pompage des eaux de la nappe phréatique pour l'irrigation ou pour la consommation domestique. Par le fait que l'activité agricole est sûrement absente sur la deuxième et la quatrième zone, les dépressions observées sont dues à la forte perméabilité de la formation géologique notamment l'existence du calcaire fissuré dans ces zones.

Le gradient hydraulique montre des variations qui peuvent être induites par la nature lithologique de l'aquifère (abondance des alluvions ou de marnes). Dans la partie amont de la vallée (Daya B D), le gradient est relativement faible, de l'ordre de 0.5 à 1.5%, c'est la zone d'alimentation du réservoir. A la zone aval de Touzouz et BouChene, ce gradient augmente de quatre fois pour atteindre une valeur de 4 à 5%. Cette partie médiane ayant un gradient hydraulique plus fort correspond à la transition d'un dôme d'alimentation de Touzouz vers un cône de dépression de BouChene (la source d'eau domestique). Au sud, le gradient hydraulique diminue à nouveau pour atteindre une valeur moyenne de 0.5% à El Ghaba et BenGhaneme, ensuite il augmente une autre fois près de Ksar Ghardaïa. De Ghardaïa à El Atteuf, le gradient hydraulique garde une valeur moyenne de 2%, il traduit une homogénéité de la formation alluvionnaire dans cette zone.

### **B. La carte piézométrique de septembre 2006**

La figure V.9 décrit la carte piézométrique de la période septembre 2006. La carte établie montre que le sens général d'écoulement est toujours du Nord-Ouest vers le Sud-Est. La cote piézométrique la plus élevée est observée en amont de Daya B D avec une valeur de 520 m, et le plus basse est observée en aval d'El Atteuf avec une valeur de 445 m. Les deux dômes dus à la recharge par infiltration des eaux d'irrigation illustrées durant la campagne avril 2005 sont toujours présentes sur la région de Touzouz et El Ghaba, en gardant les mêmes délimitations.

Les zones de prélèvement figurées durant la campagne avril 2005, ont gardées les mêmes emplacements, mais avec des dimensions réduites, notamment pour le premier cône situé au débouchement d'Oued Boubrik sur Oued Labioudh, et qui a été réduit énormément pour atteindre un diamètre de 300 m. Cela traduit le déclin de l'activité agricole dans la zone de Daya B D durant l'année 2006.

Le gradient hydraulique à Daya B D est toujours faible avec une fourchette de 0.5 à 1%. A la zone aval de Touzouz et BouChene, le gradient hydraulique augmente jusqu'à 5% (zone de transition entre alimentation et prélèvement). Vers Ghardaia, le gradient hydraulique diminue pour atteindre une valeur de 0.5%, ensuite il augmente vers Bounoura et El Atteuf pour se stabilise à 2% environ.

### **C. La carte piézométrique d'avril 2007**

La figure V.10 présente la carte piézométrique de la campagne avril 2007. La carte établie montre que le sens l'écoulement est toujours du Nord-Ouest vers le Sud-Est. La cote piézométrique la plus élevée est de 518 m à Daya B D, et le plus basse est de 448 m en aval d'El Atteuf. Les dômes de recharge illustrées dans les campagnes précédentes notamment la campagne avril 2005, sont présentent dans les même endroits et avec les même délimitations. Les cônes de prélèvement aussi ont gardées les mêmes emplacements, et les mêmes dimensions par rapport à la campagne avril 2005.

Le gradient hydraulique à l'amont de la vallée (Daya B D) est de l'ordre de 1%. A la zone aval de Touzouz et BouChene, le gradient augmente jusqu'à 5%, puis il diminue jusqu'à 0.5 % dans les environs de Ghardaia, ensuite il augmente une autre fois dans la zone entre Bounoura et El Atteuf pour une valeur de 2% environ.

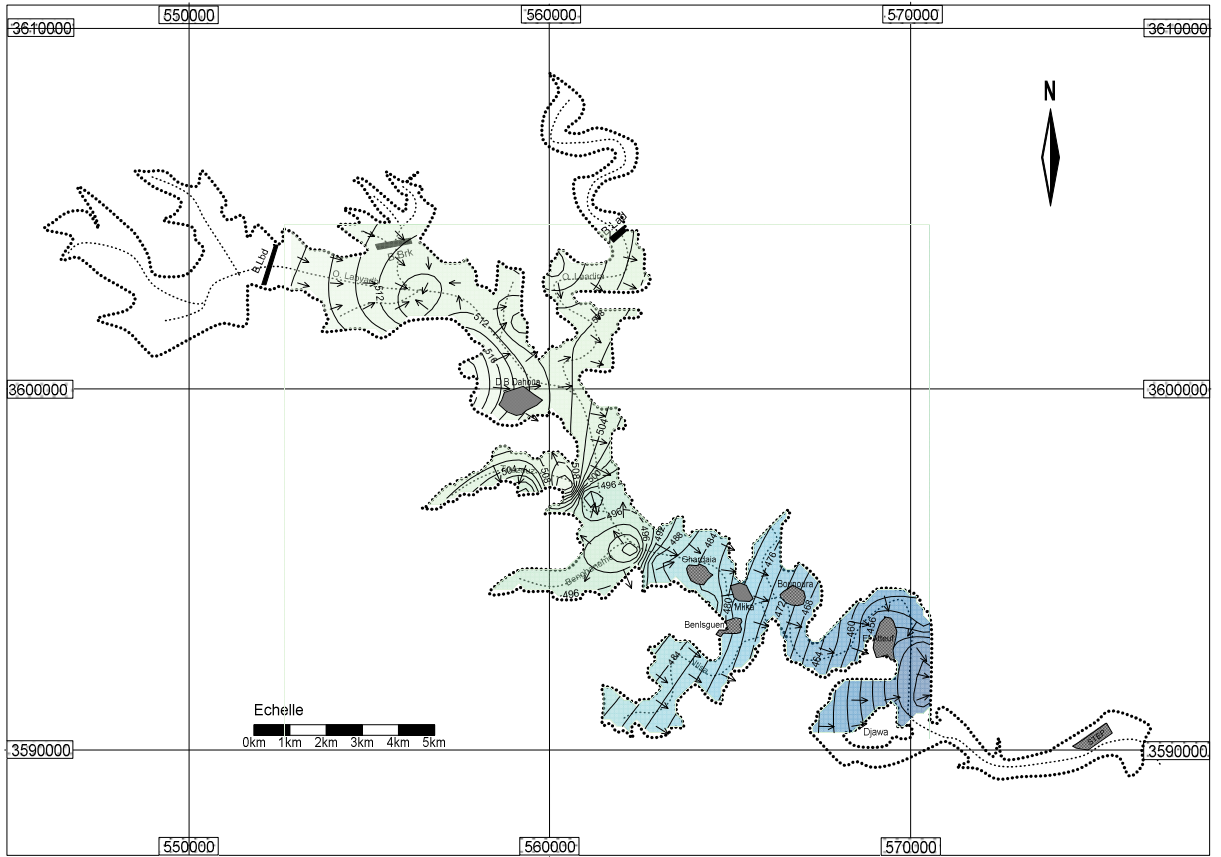


Figure V.10 : La carte piézométrique du M'Zab à la période avril 2007

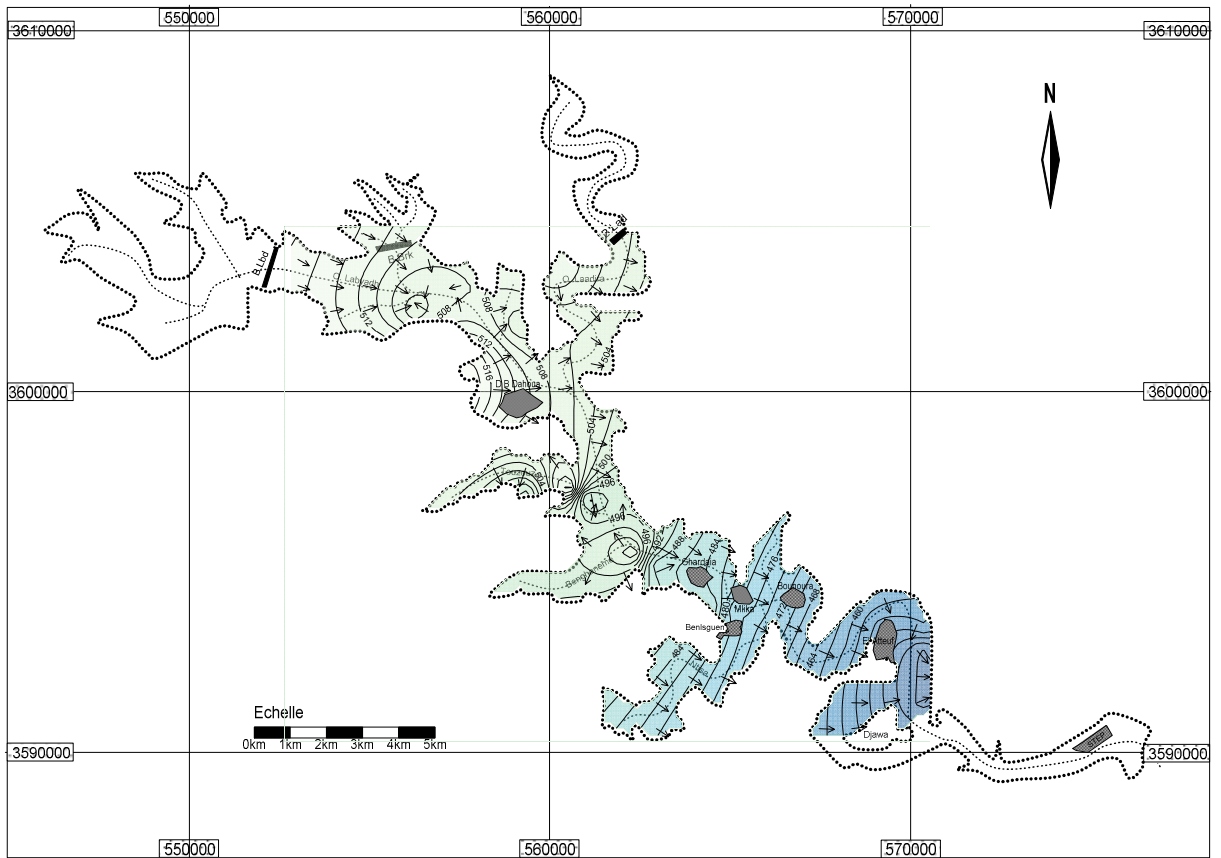


Figure V.11: La carte piézométrique du M'Zab à la campagne septembre 2007

#### **D. La carte piézométrique de septembre 2007**

La carte piézométrique de cette campagne est présentée sur la figure V.11. Cette campagne garde les mêmes caractéristiques piézomorphologique que la carte septembre 2006 notamment :

- Le sens d'écoulement général est de Nord-Ouest vers le Sud-Est;
- La côte piézométrique la plus élevée est situé en amont avec une valeur de 518 m, et la plus basse est situé en aval pour une valeur d 445 m.
- Deux dômes de recharge existeront sur la carte, la première est située en aval d'Oued Touzouz (BouChene) avec un diamètre de 600 m, et la deuxième à El Ghaba avec un diamètre de 1600 m.
- Trois cônes de prélèvements sont présents sur la carte, le premier est situé au débouchement d'Oued Boubrik sur Oued Labioudh avec un diamètre de 350 m, le deuxième est situé en aval de Touzouz (Source d'El Ghaba) avec un diamètre de 400 m, et le troisième est situé en aval d'El Atteuf, avec une forme allongé de 1200 m.
- Le gradient hydraulique à Daya B D est toujours faible (0.5 à 1%). Le gradient augmente jusqu'à 5% à Touzouz-BouChene (zone de transition entre alimentation et prélèvement). A Ghardaia, le gradient hydraulique diminue à 0.5%, ensuite il augmente vers Bounoura et El Atteuf pour se stabilise à environ 2%.

La diminution de la taille des cônes de prélèvements, et le faible gradient hydraulique durant cette campagne, traduit la diminution considérable des prélèvements sur la nappe phréatique et par conséquent le déclin de l'activité agricole dans la vallée notamment sur la partie amont (Daya B D, Touzouz, Laadira et El Gaba).

#### **E. La carte piézométrique d'avril 2008**

La carte piézométrique de cette campagne est présentée sur la figure V.12 La carte piézométrique de la campagne avril 2008 présente les mêmes allures morphologique, ainsi que une amplitude de variation du niveau piézométrique et gradient hydraulique similaires à celles décrites en avril 2005. La seule distinction : est la présence d'un petit décalage des courbes piézométriques de 30-100 m qui se convergent vers l'aval de la vallée. Ce décalage traduit une faible remontée des eaux durant le cycle 2005-2008 avec une lame d'eau moyenne sur toute la vallée de 1.5 m, soit 0.5 m/an. La variation des volumes saisonnières et annuelles est estimée au paragraphe V.2.5.5 : Fluctuations piézométriques.



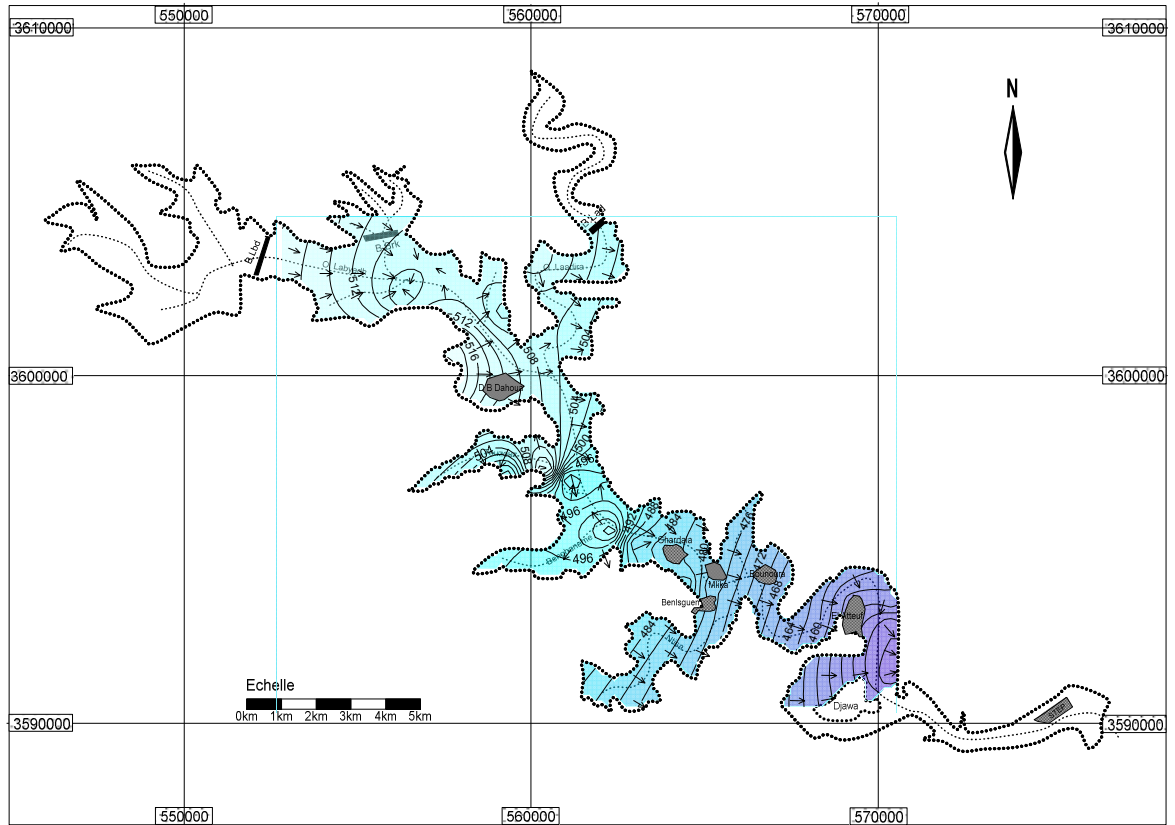


Figure V.12 : La carte piézométrique du M'Zab à la période avril 2008

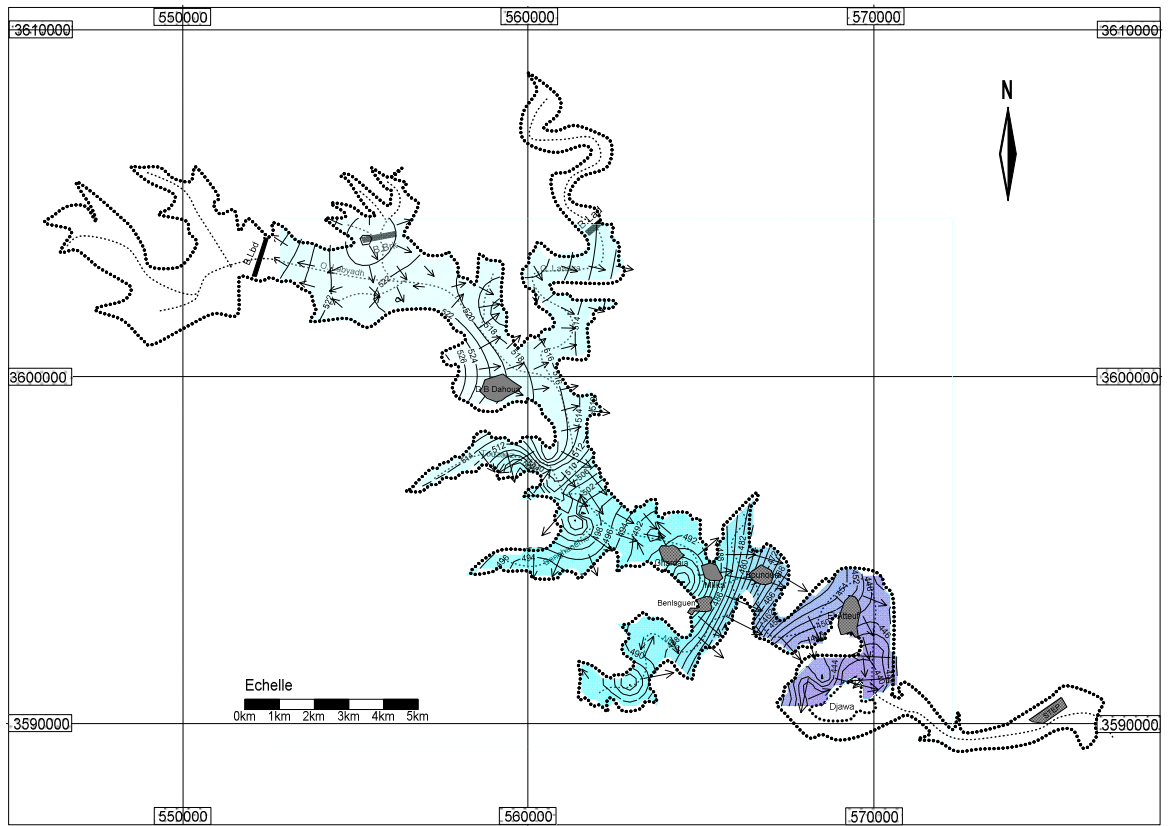


Figure V.13 : La carte piézométrique du M'Zab à la campagne mai 2011

### F. La carte piézométrique mai 2011

La figure V.13 présente la carte piézométrique de la campagne mai 2011. Cette carte au contraire aux autres, montre plusieurs sens d'écoulement sur le long de la vallée :

- En amont, il y a un écoulement souterrain à partir du barrage de Boubrik vers le Barrage Labioudh (Sud-Est au Nord-Ouest), avec un gradient hydraulique de 0.5 % et une cote piézométrique maximale de 528 m.
- Sur la palmeraie de Daya B D, le sens d'écoulement est de Sud-Ouest vers le Nord-Est, avec un gradient hydraulique de 1% en moyenne et une cote piézométrique moyenne de 516 m.
- A partir du confluent Touzouz-Laadira-Labioudh (Amlaga), le sens d'écoulement est du Nord-Ouest vers le Sud-Est, avec un gradient hydraulique qui varie de 0.5 % à El Ghaba (500 m) passant à 5% entre Ghardaïa et Bounoura (484 m), pour se stabiliser à 2% sous à El Atteuf (445 m).

La carte met en évidence aussi l'existence de cinq dômes de recharge sur la partie amont et centrale de la vallée.

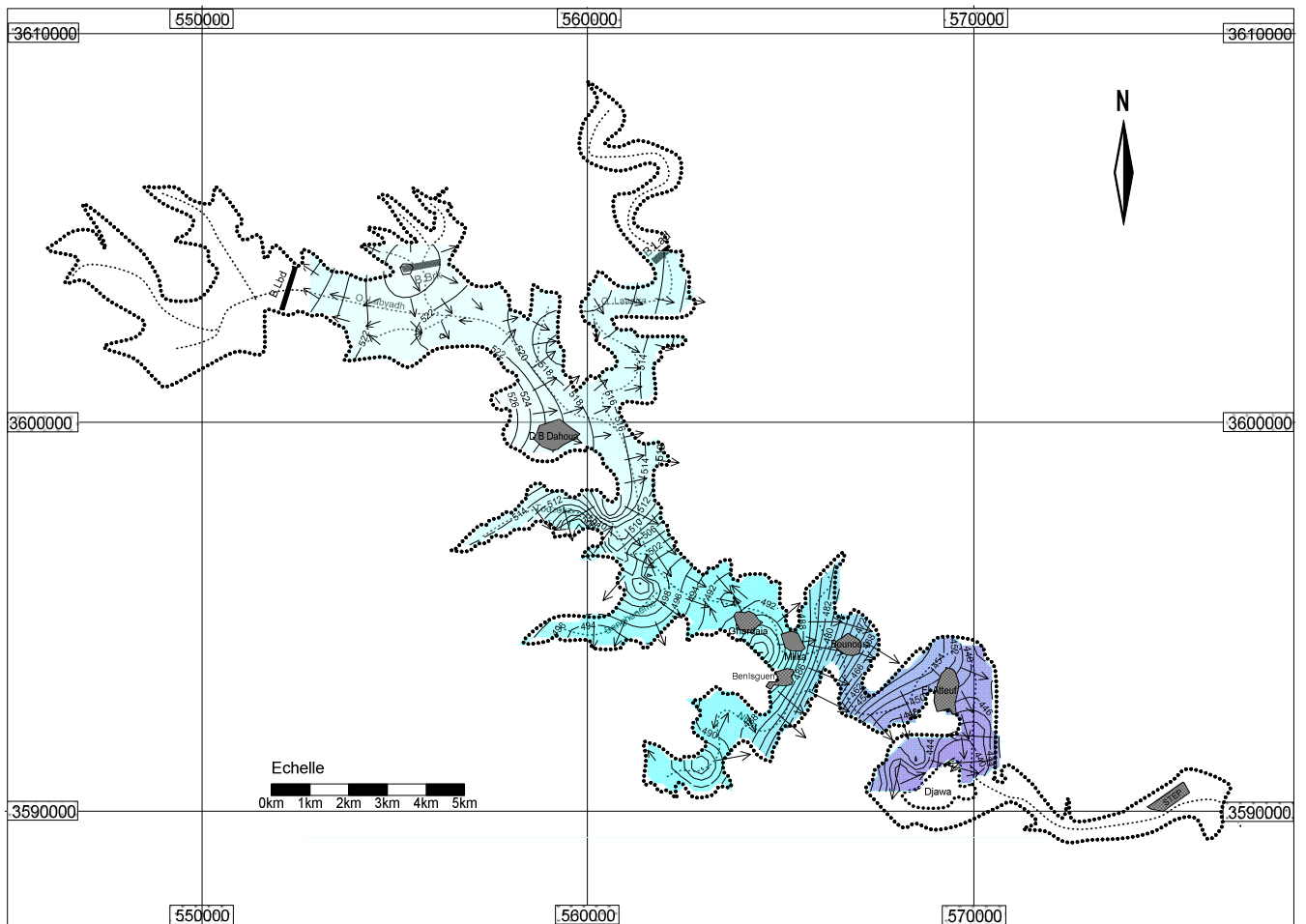
- Le premier dôme est situé au barrage Boubrik à l'amont de Daya B D, avec un diamètre de 1200 m.
- Le deuxième dôme est situé à la partie aval d'Oued Touzouz (Bouchéne) avec un diamètre de 500 m.
- Le troisième dôme est situé au confluent d'Oued M'Zab et Oued BenGhaneme (El Ghaba) avec un diamètre de 1500 m.
- Le quatrième dôme est situé entre Ghardaïa et Mlika, d'un diamètre de 1200 m.
- Le cinquième dôme est situé au niveau d'Oued Ntissa (amont de Benisguen), avec un diamètre de 1500 m.

Le premier dôme est dû à l'infiltration des eaux des crues cumulées dans la retenue de Boubrik après la faible crue de 22 avril 2011 qui a caractérisé l'amont du M'Zab. Tandis-que, les dômes 2, 3 et 5 résultent de la recharge de la nappe phréatique par l'infiltration des eaux d'irrigation. Par contre le quatrième dôme est dû probablement aux infiltrations des eaux domestiques (AEP) et les fuites du système d'assainissement des quartiers populaires de la vallée, notamment Ghardaïa et Thnia.

Cinq zones de prélèvement sont figurées comme des cônes de dépression et sont situées comme suit:

- La plus importante est située au près du barrage Labioudh, elle est due à l'action du pompage des eaux de la nappe phréatique pour le profit de l'activité agricole à l'amont de Daya B D.
- La deuxième de forme ellipsoïdale, d'un diamètre de 600 m, et située sur la rive droite d'Oued Labioudh au-dessous de la city Boubrik à Daya B D. Elle est due à la forte perméabilité de la nappe dans cet endroit.
- La troisième, de diamètre 500, est située en aval de Touzouz notamment à la retenue de Bouchene. Elle est due au pompage de la Source d'El Ghaba.
- Le quatrième cône de diamètre : 300 m, est situe juste en amont de Ghardaia (Ahbas Djdid), il est dû aussi à l'action de pompage dans la palmeraie de Ghardaia.
- Le cinquième cône est situé en aval de la vallée notamment au sud d'El Atteuf, de forme allongée (1200 m), cela est dû probablement à la forte perméabilité des formations géologiques et l'existence du calcaire fissuré sous ces zones.

**G. La carte piézométrique mai 2013**



**Figure V.14: La carte piézométrique du M'Zab à la campagne mai 2013**

La figure V.14 représente la carte piézométrique de la campagne de mai 2013. Cette carte montre plusieurs sens d'écoulement à savoir :

- En amont, il y a un écoulement souterrain radial à partir du barrage de Boubrik et celle de Labioudh. Généralement c'est un écoulement de Nord vers le Sud, avec un gradient hydraulique de 0.3 % et une cote piézométrique maximale de 515 m.
- De la palmeraie de Daya B D à la palmeraie d'Ahbas Djdid de Ghardaïa, le sens d'écoulement est généralement d'Est vers l'Ouest, avec un gradient hydraulique qui varie de 0.5% Daya B D à 3% à d'Ahbas Djdid. La cote piézométrique sur cette zone varie de 500 à 478 m.
- En aval de Ghardaia jusqu'à Bounoura, le sens l'écoulement est devenu à nouveau du Nord vers le Sud, dévoile ainsi un dôme d'alimentation important situé en bas de Mlika. Le Gradient hydraulique sur cette zone est important, il est de l'ordre de 6%, avec une cote piézométrique de 476 m, celui-ci est dû probablement au rétrécissement géologique de Mlika, ou à la faible perméabilité de la nappe dans cette zone.
- De Bounoura à El Atteuf le sens d'écoulement est de Nord-Ouest vers le Sud-Est, avec un gradient hydraulique plus ou moins stable au environ de 2%, et une cote piézométrique minimale de 444 m.

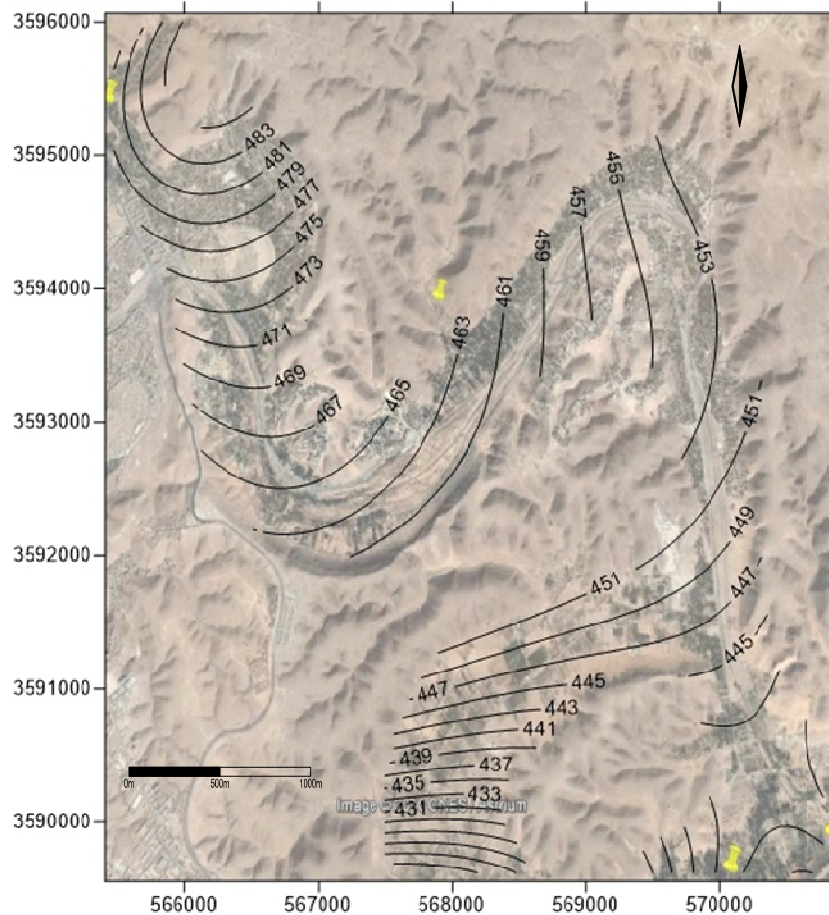
La carte met en évidence aussi l'existence de deux dômes de recharge dans la partie amont et centrale de la vallée :

- Le premier dôme est situé entre le barrage Labioudh et le barrage Boubrik en amont de Daya B D, avec un diamètre de 2500 m. Celui-ci est dû aux infiltrations des eaux des crues stockées dans les retenues.
- Le deuxième dôme est situé entre Ghardaia et Milka avec un diamètre de 800 m. Il est dû aux infiltrations des eaux domestiques (fuites réseaux AEP et assainissement) sur les quartiers populaires tel que Ghardaia, Benisguen, Mlika et Thnia.

La forme des courbes piézométriques révèle de la contribution des affluents d'Oued M'Zab à la recharge de la nappe phréatique notamment par les Oueds: Touzouz, BenGhanem, Ntissa et Azouil. Les zones de prélèvement sont mal figurées sur cette carte, mais au moins on peut évoquer les deux grandes zones à la vallée qui sont déjà illustrées sur les cartes précédentes :

- La zone du prélèvement la plus importante qui est situé à l'amont de Daya B D, elle est due à l'activité agricole intense qui profite de la nappe phréatique.
- La deuxième est situé à la source d'El Ghaba, et qui est bien alimentée par le confluent Laadira-Touzouz-Labioudh (Amlagua).

#### H. La carte piézométrique novembre 2015



**Figure V.15: Carte du niveau piézométrique de la nappe phréatique sur Bounoura et El Atteuf (11/2015)**

Cette campagne a été limitée aux régions aval de la vallée : Bounoura et El Atteuf. La carte piézométrique novembre 2015 montre une légère remontée par rapport à la campagne de mai 2013, notamment à la zone d'El Atteuf. La carte montre aussi un sens d'écoulement qui suit la sinuosité de la vallée. En aval de Bounoura le sens d'écoulement est de Nord-Ouest vers le Sud-Est, ensuite il se tourne vers le Nord-Est près de Ksar El Atteuf. En aval vers la palmeraie, le sens d'écoulement devient de Nord vers le Sud. A l'intérieur du méandre morphologique d'El Atteuf (Djawa), le sens d'écoulement est d'Ouest vers l'Est. Après le barrage d'El Atteuf, le sens prend la direction d'Est jusqu'à la SETP de Ghardaïa. La distribution des courbes du niveau montre que le gradient hydraulique est plus fort en aval qu'en amont, avec une valeur de 0.05

m/m contre 0.01 m/m en amont, ce qui confirme l'existence des couches très perméables en aval de la nappe phréatique.

#### **V.2.5.5. Fluctuations piézométriques**

Tout type de fluctuation est évaluée par déduction de deux relevés piézométriques concernés à chaque point de mesure. Par exemple : pour cartographie la fluctuation saisonnier (hautes eaux-basses eaux) de l'année hydrologique 2005-2006, on déduit le relevé piézométrique de septembre 2006 à cel d'avril 2005, il résulte une lame d'eau (en m) dans chaque piézomètre, soit en déficit soit en excès. On à utilisée une gamme de colleurs pour distingues la nature de cette fluctuation. La gamme jaune-orange utilisée pour distinguer le **déficit** entre deux relevés, tandis que la gamme bleu ciel -bleu foncé pour distinguer **l'excès** ou la remontée des eaux.

Les cartes piézométriques établies, permettent d'examiner les fluctuations possibles de la nappe phréatique de la vallée du M'Zab. On distingue deux types de fluctuations :

- Fluctuations saisonnières ou interannuelles.
- Fluctuations annuelles ou cycliques.

Rappelant ici, que pour évaluer les fluctuations saisonnières, il convient de comparer les relevés de deux campagnes de saisons différentes (avril 2005-septembre 2006). Les fluctuations annuelles peuvent être évaluées, en comparant deux campagnes de même saison (avril 2005 – avril 2007).

#### **A. Fluctuation saisonnière**

La localisation des différentes zones piézomètres dans la vallée, ainsi que l'évolution du niveau statique de la nappe sont reportés sur les figures V.16-19. Le tableau V.2 récapitule l'évaluation des fluctuations saisonnières examinées sur les cartes réalisées. On note ici que le logiciel AutoCAD2013 est très utile pour planimètre les zones piézométriques sur une carte callée à l'échelle réal. La surface totale examinée sur la vallée est de **7005 Ha**, soit 70 km<sup>2</sup>.

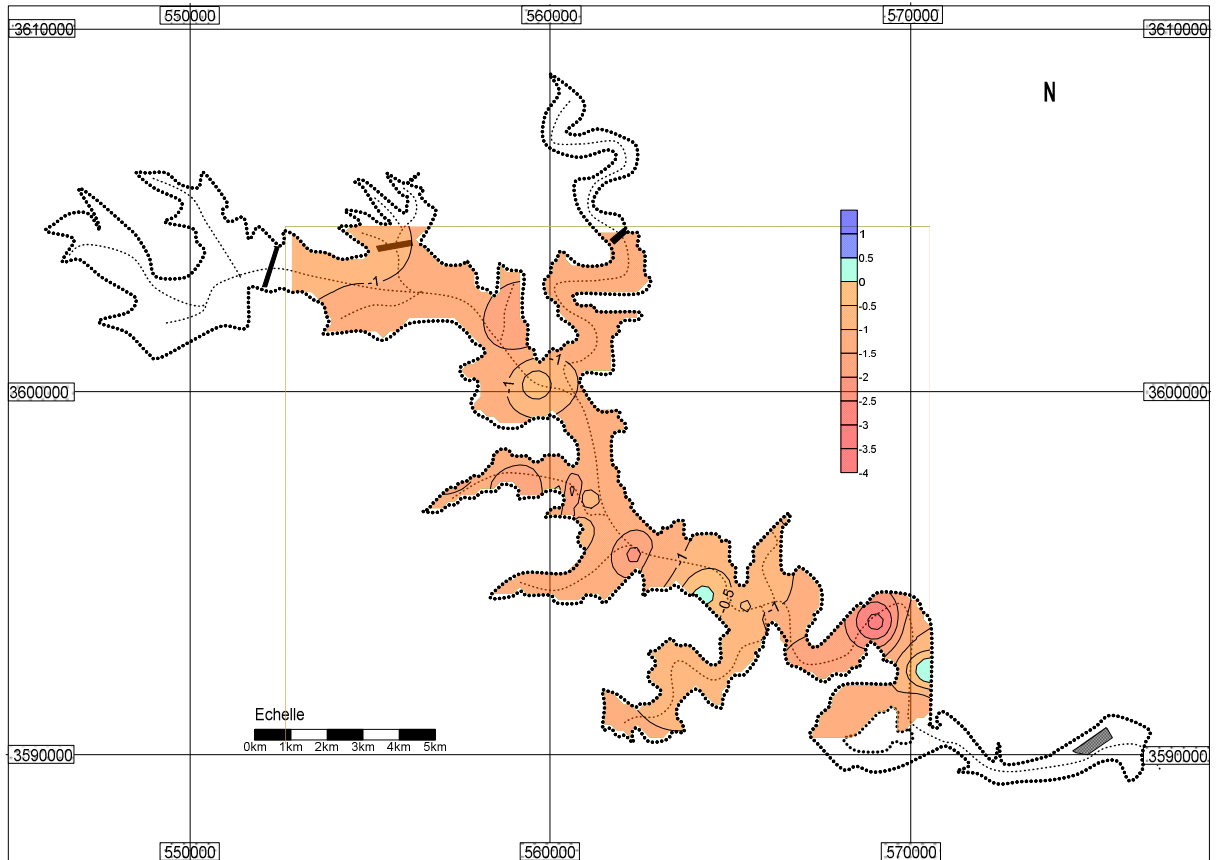


Figure V.16: Carte de la fluctuation saisonnière avril 2005-septembre 2006 (Basses eaux)

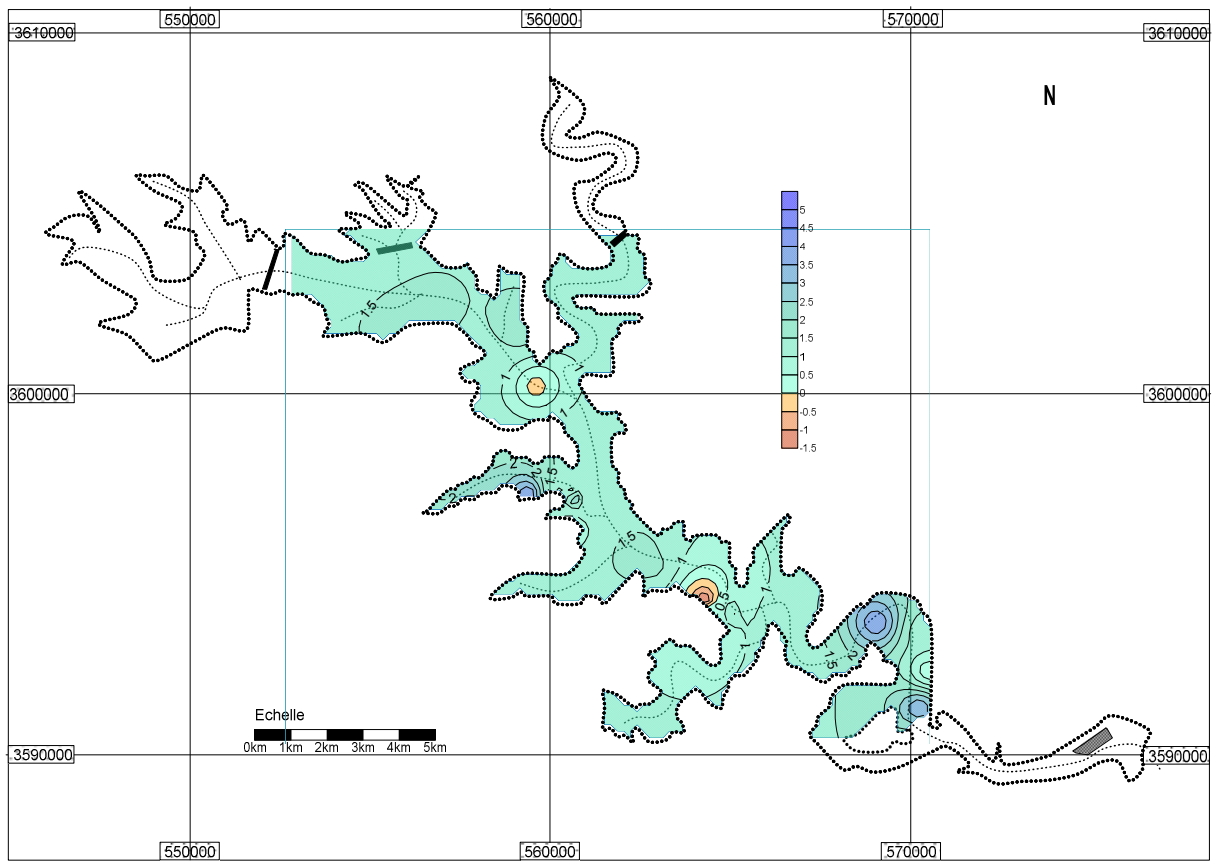


Figure V.17 : Carte de la fluctuation saisonnière septembre 2006- avril 2007 (Hautes eaux)

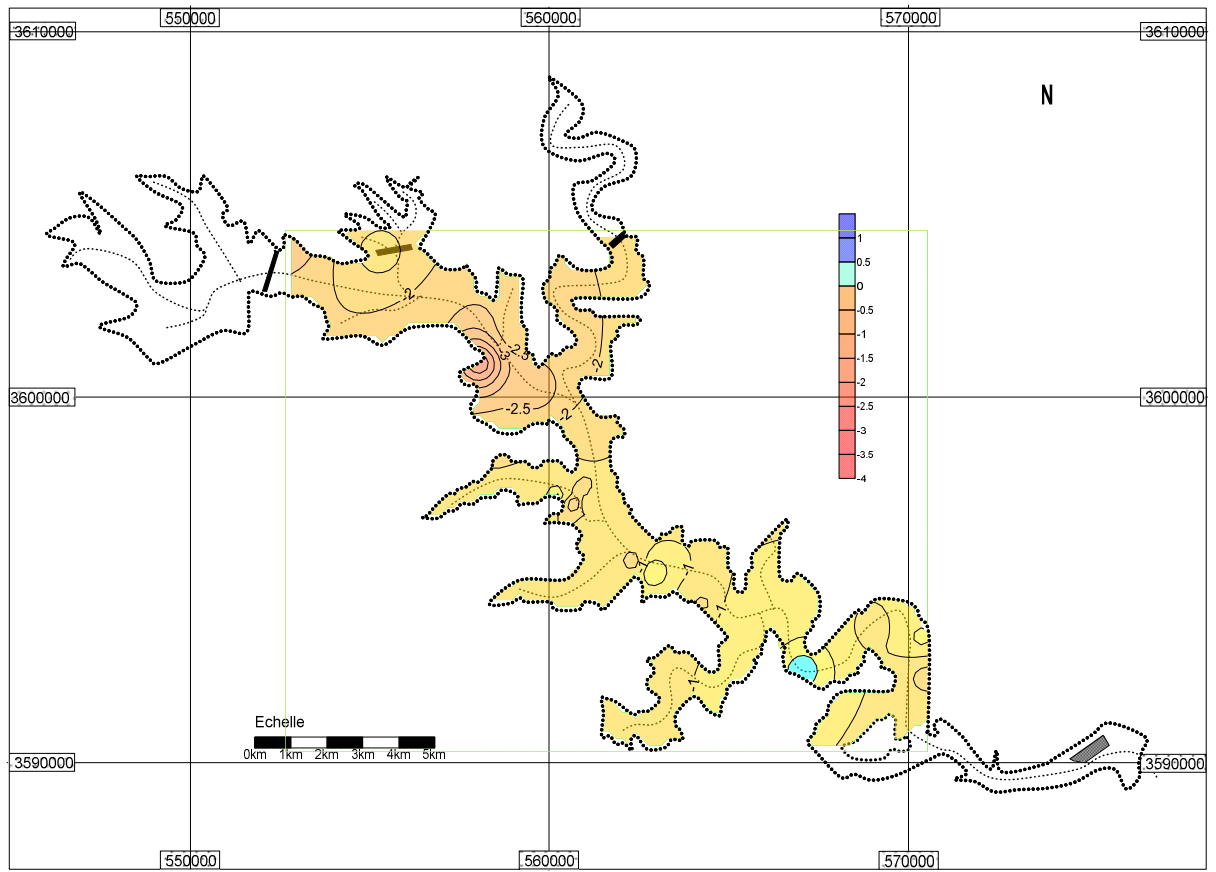


Figure V.18: Carte de la fluctuation saisonnière avril 2007-septembre 2007 (Basses eaux)

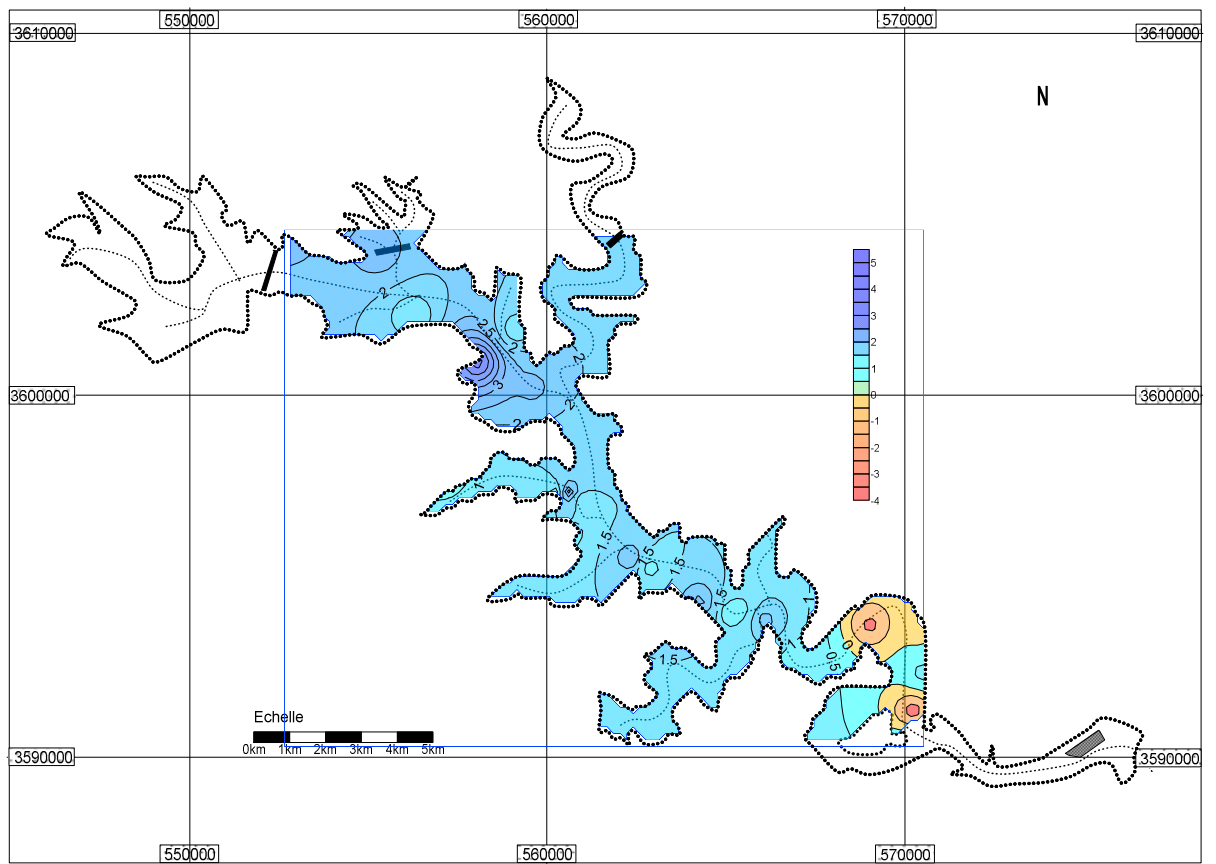


Figure V.19: Carte de la fluctuation saisonnière septembre 2007- avril 2008 (Hautes eaux)



Tableau V.2: Calcul des volumes de la fluctuation saisonnière de la nappe phréatique du M'Zab sur la période 2005-2008

Cycle saisonnières	fluctuation(m)	Surface piézométrique Ha (.10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	Volume de la roche réservoir Hm <sup>3</sup> (.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Volume de réserve fluctuée Hm <sup>3</sup> (10 <sup>6</sup> Hm <sup>3</sup> ) (porosité eff = 15%)	Localisation	Lame d'eau moyenne fluctuée (m)
04/2005-09/2006 <i>Basses eaux</i>	-4...-3m	12	0.12-	14.02 -	Daya B D et El Ghaba Centre de la vallée El Ghaba et Aval d'El Atteuf,	La nappe phréatique a baissée de 100 cm en moyenne sur toute la vallée.
	-3...-2m	144	1.44-			
	-2...-1m	4761	47.61-			
	-1... 0 m	2141	21.41-			
	0... +5m	36	0.36+			
Totale saison			70.20-			
09/2006-04/2007 <i>Hautes eaux</i>	-2...-1m	8	0.08-	13,75+	Centre ville Ghardaïa Aval de Daya B D Centre de la vallée Daya, El Ghaba, El Atteuf Benghanem, aval de Bounoura	Une remontée générale de 98 cm sur toute la surface de la nappe
	-1... 0 m	55	0.55-			
	0...+1m	989	9,89+			
	+1...+2m	5426	54,26+			
	+2...+3m	409	4.12 +			
	+3...+4m	116	1,17 +			
Totale saison			68,77+			
04/2007-09/2007 <i>Basses eaux</i>	-4...-3m	40	0.40-	13,85-	El Ghaba et Daya B D Centre et aval de la vallée Aval de Bounoura	Une basse générale de 99 cm
	-3...-2m	113	1,16-			
	-2...-1m	3167	31,67-			
	-1... 0 m	3644	36,44-			
Totale saison			69,25-			
09/2007-04/2008 <i>Hautes eaux</i>	-2...-1m	18	0.18-	13,47+	El Atteuf Centre de la vallée El Ghaba et Daya B D	Une remontée générale de 96 cm
	-1... 0 m	117	1,17-			
	0...+1m	888	8,88+			
	+1...+2m	4081	40,81+			
	+2...+3m	1759	17,59+			
	+3...+4m	90	0.90+			
Totale saison			67,33+			

**Discussion des cartes :**

L'analyse de la fluctuation saisonnière sur la période avril 2005- avril 2008 montre une alternance saisonnière plus ou moins stable entre la période Hautes eaux et la période Basses eaux, avec une lame d'eau moyenne alternée de 1 m sur le quasi total la nappe. Le volume d'eau moyen fluctué sur cette période est de 13.75 Hm<sup>3</sup>.

On remarque bien que l'écart entre les hautes eaux et les basses eaux à Daya B D et El Atteuf est plus fort qu'aux parties intermédiaires de la vallée. Cet écart est attribuée au fait qu'à Daya B D il existe des barrages de recharges et de la zone agricole intensive. Par contre la zone d'El Atteuf constitue l'exutoire naturel perméable de la nappe phréatique.

L'analyse sur la période avril 2005- avril 2008 fait apparaitre aussi que la variation piézométrique est en bonne relation avec l'activité agricole (arrosage, drainage). Par conséquence l'allure piézométrique est bien claire en amont et en aval de la vallée. Par contre la relation de la piézométrie avec les apports pluviométriques est non significative durant la période considérée, qui a marquée un état de sécheresse jusqu'à la fin de 2008 (voir chapitre II climatologique). Donc sur la période 2005-2008, la remontée et la baisse d'eau saisonnière sont liées directement à l'activité agricole en amont, et aux conditions hydrogéologiques en aval.

**B. Fluctuation annuelle ou cyclique**

La fluctuation cyclique est illustrée sur les cartes V.20-23 et le tableau V.3.

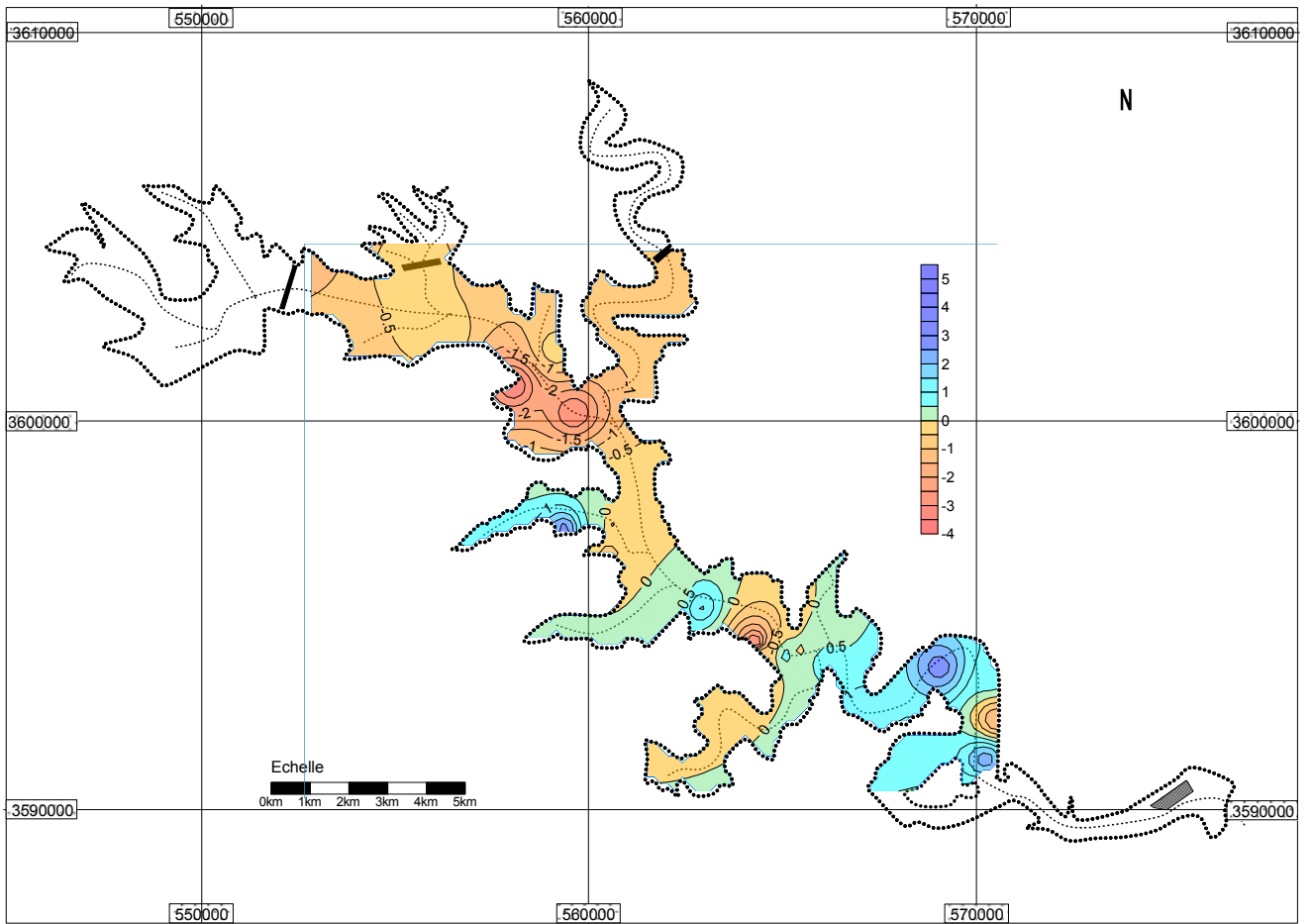


Figure V.20: Carte de la fluctuation annuelle septembre 2006-septembre 2007

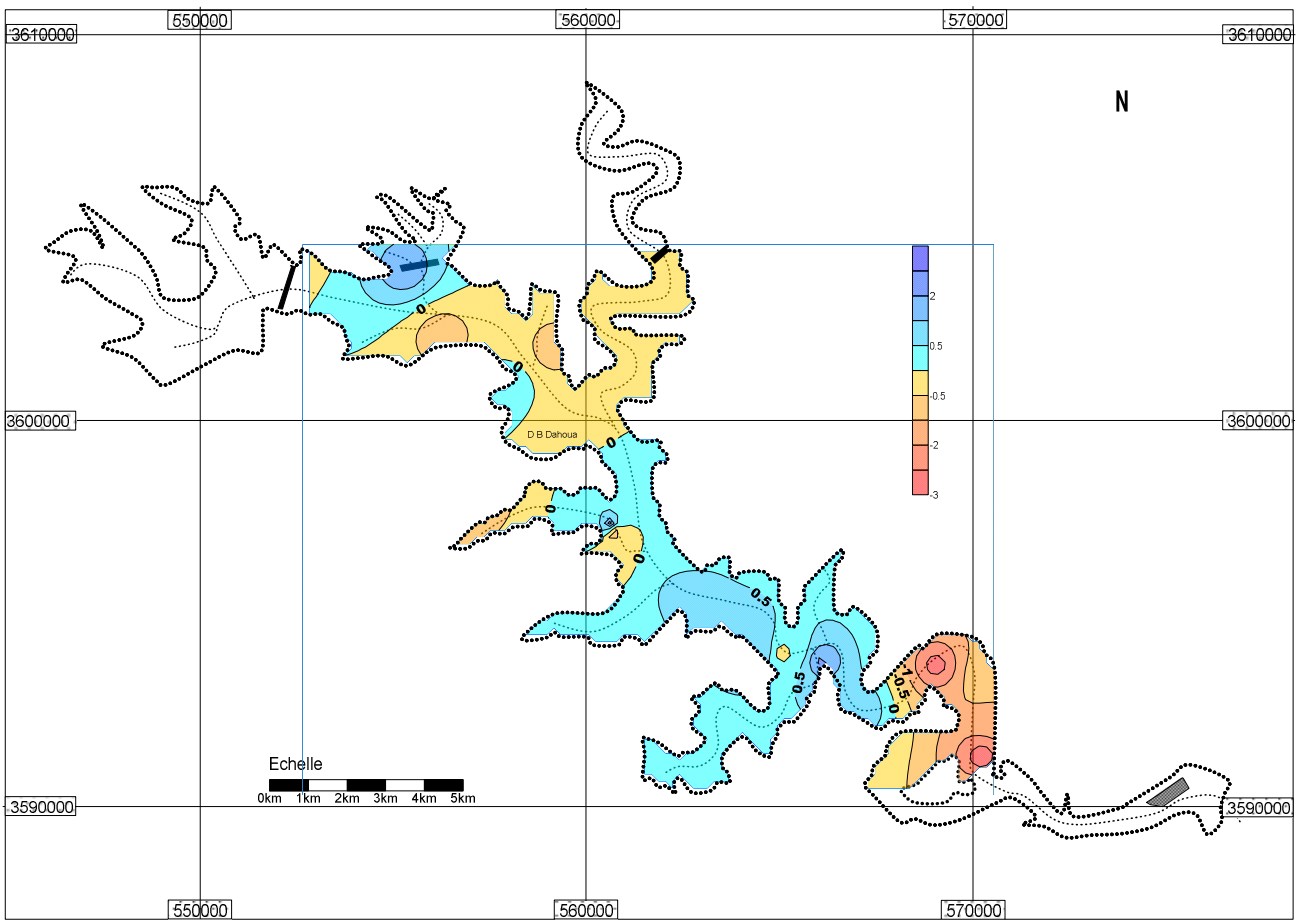


Figure V.21: Carte de la fluctuation annuelle avril 2007- avril 2008

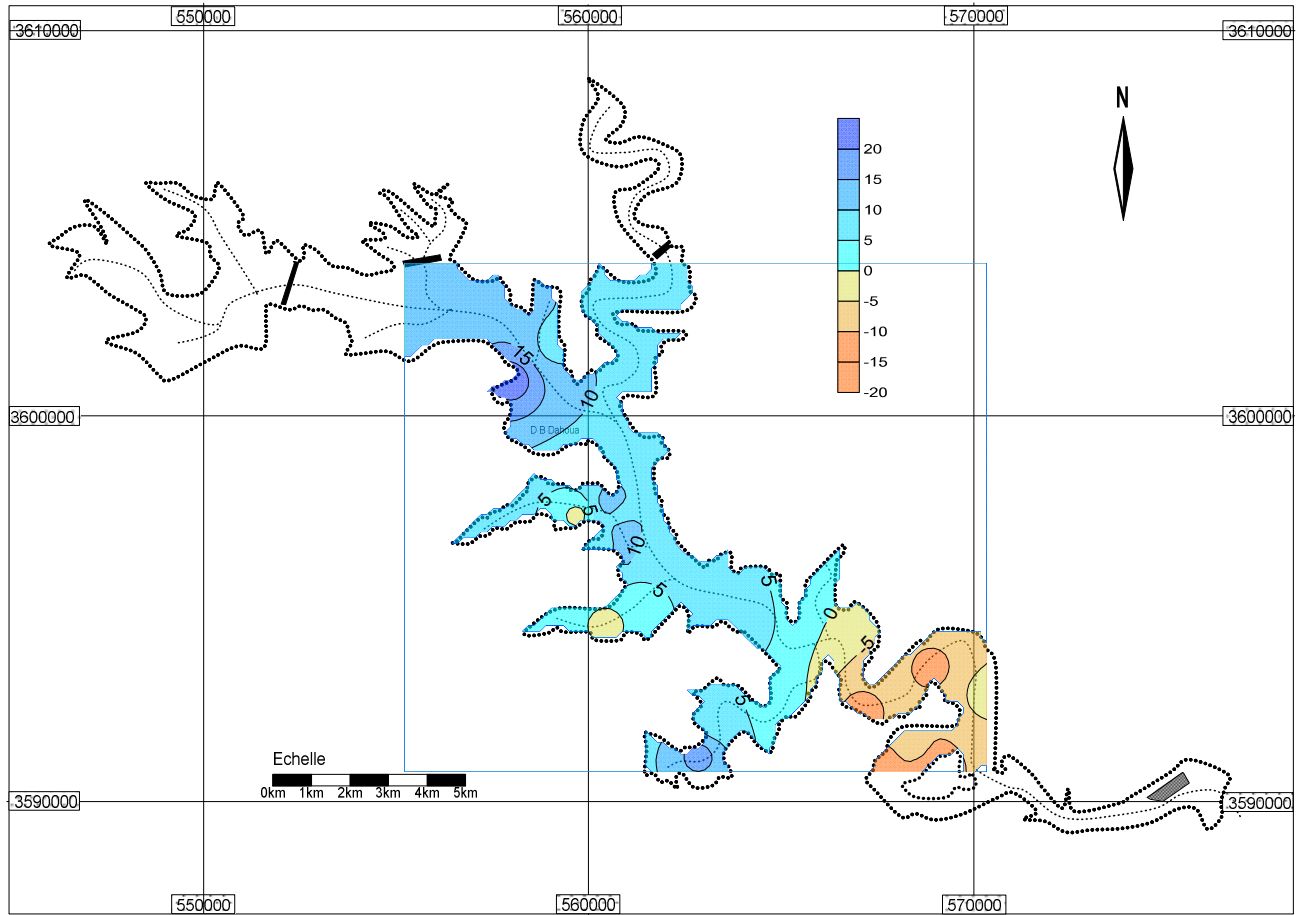


Figure V.22: Carte de la fluctuation annuelle Avril 2008-Mai 2011

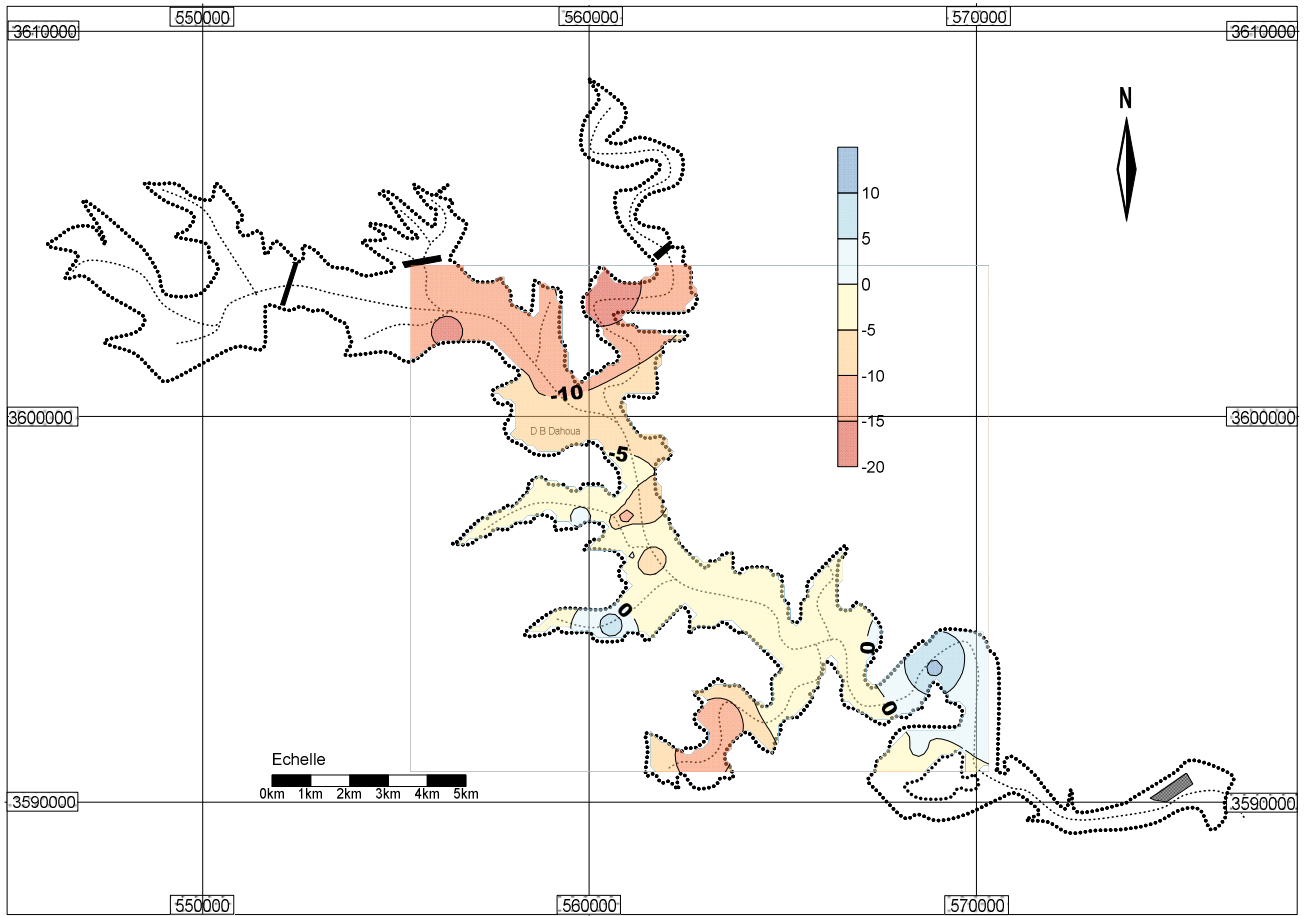


Figure V.23: Carte de la fluctuation annuelle Mai 2011- Mai 2013

Tableau V.3: Calcul des volumes de la fluctuation annuelle de la nappe phréatique du M'Zab sur la période 2006-2013

Cycle annuel	fluctuation(m)	Surface piézométrique Ha (.10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	Volume de la roche réservoir Hm <sup>3</sup> (.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Volume de réserve fluctuée Hm <sup>3</sup> (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) (porosité eff = 15%)	Localisation	Lame d'eau moyenne fluctuée (m)
09/2006-09/2007	-3...-2m	220	2.20	- 4.74	Daya, amont d'El Ghaba, Ghardaia, Ntissa et El Atteuf	La nappe phréatique a baissée de 34 cm en moyenne sur toute la vallée.
	-2...-1m	1494	- 14.94			
	-1...0m	2965	- 29.65			
	0...+1m	1747	17.47		Boukhalkhal, El Ghaba Bounoura et aval d' El Atteuf	
	+1...+2m	452	4.52		Amont et aval d' El Atteuf	
	+2...+3m	111	1.11			
<b>Totale année</b>			<b>-23.70</b>			
04/2007-04/2008	-2...-1m	50	- 0.50	-0.76	Amont et aval d' El Atteuf	Une baissée générale de 5 cm sur toute la surface de a nappe
	-1... 0 m	3,640	- 36.40		Daya, amont d'El Ghaba	
	0...+1m	3,167	31.67		Amont de Daya et Centre de la vallée	
	+1...+2m	144	1.44			
<b>Totale année</b>			<b>-3.79</b>			
04/2008-05/2011	-15...-10m	210	10.50-	+49.77	Aval de Bounoura et El Atteuf	Une remontée générale de 355 cm
	-10...-5m	627	31.35-		BenGhaneme, Bounoura	
	-5...0m	176	8.80-		Ghardaia et BenGhaneme	
	0...+5m	872	43.60		Laadira, Daya et El Ghaba	
	+5...+10m	3740	187.00		Amont de Daya et Ntissa	
	+10...+15m	1378	68.90			
<b>Totale année</b>			<b>248.85</b>			
05/2011-05/2013	-20...-15m	188	9.40-	-54.73	Daya, Laadira et Ntissa	Une baissée de 391 cm
	-15...-10m	1248	62.40-		Aval de Daya et Ntissa	
	-10...-5m	1067	53.35-		Centre de la vallée (El Ghaba)	
	-5...0m	3735	186.75-			
	0...+5m	548	27.40		El Atteuf et BenGhaneme	
	+5...+10m	200	10.00			
	+10...+15m	17	0.85			
<b>Totale année</b>			<b>-273.65</b>			

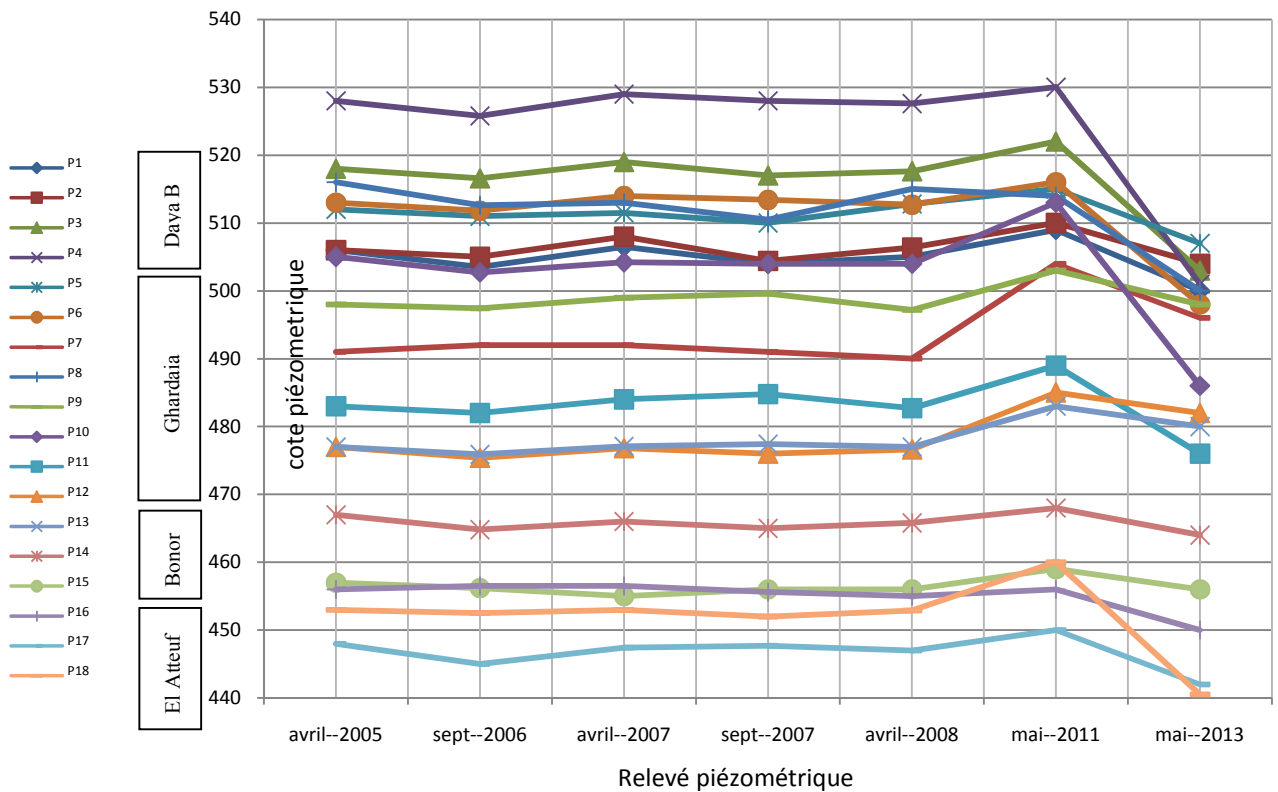
### Discussion des cartes :

L'évolution de la fluctuation annuelle de la nappe phréatique fait apparaître que la piézométrie est fortement impactée par : la variation d'apports pluviométriques, de l'activité humaine (urbaine et agricole) et les conditions hydrodynamiques de la nappe alluvionnaire en aval. Elle incite à faire les commentaires suivants :

- **Période 2006-2008:** se caractérise par une baisse généralisée du niveau piézométrique. Cette baisse est bien remarquable à la première année 2006-2007, avec une lame d'eau moyenne fluctuée de 34 cm et un volume de 4.74 Hm<sup>3</sup>. Par contre à la deuxième année 2007-2008, la baisse a mesurée une lame d'eau moyenne de 5 cm et un volume de 0.76 Hm<sup>3</sup>. La première phase de cette baisse importante correspond à l'écart entre deux périodes hautes eaux, elle est liée à la période de sécheresse qui a touchée la région. La deuxième phase de baisse, est en rapport avec la mise en eau d'irrigation sur les périmètres agricoles en amont de la vallée. Ceci peut être expliqué par le faite que la baisse est bien localisée sur les régions agricoles de la vallée : Daya B D, Ntissa, El Ghaba et l'aval d'El Atteuf.
- **Période 2008-2011 :** se caractérise par une remontée importante due aux fortes crues qui ont caractérisées cette période : la crue d'octobre 2008 et celle de mars 2011. La remontée moyenne enregistrée sur cette période est de 355 cm, soit un volume d'eau en excès de 49.77 Hm<sup>3</sup>. La remontée est observée sur la partie amont et centrale de la vallée notamment à Daya B D et Ntissa, là ou se trouve les ouvrages de rétention et Ahbas (petits barrages) qui favorisent la recharge et l'infiltration des eaux vers la nappe phréatique. Par contre, en aval d'El Atteuf présente une baisse due probablement au drainage naturel de la nappe phréatique vers l'aval.
- **Période 2011-2013:** est caractérisée par une piézométrie d'une nouvelle phase d'abaissement jusqu'à la fin de l'année 2013, cette baisse était de 4 à 1 m/an, avec un volume moyen de 54.73 Hm<sup>3</sup>. Cette baisse du niveau piézométrique est en relation d'une part à la période de sécheresse qui va commencer de 2012 jusqu'a présent, et d'autre part à l'exploitation intense pour l'irrigation sur la période considéré. D'après la carte de la figure V.23, les zones les plus touchées sont à potentiel agricole important tel que Daya B D, El Ghaba et Ntissa. Par contre les zones de remontée sont localisées à l'amont d'El Atteuf.

### V.2.5.6. Synthèse chronologique

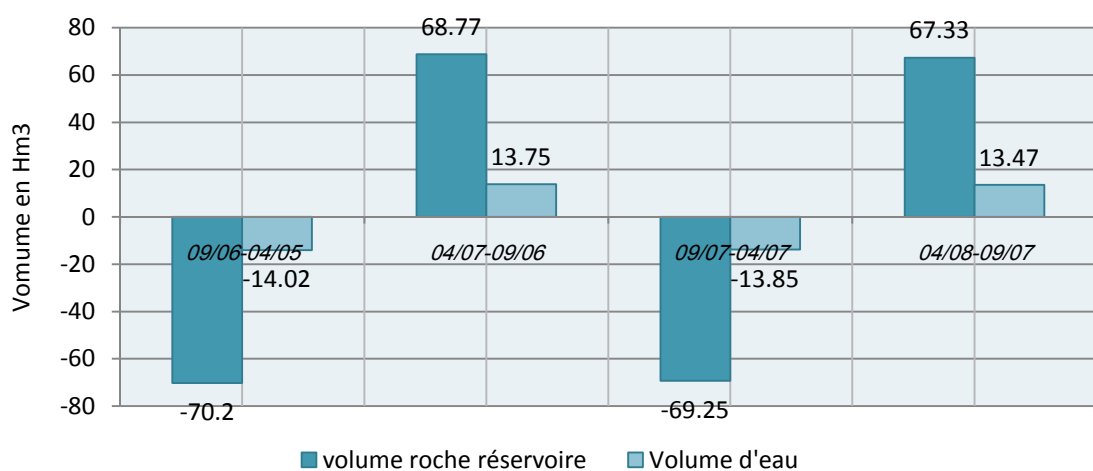
Afin de faire une corrélation objective, nous avons introduit un graphique représentant l'évolution de la piézométrie dans le temps pour des piézomètres représentatifs à travers la vallée



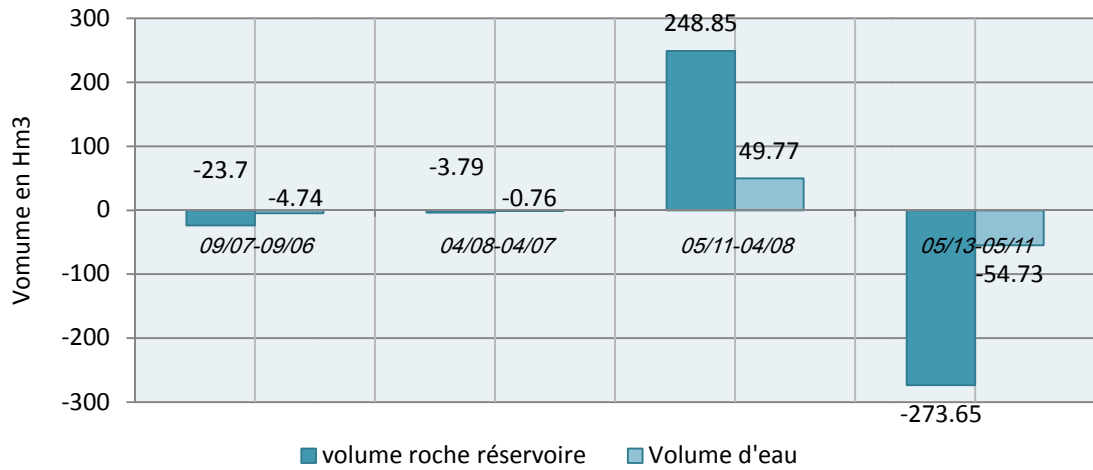
(de Daya B D à El Atteuf).

**Figure V.24: Evolution dans le temps du niveau d'eau dans les piézomètres de différentes localités dans la vallée du M'Zab.**

Nous pouvons aussi représenter la chronique des fluctuations saisonnières et cycliques moyennes sur la période du suivi :



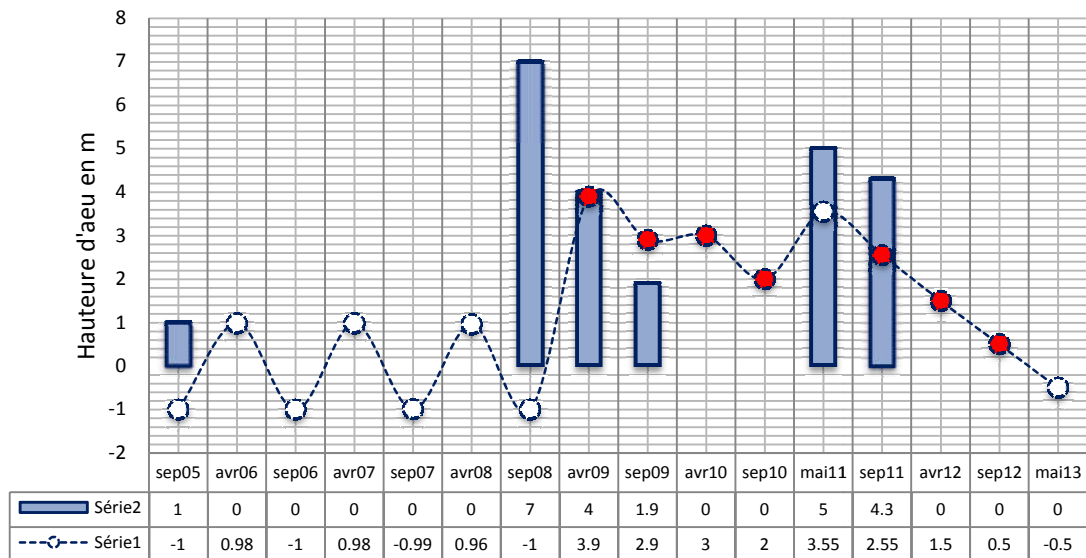
**Figure V.25: Fluctuation moyenne saison aire de la période 2005-2008**



**Figure V.26: Fluctuation moyenne cyclique de la période 2006-2013**

Généralement les courbes présentent une certaine stabilité piézométrique durant la période 2005-2008, avec une variation de faible amplitude (0.5 à 2.5 m). Par contre la période 2008-2013 présente une amplitude piézométrique importante de 1 à 30 m environ, cette amplitude est due aux événements météorologiques qui ont caractérisées cette période, ajoutant à celle-ci la présence de sécheresse allant de 2012 jusqu'à présent.

Sur le graphique suivant nous allons chercher à décrire la relation entre la fluctuation moyenne de la nappe phréatique et les événements météorologiques notamment la précipitation journalière maximale :



**Figure V.27: Fluctuation moyenne mesurée et simulée de la nappe phréatique de la vallée du M'Zab sur la période 2005-2013.**

- Série 1: variation de la fluctuation en m;
- Série 2: P<sub>Jmax</sub> divisée par 1/10 mm.
- Points rouges sont les valeurs estimées et Points blancs sont les valeurs mesurés.



Pour cerner la fluctuation piézométrique de la nappe phréatique, il est nécessaire de disposer un levé piézométrique sur une longue période. Comme ces mesures n'existent pas, ou qu'ils sont incomplets sur quelques saisons, nous allons les rechercher à travers d'un travail d'enquêtes sur terrains notamment auprès des agriculteurs utilisant la nappe phréatique comme sources d'alimentation à Daya B D et El Ghaba. Malgré l'étendu partiel de cette l'enquête, mais elle reste la seule source d'information pour compléter les données manquantes sur la piézométrie durant la période 2008-2013.

L'interpolation des niveaux piézométriques estimés d'après cette enquête a permis de déceler une hausse piézométrique de 4 m en moyenne en avril 2009 sur le quasi-total de la nappe phréatique, elle correspond au crue d'octobre 2008. Les baisses d'eau en septembre 2009, 2010, 2011 sont liées à la perte d'eau de la nappe phréatique pour combler l'irrigation estivale. La hausse d'eau d'avril 2010, bien qu'elle est moins importante que celle d'avril 2009, elle correspond à la recharge piézométrique des précipitations importantes de l'année humide 2008-2009. Cependant la période d'avril 2011 est caractérisée par des précipitations relativement élevées, s'accompagnent d'une remontée plus ou moins importante (3.55 m). Ceci peut être expliqué par le fait que les avers de l'année 2011, n'étaient pas homogènes sur toute la vallée du M'Zab, (la station de Noumeratte, située à 18 km au sud de la vallée a enregistré 5 mm/j).

En dehors de cette période, nous avons constaté une baisse continue du niveau d'eau à partir de l'année 2012. Cette baisse est bien visible à la campagne de Mai 2013, et qui peut être expliquée par la présence de sécheresse qui caractérise la région du Sahara septentrional durant cette période, ajoutant à cela la surexploitation de la nappe phréatique pour l'irrigation en amont de la vallée (Daya B D, El Ghaba et Ntissa).

### **V.3. Conclusion et synthèse**

Dans la région du M'Zab la nappe phréatique est contenue dans les formations de Quaternaire et le calcaire du Turonien. Elle s'exploite par des puits traditionnels donnant de faibles débits, utilisés souvent pour l'irrigation des palmeraies dans la vallée. L'étude piézométrique de la nappe phréatique sur la période 2005-2015, montre que la piézométrie est en relation d'une part aux apports météorologiques et d'autre part à la recharge de la nappe par les infiltrations des eaux d'irrigation et les eaux usées urbaines. La baisse et la hausse de la nappe phréatique ont une amplitude variable dans l'espace, et dans le temps. Cette variabilité est en relation directe et étroite avec les apports météorologiques et les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe.

L'analyse de la fluctuation saisonnière sur la période d'avril 2005- avril 2008 montre une stabilité saisonnière entre la période Hautes eaux et la période Basse eaux, avec une lame d'eau moyenne alternée de 1 m et un volume moyen de 13.75 Hm<sup>3</sup>. La fluctuation annuelle de la nappe

phréatique est en relation étroite avec les variations pluviométriques et les apports météorologiques. On peut distinguer trois périodes successives :

- Une période de sécheresse allant de 2006 jusqu'à la fin de 2008, avec une baisse d'eau de 40 cm sur toute la nappe, soit un volume perdu de 5 Hm<sup>3</sup>.
- Une période humide allant de 2009 jusqu'à le début de 2012, se caractérise par une remontée importante due aux fortes crues de cette période, avec une lame d'eau moyenne de 355 cm et un volume d'eau en excès de 49.77 Hm<sup>3</sup>.
- Une autre période sécheresse allant de 2012 jusqu'à la fin de 2015, qui caractérise une nouvelle phase d'abaissement avec une amplitude de 4 à 1 m/an et un volume moyen perdu de 54.73 Hm<sup>3</sup>.

*CHAPITRE V*

**IMPACT DE L'ACTIVITE HUMAINE SUR  
LE REGIME HYDROLOGIQUE DE LA  
VALLEE DU M'ZAB**

## Chapitre VI: Impact de l'activité humaine sur le régime hydrologique de la vallée du M'Zab

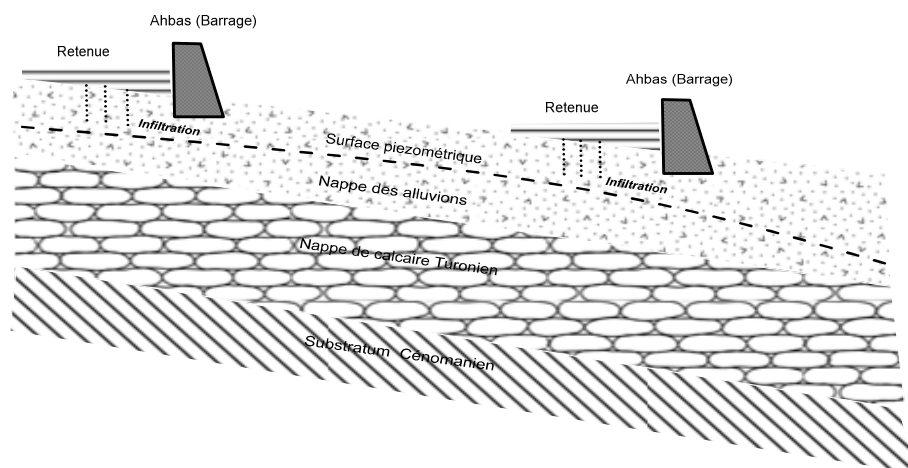
### VI.1. Introduction

Depuis longtemps les habitants au M'Zab ont cherché de se profiter et de se protéger des inondations d'Oued M'Zab. Ainsi, des aménagements hydrauliques ont été proposés pour cet objectif. Certes ces aménagements modifient d'une façon durable la composition physique du système : pente, profondeur, vitesse d'écoulement, débitante, forme des berges. Ils ont donc des répercussions sur le fonctionnement hydrologique de la vallée. Dans ce chapitre nous allons traiter les impacts des aménagements hydrauliques sur le régime hydrologiques d'Oued M'Zab.

### VI.2. Utilisation des barrages et retenues pour la protection de la vallée et la recharge de la nappe phréatique

#### VI.2.1. Fonctionnement générale

Les barrages et les petites retenues ont pour objectif de stocker temporairement les crues de fréquence exceptionnelles, en relâchant un débit limité, assurant ainsi avec les aménagements en aval (endiguements, reprofilages, murs de berge,..), la protection des biens et des personnes des agglomérations de la vallée. Par le stockage temporaire des crues et le maintien d'un débit faible pendant une durée accrue, ces ouvrages permettront également une infiltration locale des eaux de crue dans la nappe phréatique. Favorisant ainsi un développement agricole à l'aval proche et une utilisation facile et prolongée des écoulements de surface.



**Figure VI.1 : Processus de stockage et recharge de la nappe phréatique**

Les ouvrages conçus constituent toute une gamme de dispositifs par l'intermédiaire desquels l'homme modifie plus ou moins les conditions naturelles dans le but de provoquer une

infiltration accrue de l'eau dans la formation aquifère. Dans la vallée nous pouvons distinguer les grands barrages de rétention d'amont, et les seuils de rétention intermédiaires.

### VI.2.2. Ouvrages de rétention d'amont

Ce sont des grands ouvrages (barrages) réalisés en terre avec un noyau argileux, équipés d'un évacuateur de crue et d'une vanne de vidange au fond d'un débit de 20 m<sup>3</sup>/s. Ces ouvrages sont conçus en amont de la vallée du M'Zab dont le but est de la protection contre les crues torrentielles et la réalimentation de la nappe phréatique. Ils sont au nombre de trois. Le tableau VI.1 résume les caractéristiques de ces ouvrages.

**Tableau VI.1: Caractéristiques géométriques et hydrauliques des ouvrages de rétention amont**

<b>Barrages</b>	<b>Labioudh</b>	<b>El Haimer</b>	<b>Boubrik</b>
Emplacement	Oued Labioudh	Sur Oued Laadira	Oued Boubrik
Hauteurs max / Longueurs (m)	16/1000	18/430	8/860
Surface de la retenue (Ha)	710	240	160
Capacité (x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) - Hm <sup>3</sup>	15	12	8
Débit centennial naturel (m <sup>3</sup> /s)	366	294	75
Débit centennial laminé (m <sup>3</sup> /s)	25	20	5
Débit Millennial laminé (m <sup>3</sup> /s)	210	190	75
Date de mise service	Avril 2008	Juin 2011	Décembre 2010

### VI.2.3. Barrages et seuils à travers la vallée (les Ahbas).

Les anciens Mozabites ont valorisé en maximum les ressources hydriques disponibles. C'est ainsi que les vallées dans le M'Zab, sont fréquemment barrées par des levées en terre souvent revêtues de maçonnerie ou par des barrages entièrement en maçonnerie afin que l'eau qui circule rarement soit ralentie, stockée et infiltrée vers la nappe. Les principaux ouvrages envisagés sont (voir figures VI.2):

- **Ahbas Touzouz :**

Cet ouvrage est situé en aval de la commune de Daya B. D. sur l'Oued Touzouz et parmi les plus anciennes digues réalisées au M'Zab. Il est construit en pierre et du mortier de la chaux. Il a subi dans le passé de très graves dommages dû notamment aux crues et a pratiquement disparu et il ne subsiste que quelques vestiges.

- **Ahbas Bouchene:**

Cet ouvrage est situé juste à l'amont de la palmeraie de Ghardaia (El Ghaba). Il est installé depuis quatre siècles sur le confluent de trois affluents : Laadira, Labioudh et Touzouz (Amlaga). Cet ouvrage est considéré comme la retenue de recharge la plus importante dans la vallée.

- **Ahbas Jedid :**

Cet ouvrage est situé à l'amont de la ville de Ghardaïa. Il est surtout destiné à la réalimentation de la nappe. Il est constitué essentiellement d'un seuil déversant à deux niveaux qui se referme directement sur la piste existante en rive droite et qui est constituée d'un mur en maçonnerie étayé par des contreforts.

- **Ahbas Ben Isguen :**

Situé en amont du Ksar Ben Isguen. Cet ouvrage constitue un célèbre monument historique et touristique dans la vallée. Il est destiné à régulariser le régime de crue d'Oued Ntissa, ainsi que la réalimentation de sa nappe. Il a subi des travaux de restauration, suite à la destruction partielle dans la passé due aux crues torrentielles de 1951 et de 1952.

- **La digue d'El Atteuf :**

Il s'agit de l'ouvrage le plus emblématique de la vallée. La digue est transversale à l'oued, s'appuie sur le versant en rive droite. Le barrage possède un évacuateur de crues et une fermeture topographique constituée d'un remblai épaulé sur un mur en maçonnerie. La digue principale a été victime d'une très importante brèche suite à la crue de 2008. Des travaux de réfection et de renforcement ont été réalisés pour rétablir son intégrité.

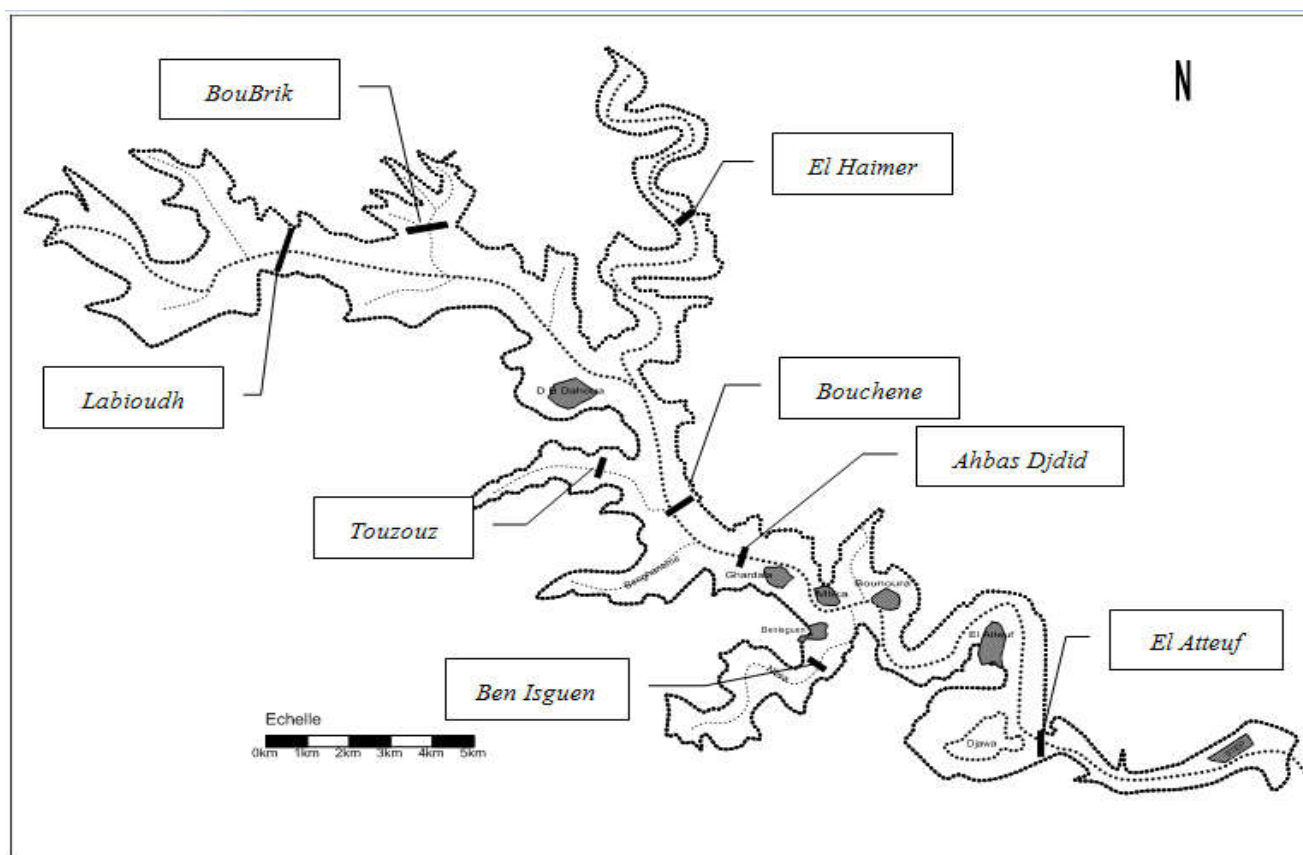


Figure VI.2: Situation des barrages et Ahbas à travers la vallée du M'Zab

**Tableau VI.2: Caractéristiques géométriques et hydrauliques des Ahbas**

Ahbas	Touzouz	Bouchene	Abas Djdid	Ben Isguen	El Atteuf
Emplacement	Oued Touzouz	Conflue Labioudh-Laadira - Touzouz	Oued M'Zab (avant Ghardaïa)	Oued Ntissa (avant Ben Isguen)	Oued M'Zab (Après El Atteuf)
H max / L (m)	3/340	4/635	6/80	5/485	6/865
Surface de la retenue (Ha)	10	68	5	35	85
Capacité de rétention Hm <sup>3</sup>	0.15	1.36	0.3	1.05	1.27
Date de réalisation	1867	1707-1717	1887	1325- 1330	1030-1038
Réfection	Dégradée	Bonne état	Bonne état	Bonne état	Réfection en cours



Barrage Labioudh



Ahbas Touzouz



Ahbas Bouchene



Ahbas Djdid



Ahbas Ben Isguene (crue d'avril 2011)



Barrage El Atteuf

**Figure VI.3: Photos des principaux Barrages et Ahbas dans la vallée du M'Zab**

### VI.3. Impact des ouvrages amonts sur le régime hydrologique d'Oued M'Zab

#### VI.3.1 importance des Ouvrages

Les caractéristiques géométriques et hydrauliques des retenues sont données dans le tableau VI.1. Les ouvrages de rétention amont devront pouvoir laminer une crue de fréquence centennale, en relâchant un débit maximum fixé, compatible avec les aménagements aval. Par ailleurs, ces ouvrages devront supporter sans danger pour leur sécurité et la sécurité des populations en aval pour une crue exceptionnelle de fréquence Deca-millénnalles. Ces crues exceptionnelles apercevront leur débit de pointe nettement diminués grâce à l'effet de laminage des barrages.

### VI.3.2. Simulation de l'effet de laminage des crues

Devant le manque d'informations hydrométriques et l'absence des événements de crues sur la région jusqu'à nous jours, il est difficile de cerner et d'évaluer l'impact des ouvrages de rétention sur le régime hydrologique de la vallée. Toutefois nous essayons d'exploiter en maximum les documents de réalisation de ces ouvrages (nous remercierons ici les services de DRE de Ghardaïa pour mettre à notre disposition toute la documentation nécessaire).

La réalisation des ouvrages amont de rétention aura l'effet de laminage sur les crues de différentes fréquences d'Oued M'Zab, le tableau VI.3 et la figure VI.3 résument cet impact.

**Tableau IV.3: Débits maximaux aux différentes confluents d'Oued M'Zab avant et après la réalisation des ouvrages de rétention amont**

Sections	Affluents	Qmax avant l'implantation des ouvrages (m <sup>3</sup> /s)			Qmax après l'implantation des ouvrages (m <sup>3</sup> /s)		
		10 ans	100 ans	1000 ans	10 ans	100 ans	1000 ans
<b>Daya B D</b>	Labioudh, Boubrik et divers Chaabas	214	441	740	50	60	285
<b>Amlaga</b>	+ Laadira, divers Chaabas	358	735	1234	85	102	476
<b>Ghardaia</b>	+ Touzouz, Benghaneme, Khalkhala et divers Chaabas	390	788	1286	111	145	583
<b>El Atteuf</b>	+ Ntissa, Azouil et divers Chaabas	402	824	1384	210	274	737

Les débits estimés avant l'installation des ouvrages sont celles du paragraphe III.6.9. Par contre les débits estimés après la réalisation sont les débits écoulés après le laminage. Les données de base de cette estimation seront les débits de vidange du fond et les débits des évacuateurs de crue pour chaque ouvrage, ajoutant à ceci les débits des affluents plus en aval. Après la réalisation de la simulation nous pouvons constater que :

- Le laminage des crues a réduit largement les débits de différentes fréquences. L'effet protecteur de ces ouvrages est très important puisqu'il permet de diviser le débit maximal de la crue par un coefficient de 2.7 à 4 fois.
- Selon la position du point considéré le long de la vallée, l'effet du bassin versant intermédiaire prenant de l'importance lorsqu'on se déplace vers l'aval.
- L'effet du stockage dans les petits retenues et l'infiltration dans les bassins intermédiaires, ont diminuent considérablement le débit commutatif vers l'aval.
- Grâce au stockage temporaire des crues et le maintien d'un débit faible pendant une durée accrue, ces ouvrages permettront également une infiltration locale des eaux de crue dans la nappe phréatique.



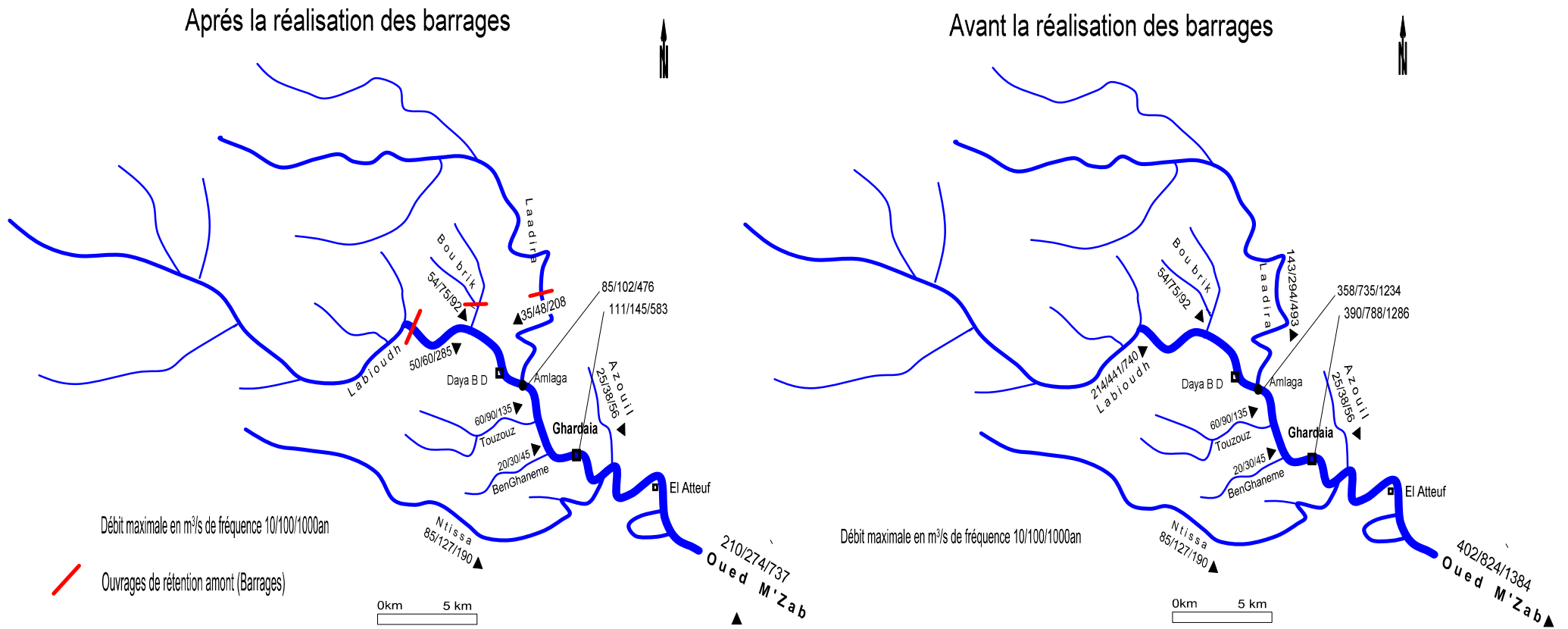


Figure VI.3: Schéma explicatif de l'effet de laminage des crues dans le système hydrographique du M'Zab

## **VI.4. Impact des travaux d'aménagement du lit d'Oued sur le régime hydrologique du M'Zab.**

### **VI.4.1. Etat de fait de la vallée**

Actuellement le lit de l'oued est considéré comme un espace public. Dans certains tronçons comme la palmeraie d'El Ghaba, il est utilisé comme voie de circulation, et comme moyen direct de passer d'une rive à l'autre tant pour les personnes que les véhicules. L'altération de son paysage, liée à la présence fréquente d'eaux usées, a conduit les populations à le considérer comme un lieu de décharge (gravats, ordures ménagères,...), ce qui a des conséquences tant sur la qualité de l'environnement que sur les possibilités d'écoulement des crues, par diminution de la section d'écoulement ou par obstruction des ouvrages de franchissement de la vallée de l'oued. Enfin le lit de l'oued est quelquefois utilisé comme terrains de sport spontanés ou pour des activités commerciales locales (cas de Ghardaïa et Bounoura).

### **VI.4.2. Historique des travaux d'aménagement dans la vallée du M'Zab**

Face aux aléas d'inondation majeurs dans le M'Zab, les autorités locales et les services techniques ont entrepris un projet colossal pour la protection contre les crues sur la période 1995-2012. Ainsi, les recommandations de l'étude du groupement Bonnard & Gardel, ont menés à la réalisation des ouvrages et des aménagements hydrauliques à savoir:

- Dignes de rétention amont sur les oueds El Abiod, El Haimeur et Bou Brik, de hauteur respective 15, 17 et 9 mètres,
- Ouvrages de protection contre les crues le long de la vallée, constitués d'endiguements, de murs de berge, et de mesures de correction et de recalibrage du lit de l'oued, le tout sur une longueur d'environ 25 km,
- Revêtement et dallage en béton du lit d'Oued en quelque section sur la vallée du M'Zab notamment à Ghardaïa sur 2.4 km environ.
- Collecteur principal de 23 km de longueur et d'un diamètre variant de 400 mm à 2000 mm pour les eaux usées, depuis Daya B. D. jusqu'à la digue d'El Atteuf,
- Station de traitement des eaux usées par lagunage d'une capacité de traitement de 46 400 m<sup>3</sup>/j à l'horizon du projet, à l'aval de la digue d'El Atteuf.

### **VI.4.3. Conséquence des travaux de recalibrage**

Le recalibrage est pour bute de la protection des berges contre l'érosion et l'amélioration la la débitante du cours d'eau. La technique utilisée est le revêtement en béton du lit et les berges. Ce

type d'aménagement hydraulique a été mis en œuvre après la crue catastrophique d'Octobre 2008, en particulier à la commune de Ghardaïa. Le dallage a été exécuté du pont d'Addaoud jusqu'à la passerelle de Mlika, sur une distance de 2400 ml.



**Figure VI.4: Dallage et Mure de soutènements en béton sur Oued M'Zab au centre ville de Ghardaïa**

Le recalibrage du lit d'Oued M'Zab à pour conséquences :

- Aggravation des inondations par l'augmentation de vitesse d'écoulement et accélération d'évacuation des crues, car le coefficient de rugosité du lit d'Oued passe de 35 à 75, et la vitesse observée peut toucher 6 m/s .
- Diminution du taux de recharge de la nappe phréatique par infiltration.
- Perturbation du transport solide.

*CHAPITRE VII*

**ÉTABLISSEMENT DU BILAN  
HYDROLOGIQUE DE LA NAPPE  
PHRÉATIQUE DU M'ZAB**

## **Chapitre VII : Etablissement du bilan hydrologique de la nappe phréatique du M'Zab**

### **VII.1. Introduction**

L'établissement du bilan de la nappe exige la connaissance précise de ses alimentations et de ses pertes. Or celles-ci sont multiples, directes ou indirectes, superficielles ou profondes. Le bilan hydrologique global a pour but d'établir la balance entre l'actif et le passif, les apports et les pertes et ainsi d'étudier la variation des réserves en eau. La balance est équilibrée suivant les conditions naturelles conformément au cycle de l'eau et/ou, à la présence de l'intervention humaine. Le bilan d'eau permet également de calculer par différence l'un des éléments, les autres étant connus (Castany, 1968). Avant d'aborder l'étude du bilan hydrologique de la nappe phréatique, il est intéressant de donner un bref rappel de la méthodologie d'établissement des bilans d'eaux et les différentes procédures à suivre.

### **VII.2. Méthodologie**

#### **VII.2.1. l'année Hydrologique**

Tout bilan d'eau se rapporte :

- A une période de référence bien déterminée : le bilan d'eau porte sur une période déterminée et tous les éléments doivent obligatoirement se rapporter à la même durée. La période considérée est l'année hydrologique inter-annuelle calculée sur une longue période (par exemple septembre 2005- octobre 2009) ou l'année hydrologique déterminée sur les saisons ou les mois ou encore sur les décades de l'année considérée (par exemple septembre 2006-octobre 2007). Nous obtenons alors le bilan d'eau sont exprimées en mètres cubes par an ou en hauteur annuelle de lame d'eau exprimée en millimètres.
- A une unité de volume nettement délimitée : Le volume doit être délimité avec précision et correspond à un cadre naturel (bassin, versant, nappe, cuvette, Oued...). Pour les nappes libres l'unité de volume considérée n'est pas constante par suite des fluctuations de la surface piézométrique. Il en résulte que nous devons toujours tenir compte de la variation de la réserve en eaux souterraines.

L'année hydrologique d'un système aquifère libre est déterminée par l'étude statistique de la pluviométrie, les écoulements superficiels et l'étude des fluctuations piézométriques. Dans les nappes libres, la surface piézométrique subit dans les conditions naturelles, des fluctuations des niveaux en fonction du rythme des précipitations et de l'évaporation. Dans les conditions d'une région développée, la fluctuation est en relation aussi avec l'exploitation et la restitution des eaux

d'irrigation et les eaux domestiques. L'année hydrologique débute avec une surface piézométrique minimale, pour se terminer avec la surface piézométrique minimale suivante (Basses eaux-Basses eaux) comme on peut procéder à l'inverse (hautes eaux –hautes eaux). Pour des conditions arides à faible pluviométrie, elle s'étale habituellement d'octobre à septembre (Ouled Belkhir, 2002).

### VII.2.2. Équilibre du bilan

Le bilan calculé sur une période annuelle, ne s'équilibre pas en général, pour de multiples causes dont les principales sont, en dehors de l'intervention fréquente de l'homme, la variation de la réserve, les erreurs et approximations des mesures. Cette dernière cause est importante à considérer par lorsque le bilan a pour but de déterminer la variation de la réserve, les résultats numériques obtenus pour cette variation d'erreurs relatives aux données de basse.

### VII.2.3. Éléments d'un bilan d'une couche aquifère libre

Le tableau suivant présent les principaux éléments d'un bilan d'eau sans l'intervention de l'homme.

**Tableau VII.1: Bilan hydrologique dans les conditions naturelles (Castany, 1968) .**

Apports ou entrées En mm ou m <sup>3</sup> /an	Pertes ou sorties En mm ou m <sup>3</sup> /an
<b>Alimentation directe :</b> Infiltration efficace des précipitations Iw Infiltration des eaux de surface Iq	Évaporation et évapotranspiration Émergences des sources Qe Déversements dans les couches aquifères adjacentes ou profondes Qp
<b>Alimentation indirecte :</b> - Apports des eaux souterraines adjacentes ou profondes DW - Apports (infiltration) des eaux de surface de bassins voisins Is	
Variation des réserves en eaux souterraines +/- dW	

Le tableau suivant présent les principaux éléments d'un bilan d'eau tenant compte de l'intervention de l'homme.

**Tableau VII.2: Bilan hydrologique tenant compte de l'intervention de l'homme (Castany, 1968).**

Apports ou entrées En mm ou m <sup>3</sup> /an	Pertes ou sorties En mm ou m <sup>3</sup> /an
<b>Alimentation directe :</b> - Infiltration efficace des précipitations Iw - Infiltration des eaux de surface Iq	Évaporation et évapotranspiration E Émergences des sources Qe Déversements dans les couches aquifères adjacentes ou profondes Qp
<b>Alimentation indirecte :</b> - Apports des eaux souterraines adjacentes ou profondes DW - Apports (infiltration) des eaux de surface de bassins voisins Is	Prélèvement et exploitation Qex - Eau domestique - Eau industrielle - Eau d'irrigation
<b>Restitution Ir :</b> - Eau domestique - Eau industrielle - Eau d'irrigation	Pompes hors du système aquifère Qh
Variation des réserves en eaux souterraines +/- dW	

On constate que l'apport principal du bilan est l'infiltration efficace I<sub>effe</sub>, et les sorties sont surtout l'évaporation, les prélèvements et l'écoulement souterrain vers l'aval.

### VII.2.4. Expression générale du bilan d'eau d'une couche aquifère

La formule classique du bilan hydrologique, fréquemment utilisée, est

$$\text{Apports} = E + R + I \pm dW \quad (7.1)$$

Nous rappelons qu'en équilibre :

$$I = Q_w = \pm dW \quad (7.2)$$

Dans les zones arides, le ruissellement de surface dans le cas de la couche aquifère est souvent négligeable par suite de morphologie de surface du sol. Lorsqu'il est important, une partie s'infiltré, une autre s'évapore et le surplus est repris par l'écoulement, lequel est mesuré à l'exutoire. Nous pouvons donner des expressions plus complètes en tenant compte des éléments du tableau en dessous (Castany, 1968).

$$I_w + I_q + I_r + D_w + I_s = E + Q_{ex} + Q_p + Q_h \pm dW \quad (7.3)$$

Le nombre de facteurs varie avec les conditions hydrogéologiques ou certains peuvent ne pas apparaître dans le bilan :

- Si la couche aquifère est isolée les apports et les pertes en eaux souterraines sont nuls et l'expression devient :

$$I_w + I_q + I_r + I_s = E + Q_{ex} + Q_h \pm dW \quad (7.4)$$

- Si la couche aquifère n'est pas exploitée :

$$I_w + I_q + I_r + D_w + I_s = E + Q_p \pm dW \quad (7.5)$$

### VII.2.5. Infiltration Efficace

Le terme infiltration efficace a été traité en détail dans le chapitre V, paragraphe V.5.1. Nous utilisons comme gradeurs pour ce terme :

- 40 % taux d'infiltration sur les pluies efficaces de 5 mm/j ou plus
- 50 % taux d'infiltration sur les eaux d'épandage (Crues, eaux urbaines restituée, eaux d'irrigation)

### VII.2.6. Evapotranspiration et Evaporation à travers la zone non saturée

L'évaporation est un paramètre climatique qui a une grande influence sur la variation du niveau piézométrique des nappes proche du sol. Le taux d'évaporation d'une nappe d'eau est d'autant plus faible en hiver, et plus fort en été que la nappe est plus étendue et plus profonde. Dans un bilan hydrologique le terme Evaporation contribue sous forme :

- Evaporation des plans d'eau;
- Evapotranspiration du couvert végétale;
- Evaporation des couches aquifères à travers la zone non saturée.

Dans la vallée du M'Zab, notamment à Daya B. D. et à El Ghaba, l'activité agricole est irriguée. Elle est pratiquée principalement dans les palmeraies qui se bénéficient de l'eau de la nappe

phréatique grâce à un réseau énorme de puits traditionnels. On va voir dans le paragraphe VII.3 que l'évapotranspiration se comptabilise indirectement dans le bilan hydrologique par l'utilisation d'ETP dans le calcul de la dose d'irrigation qui va contribuer par la suite à l'infiltration vers la nappe phréatique. L'évapotranspiration dans ce cas, concerne uniquement le bilan hydrique local de la zone racinaire (Théorie du Plan de flux nul, Figure VII.1) (Anne & Benoit 2003). Donc la seule forme d'évaporation qui va rentrer en jeu directement dans bilan hydrologique de la nappe phréatique, est l'évaporation à travers la zone non saturée.

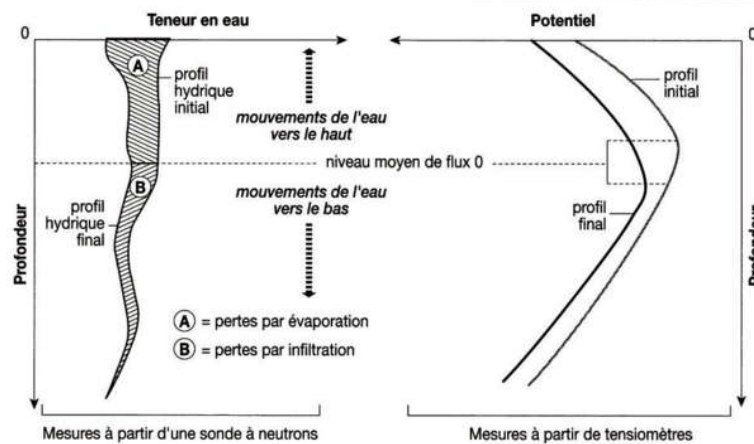


Figure VII.1: Le plan de flux nul (Bazie & Dieng, 1995)

La zone non saturée (ZNS), est une tranche de sol compris entre la surface de la nappe phréatique (NS) et la surface du sol. Les techniques hydrologiques classiques n'apportent pas suffisamment d'information sur le taux de migration de l'eau à travers cette zone. Par contre les techniques isotopiques récemment appliquées, décrivent plus précisément les mécanismes de l'évaporation et de l'infiltration (Bazie & Dieng, 1995). Nous exposons ici les résultats de quelques travaux expérimentaux et scientifiques sur les régions arides et semi-arides depuis l'année 1985 (Figures VII.2).

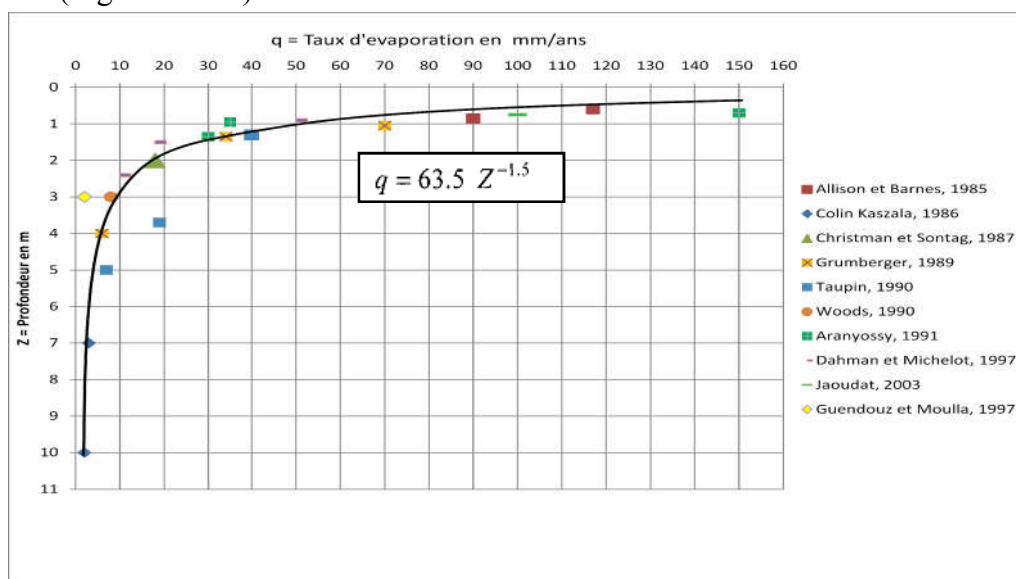


Figure VII.2: Variation du taux d'évaporation en fonction de la profondeur de la nappe (Bazie & Dieng, 1995) (Anne & Benoit 2003)



Le taux d'évaporation  $q$  diminue lorsque la profondeur  $Z$  augmente. Les données de  $q$  et  $Z$  suivent un ajustement exponentiel (Anne & Benoit 2003):

$$q = 63,5 \cdot Z^{-1,5} \quad (7.6)$$

D'où :

- $q$  : flux d'évaporation en mm/an,
- $Z$ : profondeur de la nappe en m.

En effet, plus la nappe est profonde, plus la zone de transfert d'humidité en phase de vapeur devient importante et le front d'évaporation plus profond, ce qui favorise le ralentissement de l'évaporation (Bazie & Dieng, 1995) et (Anne & Benoit 2003).

D'après l'étude piézométrique de la nappe phréatique de la vallée du M'Zab, la profondeur du NS moyenne varier de 3 m (Bounoura- El Atteuf) à 15 m (Daya B D). Donc le flux d'évaporation à travers la zone non saturée de la nappe est de 1 à 12 mm/an, soit une moyenne de **6 mm/an**. Les résultats de cette application sont cohérents avec d'autres résultats publiés pour des régions arides et semi arides à forte évaporation (Tunisie, Arabie Saoudien, USA...)(Ouled Belkhir, 2002).

#### **VII.2.7. Relation avec les couches aquifères profondes et adjacentes**

Les pertes ou apports en relation avec les couches aquifères profondes ou adjacentes doivent être prises en considération. Lorsque le bassin comporte des couches aquifères profondes, communiquant avec les nappes supérieures et la surface, il se produit une drainance vers les nappes superficielles. Cependant les phénomènes tectoniques mettent en évidence des fractures par lesquelles les eaux profondes remontent et alimentent la nappe phréatique. Il est très difficile d'évaluer les grandeurs des flux de ces communications, car elles demandent des techniques et études tel que : géophysique, géochimie et méthodes isotopiques. En l'absence de ces études on procède à l'évaluation de ces flux par la différence des autres éléments du bilan à l'état d'équilibre (Ouled Belkhir, 2002).

### **VII.3 Établissement du bilan hydrologique : application sur la nappe phréatique du M'Zab**

#### **VII.3.1. Cadre hydrologique et hydrogéologique du système étudié**

La vallée du M'Zab se caractérise par un relief cisailé, raviné et serpenté d'innombrables oueds. Le substratum géologique est constitué de calcaires, dolomies et marnes d'âge Turonien. On distingue, le long de la vallée des dépôts alluvionnaires d'âge quaternaire. Ces alluvions sont constituées de sables fins et grossiers (mélangés à des limons et des argiles), gravillons, galets

consolidés. Cette formation superficielle (20-40 m), contient une nappe phréatique plus ou moins profonde, exploitée par des puits donnant de faibles débits. La couche de la nappe phréatique constitue un ensemble unique dont le bassin des eaux souterraines concorde avec le bassin hydrographique. D'après l'étude hydrologique, le système hydrographique du M'Zab est isolé dans sa partie amont, c'est-à-dire qu'il est dépourvue d'un bassin hydrographique voisin en amont. Par contre la zone des Dayas de Hassi Rmel en amont du M'Zab peut contribuer à l'alimentation souterrain de la nappe phréatique.

### VII.3.2. Choix des périodes de références

Les périodes retenues ont été choisies pour des raisons de disponibilité des données de tous les paramètres entrant dans la formule de l'équation du bilan. L'ensemble des données dont nous disposons (calculs, estimations, mesures) et compte tenu du régime climatique de la région, ils nous permettront d'établir deux types de bilans :

- **Bilans moyens périodiques :**
  - Bilan moyen périodique : (2005-2009).
  - Bilan moyen périodique : (2010-2015).
- **Bilans annuels :**
  - Bilans annuelles des années pluvieuses : 2008-09, 2011-12.
  - Bilans annuelles des années sèches : 2005-06, 2012-13

Pour les deux types de bilans, l'année hydrologique moyenne débute en **octobre**, et se termine en **septembre**.

### VII.3.3. Eléments du bilan hydrologique

Les différents éléments et phénomènes hydrologiques entrant dans le bilan hydrologique sont récapitulés sur la figure VII.3.

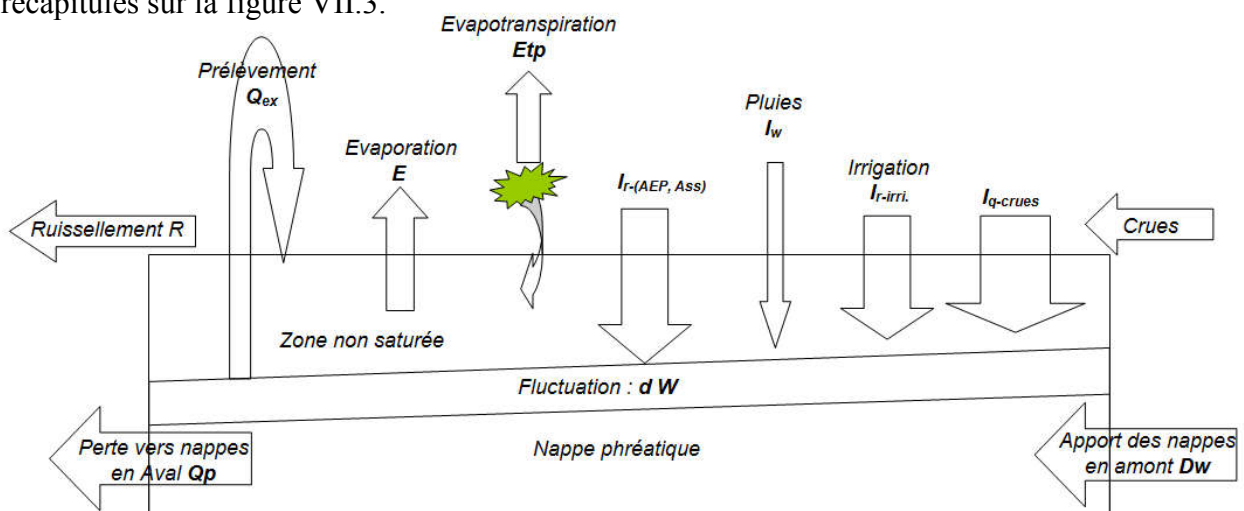


Figure VII.3: Différents facteurs entrants dans  
L'établissement du bilan hydrologique



### VII.3.4. Bilans moyens périodiques de 2005-2009 et 2010-2015

#### VII.3.4.1. Les Apports

##### a) Infiltration efficace sur les écoulements de crues ( $I_{q\text{-crue}}$ )

Elles sont représentées par les crues d'Oued M'Zab et ces affluents qui participent à la réalimentation de la nappe phréatique. D'après l'étude hydrologique (voir paragraphe III.4.), nous avons évalué sur la période 2005-2009 les crues suivantes : octobre 2008, janvier 2009 et septembre 2009. Sur la période 2010 -2015, il ya celle de mars, avril, octobre 2011 et de novembre 2013 (faibles crues). Les volumes des crues sont estimés par la méthode de Rodier en fonction de la pluie journalière maximale enregistrée. On attribue pour la faible crue une fréquence minimale de 2 ans, et pour la crue moins importante une fréquence de 5 ans. Les crues importantes auront lieu pour des fréquences d'aux moins de 10 ans. La crue d'octobre 2008 a été étudiée d'avantage dans le paragraphe III.5. Concernant les volumes d'eau générés on adopte la moyenne entre l'exutoire de Daya B D et celle d'El Atteuf. Les volumes ainsi calculés et estimés sont présentés sur le tableau suivant:

**Tableau VII.4: Volumes de crues infiltrées de 2005-2009 et 2010-2015**

Date de crue	Pj (mm)	Débit Max(m <sup>3</sup> /s)	Volume écoulé (Hm <sup>3</sup> )	Taux d'infiltration	Volume infiltré Hm <sup>3</sup>
<b>2005-2009</b>					
01/10/2008	79	1245	29	50 %	14.5
21-22/01/2009	40	380	11		5.5
08/09/2009	17	180	5		2.5
12/09/2009	19	180	5		2.5
Totale Mm <sup>3</sup>					25
Moyenne Mm <sup>3</sup> /an					<b>6.25</b>
<b>2010-2015</b>					
13/03/2011	50	528	16	50 %	8
22/04/2011	14	180	5		2.5
02/10/2011	40	380	11		5.5
25/11/2013	10	-	5		2.5
Totale Mm <sup>3</sup>					15.50
Moyenne Mm <sup>3</sup> /an					<b>3.87</b>

##### b) Infiltration efficace sur les précipitations ( $I_w$ )

La surface susceptible de transformer les précipitations vers la nappes (l'impluvium) est estimée à 85 km<sup>2</sup>, soit plus grand que la surface de la nappe (70 km<sup>2</sup>) si en ajoute les versant et les plateaux en voisinage du bassin versant du M'Zab. Seules les pluies journalières d'intensités supérieures ou égale 5 mm sont susceptibles de déclencher le ruissellement et la recharge de la nappe phréatique. On retient un taux d'infiltration de l'ordre de 40%. Le calcul de la quantité d'eau infiltrée pour les deux périodes de référence est mentionné sur le tableau ci dessous.

**Tableau VII.5: Volumes infiltrés sur les pluies efficaces  
(2005-2009 et 2010-2015)**

Période	2005-2009	2010-2015
Somme des $P_j (\geq 5 \text{ mm/j})$	165 mm	114 mm
Taux d'infiltration	40%	
Lame d'eau infiltrée mm	66 mm	45 mm
Superficie de l'impluvium (km <sup>2</sup> )	85	
Quantité d'eau infiltré Hm <sup>3</sup> /an	<b>5.61</b>	<b>3.82</b>

### c) Restitution des eaux d'irrigation ( $I_{r-irri}$ )

La nappe phréatique du M'Zab reçoit de plus en plus d'eaux d'infiltration provenant de l'irrigation des palmeraies, jardins et terre agricoles. La vallée comporte un total de **3 520 Ha** de terres agricoles, dont la culture étagère est la plus dominante. Elle regroupe les palmiers dattes, les arbres fruités et le maraichage. Les principales zones agricoles dans la vallée sont: Daya B D , Laadira, El Ghaba, Ntissa et Djawa d'El Atteuf (DPAT /DSA Ghardaïa, 2015). Les exigences hydriques des cultures dépendent essentiellement d'un facteur climatique, c'est l'évapotranspiration potentielle qui est calculée à partir des données climatiques. Par l'usage du logiciel CROPWAT, nous avons pu calculer les besoins nets mensuels d'irrigation des cultures étagés dans la vallée (voir paragraphe II.1.4.). L'équation générale du bilan hydrique s'écrit comme suivant:

$$I_b + P_{ef} + RFU = ETR + R + Inf \quad (7.9)$$

- $I_0$  : Irrigation nette.
- ETR : Évapotranspiration réelle.
- $P_{ef}$  : Pluie efficace.
- RFU : Réserve facilement utilisable dans le sol.
- R: Ruissèlement des eux en excès.
- Inf : Infiltration vers la nappe profonde

Pour une zone aride il est évident que les pluies efficaces et les réserves hydriques du sol sont négligeables. La formule du bilan peut se simplifiée comme suite :

$$I_0 = ETR = Kc \cdot ETP \quad (7.10)$$

- $Kc$  : Coefficient culturale, il dépend du stade végétatif de la culture.
- ETP : Évapotranspiration potentielle.

L'irrigation nette des cultures tienne compte l'efficience du réseau d'irrigation (pertes et fuites)

$$I_b = I_0 / e \quad (7.11)$$

- $I_b$ : Irrigation brute des cultures.
- e: Efficience du système d'irrigation (Généralement  $e = 0.9$ ).

Dans le système Oasien, l'estimation de la dose brute est employée pour le dimensionnement d'un réseau d'irrigation satisfaisant. Elle correspond à l'exploitation idéale et totale de la parcelle. Alors, les agriculteurs de la vallée exploitent leurs parcelles que à 60% seulement, et cela dans les meilleures conditions, ce qui rapproche une dose d'arrosage réelle de **0.45 l/s/ha**.

**Tableau VII.6: Calcul des besoins en eau pour un système étagé dans la vallée du M'Zab**

Mois	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Jt.	Aot.	Sep.
ETP (mm/j)	4.63	2.68	1.96	2.29	3.23	4.45	6.55	8.67	10.52	9.82	9.11	7.13
I <sub>b</sub> (l/s/ha)	0.60	0.34	0.25	0.29	0.42	0.57	0.84	1.11	1.35	1.26	1.17	0.92
I <sub>reel</sub> (l/s/ha)	0.36	0.21	0.15	0.18	0.25	0.34	0.51	0.67	0.81	0.76	0.70	0.55
Moy saison (l/s/ha)	0.24 l/s/ha						0.66 l/s/ha					

Le besoin réel maximum est enregistré au mois de juin avec 10.52 mm/j qui correspond à un débit fictif continu unitaire de 0.81 l/s/ha. Ce débit diminuera à 0.15 l/s/ha dans la période hivernale.

Notons que les conditions géologique et géomorphologiques caractérisant la vallée ne permettant par l'expansion des palmerais et les espaces irriguées dans la vallée, ce qui nous amène à considérer que la surface agricole utile sur la vallée (SAU) reste presque constante pour les deux périodes.

Cependant, le taux de rejet des eaux d'irrigation (drainage) est estimé à 50%, dont 50% de ce rejet va s'infiltrer vers la nappe phréatique (Ouled Belkhir, 2002). Pour quantifier la tranche qui s'infiltrer vers la nappe, on multiplie le débit fictif (l/s/ha) à la surface agricole utile selon la saison (Basses Eaux – Hautes Eaux). Il résulte un débit global d'irrigation en l/s, ensuite on le multiplie au temps d'arrosage moyen (4 heures/jours) pour avoir un volume d'eau nécessaire à l'irrigation. Enfin on multiplie ce volume au taux d'infiltration qui soit 20% au total. Les calculs sont résumés sur le tableau ci-dessous

**Tableau VII.7 : Estimation des volumes d'eau de drainage restitués à la nappe phréatique (2005-2009 et 2010-2015)**

Zones	SAU (Ha)	Période Hautes eaux		Période Basses eaux		taux d'infiltration (20%)	
		Octobre-Mars (0.24 l/s/ha)		Avril – Septembre (0.66 l/s/ha)			
		Q en l/s	V en Hm <sup>3</sup>	Q en m <sup>3</sup> /s	V en Hm <sup>3</sup>	H. eaux	B. eaux
Ghardaia	830	199	3.10	548	8.52	0.62	1.70
Daya	1560	374	5.82	1030	16.01	1.16	3.20
El-Atteuf	680	163	2.54	449	6.98	0.51	1.40
Bounoura	450	108	1.68	297	4.62	0.34	0.92
<b>Total</b>	<b>3520</b>	<b>845</b>	<b>13.14</b>	<b>2323</b>	<b>36.13</b>	<b>2.63</b>	<b>7.23</b>
<b>Total irrigué : 50 Hm<sup>3</sup>/an</b>						<b>Total infiltré : 9.85 Hm<sup>3</sup>/an</b>	

**d) Eaux urbaines restituées (  $I_{r- aep/ass}$  )**

La nappe phréatique, aujourd'hui est moins sollicitée. Elle reçoit les rejets des eaux usées de fosses septiques de la zone non assainie, les fuites du collecteur et les ruissèlements des eaux stagnées à ciel ouvert sur certains tracés non construits du collecteur. Par ailleurs, sous l'effet combiné de la réduction des prélèvements et de l'augmentation de la recharge, cette nappe a tendance à remonter fortement. Les rejets urbains des agglomérations de la vallée s'écoulent dans le lit d'Oued M'Zab jusqu'à la STEP d'El Atteuf. A la fin de 2012, un collecteur des eaux usées a été mis en place, il couvre 90% de la population de la vallée. Le débit du rejet actuel à la STEP est estimé à 1490 m<sup>3</sup>/j. Les données de la population et celles de la consommation journalières sont celles de la PDAT de Ghardaïa en 2015. Le taux d'infiltration suggéré sur les eaux urbaines est toujours estimé à 50%. Le tableau ci-dessous récapitule l'opération.

**Tableau VII.8: Volumes restitués des eaux urbaines dans la nappe phréatique. (2005-2009 et 2010-2015)**

Commune	2005-2009				2010- 2015			
	Population	Besoin en eau (Hm <sup>3</sup> /an)	Rejet (Hm <sup>3</sup> /an)	$\frac{I_{ass/AEP}}{(Hm^3/an)}$	Population	Besoin en eau (Hm <sup>3</sup> /an)	Rejet (Hm <sup>3</sup> /an)	$\frac{I_{ass/AEP}}{(Hm^3/an)}$
Ghardaïa	88 600	4.85	3.88	1.94	115 100	6.3	6.3	3.15
Bounoura	27 700	1.52	1.22	0.61	36 400	1.99	1.99	1.00
El Atteuf	15 000	0.82	0.66	0.33	23 100	1.26	1.26	0.63
Daya	10 900	0.6	0.48	0.24	17 100	0.94	0.94	0.47
Total	142 200	7.79	6.23	<b>3.12</b>	191 700	10.49	10.49	<b>5.25</b>

**VII.3.4.2. Les pertes**

Les pertes sont principalement les prélèvements sur la nappe, le déversement vers les nappes avales et l'évaporation à travers la zone non saturée.

**a) Prélèvement sur la nappe phréatique pour utilisations locales (Q<sub>ex</sub>)**

Les prélèvements sont essentiellement à usage agricole. Le réseau de prélèvement constitué de puits traditionnels et petit forages à battage. Durant la campagne piézométrique d'avril 2005 nous avons recensés plus de 550 puits opérationnels dans la vallée, ajoutant à celle-ci, les forages de petites profondeurs qui captent le phréatique qui sont en nombre de 160 forages (seulement les forages déclarés). D'après les services techniques de la wilaya (ANRH, DRE, DSA, ADE, OPVM), la nappe phréatique représente 70% de source d'irrigation dans la vallée. Le reste est recouvert par les forages albiens qui alimentent les réseaux mixtes à travers la vallée (AEP et Irrigation). Par manque de données il était difficile de déterminer ce terme. Nous pouvons employer deux approches :

- Approche s'appuie sur la dose d'arrosage réelle ; cette dose est déjà estimée de 0.24 à 0.66 l/s/ha soit une moyenne de 0.45 l/s/ha pendant toute l'année. On déduira d'abord le volume nécessaire pour l'irrigation qui doit être disponible, ensuite on retranche la part

qui concerne la nappe phréatique. Les calculs sont déjà faits sur le tableau VII.7. Le volume total du besoin en eau pour irrigation des palmeraies du M'Zab, est de  $50 \text{ Hm}^3/\text{an}$ , dont la contribution de la nappe phréatique est de  **$35 \text{ Hm}^3/\text{an}$** .

- Approche s'appuie sur le débit extrais de puits et forages : si on fixe un débit moyen d'exploitation de 3 l/s/puits (ANRH), et on le multiplie par un temps de pompage journalière moyenne de 4 h, on obtient un volume annuel extrais de  **$12 \text{ Hm}^3/\text{an}$** .

Si en tiendra compte le comportement général du bilan de la nappe d'une part, et la qualité d'information sur le nombre de puits opérationnels, on rejettera automatiquement la deuxième approche.

#### b) Déversement vers la nappe en aval d'El Atteuf ( $Q_p$ )

Ce terme est très difficile à le quantifier. Cependant le manque de données géotechniques et hydrogéologiques sur la partie aval de la vallée, nous amènes à approximer la grandeur de débit du déversement par l'application de la méthode de Darcy sur les sections : d'Amlaga (aval de Daya B) et le Barrage d'El Atteuf. D'après Darcy le débit d'une couche aquifère libre pour un régime permanent est en fonction du gradient hydraulique, de la perméabilité, et la section de la couche à traverser.

$$Q = K \frac{H_1 - H_2}{L} S \quad (7.12)$$

Les sections choisies correspondent aux deux régions hydrogéologiquement différentes. On se réfère aux paragraphes V.2.5.4, afin d'exploiter d'avantage les paramètres hydrogéologiques de chaque section. Le gradient hydraulique  $I$  (m/m) est adopté à une valeur moyenne pour chaque période. La surface de la section est estimée selon le niveau statique moyen de la nappe et la profondeur du substratum à la période concernée. Le coefficient de perméabilité  $K$  (m/s) est fixé à  $3 \times 10^{-4}$  m/s comme valeur moyenne pour chaque section : L'application de la loi de Darcy sur les deux sections résulte les valeurs indiquées au tableau VII.9.

**Tableau VII.9: Débits moyens annuels déversés dans la nappe phréatique aval. (2005-2009 et 2010-2015)**

Zones	2005-2009					2010- 2015				
	S m <sup>2</sup>	NS m	I en m/m	K en m/s	Q m <sup>3</sup> /s	S m <sup>2</sup>	NS m	I en m/m	K en m/s	Q m <sup>3</sup> /s
Amlaga	15120	12	0.055	0.0003	<b>0.249</b>	12420	17	0.05	0.0003	<b>0.186</b>
El Atteuf	25420	4	0.025	0.0003	<b>0.191</b>	24800	5	0.025	0.0003	<b>0.190</b>

Les volumes annuels moyens déversés dans nappe aval d'El Atteuf pour les deux périodes sont respectivement :  **$6.1 \text{ Hm}^3/\text{an}$**  et  **$5.9 \text{ Hm}^3/\text{an}$** .



**c) Evaporation à travers la zone non saturée (E)**

L'analyse de la carte du zonning de l'ensemble de la vallée permette de chiffrer les différentes surfaces d'occupation du sol (fig VII.4). La surface concernée par ce terme est estimée à **5900 Ha**. Cette surface comprend aux sols nus, les palmeraies et les zones mixtes. Si on multiplie cette surface au taux d'évaporation de 6 mm/an il résulte un volume annuel de **0.4 Hm<sup>3</sup>/an**.

**d) Variation des réserves (dW)**

Dans le cas des nappes phréatiques, la variation de la réserve en eau peut être calculée directement par l'étude des fluctuations de la surface piézométrique sur la période hydrologique considérée. L'estimation des réserves repose sur le calcul du volume d'eau emmagasiné dans la tranche de couche aquifère considérée. C'est-à-dire le volume de la roche réservoir et la porosité efficace, D'où,

$$dW = V.n \quad (7.13)$$

- dW : volume de la réserve en eaux souterraines ;
- V : volume de la roche réservoir en m<sup>3</sup>;
- n: porosité efficace en %.

Pour la vallée du M'Zab, la porosité moyenne est estimée à 20 %. Si on se réfère au paragraphe V.2.5.5 : fluctuation piézométrique, notamment le tableau V.2, nous observons que la variation du niveau piézométrique pendant 2005-2009, montre une baisse de -5 cm à 34 cm, soit un volume moyen annuel dépensé de **1.35 Hm<sup>3</sup>/an**. Sur la période 2010-2015, on constate une remontée de 355 cm, ensuite il se surgit brusquement une baisse de 391cm, soit un volume moyen annuel dépensé de **1.24 Hm<sup>3</sup>/an**.

**VII.3.4.3. Balance d'eau définitive**

Finalement on récapitule le bilan moyen annuel sur le tableau ci-dessous:

**Tableau VII.10: Balance d'eau moyenne annuelle de périodes 2001-2009 et 2010-2015**

Apports en Hm <sup>3</sup> / an			Pertes en Hm <sup>3</sup> / an		
Eléments	2005-09	2010-15	Eléments	2005-09	2010-15
Infiltration efficace sur les crues I <sub>q-crue</sub>	6.25	3.87			
Infiltration efficace sur les précipitations I <sub>w</sub>	5.61	3.82	Évaporation E	0.40	0.40
Eaux restituées d'irrigation I <sub>r-irri</sub>	9.85	9.85	Prélèvement pour utilisation locale Q <sub>ex</sub>	35.00	35.00
Eaux restituées urbains I <sub>r-aep/ass</sub>	3.12	5.25	Diversement vers aquifères en aval Q <sub>p</sub>	6.10	5.90
Apport des nappes adjacentes en amont Dw	15.32	17.27			
Variation des réserves ± dW	-1.35	-1.24			
<b>Total Apports</b>	<b>40.15</b>	<b>40.06</b>	<b>Total Pertes</b>	<b>41.50</b>	<b>41.30</b>

Dans les conditions d'équilibre les apports des nappes adjacentes amonts (Dw) est calculé par différence :  $Dw = \text{Apport} - \text{Perte} \pm dW$ .

#### VII.3.4.4. Résultats et discussions

L'examen du bilan établi permet de constater que, La première période (2005-2009) est plus pluvieuse que la deuxième période (2010-2015), bien que les deux périodes sont déficitaires. Les apports totalisant 40.15 Hm<sup>3</sup>/an durant la période 2005-2009 contre 40.06 Hm<sup>3</sup>/an en 2010-2015. Les pertes totalisant 41.50 Hm<sup>3</sup>/an durant 2005-2009, contre 41.30 Hm<sup>3</sup>/an durant 2010-2015. Les apports des nappes adjacente en amont présentent 30% des apports totaux. Cependant, les prélèvements sur la nappe phréatique présentent 85% des dépenses. Les rejets sur les eaux urbaines ont été presque doublés de 2005-2009 à 2010-2015, cela est dû à la multiplication de la population d'une part, et à l'existence des fosses septiques illicites (puisards) malgré l'augmentation de la couverture du réseau d'assainissement dans la vallée. Les autres paramètres du bilan, que soit apports ou pertes présentent une certaine stabilité sur les deux périodes. Les pertes par évaporation à travers ZNS sont quasiment négligeables comparée aux autres éléments. Comme il a été exposé antérieurement, les zones arides tel que la vallée du M'Zab sont caractérisée par des événements hydrologiques exceptionnels de courtes durées, anticipées de quelques années de sécheresse. Ces événements peuvent être l'origine des catastrophes énormes comme le cas de la crue juin 1991 et octobre 2008. Dans ce contexte, la moyenne annuelle perde son sens, et le bilan moyen annuel ne décrit que partiellement les phénomènes hydrologiques. Donc ce type de bilan ne convient que pour des événements plus ou moins réguliers.

#### VII.3.5. Bilan pour une année déterminée

Si on se réfère au suivi piézométrique pendant 2005-2013, les années déterminées qu'on peut les retenir sont :

- Octobre 2006 – septembre 2007 (année sèche)
- Octobre 2008 – septembre 2009 (année humide)
- Mars2011- Avril2012 (moyennement humide)
- Octobre 2012 – septembre 2013 (année sèche)

Les années retenues ont l'avantage de la disponibilité des données hydrologiques du bilan, et pour lesquelles les niveaux piézométriques ont été relevés ou estimés. Pour les périodes choisies, l'année hydrologique débute en octobre, et se termine en septembre, sauf pour l'année 2011-2012, qui a été décalée pour cerner les événements hydrologiques durant l'année 2011, et de savoir qu'elles sont ces influences sur le bilan. La méthodologie utilisée pour ce type du bilan a le même principe que celle du bilan moyen annuel.

### VII.3.5.1. Les apports

#### a) Infiltration des précipitations ( $I_w$ )

L'infiltration efficace présente 40% du cumule de pluie journalière ( $\geq 5$  mm/j) qui tombe sur un impluvium de 85 km<sup>2</sup>. Les données de pluies disponibles sont ceux de la station de Noumeratte.

Les totaux annuels de pluies et celles qui s'infiltrent sont mentionnés sur le tableau ci-dessous:

**Tableau VII. 11: Volumes infiltrés sur les pluies efficaces**  
(10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 et 10/12-09/13)

Période	10/2006-09/2007	10/2008-09/2009	03/2011-02/2012	10/2012-09/2013
Somme des Pj ( $\geq 5$ mm/j)	24	170	109	19
Taux d'infiltration	40%			
Lame d'eau infiltrée (mm)	9.6	68	43.6	7.6
Superficie de l'impluvium (km <sup>2</sup> )	85			
Quantité d'eau infiltré Hm <sup>3</sup> /an	<b>0.86</b>	<b>5.78</b>	<b>3.70</b>	<b>0.64</b>

#### b) Infiltration sur les eaux de surface ( $I_{q-crue}$ )

Durant les années 2008-2009 et 2011-2012, des crues importantes ont lieu au M'Zab, et on atteint jusqu'à Sebkheth Sefioune. Par contre en 2006-2007 et 2012-2013, des crues de très faibles importances se générées sur l'amont du M'Zab.

**Tableau VII.12: Volumes de crues infiltrées pour les périodes:**  
10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 et 10/12-09/13

Période	10/2006-09/2007	10/2008-09/2009	03/2011-02/2012	10/2012-09/2013
Volume écoulé (Hm <sup>3</sup> )	0	51	32	2
Taux d'infiltration	50%			
Quantité d'eau infiltré Hm <sup>3</sup> /an	<b>0</b>	<b>25.5</b>	<b>16</b>	<b>1</b>

#### c) Infiltration sur les eaux d'irrigation ( $I_{r-irri}$ )

On adoptée la valeur moyenne utilisée ultérieurement pour toute la période d'observation du bilan moyenne annuelle, soit **9.85 Hm<sup>3</sup>/an**.

#### d) Restitution des eaux urbaines ( $I_{r-aep/ass}$ )

L'exploitation des données de la population et celles de la consommation journalières nous permettant d'adopter les chiffres d'inventaire des périodes 2005-09 et 2010-15. Le calcul des volumes restitués est mentionné sur le tableau suivant:

**Tableau VII.13: Volumes restituées des eaux urbaines dans la nappe phréatique.**  
(10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 et 10/12-09/13)

Commune	10/2006-09/2007 et 10/2008-09/2009				03/2011-02/2012 et 10/2012-09/2013			
	Population	Besoin en eau (Hm <sup>3</sup> /an)	Rejet (Hm <sup>3</sup> /an)	$I_{r-ass/AEP}$ (Hm <sup>3</sup> /an)	Population	Besoin en eau (Hm <sup>3</sup> /an)	Rejet (Hm <sup>3</sup> /an)	$I_{r-ass/AEP}$ (Hm <sup>3</sup> /an)
Ghardaïa	88 600	4.85	3.88	1.94	115 100	6.3	6.3	3.15
Bounoura	27 700	1.52	1.22	0.61	36 400	1.99	1.99	1.00
El Atteuf	15 000	0.82	0.66	0.33	23 100	1.26	1.26	0.63
Daya	10 900	0.6	0.48	0.24	17 100	0.94	0.94	0.47
Total	142 200	7.79	6.23	<b>3.12</b>	191 700	10.49	10.49	<b>5.25</b>

### VII.3.5.2. Les pertes

Comme dans le cas d'un bilan moyen annuel, les pertes inventés sont : les prélèvements sur la nappe, le déversement vers les nappes avales et l'évaporation à travers la zone non saturée.

#### a) Prélèvement sur la nappe phréatique pour utilisations locales (Qex)

Etant données que la surface agricole utiles est inextensible au moins sur période d'observation (15 ans), le volume d'irrigation reste presque constante pour cette période. Il est de  $50 \text{ Hm}^3/\text{an}$ , dont la contribution de la nappe phréatique est de  $35 \text{ Hm}^3/\text{an}$ .

#### b) Déversement vers la nappe en aval d'El Atteuf (Qp)

Pour chaque année hydrologique on prend en considération les paramètres hydrodynamiques de la section la plus en aval (Barrage d'El Atteuf). L'application de la loi de Darcy sur cette section, résulte les valeurs indiquées au tableau VII.14.

**Tableau VII.14: Débits annuels déversés dans la nappe phréatique aval.**  
(10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 et 10/12-09/13 )

Zones	Paramètres	10/2006-09/2007	10/2008-09/2009	03/2011-02/2012	10/2012-09/2013
El Atteuf	S(m <sup>2</sup> )	6.5	6	8	6
	NS (m)	23870	24180	22940	24180
	I (m/m)	0.02	0.02	0.02	0.03
	K ( m/s)	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
	Q (m <sup>3</sup> /s)	0.143	0.145	0.138	0.218
	V (Hm <sup>3</sup> /an)	<b>4.52</b>	<b>4.58</b>	<b>4.34</b>	<b>6.86</b>

#### c) Evaporation à travers la zone non saturée (E)

La lame d'eau qui s'évapore de la nappe phréatique du M'Zab à travers la zone non saturée est déjà estimée au paragraphe VII.2.6, soit un volume moyen annuel sur la vallée de  $0.4 \text{ Hm}^3/\text{an}$ .

#### d) Variation des réserves (dW)

L'observation des variations de niveau piézométrique et leurs fluctuations annuelles (voir paragraphe V.2.5.5.B) ont servi de faire les constatations suivantes :

- **L'année 10/2006-09/2007**: on constate une baisse générale sur la nappe de 34 cm soit un volume dépensé de  $4.74 \text{ Hm}^3/\text{an}$ .
- **L'année 10/2008-09/2009** : on peut interpoler le niveau piézométrique fluctué par le modèle de la fluctuation simulée sur les graphes V.26 et V.27. On peut conclure que pour une remontée moyenne de 2.9 m, un volume d'eau de  $20.3 \text{ Hm}^3$  va être additionné sur le quasi-total de la nappe phréatique. L'année 2008/2009 est l'épisode la plus pluvieuse sur toute la série d'observation.
- **L'année 03/2011-02/2012** : par interpolation à la même manière sur le graphique V.26, la remontée moyenne sur cette année est de 2.25 m. Cette remonté engendre un volume d'eau en surplus de  $15.75 \text{ Hm}^3$ .

- **L'année 10/2012-09/2013:** cette épisode est caractérisée par une piézométrie déficitaire d'une lame moyenne de 1 m/an. Comme il a été indiqué au paragraphe V.2.5.5.B, ce déficit est lié à la sécheresse qui va débiter en 2012, ainsi que, aux prélèvements estivaux de la nappe phréatique. Le volume dépensé à la suite de cette baisse est de **4.73Hm<sup>3</sup>**.

### VII.3.5.3. Balance d'eau définitive

Ce bilan est résumé dans le tableau suivant:

**Tableau VII.15: Balance d'eau annuelle des années:  
10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 et 10/12-09/13**

Apports en Hm <sup>3</sup> / an					Pertes en Hm <sup>3</sup> / an				
Eléments	10/06-09/07	10/08-09/09	03/11-02/12	10/12-09/13	Eléments	10/06-09/07	10/08-09/09	03/11-02/12	10/12-09/13
Infiltration efficace sur les crues $I_{q\text{-crue}}$	00	25.50	16.00	1.00	Évaporation E	0.40	0.40	0.40	0.40
Infiltration efficace sur les précipitations $I_w$	0.86	5.78	3.70	0.64	Prélèvement pour utilisation locale Qex	35.00	35.00	35.00	35.00
Eaux restituées d'irrigation $I_{r\text{-irri}}$	9.85	9.85	9.85	9.85	Diversement vers aquifères en aval Qp	4.52	4.58	4.34	6.86
Eaux restituées urbaines $I_{r\text{-aep/ass}}$	3.12	3.12	5.25	5.25					
Apport des nappes adjacentes en amont Dw	21.35	16.03	20.69	20.79					
Variation des réserves $\pm dW$	-4.74	20.30	15.75	-4.73					
<b>Total Apport</b>	<b>35.18</b>	<b>60.28</b>	<b>55.49</b>	<b>37.53</b>	<b>Total Perte</b>	<b>39.92</b>	<b>39.98</b>	<b>39.74</b>	<b>42.26</b>

Dans les conditions d'équilibre les apports des nappes adjacentes amonts (Dw) sont calculées par différence :  $Dw = \text{Apports} - \text{Pertes} \pm dW$

### VII.3.5.4. Résultats et discussions

L'examen du tableau VII.15 mis en évidence que la balance annuelle illustre très bien les phénomènes hydrologiques interannuels, par la quelles on peut faire la distinction entre une année humide et une année sèche. Cela peut se répercuter aussi sur la variation des apports et des pertes naturelles d'une année à une autre. Par conséquence, l'année 2006-2007 est considérée comme une année sèche, par contre l'année 2008-2009 est la plus arrosée au moins sur la période d'observation. On peut considérer que l'année 2011-2012 est la suite de l'épisode pluvieuse qui débute à la fin de 2008, mais avec des précipitations et apports superficiels moins. L'année intercalaire entre deux périodes pluvieuses : 2009-2010 est marquée par une pluviométrie nulle. Au début de l'année 2012 sa commence une autre période de sécheresse, caractérisée par une pénurie d'apports météorologiques et un état de basses d'eaux générale marquées sur toute la nappe phréatique de la vallée.

Sur les quartes bilans, les apports sont principalement la contribution des nappes amont, les apports météorologiques et les eaux de drainage infiltrées. Les apports des nappes amont représentent de 27 à 60 % des apports totaux. Ainsi, que celles d'origines météorologiques représentent de 35 à 55% des apports totaux. Les pertes dominantes sont toujours les prélèvements qui sont stables sur toute la période avec une portion qui dépasse 84% du total de pertes. Le diversement vers la nappe en aval est plus au moins stable sur les trois premiers bilans, mais il représente une hausse de 40% à partir de l'année 2012.

L'apport des nappes amont et le diversement vers les nappes aval, présentent une variation aberrante et une discordance très nette avec les apports météorologiques, car on observe plus l'année soit humide plus l'apport de la nappe amont diminue. Ceci peut être expliqué par le fait que la recharge de la nappe par cette voie ne se généralise qu'après quelques années. Donc la nappe phréatique présente une réponse hydrogéologique plus ou moins lente (faible perméabilité  $\leq 3 \times 10^{-4}$  m/s). De-ce-fait, la diminution de cet apport durant l'année pluvieuse 2008-2009 est due certainement à la sécheresse qui a caractérisé les années précédentes (2004-2008). Aussi, la hausse des déversements vers les nappes aval pendant la période sèche 2012-2013 est due à la recharge supplémentaire de la nappe phréatique durant les années pluvieuses (2009-2011). On note que par manque de données sur le comportement hydrodynamique de la nappe phréatique en aval, notamment la perméabilité et l'épaisseur de l'aquifère, le débit de diversement vers l'aval pourrait être sous-estimé.

Enfin, nous assisterons ici à l'installation immédiate des stations hydrométriques et météorologiques le long de la vallée (Daya B D , Mlika et El Atteuf), afin d'avoir des longues séries chronologiques des éléments du bilan hydrologique qui vont renseigner d'une part sur la disponibilité des ressources en eau superficiels et d'autre part sur les changements des divers facteurs mentionnés ci-dessus auraient pu faire subir au bilan hydrologique.

## Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude consiste à approfondir les connaissances du système aquifère de la vallée du M'Zab et à déterminer l'impact de l'activité humaine sur sa balance hydrique en se basant sur des études sommaires : climatologiques, hydrologiques et hydrogéologique. Elle a été l'occasion de développer et d'essayer plusieurs méthodes d'estimation et de calcul des grandeurs de débits, volumes et flux écoulés, infiltrés, évaporés ou prélevés dans ce système hydrologique. L'étude climatologique a permis de conclure que la période pluvieuse sur le M'Zab va d'octobre à avril, avec quelques pluies d'intensité supérieure à 5 mm/24h et qui sont favorables de déclencher des ruissellements. Les pluies journalières de hauteurs supérieures ou égales respectivement à 5 mm, 10 mm et 25 mm représentent respectivement 62 %, 39 % et 14 % du total annuel. Les hauteurs de pluies journalières du M'Zab de fréquence décennale, centennale et millénaire ont été évaluées respectivement à 40 mm, 73 mm et 128 mm. On évalue à 2 ans le période de retour des crues qui atteignent les barrages amont de la vallée. Celles qui sont capables d'y remplir le barrage d'El atteuf (aval de la vallée) ont une fréquence de 5 ans. L'écoulement exceptionnelles depuis Ghardaïa jusqu'à Sebket Sefioune, ne se produirait au plus tard que tous les 8 ans. Les pluies journalières de même fréquence ont une hauteur de 38 mm à Ghardaïa.

L'étude hydrologique descriptive pour l'ensemble de sous-bassins du M'Zab, a permis de déciller les valeurs caractéristiques conduisant aux grandeurs de crue de différentes fréquences. En faisant appel à toute une série d'approches (analyse historique, paramètres caractéristiques, formules Myer, méthode de Rodier et ORSTOM, enquête de crues). Cette étude nous a permis d'établir des lois reliant les temps caractéristiques des crues à la superficie et à la classe de relief. Elle a également fixé des relations entre le coefficient de ruissellement, la perméabilité du bassin et la classe de relief pour différentes pluies. Ces relations ont permis d'établir pour les bassins versants du M'Zab des hydrogrammes des crues à différentes fréquences. Les crues importantes se produisent le plus fréquemment au printemps et à l'automne. Ainsi, elles peuvent intervenir en tout mois de l'année (Crue du 2 juin 1991). Les mois de fréquences les plus faibles ou nulles, sont : janvier, juillet et août.

Les caractéristique des crues du bassin du M'Zab, et notamment les débits et les volumes, ont été évalué par plusieurs méthodes analogiques avec d'autres régions semblables dans le monde. Après comparaisons, nous avons adopté pour la méthode Rodier-Auvray. Nous avons évalué sur

la partie amont du M'Zab (exutoire Daya B Dahua) les volumes :  $V_{10}=11 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{100}= 22 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{1000}= 37 \text{ Hm}^3$ . Par l'effet d'infiltration rapide et l'évaporation intense, ces volumes vont subir des abattements de l'ordre de 80% pour atteindre l'exutoire de Sebket Sefioune, ces volumes deviendront :  $V_{10}= 4 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{100}= 8 \text{ Hm}^3$ ,  $V_{1000}= 13 \text{ Hm}^3$ .

L'étude de quelques événements de crue qui ont caractérisés la région, montrent que la vallée du M'Zab et notamment en zones urbaines proches du lit d'Oued présentent une très forte vulnérabilité face aux risques météorologiques. Les ouvrages de rétention amont sont réalisés afin de réduire les aléas d'inondation et garantir la protection des biens et des populations vis-à-vis à ces événements. Ces installations ont énormément modifié le régime hydrologique original de la vallée, car ils ont réduit de 2.7 à 4 fois les débits transités vers l'aval. Le recalibrage du lit d'Oued M'Zab a pour conséquences : l'aggravation des inondations par accélération d'évacuation des crues et diminution du taux de recharge de la nappe phréatique par infiltration.

Les essais géotechniques réalisés en amont de la vallée notamment Muntz, Porchet et Lugeon montrent que les calcaires et les alluvions cimentés sont relativement peu perméables quand ils sont sains. Ils accusent par contre des niveaux de perméabilités élevés dans les zones fracturées. Les niveaux d'argile de base sont totalement étanches. La perméabilité relativement importante des alluvions et des calcaires générera nécessairement des pertes d'eau importantes. Ces eaux de toutes les façons reviendront dans la vallée à l'aval. Les résultats de l'essai Muntz et Porchet dénombre une perméabilité superficielle (alluvions) entre  $5 \times 10^{-6}$  et  $2 \times 10^{-4}$  m/s, par contre l'essai Lugeon dénombre une perméabilité moyenne de calcaire de  $3 \times 10^{-4}$  m/s. La synthèse des données sur le taux d'infiltration permettent de fixer les un taux de 40% sur les pluies journalières ponctuelles supérieures à 5 mm/h, ainsi un taux de 50% sur l'épandage des eaux de ruissellement et de la percolation. Les essais d'identification des terrains rencontrés lors du sondage dans la nappe phréatique relèvent une porosité efficace moyenne de 20%.

L'étude hydrogéologique et piézométrique de la nappe phréatique sur la période 2005-2015, montre que la piézométrie est en relation étroite aux apports hydrométriques et à la recharge par des eaux d'irrigation et des eaux urbains. La baisse et la hausse de la nappe phréatique ont une amplitude variable dans l'espace et dans le temps. Cette variation piézométrique est fortement impactée par la variation d'apports pluviométriques, de l'activité humaine et les conditions hydrodynamiques de la nappe phréatique.

L'approche géostatistique nous a permis d'établir des cartes isopiézs et des cartes de fluctuation piézométriques, ce qui a mènes d'avoir une meilleure lisibilité des différents aspects de la nappe



phréatique. L'analyse de la fluctuation saisonnière sur la période d'avril 2005- avril 2008 montre une stabilité saisonnière entre la période Hautes eaux et la période Basses eaux, avec un volume moyen fluctué de  $13.75 \text{ Hm}^3$ . La fluctuation annuelle de la nappe phréatique est en relation étroite avec la variation pluviométrique et les apports hydrographiques. On peut distinguer trois périodes successives :

- Une période de sécheresse allant de 2006 jusqu'à la fin de 2008, avec une baisse du niveau d'eau de 40 cm sur toute la nappe, soit un volume perdu de  $5 \text{ Hm}^3$ ;
- Une période humide allant de 2009 jusqu'à le début de 2012, se caractérise par une remontée importante due aux fortes crues de cette période, avec une hausse d'eau moyenne de 355 cm et un volume d'eau en excès de  $49.77 \text{ Hm}^3$ .
- Une autre période sécheresse allant de 2012 jusqu'à la fin de 2015, qui se caractérise une nouvelle phase d'abaissement avec une amplitude de 4 à 1 m/an et un volume moyen perdu de  $54.73 \text{ Hm}^3$ .

Le bilan hydrologique de la nappe phréatique de la vallée du M'Zab est influencé non seulement par le climat régional, mais aussi par la couverture et l'utilisation du sol ainsi que par diverses interventions anthropiques liées à la gestion de l'eau, telles que l'irrigation, les pertes des réseaux urbaines, la retenue d'eau à travers la vallée. Il reflète en conséquence le changement climatique et les affectations du sol.

L'équation simplifiée (6.7) permet d'exprimer le bilan hydrologique de la nappe du M'Zab sans intervenir l'évaporation directe du plan d'eau et sans évapotranspiration. Bien qu'elle soit très minime, la seule évaporation a considérée dans ce bilan est celle à travers ZNS. La variation des réserves en eau sur la période de référence est estimée par exploitation graphique des cartes piézométriques établies. En l'absence des études hydrogéologique et géophysiques approfondies, les pertes et les apports sont en relation avec les déversements des couches aquifères adjacentes. Ce terme peut être estimé par différence des autres éléments du bilan à l'état d'équilibre.

L'examen du bilan moyenne annuel établi sur les années d'observation 2005-2015, permette de constater qu'on peut distinguer deux périodes différentes 2005-2009 et 2010-2015. La première période (2005-2009) est plus pluvieuse que la deuxième période (2010-2015), bien que les deux périodes soient déficitaires. Comme la région du M'Zab est caractérisée par des événements hydrologiques exceptionnels, le bilan moyen annuel ne peut en aucun cas de décrire les paramètres hydrologiques irrégulières caractérisant la région. L'examen des bilans annuels

établis sur les années 10/06-09/07, 10/08-09/09, 03/11-02/13 et 10/12-09/13, montre que la balance annuelle décrit clairement les phénomènes hydrologiques interannuels. Par conséquence, l'effet conjugué du déficit pluviométrique et celles des écoulements superficiels a engendré une baisse d'eau durant l'année 2006-2007. L'année hydrologique 2008 - 2009 aura été excédentaire sur la quasi-totalité de la région en termes pluviométrie. En printemps 2009, la nappe phréatique affiche une réserve correspondant à un état de hausse d'eau très importante caractérisant la totalité de la vallée. L'année 2011-2012 a marqué une hausse d'eau plus moins importante suite aux événements météorologiques de l'année 2011. Un retour vers la normale de la nappe (Basses eaux) pourra être envisagé à partir de l'année 2012. Les apports des nappes amont représentent 27 à 60 % des apports totaux et celles d'origines météorologiques représentent 35 à 55% des apports totaux. Les pertes dominantes sont les prélèvements qui présentent 84% du total. Le déversement vers les nappes en aval est plus au moins stable sur les trois premiers bilans, mais il représente une hausse de 40% à partir de l'année 2012. La discordance de cet élément avec les apports météorologiques, peut être expliqué par le fait que la recharge de la nappe phréatique soit trop lente.

Tous les bilans établis ont permis d'estimer les échanges des paramètres hydrologiques avec des précisions variables. Cependant certains termes restent largement ou partiellement méconnus, en particulier les apports des nappes amont et les déversements vers les nappes aval. Ces éléments devront faire l'objet d'une amélioration de connaissances dans le future.

Au final la précision des bilans établis est suffisante pour statuer l'effet anthropique (l'effet humain) sur l'équilibre du système hydrologique de la nappe phréatique. Cependant, l'étude hydrologique n'est jamais définitive, dans le temps il ya toujours un ajout de données qui vas modifies les impressions et les conclusions. Dans cette perspective est pour améliorer les résultats de cette étude nous proposons les recommandations suivantes :

- L'installation des stations météorologiques et hydrométriques le long de la vallée (Daya B D , Mlika et El Atteuf), afin d'avoir des longues séries chronologiques des éléments du bilan, et qui vont renseigner sur les changements que les divers facteurs mentionnés ci-dessus auraient pu faire subir au bilan hydrologique.
- Réalisation des études géophysiques et géotechniques détaillées sur l'amont et l'aval de la vallée afin de préciser les flux des nappes adjacentes.
- Approfondir l'étude d'impact des barrages et divers aménagements sur le système hydrologique de la vallée.

## Références bibliographiques

- ANNE C. & BENOIT F. (2003).** Flux évaporatoire depuis les nappes phréatiques en région arides. CNRS-IRD-UMH, université du Montpellier, 8p.
- ANRH (2011).** Note sur les ressources aquifère de la région du M'Zab. Agence national des ressources hydrauliques, Ouargla, l'Algérie, 80p.
- ANRH-B.E.T OUED RIGH (1997).** Etude sur les crues de juin 1991 & avril 1997 à l'exutoire de Sebkheth Sefioune à Ouargla. Rapport technique. ANRH – Ouargla, Algérie, 60p.
- BAZIE P. & DIENG B. (1995).** Water balance in unsaturated soil under a Sudano-Sahelien climat. University Louis Pasteur, Strasborg, 173p.
- BEKHOUCHE H. (1998).** Protection du réseau d'assainissement de la vallée du M'Zab contre les crues. Rapport sur la conception de rétention des eaux pluviales BG-ENCH.- Lausanne, 45p.
- BENSSAAD ALI (1998).** Paradoxe environnemental des villes sahariennes, chap :20, Vallée du Rigue. Université de Provence IREMAM - Provence, 254p.
- BENYOUCEF B. (1986).** Le M'Zab : Les pratiques de l'espace. Edition IAD, Alger, 165p.
- BIZEJ.,L.BOURGUET,J.LEMOINE (1972).** Alimentation artificielle des nappes souterraines. Paris, Masson, 178 p.
- BODELLE J., MARGAT J. (1980).** L'eau Souterraine En France. Masson, Paris, 207p.
- BOHART P. (1977).** Géologie de quaternaire de la Chebkheth du M'Zab. Rapport d'étude de Sonatrach – Alger, 35p.
- BOURDAROT G. (1996).** Essais de puits : méthodes d'interprétation. Publication de l'institut Français du pétrole. Edition TECHNIP, Paris, 350p.
- BREMOND R. (1965).** Contribution à l'interprétation des mesures de débit et de rabattement dans les nappes souterraines. Paris, Gauthier-Villars, 118p.
- BUSSON G. (1970).** Le Mésozoïque Saharienne: Essai de synthèse des données des sondages Algéro-Tunisiens, CNRS, Paris, 811p.
- CAPOT-REY.(1939).** Etude des caractéristiques hydrologiques de la vallée du M'Zab. Institut des recherches sahariennes. Alger ; p 468-478.
- CARLIER (1986).** Hydraulique Générale Et Appliquée. Collection de la direction des études et recherches d'Électricité de France. Paris, Eyrolles, 567p.
- CASSAN Maurice (1980).** Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols. Paris : Eyrolles, 1980. 275p.
- CASSAN Maurice (1980).** Aide-mémoire d'Hydraulique Souterraine. Paris, Presse des Ponts et Chaussée, 193p.
- CASTANY Gilbert (1968).** Prospection et exploitation des eaux souterraines. Dunod, Université. Paris : Bordas, 720p.
- CASTANY Gilbert (1982).** Principe et méthode de l'hydrogéologie. Dunod, Université de Paris : Bordas, 237p.

- DAVIAU F. (1986).** Interprétation des essais de puits. Les méthodes nouvelles. Publication de l'institut Français du pétrole, Paris , Edition TECHNIP, 173p.
- DELTA-GHARDAIA (2006).** Plan d'action Ghardaïa pour le développement des systèmes culturels territoriaux- rapport d'étude. Institut méditerranéen et Euromed héritage (UE) – Alger, 109p .
- DETAY Michel (1993).** Le Forage D'eau, Réalisation, entretien réhabilitation. Masson, Paris, 379p.
- DETAY Michel (1997).** La gestion active des aquifères. Masson, Paris, 410p.
- DPAT-Ghardaïa (2015).** Monographie de la wilaya de Ghardaïa 2010-2015. Wilaya de Ghardaïa, l'Algérie, 160p.
- DUBIEF Jean (1963).** Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Institut de météorologie et de Physique du globe de l'Algérie. Alger, 386p.
- DUBIEF Jean (1959).** Le climat du Sahara. Institut des recherches sahariennes. Mémoire hors série, tome 1 et 2. Alger,275p .
- DUPONT A. (1981).** Hydraulique Urbaine et Hydrologie (Tome 1) : Captage et traitement des eaux. Paris, Eyrolles, 263p.
- FONTAINE P. (1969).** Quelques applications du bilan hydrologique. Comète nationale des géologues. Monographie N°36. Paris, 14p.
- GENETIER Bernard (1984).** La Pratique Des Pompages D'essai En Hydrogéologie, Manuels & Méthodes N°9. Orléans, BRGM, 132p.
- HILLEL D. (1998).** L'eau et le sol. Ed. Pédasup 5, Laovain-La-Neuve, France, 350 p.
- JACQUES M. (1984).** Guide pratique d'estimation des probabilités de crues. Saint Gemain. Paris 5 Edition Eyrolles France, 222p.
- JEAN-PAUL LABORDE (2000).** Éléments d'hydrologie de surface. Université de Nice, Sophia Antipolis & CNRS. U.F.R. Espaces et Cultures - Nice, 192p .
- LAFFITE Ph. (1980).** Contribution à l'étude des transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée. Département d'eau, Orléans, 120p.
- LTPSud-BG (2012).** Rapport des résultats des essais géotechniques sur les fondations des ouvrages de rétention amont de la vallée du M'Zab (Labioudh, El Haimer, Boubrik).Rapport 1,2 et 3. LTPS –Ghardaïa, l'Algérie, 95p.
- MICHEL-ALAIN ROCHE (1996).** Protection du réseau d'assainissement de la vallée du M'Zab contre les crues. Rapport d'étude hydrologique. BG-ENCH. Lausanne, 150p.
- ONM-Ghardaïa (2015).** Requête des données climatiques de la station de Noumeratte 1975-2015. Office national météorologique, Wilaya de Ghardaïa, l'Algérie.
- OULED BELKHIR Cheikh.(2002).** Contribution à l'étude et l'établissement du bilan hydrologique de la cuvette d'Ouargla (Sahara Nord-Est septentrional - Algérie). Thèse de Magister. Université de Blida,143p.
- PIERRE-ALAIN ROCHE (2005).** Hydrologie (Chap 6 Hydrogéologie). Polycop de cours.

Edition Ecole nationale Pont et Chaussée, Lausanne, 60 p.

**REMINE B. (2005).** La problématique de l'eau en Algérie, Université de Blida, 180p.

**SARI A. (2002).** Initiation à l'hydrologie de surface. Polycop de cours. Edition HOUMA, Alger, 222p.

**SCHNEEBELI G.(1978).** Hydraulique Souterraine. Collection de la direction des études et recherches d'Électricité de France. Paris , Eyrolles, 354p.

**SOKOLOVSKY D.L (1968).** L'écoulement fluvial. Gydrométéoizdat, Leningrad, 256p.

**UNESCO (1972).** Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional. Rapport final, SASS, Tunis, Tunisie, 78p.

