

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Frères Mentouri Constantine 1
Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire
Département de l'Aménagement du Territoire

N° d'ordre :

Série :



THESE

Présentée pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option : Aménagement du Territoire

Par

KERDOUD SOUHEILA

Sous la direction de
Pr. TATAR Hafiza

THEME

**LES RESSOURCES EN EAU, L'EROSION HYDRIQUE
ET L'ENVASEMENT DES BARRAGES
DANS L'EST ALGERIEN**

Devant le jury :

<i>Dr. M.T BENAZZOZ</i>	Prof. Univ. Frères Mentouri Constantine 1	<i>Président</i>
<i>Dr. Hafiza TATAR</i>	Prof. Univ. Frères Mentouri Constantine 1	<i>Rapporteur</i>
<i>Dr. Khaled BRAHMIA</i>	Prof. Univ. Badji Mohktar d'annaba.	<i>Examineur</i>
<i>Dr. Omar ELAHCENE</i>	Prof. Univ. Ziani Achour de Djelfa.	<i>Examineur</i>
<i>Dr. Abdelaziz LOUAMERI</i>	MCA Univ. Frères Mentouri Constantine 1	<i>Examineur</i>
<i>Dr. Hamouda BOUTAGHANE</i>	MCA Univ. Badji Mohktar d'annaba	<i>Examineur</i>

Thèse soutenue publiquement le 31/03/2022

Remerciements

Ce travail de thèse est le résultat d'une longue expérience professionnelle avec lequel j'ai été amené à rencontrer et échanger avec plusieurs personnes qui m'ont apporté aide et soutien. Cette page est sûrement trop courte pour lister toutes les personnes, mais, je vous propose de remonter le temps pour souligner les rencontres clés sans lesquels je n'aurais pas eu le plaisir d'écrire ces quelques lignes.

*Dans un premier temps, je tiens à exprimer ma gratitude et mes plus sincères remerciements au **Pr Tatar Hafiza**, directrice de cette thèse. Elle a toujours fait preuve de patience et de compréhension, en me laissant une très grande liberté de travail, merci, pour son aide, ses conseils, de m'avoir fait confiance pour que ce travail soit achevé un jour.*

*Mes remerciements vont également à tous les membres du jury. Au professeur **M.T. Benazzouz** d'avoir accepté de présider le jury, ainsi, qu'aux professeurs : **K. Brahmia, O. Elahcene, A. Louameri et H. Boutaghane**, qui par sens du devoir ont accepté de lire et d'expertiser cette thèse.*

*Pour certaines discussions qui éclairent, je tiens également à témoigner toute ma gratitude et ma reconnaissance au **Pr. A. Benkhaled**, pour sa disponibilité ; malgré son emploi du temps qui été trop chargé, il n'a pas hésité de me faire part de son expérience.*

*Il y a aussi toutes ces personnes essentielles à remercier : **Pr. A.Nemouchi, Pr. B.Touati, Pr. M. Larouk,; Pr. M. Marok** et bien évidemment à mes deux amies **Belkadi leila et Gouachi Zakia**. Aux personelles des services de : l'ANBT des barrages : Zit Emba, Koudiet M'daouar et des Fontaines de Gazelles, de l'ANRH Alger et du BENEDER Constantine.*

*À la mémoire de celui qui m'a inculqué et indiqué la bonne voie en me rappelant sans cesse que la patience, la volonté et le travail ont toujours fait de grandes personnes. À **mon défunt père**.*

*À celle qui ne ménage aucun effort pour ma réussite et à su attendre avec patience les fruits de sa bonne éducation. À **ma mère**.*

*Un grand merci à toi **Djamel** pour ton assistance depuis les premières lignes écrites de cette thèse jusqu'au dernier jour avant la soumission du manuscrit. Ta compréhension dans les moments les plus cruciaux et difficiles m'a beaucoup apporté.*

Enfin, A mes sœurs, frères, nièces et neveux.

*À mes enfants, la prunelle de mes yeux
Qu'ils trouvent en cette thèse un chemin
à suivre au pas de leurs parents.*

RESUME

L'érosion hydrique présente un risque naturel qui résulte en premier lieu de la fragilité du milieu et de la socialisation anarchique des versants. Actuellement, elle constitue la première cause de dégradation des ressources en eau. Elle réduit non seulement les surfaces cultivables et la fertilité des sols, mais elle entraîne aussi dans les régions situées en aval, la dégradation de la qualité des eaux et l'envasement des barrages.

Le but de cette thèse est d'évaluer d'une part l'ampleur de cette érosion dans les cours d'eau et de saisir d'autre part, son impact sur la durée de vie des barrages. En vue d'atteindre ces objectifs, trois sous bassins versants situés dans des milieux différents à l'Est Algérien ont été choisis : le sous bassin Kebir Hammam (bassin des Côtiers Constantinois Centre), le sous bassin versant Reboa (les Hauts Plateaux Constantinois) et le sous bassin de Oued El Hai situé sur les versants sud de l'atlas saharien (bassin Chott Melrhir). L'objectif de ce travail consiste, en fait, à estimer le transport solide en suspension des trois bassins versant aux caractéristiques physiques et climatiques différentes, et, à en comparer les dynamiques érosives. Les trois barrages, situés à leur aval ont fait l'objet d'une étude d'envasement (Zit Emba, Koudiet Meddaouar et les Fontaines des Gazelles).

L'étude est basée sur le principe de la modélisation. Les chroniques de débits liquides et solides mesurées ont été utilisées afin de reconstituer les chroniques de flux non mesurés et ceux à partir des débits liquides. Elles concernent quatre stations aménagées sur quatre cours d'eau. Elles reflètent par bassin, des périodes hétérogènes allant de 10 à 22 ans. Les modèles statistiques permettant de reproduire les flux des matières en suspension ont été réalisées sur 4 échelles temporelles (instantanées ou journalières, mensuelles, saisonnières et par période hautes et basses eaux).

Les résultats obtenus montrent de fortes variabilités annuelles, saisonnières et mensuelles dans les trois bassins. Sur une période d'observation de 10 ans (1970/19980), la dégradation moyenne spécifique dans le bassin Kebir Hammam est de 82 tonnes/Km²/an. Les apports solides en suspension les plus importants proviennent de l'hiver (56%). Oued Reboa et Oued Guergour au bassin Reboa produisent en moyenne 300 tonnes/km²/an pour une période étudiée de 11 années (1985/1996). Au printemps, les apports solides en suspension dépassent les 40% du total. Au bassin Oued El Hai, les pics sont plutôt automnaux. L'apport solide spécifique moyen est de 140 tonnes/km²/an (1970/1992).

L'application de l'approche des hystérésis reliant les concentrations en suspension et débits liquides de quelques crues a montré qu'au bassin Kebir Hammam la réponse des concentrations est dans le sens des aiguilles d'une montre « clockwise loop ». Ce modèle se présente particulièrement pour les crues d'hiver et printemps. Ils traduisent un apport de sédiments en suspension qui provient essentiellement, du lit du cours d'eau et une érosion est active dès les premières pluies. En revanche, elle suit le sens contraire d'une montre à Reboa et Oued El Hai. Les sédiments en suspension proviennent du haut des bassins versants et mettent plus de temps à arriver à l'exutoire.

Mots clés : Erosion hydrique, barrage, modélisation, matières en suspension, envasement.

ABSTRACT

Water erosion presents a natural risk those results primarily from the fragility of the environment and the anarchic socialization of the slopes. Currently, it is the leading cause of degradation of water resources. It not only reduces cultivable areas and soil fertility, but also leads to downstream regions in the degradation of water quality and the silting up of dams.

The aim of this thesis is to assess, on the one hand, the extent of this erosion in waterways and, on the other hand, to understand its impact on the lifespan of dams. In order to achieve these objectives, three sub-watersheds located in different environments in eastern Algeria were chosen: the Kebir Hammam sub-basin (Coastals Constantinois Center basin), the Reboa sub-basin (the Constantine Highlands) and the sub-basin of Oued El Hai located on the southern slopes of the Saharan atlas (ChottMelrhir basin). The objective of this work is, in fact, to estimate the suspended solid transport of the three watersheds with different physical and climatic characteristics, and to compare the erosive dynamics. The three dams, located downstream were the subject of a siltation study (Zit Emba, Koudiet Meddaouar and the Fontaines des Gazelles).

The study is based on the principle of modeling. The chronicles of measured liquid and solid flows were used to reconstruct the chronicles of unmeasured flows and those from liquid flows. They concern four stations on four rivers. They reflect by basin, heterogeneous periods ranging from 10 to 22 years. The statistical models making it possible to reproduce the flows of suspended matter were carried out on 4 time scales (instantaneous or daily, monthly, seasonal and by high and low water period).

The results obtained show strong annual, seasonal and monthly variability in the three basins. Over an observation period of 10 years (1970/19980), the average specific degradation in the Kebir Hammam basin is 82 tonnes / km² / year. The largest suspended solids input come from winter (56%). Oued Reboa and Oued Guergour in the Reboa basin produce on average 300 tonnes / km² / year for a period of 11 years (1985/1996). In spring, the suspended solids contributions exceed 40% of the total. In the Oued El Hai basin, the peaks are rather autumnal. The average specific solid input is 110 tonnes / km² / year (1970/1992).

The application of the hysteresis approach linking the suspended concentrations and liquid flows of a few floods has shown that in the Kebir Hammam basin the response of the concentrations is in a "clockwise loop" direction. This model is particularly suitable for winter and spring floods. They reflect a contribution of suspended sediment which comes mainly from the bed of the stream and erosion is active from the first rains. On the other hand, it follows the opposite direction of a watch in Reboa and Oued El Hai. Suspended sediment comes from the top of the watersheds and takes longer to reach the outlet.

Keywords: Water erosion, dam, modeling, suspended solids, siltation, Kebir-Hammam, Reboa, Oued El Hai.

ملخص

تمثل التعرية المائية خطرا طبيعيا ينتج بالدرجة الأولى من الأوساط الهشة والمنحدرات المتحركة بشكل عشوائي من طرف الإنسان. حاليا، تعتبر من الأسباب الأولية المؤدية لتدهور حالة الموارد المائية. فهي لا تقلل من المساحات الصالحة للزراعة و الخصبة فقط لكن أدت إلى تدهور نوعية المياه وتوحد السدود.

إن الهدف الأساسي من هذه الأطروحة هو تقدير هذه التعرية من ناحية وفهم تأثيرها على عمر السدود. من أجل تحقيق هذه الأهداف، تم اختيار كنموذج للأحواض التجمعية الشرقية الجزائرية ثلاثة أحواض ذات أوساط فيزيائية ومناخية مختلفة: حوض كبير حمام والذي ينتمي إلى الأحواض التجمعية القسنطينية الوسطى، حوض ربوعة الواقع ضمن الحوض التجمعي للهضاب العليا القسنطينية، وأخيرا حوض واد الحي المتوضع على المنحدرات الجنوبية للأطلس الصحراوي (حوض شط ملغنيغ). الهدف من هذا العمل في الواقع هو تكميم النقل الصلب العالق لكل حوض من الأحواض الثلاث ومقارنة ديناميكيات التعرية المائية فيها، ومعرفة انعكاساتها على توحد السدود الثلاث الواقعة على مستوى هذه الأودية.

اعتمدت الدراسة على مبدأ النمذجة. تم استخدام لمعطيات الصبوبات الصلبة و السائلة المقاسة لاستخراج فيما بعد المعطيات لفترات غير مقاسة.

أظهرت النتائج لتغيرات سنوية، فصلية و شهرية قوية للحمولة الصلبة العالقة في الأحواض الثلاث. فقد بلغ متوسطها سنويا عند حوض كبير حمام 82 طن/كم² خلال الفترة ما بين 1970 إلى 1980، أهمها كانت في فترة الشتاء (56%). ما نتج عن حوض الربوعة حجم قدره 300 طن/كم² سنة (1985/1996) خلال 11 سنة المدروسة حيث ساهم فيها فصل الربيع ب 40% من إجمالي الحمولة للحوض. بينما في حوض واد الحي، القيم القصوى للحمولة الصلبة العالقة كانت خريفية إلى حد ما. فقد بلغ متوسط الحمولة الصلبة العالقة عند هذا الحوض 140 طن/كم² سنة.

إن تحليل تطور العلاقة ما بين قيم التركيزات العالقة و الصبوبات السائلة على مستوى بعض الفيضانات أظهرت أن استجابة التركيزات للمواد العالقة في حوض واد الكبير تكون في مجملها في اتجاه عقارب الساعة، تخص أساسا فيضانات فصل الشتاء و الربيع و مصدرها قاع الواد نتيجة للأمطار الأولى.

بينما تركيزات المواد العالقة في واد ربوعة و واد الحي تتبع اتجاه معاكس للساعة و المواد العالقة مصدرها من أعلى المنحدرات حيث تستغرق زمتا طويلا للوصول إلى المصب.

الكلمات المفتاحية :

التعرية المائية ، السدود ، النمذجة ، المواد العالقة، الوحد، كبير حمام، الربوعة، واد الحي.

Sommaire

Liste des figures.....	I
Liste des Photos.....	i
Liste des tableaux.....	i
Introduction Générale.....	01
Chapitre 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1. Introduction.....	07
1.2. Etudes antérieures sur l'érosion hydrique.....	07
1.3. Rappels sur l'érosion et l'érosion hydrique.....	13
1.3.1. Les mécanismes de l'érosion.....	14
1.3.2. Les types d'érosion.....	15
1.3.3. Les principaux facteurs de l'érosion.....	18
1.3.4. Méthodes d'évaluation de l'érosion hydrique.....	22
1.4. Le transport solide.....	25
1.5. Le transport solide en suspension.....	27
1.6. Mesures du transport solide en suspension.....	27
1.6.1. Les préleveurs instantanés.....	27
1.6.2. Les préleveurs par intégration.....	28
1.6.3. Les préleveurs à pompe.....	28
1.6.4. Les Pièges à sédiments.....	28
1.6.5. La Mesure de la turbidité.....	29
1.6.6. Estimation du transport par le contrôle de l'envasement des retenues (la bathymétrie).....	29
1.7. Conclusion.....	29
Chapitre 2 : LE TERRITOIRE DE L'EAU	
2.1. Introduction.....	31
2.2. Présentation des bassins d'étude.....	31
2.3. Le relief des bassins.....	32
2.3.1. Les indices de relief (Courbe hypsométrique).....	37
2.4. L'orientation du relief des bassins.....	42
2.5. La géologie régionale des bassins.....	45
2.5.1. La chaîne Alpine.....	45
2.5.2. Le domaine de plate-forme saharienne.....	51
2.6. La Stratigraphie des bassins.....	52
2.6.1. Les formations métamorphiques.....	52
2.6.2. Les formations sédimentaires.....	53

2.7. Sols et végétation des bassins	58
2.7.1. Les Sols des bassins.....	58
2.7.2. La Végétation.....	63
2.8. Conclusion	68

Chapitre 3 : LE CLIMAT DES BASSINS

3.1. Introduction	69
3.2. Le climat en Algérie et sa tendance	69
3.3. Le réseau de surveillance pluviométrique et les séries d'observation	71
3.4. Etude des pluies	74
3.4.1. Evaluation de la variabilité interannuelle du régime des précipitations observées	74
3.4.2. Le cycle des précipitations annuelles et leur tendance	78
3.4.3. Les indices annuels de sécheresse	81
3.4.4. Ajustement des pluies annuelles a une loi de probabilité	85
3.4.5. Le cycle inter-mensuel et mensuel des précipitations	89
3.4.6. Les régimes pluviométriques saisonniers	95
3.4.7. Analyses fréquentielle des précipitations journalières maximales	98
3.5. Le régime thermique	101
3.6. Bilan hydrique	104
3.7. Conclusion	107

Chapitre 4 : L'HYDROLOGIE DES BASSINS

4.1. Introduction	108
4.2. Les caractéristiques morphométriques du réseau hydrographique	108
4.2.1. Le réseau hydrographique.....	108
4.2.2. Typologie du Réseau hydrographique.....	113
4.2.3. Les descripteurs de la forme et de la taille.....	114
4.2.4. Les descripteurs du réseau hydrographique.....	118
4.3. Le réseau de mesure des bassins	121
4.4. Les modules moyens annuels et interannuels	122
4.4.1. L'abondance des modules.....	122
4.4.2. Le coefficient de variation.....	126
4.4.3. Les variations de l'hydraulicité.....	126
4.4.4. Tendence des Modules.....	128
4.4.5. Relations pluies-débits.....	128
4.4.6. Les bilans hydrologiques des bassins.....	129

4.4.7. Ajustement des modules moyens annuels.....	133
4.5. Les modules moyens mensuels et saisonniers.....	135
4.5.1. Les modules moyens mensuels.....	135
4.5.2. Les modules moyens saisonniers.....	138
4.5.3. Coefficients de variation.....	140
4.5.4. Relations entre débits moyens mensuels et pluies.....	140
4.6. Les modules moyens journaliers dans l'année.....	141
4.7. Courbes des débits classés.....	144
4.8. Les modules extrêmes.....	147
4.8.1. Les crues.....	148
4.8.2 Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles.....	155
4.8.3. Les étiages.....	158
4.9. Conclusion.....	160

Chapitre 5 : LES RESSOURCES EN EAU ET LEUR MOBILISATION

5.1. Introduction.....	162
5.2. Les ressources en eau en Algérie.....	162
5.3. Les ressources en eau des bassins.....	163
5.3.1 Les ressources en eau superficielles.....	163
5.3.2. Les eaux souterraines.....	163
5.4. Mobilisation des ressources souterraines.....	168
5.5. Mobilisation des ressources superficielles.....	170
5.5.1. A partir des retenues collinaires.....	170
5.5.2. A partir des barrages.....	174
5.5.3. Quelques caractéristiques techniques des barrages étudiés.....	176
5.5.4. Bilans de régularisation des barrages.....	184
5.6. L'envasement des barrages.....	199
5.7. Conclusion.....	203

Chapitre 6 : MODELISATION STATISTIQUE ET QUANTIFICATION DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION

6.1. Introduction.....	205
6.2. Le réseau de mesures et qualité des données.....	205
6.2.1. Les mesures aux stations hydrométriques.....	205
6.2.2. Les mesures bathymétriques.....	208
6.3. Méthodologie de travail.....	208
6.3.1 Les apports solides mesures.....	208
6.3.2. La courbe d'évaluation des sédiments « la courbe rating curve ».....	209
6.3.3. Construction et choix des modèles.....	210

6.3.4. Correction des modèles.....	211
6.3.5. Critères de validation des modèles.....	212
6.4. Variations des concentrations.....	213
6.5. Modélisations des débits liquides-Concentrations.....	215
6.6. Modélisations des débits liquides-débits solides.....	215
6.6.1. Examen des relations en puissance sur une série complète	215
6.6.2. Examen des relations en puissance sur une échelle mensuelle	216
6.6.3. Examen des relations en puissance sur une échelle saisonnière	218
6.6.4. Examen des relations en puissance sur une échelle hautes et basses eaux....	222
6.7. Résultats de la modélisation.....	224
6.8. La dynamique érosive dans les bassins.....	228
6.8.1 Variabilité interannuelle des apports solides.....	228
6.8.2. Variabilité saisonnière et mensuelle des apports solides.....	232
6.9. Projection des modèles et bathymétrie	234
6.9.1. Extension des données des modèles et bathymétrie.....	236
6.10 Caractérisation du modèle statistique en puissance à l'échelle des crues (<i>hystérésis</i>)	238
6.10.1. Les classes d'hystérésis les plus prépondérants.....	238
6.10.2. La sélection des crues et méthodologie.....	242
6.10.3. Résultats et interprétations.....	242
6.11. Conclusion.....	252
 Chapitre 7 : LES ZONES SENSIBLES A L'EROSION DANS LES BASSINS	
7.1. Introduction.....	254
7.2. Méthodologie de travail.....	254
7.3. Classification et codification des facteurs par degré de sensibilité à l'érosion.....	256
7.3.1. Le facteur pente.....	256
7.3.2. Occupation et protection du sol	259
7.3.3. La géologie des formations superficielles lithologiques	262
7.3.4. Les pluies.....	266
7.4. La combinaison des facteurs.....	267
7.4.1. Croisement des deux facteurs pente/occupation des sols	267
7.4.2. Croisement des trois facteurs pente /occupation et lithologie (cartes potentielles d'érosion).....	268
7.4.3. Les zones sensibles à l'érosion.....	272
7.5. Conclusion.....	281
Conclusion Générale.....	283
Références bibliographiques	
Annexes.....	A

Liste des figures

Liste des Figures

Chapitre 1

Fig. 1 : Processus de l'érosion hydrique.....	13
Fig. 2 : Les principaux facteurs de l'érosion hydrique.....	17
Fig. 3 : Battage et perte du sol.....	18
Fig. 4 : Modes de transport solide, d'après Graf et Altinakar. Source Magali Jodeau ; 2004.....	26
Fig. 5 : Diagramme classique de Hjulstrom (1935) : Etat d'un grain en fonction de la taille et la vitesse du courant.....	27

Chapitre 2

Fig. 6 : Localisation des bassins.....	32
Fig. 7 : Les altitudes -Bassin Kebir Hammam-.....	33
Fig. 8 : Coupes topographiques du relief –Bassin Kebir Hammam-.....	34
Fig. 9 : Les pentes –Bassin Kebir Hammam-.....	34
Fig. 10 : Coupes topographiques –Bassin Reboa-.....	35
Fig. 11 : Les altitudes –Bassin Reboa-.....	35
Fig. 12 : Les pentes –Bassin Reboa-.....	36
Fig. 13 : Coupes topographiques –Bassin Oued El Hai-.....	37
Fig. 14 : Les altitudes –Bassin Oued El Hai-.....	37
Fig. 15 : Les pentes –Bassin Oued El Hai-.....	38
Fig. 16 : Etat de maturité du relief des bassins versant.....	39
Fig. 17 : Courbes hypsométriques –Oued El Hai-.....	39
Fig. 18 : Orientation des versants –Bassin Kebir Hammam-.....	44
Fig. 19 : Orientation des versants –Bassin Reboa-.....	45
Fig. 20 : Orientation des versants –Bassin Oued El Hai-.....	45
Fig. 21 : Les principales unités structurales de l'Algérie : Coupe Nord-Sud (H. Haddoum).	46
Fig. 22 : La géologie -Bassin Kebir Hammam-.....	48
Fig. 23 : La géologie –Bassin Reboa-.....	51
Fig. 24 : La géologie -Bassin Oued El Hai-.....	53
Fig. 25 : La lithologie –Bassin Kebir Hammam-.....	54
Fig. 26 : La lithologie –Bassin Reboa-.....	56
Fig. 27 : La lithologie –Bassin Oued El Hai-.....	57
Fig. 28 : La pédologie –Bassin Kebir Hammam.....	60
Fig. 29 : La pédologie –Bassin Reboa-.....	61
Fig. 30 : La pédologie –Bassin Oued El Hai-.....	62
Fig. 31 : L'occupation du sol –Bassin Kebir Hammam-.....	64
Fig. 32 : L'occupation du sol –Bassin Reboa-.....	65
Fig. 33 : L'occupation du sol –Bassin Oued El Hai-.....	66

Chapitre 3

Fig. 34 : Les domaines bioclimatiques du Nord-Est de l'Algérie, d'après COTE 1998.	71
Fig. 35 : Localisation des stations pluviométriques –Bassin Kebir Hammam-.....	74
Fig. 36 : Localisation des stations pluviométriques –Bassin Reboa-.....	74
Fig. 37 : Localisation des stations pluviométriques –Bassin Oued El Hai-.....	75
Fig. 38 : Evolution de la pluie annuelle aux stations du bassin Kebir Hammam et pentes de Sen (lignes en pointillés rouges).....	77
Fig. 39 : Evolution de la pluie annuelle aux stations du bassin Reboa et pentes de Sen (lignes en pointillés rouges).....	79
Fig. 40 : Evolution de la pluie annuelle aux stations du bassin Oued El Hai et pentes de Sen (lignes en pointillés rouges).	79
Fig. 41 : Séries des stations présentant une rupture en moyenne.	82
Fig. 42 : Distribution des pluies moyennes inter-mensuelles –Stations bassin Kebir Hammam-.....	94

Fig. 43 : Distribution des pluies moyennes inter-mensuelles –Stations bassin Reboa-.....	95
Fig. 44 : Distribution des pluies moyennes inter-mensuelles –stations bassin Oued El Hai-.....	96
Fig. 45 : Diagramme ombrothermique de Gaussen -Station Skikda O.N.M-.....	104
Fig. 46 : Diagramme ombrothermique de Gaussen -Station Batna O.N.M-.....	105
Fig. 47 : Diagramme ombrothermique de Gaussen -Station Biskra O.N.M-.....	105

Chapitre 4

Fig. 48 : Profil en long O.Hammam et O.Emchekel.....	111
Fig. 49 : Réseau hydrographique et localisation des stations hydrométriques.....	111
Fig. 50 : Longueurs des principaux cours d'eau –bassin Kebir Hammam-.....	112
Fig. 51 : Profil en long de Oued Reboa.....	113
Fig. 52 : Longueurs des principaux cours d'eau –bassin Reboa-.....	114
Fig. 53 : Profil en long d'Oued El Hai.....	114
Fig. 54 : Longueurs des principaux cours d'eau –bassin Oued El Hai-.....	115
Fig. 55 : Hiérarchisation du réseau hydrographique.....	117
Fig. 56 : Variation des débits à la station de Ain Charchar.....	125
Fig. 57 : Variation des débits à la station Reboa et Timgad.....	125
Fig. 58 : Variation des débits à la station El Kantara.....	127
Fig. 59 : Variation de l'hydraulicité –Station Ain Charchar-.....	128
Fig. 60 : Variation des débits à la station Reboa.....	129
Fig. 61 : Variation des débits à la station Timgad.....	129
Fig. 62 : Variation de l'hydraulicité –Station El Kantara-.....	129
Fig. 63 : Relations pluies-débits –station Ain Charchar-.....	130
Fig. 64 : Relations pluies-débits –stations Reboa et Timgad-.....	131
Fig. 65 : Relations pluies-débits –station station El Kantara -.....	131
Fig. 66 : Bilans hydrologiques par station.....	132
Fig. 67 : Ajustement des débits moyens annuels à loi Gamma –Station Ain Charchar.....	136
Fig. 68 : Ajustement des débits moyens annuels à loi Log-normale -Stations Reboa-.....	136
Fig. 69 : Ajustement des débits moyens annuels à loi Log-normale -Stations Timgad-.....	136
Fig. 70 : Ajustement des débits moyens annuels à loi Gamma –Station El Kantara-.....	136
Fig. 71 : Variation mensuelle des débits et pluies –Station Ain Charchar-.....	138
Fig. 72 : Variation mensuelle des débits et des pluies–Station Reboa-.....	139
Fig. 73 : Variation mensuelle des débits et des pluies –Station Timgad-.....	139
Fig. 74 : Variation mensuelle des débits et des pluies –Station El Kantara-.....	140
Fig. 75 : Distribution saisonnières des débits –Station Ain Charchar-.....	140
Fig. 76 : Distribution saisonnières des débits –Station Reboa-.....	141
Fig. 77 : Distribution saisonnières des débits –Station Timgad-.....	141
Fig. 78 : Distribution saisonnières des débits –Station El Kantara-.....	142
Fig. 79 : Relations entre débits et pluies mensuels par station.....	142
Fig. 80 : Variation journalière des débits à la station Ain Charchar.....	144
Fig. 81 : Variation journalière des débits à la station Reboa.....	145
Fig. 82 : Variation journalière des débits à la station Timgad.....	143
Fig. 83 : Variation journalière des débits à la station El Kantara.....	146
Fig. 84 : Courbe des débits classés –Station Ain Charchar-.....	148
Fig. 85 : Courbe des débits classés –Station Reboa-.....	148
Fig. 86 : Courbe des débits classés –Station Timgad-.....	149
Fig. 87 : Courbe des débits classés –Station El Kantara-.....	149
Fig. 88 : Ajustement de la série des débits maximums à loi Gamma -Station Ain Charchar-.....	158
Fig. 89 : Ajustement de la série des débits maximums à loi Log-normale –Station Reboa -.....	158
Fig. 90 : Ajustement de la série des débits maximums à loi Gamma –Station Timgad-.....	158
Fig. 91 : Ajustement de la série des débits maximums à loi Gamma –Station El Kantara-.....	159
Fig. 92 : Débits d'étiages mensuels –Station Ain Charchar-.....	160
Fig. 93 : débits d'étiages mensuels –Station Reboa -.....	161
Fig. 94 : Débits d'étiages mensuels –Station Timgad-.....	161
Fig. 95 : Débits d'étiages mensuels –Station El Kantara-.....	162

Chapitre 5

Fig. 96 : Les nappes phréatiques –Bassin Zit Emba- (source : PNE, 2010)	166
Fig. 97 : Les nappes phréatiques –Bassin Reboa- (source : PNE, 2010)	168
Fig. 98 : Les nappes phréatiques –Bassin Oued El Hai- (source : PNE, 2010)	169
Fig. 99 : Localisation des forages en exploitation au bassin Kebir Hammam (ABHCSM, 2012).....	171
Fig. 100 : Localisation des forages en exploitation au bassin Reboa (ABHCSM, 2012).....	171
Fig. 101 : Localisation des forages en exploitation au bassin Oued El Hai (ABHCSM, 2012)	172
Fig. 102 : Localisation des retenues collinaires -Bassin Kebir Hammam.....	174
Fig. 103 : Localisation des barrages en exploitation et réalisés dans l’Est Algérien (Source : ABHCSM, 2018)	178
Fig. 104 : Schéma du transfert du barrage Beni Haroun.	184
Fig. 105 : Schématisation du bilan hydrologique d’une retenue d’eau.....	187
Fig. 106 : Les apports annuels du barrage Zit Emba.....	189
Fig. 107 : Les apports mensuels au barrage Zit Emba.....	189
Fig. 108 : Les pluies au site du barrage Zit Emba.....	189
Fig. 109 : Les apports du barrage Koudiet Meddaouar.....	190
Fig. 110 : Les apports mensuels du barrage Koudiet M’daouar.....	190
Fig. 111 : Les pluies à la station du barrage Koudiet M’daouar.....	191
Fig. 112 : Les apports du barrage Fontaines des Gazelles.....	191
Fig. 113 : Les apports mensuels au barrage Fontaines des Gazelles.....	192
Fig. 114 : Les pluies à la station du barrage Fontaines des Gazelles.....	192
Fig. 115 : Les volumes annuels d’eau évaporés au niveau du barrage Zit Emba.....	193
Fig. 116 : Les volumes mensuels d’eau évaporés au niveau du barrage Zit Emba.....	194
Fig. 117 : Les volumes annuels d’eau évaporés au niveau du barrage Koudiet M’daouar.....	194
Fig. 118 : Les volumes mensuels d’eau évaporés au niveau du Koudiet M’daouar.....	195
Fig. 119 : L’évaporation au niveau du Fontaines des Gazelles.....	195
Fig. 120 : Les volumes mensuels d’eau évaporés au niveau du barrage Fontaines des Gazelles.....	196
Fig. 121 : Déversements et vidanges du barrage Zit Emba.....	197
Fig. 122 : Déversements et vidanges du barrage Koudiet M’daouar.....	197
Fig. 123 : Déversements et vidanges du barrage Fontaines des Gazelles.....	198
Fig. 124 : Les Fuites du barrage Zit Emba.....	199
Fig. 125 : Les Fuites du barrage Koudiet M’daouar.....	199
Fig. 126 : Destination des eaux du barrage Zit Emba.....	200
Fig. 127 : Destination des eaux du barrage Koudiet M’daouar.....	201
Fig. 128 : Destination des eaux du barrage Fontaines des Gazelles.....	201
Fig. 129 : Courbe surface/capacité/hauteur du barrage Zit Emba.....	204
Fig. 130 : Courbe surface/capacité/hauteur du barrage Fontaine des Gazelles.....	205

Chapitre 6

Fig. 131 : Distribution dans l’année des mesures de concentrations et des débits liquides à la station de Ain Charchar (Bassin Kebir Hammam) (1970-2000)	209
Fig. 132 : Distribution dans l’année des mesures de concentrations et des débits liquides à la station de Reboa (Bassin Reboa) (1985-2006).	209
Fig. 133 : Distribution dans l’année des mesures de concentrations et des débits liquides à la station de Timgad (Bassin Reboa) (1985-2006)	209
Fig. 134 : Distribution dans l’année des mesures de concentrations et des débits liquides à la station d’El Kantara (Bassin Oued El Hai) (1970-1992).	209
Fig. 135 : Variation des valeurs de concentrations par station (a) Ain Charchar ; (b) Reboa; (c) Timgad; (d) El Kantara.	217
Fig. 136 : Relations entre les débits liquides et les débits solides instantanés a) Station Ain Charchar; b) Station Reboa; c) Station Timgad; d) Station El Kantara.	218
Fig. 137 : Relations mensuelles entre le paramètre « a » et l’exposant « b » aux stations Reboa et Timgad.....	221
Fig. 138 : relation entre les moyennes des pluies saisonnières et l’exposant « b »	222
Fig. 139 : Relations entre les débits liquides et les débits solides à l’échelle des saisons -Station Ain Chachar-...	223
Fig. 140 : Relations entre les débits liquides et les débits solides à l’échelle des saisons-Station Reboa-.....	223

Fig. 141 : Relations entre les débits liquides et les débits solides à l'échelle des saisons -Station Timgad-.....	224
Fig. 142 : Relations entre les débits liquides et les débits solides à l'échelle des saisons-Station El Kantara-.....	224
Fig. 143 : Relations entre les débits liquides et les débits solides à l'échelle des hautes et basses eaux- station de Ain Charchar-.....	226
Fig. 144 : Relations entre les débits liquides et les débits solides à l'échelle des hautes et basses eaux-Station Reboa-.....	226
Fig. 145 : Relations entre les débits liquides et les débits solides à l'échelle des hautes et basses eaux-Station Timgad-.....	226
Fig. 146 : Relations entre les débits liquides et les débits solides à l'échelle des hautes et basses eaux-Station El Kantara-.....	226
Fig. 147 : Variation annuelles des apports solides et liquides -bassin Kebir Hammam.....	231
Fig. 148 : Variation annuelles des apports solides et liquides -bassin Reboa.....	233
Fig. 149 : Variation annuelles des apports solides et liquides -bassin Oued El Hai-.....	233
Fig. 150 : Variation saisonnières des apports solides et liquides -bassin Kebir Hammam-.....	235
Fig. 151 : Variation mensuelles des apports solides et liquides -bassin Kebir Hammam-.....	235
Fig. 152 : Variation saisonnières des apports solides et liquides -bassin Reboa.....	235
Fig. 153 : Variation mensuelles des apports solides et liquides-bassin Reboa-.....	236
Fig. 154 : Variation saisonnières des apports solides et liquides -bassin Oued El Hai-.....	236
Fig. 155 : Variation mensuelles des apports solides et liquides-bassin Reboa-.....	237
Fig. 156 : Modèles des relations C/Q _l (G.P.Williams 1989)	243
Fig. 157 : Exemples de l'évolution temporelle des concentrations (g/l) et du débit liquide Q _l (m ³ /s) dans les stations des trois bassins ; mise en évidence des phénomènes d'hystérésis dans la relation C=f(Q)...	248

Chapitre 7

Fig. 158 : Schéma méthodologique pour le croisement de cartes.....	258
Fig. 159 : Sensibilité à l'érosion selon la pente –Bassin Kebir Hammam-.....	260
Fig. 160 : Sensibilité à l'érosion selon la pente –Bassin Reboa-.....	261
Fig. 161 : Sensibilité à l'érosion selon la pente –Bassin Oued El Hai-.....	261
Fig. 162 : Sensibilité à l'érosion selon l'occupation du sol –Bassin Kebir Hammam-.....	263
Fig. 163 : Sensibilité à l'érosion selon l'occupation du sol –Bassin Reboa-.....	264
Fig. 164 : Sensibilité à l'érosion selon l'occupation du sol –Bassin Oued El Hai-.....	265
Fig. 165 : Sensibilité à l'érosion selon la nature lithogique des roches -Bassin Kebir Hammam-.....	267
Fig. 166 : Sensibilité à l'érosion selon la nature lithogique des roches - Bassin Reboa-.....	268
Fig. 167 : Sensibilité à l'érosion selon la nature lithologique des roches -Bassin Oued El Hai.....	269
Fig. 168 : Sensibilité potentielle à l'érosion 1 –Bassin Kebir Hammam-.....	271
Fig. 169 : Sensibilité potentielle à l'érosion 1 –Bassin Reboa-.....	272
Fig. 170 : Sensibilité potentielle à l'érosion 1 –Bassin Oued El Hai-.....	272
Fig. 171 : Sensibilité potentielle à l'érosion 2 -Bassin Kebir Hammam.....	273
Fig. 172 : Sensibilité potentielle à l'érosion 2 - Bassin Reboa-.....	274
Fig. 173 : Sensibilité potentielle à l'érosion 2 -Bassin Oued El Hai-.....	274
Fig. 174 : L'aléa érosion –Bassin Kebir Hammam.....	276
Fig. 175 : L'aléa érosion –Bassin Reboa-.....	279
Fig. 176 : L'aléa érosion –Bassin Oued El Hai-.....	283

Liste des Photos

Liste des Photos

Photo 1 : Les sols alluviaux à Ain Touta –bassin Oued El Hai-.....	61
Photo 2 : <i>Lac de retenue du barrage de Zit Emba (Google Earth, 2016)</i>	180
Photo 3 : <i>la digue du barrage de Zit Emba</i>	180
Photo 4 : <i>Lac de retenue du barrage Koudiet M'daouar (Google Earth, 2017)</i>	182
Photo 5 : <i>la digue du barrage de Koudiet Medaouar</i>	182
Fig. 104 : Schéma du transfert du barrage Beni Haroun.	182
Photo 6 : Lac de retenue du barrage des Fontaines des Gazelles.	185
Photo 7 : La digue du barrage des Fontaines des Gazelles.....	186
Photo 8 : Zone 1 (Bassin Kebir Hammam), occupation du sol (rouge : des terrains à fortes pentes, dénudés et ravinés; vert : zones cultivées et labours dans le sens des pentes)	277
Photo 9 : Zone 1 (Bassin Kebir Hammam), Terrains fortement ravinés par les eaux de ruissellement.....	277
Photo 10 : Zone 2 (Bassin Kebir Hammam) ; Terrains agricoles à proximité de la forêt de Oued Soudane.....	278
Photo 11 : Zone 1 (Bassin Reboa), classe 3 ; badlands impropres à l'agriculture.....	279
Photo 12 : Zone 2.1 a (Bassin Reboa), Classe 4 : rouge : terrains peu couverts par la végétation; vert : terrains cultivés sur des pentes fortes au bord d'un cours d'eau.....	280
Photo 13 : Zone 2.1 b (Bassin Reboa), classe 4 ; rouge : terrains à fortes pentes couverts par une végétation très espacés ; vert : fortes pentes cultivés.....	280
Photo 14 : Zone 2.2 (Bassin Reboa), classe 4 ; rouge : terrains à fortes pentes, dénudés constitués de marnes et affectés par un ravinement intense et profond.....	281
Photo 15 : Zone 3 (Bassin Reboa), classe 4: érosion différentielle (apparence des chevrons) au versant nord: terrains dénudés à mouvements superficiels de matériaux.....	281
Photo 16 : Zone 4 (Bassin Reboa), classe 4 ; rouge : terrains cultivable en repos renfermant des zones ravinées.....	282
Photo 17 : Zone1 (Bassin Oued El Hai), classe 4 ; rouge continu: zones ravinées sur des terrains à nus ; rouge discontinu : des chevrons (érosion différentielle)	283
Photo 18 : Zone 2 (Bassin Oued El Hai), classe 4 : Ravines actives et bad-lands.....	284
Photo 19 : Zone 3 (Bassin Oued El Hai), classe 4 : ravinement généralisés à un stade avancée de l'érosion (badlands)	284

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau 1 : Influence de la nature de la couverture végétale sur le ruissellement.....	19
---	----

Chapitre 2

Tableau 2 : La répartition des altitudes dans les bassins.....	33
Tableau 3 : La répartition des pentes dans les bassins.....	34
Tableau 4 : Les résultats d'indices de relief des bassins.....	41
Tableau 5 : Les classes du relief selon l'indice de pente global « Ig »	42
Tableau 6 : Les classes du relief selon la dénivelée spécifique « Ds »	42
Tableau 7 : Les résultats des indices de pentes et classification du relief des bassins.....	43
Tableau 8 : Pourcentages d'exposition des versants par bassin.	44
Tableau 9 : Effet sur la stabilité structurale pour chaque type de sols	59
Tableau 10 : Occupation du sol –Bassin Kebir Hammam-.....	65
Tableau 11 : Occupation du sol –Bassin Reboa et Oued El Hai-.....	67

Chapitre 3

Tableau 12 : Quelques caractéristiques des stations pluviométriques.....	72
Tableau 13 : Les lacunes dans les données pluviométriques par Station	73
Tableau 14 : Les pluies déficitaires et excédentaires par station.....	76
Tableau 15 : Résultats de l'application du test Pettitt et Mann-Kendall sur les pluies moyennes annuelles.....	82
Tableau 16 : Nombres d'années sèches et humides par indice IDP.....	85
Tableau 17 : La classification de la sécheresse suivant les valeurs du SPI.....	86
Tableau 18 : Résultats de la classification du SPI par station.....	87
Tableau 19 : Intervalles de confiance et Test d'adéquation (Khi Deux) pour les stations étudiées.....	89
Tableau 20 : Quantiles estimés pour les stations.....	90
Tableau 21 : Périodes de retour pour les précipitations maximales et minimales.....	90
Tableau 22 : Moyenne, écart-type, et coefficient de variation des séries Pluviométriques mensuelles.....	92
Tableau 23 : L'indice de fournier.....	97
Tableau 24 : Concentration des pluies par indice de Peguy.....	97
Tableau 25 : Distribution saisonnière des pluies par station.....	99
Tableau 26 : Quantités des précipitations maximales journalières.....	100
Tableau 27 : Nombres de jours de pluies maximales par mois et par station.....	101
Tableau 28 : Périodes de retour des pluies maximales journalières.....	102
Tableau 29 : Les températures moyennes, maximales, minimales mensuelles par station.....	104
Tableau 30 : Bilan hydrique du bassin Kebir Hammam (Station Skikda O.N.M)	108
Tableau 31 : Bilan hydrique du bassin Reboa (Station Batna O.N.M)	108
Tableau 32 : Bilan hydrique du bassin Oued El Hai (Station Biskra O.N.M)	108

Chapitre 4

Tableau 33 : Les principaux cours d'eau par bassin.....	111
Tableau 34 : Les indices de taille et de forme.....	118
Tableau 35 : Les indices de l'organisation du réseau hydrographique.....	122
Tableau 36 : Caractéristiques des stations hydrométriques.....	124
Tableau 37 : Débits moyens annuels par station.....	126
Tableau 38 : Résultats des tests de tendance sur les modules interannuels.....	130
Tableau 39 : Bilan hydrologique par station.....	134
Tableau 40 : Quantiles des débits par station.....	136
Tableau 41 : Moyennes et coefficients mensuels des débits.....	137
Tableau 42 : Débits caractéristiques en (m ³ /s) par station.	147
Tableau 43 : Répartition en (%) Du nombre de crues Fréquence des crues par station.....	151
Tableau 44 : Volumes totaux écoulés lors des crues.....	153
Tableau 45 : Caractéristiques des crues par bassin.....	155
Tableau 46 : Quantiles des maximums journaliers.....	159
Tableau 47 : Périodes de retour des maximums journaliers de la série étudiée.....	159

Tableau 48 : Débits moyens mensuels d'étiage aux différentes stations.....	160
---	------------

Chapitre 5

Tableau 49 : Les potentialités en eau souterraines par bassin.....	165
Tableau 50 : Les retenues collinaires par bassin.....	173
Tableau 51 : Volumes de vases dans les retenues collinaires –Bassin Kebir Hammam-.....	175
Tableau 52 : Les barrages de l'Est Algérien en exploitation, réalisés et en cours de réalisation.....	179
Tableau 53 : Quelques caractéristiques technique du barrage <i>Zit Emba</i>	181
Tableau 54 : Quelques caractéristiques technique du barrage <i>Koudiet M'daouar</i>	183
Tableau 55 : Quelques caractéristiques technique du barrage <i>des Fontaines des Gazelles</i>	186
Tableau 56 : Envasement des barrages d'après les levés bathymétriques.....	203

Chapitre 6

Tableau 57 : Périodes d'observations et sélectionnées pour l'étude.....	208
Tableau 58 : Quelques caractéristiques des concentrations par stations.....	216
Tableau 59 : Les différentes périodes et leurs coefficients de corrélation bassin Kebir Hammam (1970-1980)...	219
Tableau 60 : Les différentes périodes et leurs coefficients de corrélation mensuels par bassin.....	219
Tableau 61 : Les différentes périodes et leurs coefficients de corrélation bassin Oued El Hai (1970-1992).....	222
Tableau 62 : Les différentes périodes et leurs coefficients de corrélation bassin Oued El Hai (1970-1992).....	225
Tableau 63 : Résultats des apports solides en suspension–Station Ain Charchar-.....	227
Tableau 64 : Résultats des apports solides en suspension–Station bassin Reboa-.....	229
Tableau 65 : Résultats des apports solides en suspension–Station Timgad-.....	229
Tableau 66 : Résultats des apports solides en suspension–Station El Kantara-.....	230
Tableau 67 : Les apports annuels solides en suspension -bassin Kebir Hammam-.....	231
Tableau 68 : Les apports annuels solides en suspension –bassin Reboa-.....	232
Tableau 69 : Les apports annuels solides en suspension –bassin Oued El Hai-.....	234
Tableau 70 : Bilan moyen annuel des Apports solides dans le bassin Kebir Hammam au niveau du barrage Zit Emba par les différents modèles régressifs.....	239
Tableau 71 : Bilan moyen annuel des Apports solides dans le bassin de Reboa au niveau du barrage Koudiet M'daouar par les différents modèles régressifs.....	239
Tableau 72 : Bilan moyen annuel des Apports solides dans le bassin de Oued El Hai au niveau du barrage des Fontaines des Gazelles par les différents modèles régressifs.....	240
Tableau 73 : Types de boucles d'hystérésis (d'après Williams, 1989).	244
Tableau 74 : Les paramètres statistiques des crues sélectionnées par bassin.	245
Tableau 75 : Les paramètres caractéristiques des relations C-Q en montée de crue et en décrue pour les crues du bassin Kebir Hammam –Station Ain Charchar-.....	251
Tableau 76 : Les paramètres caractéristiques des relations C-Q en montée de crue et en décrue pour les crues du bassin Reboa –Station Reboa-.....	252
Tableau 77 : Les paramètres caractéristiques des relations C-Q en montée de crue et en décrue pour les crues du bassin Reboa –Station Timgad-.....	253
Tableau 78 : Les paramètres caractéristiques des relations C-Q en montée de crue et en décrue pour les crues du bassin Oued El Hai –StationEl Kantara-.....	254

Chapitre 7

Tableau 79 : Codification des pentes.....	259
Tableau 80 : Codification de l'occupation du sol.....	262
Tableau 81 : Classification du facteur occupation du sol par bassin.....	263
Tableau 82 : Codification des formations lithologiques.....	266
Tableau 83 : Classes et répartition des formations lithologiques par bassin.....	267
Tableau 84 : Codification des pluies par classe.....	269

Tableau 85 : Répartition des superficies par classe du croisement de la pente/occupation des sols.....	270
Tableau 86 : répartition des superficies par classe du croisement de la pente /occupation et lithologie.....	273
Tableau 87 : Répartition des superficies par classe des zones sensibles à l'érosion par bassin.....	275

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La ressource en eau constitue un facteur incontournable dans l'aménagement du territoire. L'eau qui demeure à l'heure actuelle une ressource rare et précieuse est à l'origine de toutes les civilisations. Elle est non seulement source de vie, mais aussi elle contribue à modifier les milieux de vie de façon souvent irrémédiable, par sa propre dynamique, la dynamique érosive. L'érosion hydrique, (l'ablation, le transport et la sédimentation des matériaux) façonne perpétuellement la face de la terre et participe ainsi à l'évolution des écosystèmes.

Actuellement la disponibilité de cette ressource et son utilisation sont confrontées à des menaces de plus en plus grandissantes. Jusqu'à une époque récente, les cours d'eau par exemple, étaient le plus souvent considérés comme de simples «gouttières» plus ou moins stables garantissant passivement le transfert de l'amont vers l'aval de l'eau. Aujourd'hui, l'intervention de l'homme et la surexploitation de ces milieux ont beaucoup modifié son paysage. En effet, la croissance démographique, l'intensification des activités industrielles et l'amélioration des niveaux de vie se sont traduits par un renforcement de la concurrence pour cette ressource limitée et l'intensification des problèmes y afférents. Outre, la dégradation des cours d'eau par des matières chimiques et organiques, une dégradation physique, telle que le degré de température, la turbidité et les matières en suspension, peut être relevée.

Partout dans le monde, l'érosion hydrique constitue la première cause de dégradation de la qualité des cours d'eau. Elle est l'un des problèmes qui entrave le développement économique et social en général, et agricole en particulier vu que d'importants volumes de terres arables et de terres de parcours sont chaque année arrachées et charriées par les cours d'eau. Elle est en conséquence la résultante de l'interaction de plusieurs paramètres physiques et anthropiques.

L'Algérie fait partie des pays les plus touchés par l'érosion hydrique et les plus déficitaires en eau (S. Malki, 2006). Dans les zones de montagnes au nord du pays, 14 millions d'hectares sont menacés par l'érosion hydrique.

Les ressources en eau annuellement disponibles ne sont que de l'ordre de 23,2 milliards de m³/an (Algérie Presse Service, Septembre 2018), soit une moyenne annuelle de 540 m³/an et par habitant alors que la moyenne mondiale fixée par les Nations Unis est de 1000 m³/hab/an. L'Algérie est ainsi classée 29^{ème} pays au monde souffrant le plus du stress hydrique.

La faiblesse de ses ressources en eau l'a conduite à opter pour une nouvelle politique de l'eau basée sur l'élaboration d'un vaste programme de construction de barrages. Le but étant de rattraper l'énorme retard accumulé depuis l'indépendance en matière de mobilisation des eaux.

Dès l'an 2000, la construction des barrages a triplé voire même quadruplé. L'Algérie a beaucoup investi dans ces infrastructures. Elle a réalisé 36 barrages dans l'objectif de stocker d'importantes quantités d'eau de pluie. Ainsi, chaque année un ou deux barrages sont mis en service. Leur nombre au niveau national a atteint les 80 barrages (Algérie Presse Service, Septembre 2018), alors qu'il était de 48 en 2000. Malgré les nombreux avantages que procurent

ces ouvrages (la régulation des cours d'eau, l'irrigation des cultures, l'alimentation en eau des villes, etc.), ces réserves d'eau sont actuellement témoins du phénomène d'érosion. D'après les experts Algériens, la perte d'eau dans ces exutoires aménagés s'estime annuellement à près de 70 millions de m³, ce qui leur concède une durée de vie estimée approximativement à une trentaine d'année (B. Remini, 2002). Les conséquences en aval sont encore plus dispendieuses pour l'économie nationale puisque le désenvasement de ces retenues et barrages serait aussi couteux si ce n'est plus couteux que la construction de nouveaux barrages, sans compter que l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, exigeant souvent que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides (B. Remini, 2002).

Dans cette optique, l'étude de l'érosion hydrique ou plus précisément l'étude des flux solides sédimentaires en suspension des cours d'eau doit faire l'objet d'un intérêt particulier et être perçue différemment. Le but est de comprendre les cycles des apports dans les cours d'eau et les processus qui les affectent si nous voulons maintenir une bonne qualité physico-chimique des eaux des cours d'eau. Car, celles-ci modifient constamment le lit des cours d'eau et impacte la capacité des barrages. Sa quantification et la connaissance de son origine constituent un enjeu important en termes d'aménagement du territoire (protection de ces ouvrages).

Pour contribuer, même modestement, à résoudre cette problématique, le thème de notre recherche porte sur l'« **érosion, transport solide en suspension et envasement des barrages cas des bassins : Kebir Hammam, Reboa et Oued El Hai dans l'Est Algérien** ». Ce travail apportera des éléments de réponse partiels aux problématiques générales abordées par l'ensemble des travaux scientifiques Algériens réalisés dans ce domaine. Au départ, notre objectif est de développer des modèles mathématiques reliant les chroniques de débits solides aux débits liquides mesurés dans quatre stations hydrométriques qui contrôlent les cours d'eau qui drainent trois bassins choisis. L'intérêt de cette étape est de quantifier les flux sédimentaires et de valider ces flux modélisés par comparaison aux flux mesurés dans les stations. Ensuite, de pouvoir reconstituer les chroniques des flux des matières en suspension non mesurés (hors les périodes d'étude choisies) et de confirmer leur acceptation par une deuxième comparaison aux volumes de vases mesurés au niveau des barrages par bathymétrie. Les modèles ont été réalisées sur 4 échelles temporelles (instantanées ou journalières, mensuelles, saisonnières et par période hautes et basses eaux).

Subséquentement, la spatialisation des parties sensibles à l'aléa érosion dans les bassins est indispensable. La méthode adoptée est purement cartographique (qualitative) cherche à combiner dans un Système d'Information Géographique (SIG), des paramètres simples explicatifs et intervenants dans le déclenchement des phénomènes érosifs dans les bassins tels que la pente, l'occupation du sol, la lithologie et la pluie.

Les bassins sélectionnés (coupe Nord-Sud) pour cette étude ont été retenus en fonction de leur représentativité des différents milieux géographiques de l'Est Algérien ; il s'agit des bassins *Kebir Hammam*, *Reboa* et *Oued El Hai*, correspondant respectivement au milieu littoral humide, milieu hautes plaines semi-aride et piémont saharien aride. De taille moyenne, leur superficie varie

de 574 à 1700 km² et sont caractérisés par des gammes d'altitude assez larges. Le bassin versant *Kebir Hammam* de façade nordique est situé dans la mince bande côtière (grand bassin des Côtiers Constantinois Centre). Il fait partie de la zone bioclimatique humide, de l'Algérie et est caractérisée par l'abondance des précipitations. Le deuxième, celui de *Reboa*, est situé en zone semi-aride caractérisé par des saisons sèches plus ou moins longues. Son étude est extrêmement intéressante vu le taux d'occupation humaine qu'il abrite et la mise en valeur intensive de ses terres. Le troisième bassin est celui d'*Oued El Hai*. Il est situé sur les versants sud de l'atlas saharien. Il est caractérisé par une superficie importante et une dynamique érosive intense malgré son climat aride (rareté des pluies). En plus du critère géographique ces bassins ont été retenus par rapport à la disponibilité de données synchroniques de précipitations et de débits liquides et solides. L'acquisition de données à pas de temps court (instantanés et journaliers) et la présence de stations hydrométriques à proximité des barrages sont en effet indispensables pour notre étude qui s'intéresse également à l'envasement des barrages : Le barrage de *Zit Emba* situé dans le bassin *Kebir Hammam*, le barrage de *Koudiet Medaouar* situé dans le bassin de *Reboa* et enfin, le barrage *des Fontaines des gazelles* situé dans le bassin de *Oued El Hai*.

Le but de ce travail est en fait, de faire ressortir les spécificités de chaque bassin versant afin d'en cerner d'une part, les disparités et d'autre part d'en saisir les dynamiques érosives respectives, grâce à une approche comparative. Un bref questionnement guidera notre recherche :

- 1) Quels facteurs contrôlent la dynamique des matières en à l'échelle des bassins versants ?
- 2) Quels sont les parties affectées par l'érosion hydrique dans chacun des bassins ?
- 3) Quel est le modèle le plus proche de la réalité pour la reconstitution des flux de matières en suspension non mesurées ? Quelles sont les sources de ces flux sédimentaires ? Et quel est leur impact sur la durée de vie des barrages situés en aval de ces bassins ?

Pour répondre à ce questionnement et atteindre nos objectifs, différentes approches et divers outils ont été adoptés : une approche statistique consacrée à l'analyse des données collectées relatives aux mesures des matières en suspension et, une approche cartographique pour la spatialisation des zones susceptibles d'être émettrices de sédiments :

1. L'approche statistique est anticipée par une recherche bibliographique et une collecte des données de base disponibles concernant l'ensemble des trois bassins versants ont été réalisées. Le but étant de disposer d'une banque de données numériques et cartographiques suffisantes pour être en mesure d'aborder la caractérisation des bassins. Ensuite, il a été procédé au traitement des données. Cette étape a fait l'objet d'une analyse statistique. Elle nous a permis de préciser et de comprendre le rôle des variables clés physiques, climatiques et hydrologiques ayant une influence sur le phénomène érosion hydrique. La « modélisation » a été adoptée pour quantifier les matières en suspension transportés par les cours d'eau et plusieurs modèles mathématiques ont été générées reliant les débits liquides aux débits solides Les outils utilisés sont : l'Excel, Excel Stat, Hyfran Plus, etc.

2. **L'approche cartographique** est réalisée via le logiciel ArcGis, a permis de spatialiser les parties susceptibles de générer les sédiments par croisements de cartes thématiques.

Pour mener à bien notre recherche, nous avons organisé le travail en sept chapitres :

Le premier est une recherche bibliographique. Ce chapitre permet de faire la synthèse des principaux éléments extraits de la bibliographie ayant servi de base à l'élaboration de cette thèse. Un volet important est consacré aux notions de base sur le phénomène érosion en générale et l'érosion hydrique en particulier, son origine, ses modes de transport, ainsi que les différentes méthodes de mesures des matières en suspension proposées dans la littérature.

Le deuxième chapitre porte sur la présentation des bassins. L'ensemble des caractères physiques influençant l'érosion hydrique et l'écoulement sont analysés (topographie, hypsométrie, exposition, géologie, pédologie et végétation). L'objectif est de faire le point sur le degré de sensibilité de ces milieux.

Le troisième chapitre s'intéresse à l'étude des conditions climatiques des bassins. L'analyse des pluies notamment a pris une grande place dans cette étude. Elle s'appuie sur les données de 26 stations pluviométriques disposant d'une base de données mensuelles de plus de 44 ans. Une vue d'ensemble des changements dans les régimes pluviométriques dans les trois bassins a été réalisée par deux tests statistiques (Pettitt et Mann-Kendall). Le but est d'identifier les ruptures et les tendances pluviométriques. Ce travail permettra ensuite de relier les propriétés surtout des cycles pluvieux aux évolutions des matières en suspension.

Le quatrième chapitre aborde l'hydrologie des bassins. Au-delà de l'ajustement des débits à une loi mathématique, l'utilisation des données de quatre stations hydrométriques aura pour objectif de mieux apprécier les caractéristiques du régime hydrologique de chaque bassin par l'évaluation des apports d'écoulements à différents pas de temps. Une réflexion portera par ailleurs sur l'analyse de quelques crues jugées exceptionnelles et leurs occurrences. Ce chapitre est traité séparément du chapitre « Ressource en eau et mobilisation » vu son importance car, d'une part, il aborde l'étude des débits, base de la réalisation des projets d'ouvrages hydrauliques et des politiques de gestion de la ressource en eau, d'autre part, le cours d'eau présente un agent de transport qui permet le mouvement et la circulation des matières en suspension de l'amont vers l'aval des bassins.

Le cinquième chapitre se consacre à déterminer les ressources en eau disponibles à l'échelle des trois bassins. Il portera des détails sur l'utilisation, la mobilisation des eaux des trois barrages (Zit Emba, Koudiet Medaouar et Fontaines des Gazelles) et l'analyse du bilan régularisable correspondant à chaque barrage. Les données traitées dans ce volet datent des années de leur mise en service.

Le sixième chapitre touche à la modélisation. Les couples débits solides et débits liquides ont été utilisés pour définir une relation générale entre les deux paramètres. Ils sont réalisés sur de différentes échelles temporelles (instantanées ou journalières, mensuelles, saisonnières et par période hautes et basses eaux). L'intérêt est d'extrapoler les modèles validés et de reconstituer les

chroniques de débits solides non mesurés à partir des chroniques de débits liquides mesurés aux stations hydrométriques et d'en déduire les quantités de matières en suspension à l'échelle des cours d'eau de chaque bassin. Les données de mesures traitées reflètent des périodes courtes mais successives. Par bassin, elles sont hétérogènes allant de 10 à 22 ans.

Les résultats de la quantification des matières en suspension estimés par les modèles sont comparés à ceux mesurés par bathymétrie au niveau de trois barrages. Les méthodes d'estimation et de mesures n'étant pas les mêmes le but est de tester l'efficacité des modèles dans la quantification des matières en suspension.

Enfin, le septième chapitre est une approche qualitative qui permet sur une base de données cartographiques de zoner les parties sensibles susceptibles de générer des flux de sédiments. Quatre facteurs ayant une influence sur les phénomènes érosifs ont été pris en considération à savoir : les pentes, la végétation la lithologie et les pluies.

Chapitre
ETAT DE L'ART

1

1.1. Introduction

L'étude de l'érosion hydrique, plus particulièrement des transports solides dans les cours d'eau constituent la branche la plus compliquée de l'hydrologie de surface. Le produit premier du débit solide est continentale, ce qui rassemble dans sa compréhension la dégradation sous toute ses formes (éolienne, hydrique, etc...) déclenchés par des agents atmosphériques qui sont : les pluies, le gel, les vents, les variations de températures, les actions chimiques de l'eau et l'air, le ruissellement pour arriver en fin au stade de l'érosion hydrique. Le sujet est donc très large et demande dans sa simple définition l'explication de beaucoup de paramètres imbriqués et compliqués à la fois.

Ce présent chapitre est une analyse des notions théoriques de l'érosion de façon générale, de l'érosion hydrique en particulier et du transport solide en suspension. Dans un premier temps, nous ferons allusion aux travaux les plus importants et aux thèses réalisées en ce domaine. Ils sont certes peu nombreux et exposés de façon succincte, mais suffisants pour donner une information recherchée. Ensuite, nous procéderons à définir certains termes en liaison avec notre sujet, afin de soulever toute ambiguïté terminologique, et aborderons les méthodes utilisées pour la mesure du transport solide en suspension.

1.2. Etudes antérieures sur l'érosion hydrique

Les études scientifiques dans le domaine de l'érosion ont commencé vers les années quarante, après la première découverte par un chercheur allemand du rôle de l'énergie cinétique développée lors de la chute des gouttes de pluies dans la dégradation de la surface du sol «effet splash».

Dix années plus tard, à travers le Congrès de Madison de l'Association Internationale de Science du Sol, les premiers travaux américains de quantification du ruissellement et de l'érosion sur de petites parcelles ont envahi l'Afrique francophone avec les premiers travaux de Fournier (1960) et anglophone de Hudson (1957), puis en Amérique latine et plus récemment en Asie et en Europe.

En Algérie, l'étude des transports solides quoique ancienne reste peu développée. Il y a une dizaine d'années, une percée a été réalisée après les premiers travaux de A. Demmak.1982 ; A. Belatrèche.1988 ; J.L. Ballais.1981 ; H. Amirèche.1984 et 2001 ; M. Bourouba.1988. Parmi les plus connus, nous citerons pour ces dernières années ceux de B .Remini.2003 ; K. Khanchoul .2006 ; B. Touaibia.2001 et 2010 ; H. Bouchelkia 2010 et 2011 ; A. Bouanani. 2013 ; H. Tatar (2012) ; A. Louamri. 2010, 2013 ; F. Hallouze. 2013. L'ensemble de ces travaux concerne la quantification de l'érosion et le transport solide en suspension, selon des modèles physiques, statistiques ou de simples relations empiriques.

Pour quantifier ou pour prédire la suspension seule, ou la suspension avec le charriage, des méthodes variées ont été adoptées, elles sont souvent très compliquées à utiliser, et surtout,

nécessitent une analyse très fine de données qui généralement sont peu disponibles ou mal mesurées.

De façon plus ou moins précise nous allons mettre l'accent sur quelques thèses et travaux scientifiques produits dans la même thématique avec une approche de quantification des sédiments commune (modèles mathématiques). Quelques-uns ont porté sur des bassins retenus dans notre thèse ou voisins « L'Est Algérien ». Ils serviront à une éventuelle comparaison avec nos résultats qui seront exposés plus tard dans le chapitre 6.

a. Thèse A. Demmak (Thèse d'état, 1982)

Ce travail de thèse est cité dans presque tous les travaux Algériens liés à la quantification du transport solide en suspension. Il figure parmi les premiers travaux après ceux de la SOGREAH-ANRH (ex-INRH) (1981-1983) et A. Benchetrit ayant exploité les premières données publiées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques sur les transports solides de quelques Oueds Algériens dès 1972.

L'étude de Demmak englobe la quantification du transport solide en suspension de trente bassins versants de l'Algérie Septentrionale. Ces bassins s'étendent sur des superficies comprises entre 90 et 3600 km². D'après l'auteur, les relations en puissance des données regroupées sur une échelle saisonnière pour une période allant de 1972 à 1979, estiment des débits solides spécifiques importants supérieurs à 1000 tonnes/km²/an pour les bassins des régions Cheliff et des Côtiers Algérois. Les bassins des Côtiers Constantinois, Hodna et de la Tafna sont considérés les moins érodables. Les débits solides spécifiques étant inférieurs à 500 tonnes/km²/an.

L'auteur écarte dans son travail l'agressivité des averses et considère qu'elle est relativement faible et affirme que le sapement des berges des cours d'eau est une source majeure des sédiments directement mobilisés lors des fortes crues.

Le débit moyen des sédiments solides spécifiques dans les 2 bassins retenus pour notre étude, Kebir Hammam et Reboa ont été estimés par l'auteur respectivement à 91,6 tonnes/km²/an (à la station de Ain Charchar) et 593,6 tonnes/km²/an dans le bassin Reboa, à la station Reboa située actuellement en amont du barrage Koudiet Meddaouar.

b. J.D. Milliman et R.H. Meade (Article, 1983)

L'article est publié dans « le journal de la géologie » par l'université de Chicago Press en 1983. Les deux auteurs quantifient les matières en suspension transportées vers les océans en prenant comme exemple les plus grands fleuves qui drainent les 6 continents.

Deux méthodes distinctes ont été utilisées pour estimer la charge de sédiments fluviaux entrant dans les Océans. La première méthode estime les matières transportées vers l'océan à travers les fleuves (Données collectées aux stations de jaugeage en amont des fleuves à

embouchure). Tandis que l'autre méthode l'estime par la dénudation des continents (Gululy. 1955 ; F. Fournier. 1960 ; S.A. Schumm. 1963).

A travers leur étude, les auteurs ont soulevé un problème important concernant la fiabilité et la disponibilité de la mesure. Ils confirment que de nombreux fleuves sont mal étudiés ou non mesurés particulièrement lors des grandes crues. Ils concernent les fleuves qui drainent les pays sous-développés, leurs données sont souvent entachées de lacunes. Fâcheusement, ces derniers sont ceux qui déversent le plus de sédiments à l'océan.

Le total des débits de sédiments estimés et transportés par les 63 fleuves éparpillés à travers les continents est d'environ 13×10^9 tonnes pour près de 86×10^6 km² de terres drainées. Les régions d'Asie transportent la plus grande part de sédiments du monde provenant des fleuves (380 tonnes/ km² /an en moyenne). A titre d'exemple, les fleuves qui drainent l'Himalaya et qui drainent des surfaces importantes ($3,8 \times 10^6$ km²) ont un rendement de sédiments moyen d'environ 796 tonnes/ km² /an à comparer au fleuve de Yellow (Huangho, Chine) qui draine une surface de $0,8 \times 10^6$ km² et transporte 1400 tonnes/km²/an.

Bien qu'elle draine d'importantes surfaces (82% des bassins de l'Amazonie et de Parana- Plata), l'Amérique du Sud occupe le second rang. Ses grands fleuves charrient en moyenne 97 tonnes/ km² /an.

L'Afrique apporte beaucoup moins de sédiments qu'on pourrait s'y attendre (35 tonnes/ km²/an). La majorité des cours d'eau drainant l'Afrique du Nord-Ouest (principalement le Maroc, Nord de l'Algérie et la Tunisie) qualifié d'aride et aux écoulements sporadiques selon les deux auteurs sont insuffisamment documentés. Ils sont soumis aux inondations majeures et montrent un rendement moyen annuel de 110×10^6 tonnes, soit une dégradation spécifique de 100 tonnes/ km²/an.

c. J. L. Probst and P. Amiotte Suchet (Article, 1992)

En 1992, les deux auteurs publient leur travail en langue anglaise intitulé « Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa) ». La zone étudiée par les deux chercheurs englobe le territoire Nord des bassins exoréiques des trois pays : le Maroc, l'Algérie et la Tunisie (le grand Maghreb). Ce qui correspond à 130 bassins versants du grand Maghreb.

Dans cette étude, les deux auteurs proposent une autre méthode d'estimation. Ils analysent d'abord l'influence des facteurs tels que : les précipitations, drainage, taille des bassins et lithologie sur l'érosion mécanique et les transports solides dans l'ensemble des bassins et proposent ensuite un modèle de régression multiple pour estimer les transports solides spécifiques de matières en suspension au Maghreb.

D'après les auteurs, les estimations des débits solides spécifiques sont très élevées au Maghreb. Les rendements spécifiques en sédiments observés semblent être les plus élevés. En moyenne, les bassins hydrographiques qui se déversent dans l'Océan Atlantique (610

tonnes/km²/an) présentent des rendements supérieurs à ceux déversés dans la mer Méditerranée (400 tonnes /km²/an).

Le bilan sédimentaire de cette étude est considérablement supérieur à celui estimé par Milliman et Meade (1983) qui propose un rendement spécifique en sédiments moins élevé que celles données par Walling (1984).

d. M. Bourouba (Articles : 1994, 1997 et 1998)

L'auteur a mené des études hydro-sédimentaires comparatives sur plusieurs bassins versants situés en Algérie Orientale à savoir : Oued Reboa (Aurès), Oued Lougmene (Hodna) et Oued Leham (Hodna) (1975-1985) ; Oued Reboa, et l'Oued Boudouaou dans les Côtiers Algérois (1972-1982), Oued Medjerda (1975-1985) et d'autres.

Les taux de transports solides spécifiques ont été calculés à partir de courbes de relations entre les valeurs moyennes mensuelles de la turbidité et celles des débits liquides spécifiques réalisés dans des stations hydrométriques à l'exutoire des bassins versants.

La moyenne des sédiments en suspension produite par ces bassins est variable d'un bassin à un autre. Le bassin-versant de l'Oued Reboa produit annuellement 686 tonnes/km² et présente un taux de transport solide spécifique nettement supérieur (plus de 25%) à celui du bassin-versant de l'Oued Boudouaou (512 tonnes/km²/an). L'érosion spécifique du bassin-versant de l'Oued Djendjen (204 km²) est de 7619 tonnes/km²/an. Elle est 9 fois supérieure à celle de l'Oued Mellah (550 km²) à Bouchegouf (853 tonnes/km²/an) et de 30 fois à celle de l'Oued Ressoul (103 km²) à Aïn Berda (252 tonnes/km²/an).

Les valeurs estimées par l'auteur restent très élevées. L'auteur conclue que les pluies et les écoulements varient dans l'espace dans le sens inverse des transports solides spécifiques, car à l'augmentation des pluies et de l'écoulement correspond une diminution nette de la charge solide en suspension.

e. A. Benkhaled (Articles : 2003 et 2010)

Les deux articles de l'auteur s'articulent autour du bassin versant de Oued Wahrane. Ce dernier s'étend sur une superficie de plus de 270 km² et est situé dans la partie Nord du grand bassin du Cheliff. Il est contrôlé à son aval par une station hydrométrique.

Dans son premier article, l'auteur analyse les modèles en puissance reliant les débits solides et les débits liquides sur plusieurs échelles temporelles : annuelle, saisonnière, mensuelle et instantanée (les crues). Dans le second, il examine de manière qualitative, la relation entre la concentration en sédiments et son débit liquide durant les crues « phénomène d'hystérésis » pour le même bassin.

De ses deux travaux, l'auteur déduit la complexité d'approche de tels phénomènes. Les relations de puissance et leurs paramètres sont souvent difficiles à analyser et à appréhender. L'analyse des relations à l'échelle des crues, montre une grande variabilité temporelle des concentrations. Les caractéristiques morphologiques et hydrologiques du bassin de l'Oued Wahrane en sont les principaux inducteurs. L'analyse de l'hystérésis par classes montre relativement l'effet saisonnier.

f. A. Bouanani (Thèse d'état, 2004)

L'auteur a mené une analyse quantitative et qualitative sur des débits liquides et des débits solides en prenant l'exemple de quatre sous-bassins juxtaposés et appartenant à la même région (le bassin de la Tafna situé à l'Ouest de l'Algérie). Le sous bassin de Oued Sebdou (255,5 km²), Oued Mouilah (2650 km²), Oued Isser (1139,7 km²) et Oued Sikkak (463 km²). Pour des périodes hétérogènes, l'auteur a développé des modèles en puissance reliant les débits liquides aux débits solides sur une échelle instantanée puis saisonnière. Celles-ci ont permis de quantifier le transport solide en suspension à chaque exutoire du sous bassin. Aussi, sur une échelle plus affinée des liaisons entre les concentrations en fonction des débits de crue, l'utilisation des courbes en hystérésis lui a permis d'identifier les principales classes d'évolution de ce phénomène.

Les estimations publiées dans ce travail ont montré que l'action érosive se caractérise par une variabilité spatio-temporelle. Le transport solide spécifique moyen varie entre 170 tonnes/km²/an pour Oued Sikkak et 937 tonnes/km²/an pour Oued Sebdou. Pour le Mouilah et l'Isser, elle est respectivement de 364 et 180 tonnes/km²/an. Saisonnièrement, l'automne et le printemps produisent le maximum du transport solide.

D'après l'auteur, la variabilité temporelle dépend de la fréquence des orages et de leur période d'occurrence.

g. K. Khanchoul (Thèse d'état, 2006)

Le travail de thèse de K. Khanchoul s'articule autour de la quantification du transport solide en suspension dans cinq bassins situés à l'Est Algérien. Il s'agit du sous bassin de Oued Bouhamdane (1105 km²), Oued Mellah (550 km²), Oued Ressoul (103 km²), Oued Kebir Ouest (1103 km²) et Oued Saf Saf (322 km²). La période étudiée est de 22 ans (1975-1997).

Au départ, l'auteur utilise des méthodes statistiques (en puissance) pour évaluer le transport solide en suspension, puis, la méthode cartographique (croisement de cartes thématiques) qui lui permet de délimiter les zones potentiellement sensibles à l'érosion dans les cinq bassins et de préciser leur degré de sensibilité.

Les résultats de cette thèse annoncent que les débits solides spécifiques moyens annuels varient de 533 tonnes/km²/an (Oued safsaf) à 210 tonnes/km²/an (Oued Ressoul). L'auteur dégage lors d'un premier bilan que ces taux élevés sont dus aux aspects lithologiques (marnes, limons et argiles). L'analyse des relations instantanées entre les deux paramètres concentrations

et débits liquides (hystérésis) et quelques paramètres hydro-climatiques a montré par contre que la dégradation spécifique dans les cinq bassins et inversement reliée au facteur lithologique. L'existence d'évènements extrêmes comme les crues des périodes sèches participent à produire des débits solides même en quantité réduite.

Dans cette thèse, le bassin Kebir Hammam est étudié par l'auteur, il produit selon ses estimations un débit solide spécifique moyen annuel de 292,4 tonnes/km²/an.

h. A. Louamri (2013)

L'auteur a mené une étude sur les transports solides en suspension dans le bassin de Oued Bouhamdane faisant partie du grand bassin de la Seybouse (situé à l'Est Algérien). Ce bassin est contrôlé par la station de Medjez Ammar 2, qui couvre une superficie de contrôle de 1105 Km². En aval de cette station se situe le barrage Hammam Debagh qui collecte les eaux d'une surface drainée de 1150 km².

Dans cette étude, l'auteur a quantifié les transports solides en suspension qui transitent par Oued Bouhamdane sur deux périodes. La première allant de 1969 à 1987, elle s'appuie sur les données des débits solides et liquides mesurées dans la station de Medjez Ammar 2. La deuxième est générée sur la base des mesures débits liquides journaliers effectuées au site du barrage allant de 1995 à 2010.

L'auteur affirme que les meilleures régressions obtenues sont de type puissance. Il décrit une très forte variabilité des transports solides à l'échelle interannuelle. Ils ont tendance à augmenter durant la période des hautes eaux. L'hiver apporte des valeurs très élevées (72% du total), avec une dominance du mois de Décembre (70 tonne/km²/an) et les crues participent considérablement aux totaux annuels et mensuels de la dégradation spécifique.

L'auteur par son approche a tenté de comparer ses résultats avec ceux mesurés au barrage par bathymétrie. La dégradation spécifique calculée par cette dernière est trois fois plus élevée (914 tonnes/km²/an) que celle quantifiée par l'auteur durant les deux périodes (237,5 tonnes/km²/an et 281,4 tonnes/km²/an).

Par ces résultats, l'auteur atteste à son tour la complexité de la quantification des matières en suspension. L'échantillonnage d'après lui ne couvrant pas toute la surface mouillée et la faiblesse de la fréquence de mesures aboutissent à une sous-estimation des apports solides mesurés.

i. A. Guidoum (Thèse d'état, 2017)

Sur le même axe, l'auteur a travaillé sur 9 stations hydrométriques appartenant à trois grands systèmes hydrologiques : la Seybouse, les Hauts Plateaux Constantinois et Chott Melrhir. Dans sa recherche, l'auteur a combiné deux aspects d'étude de l'érosion hydrique : le premier aspect d'ordre cartographique vise à établir des cartes d'aléa pour les bassins de la région, le

second aspect s'intéresse à la quantification de matières transportées par les oueds qui drainent ces bassins à travers la mise en évidence de meilleures relations statistiques qui lient entre les débits liquides et solides mesurés.

Les résultats de la dégradation spécifique dans cette étude passent de 10 tonnes/km²/an sur l'Oued Chéria à 704 tonnes/km²/an à Bouchegouf sur le Melah, pour la période (1972-1994). Ils sont de l'ordre de 423 tonnes/km²/an (1972-1993) à la station Reboa contrôlant la partie Sud du bassin Reboa et de 679 tonnes/km²/an à la station Chemora située en aval du barrage Koudiet Medaouar, pour la même période.

La comparaison des résultats obtenus par les modèles régressifs et ceux réalisés par les mesures bathymétriques, portent l'auteur à conclure qu'aucun modèle n'a pu être généralisé sur l'ensemble des bassins de son étude.

1.3. Rappels sur l'érosion et l'érosion hydrique

L'érosion est définie de plusieurs façons selon les auteurs. Au sens le plus large, elle est définie comme l'ensemble des processus responsables de l'évolution des reliefs engendrés par les déformations de l'écorce terrestre. Au sens strict, elle est définie comme le mécanisme de détachement des particules sédimentaires et des autres matériaux à la surface du sol (G. Fleming. 1977). E. Roose Directeur de Recherches en Pédologie à l'ORSTOM (Office de la recherche scientifique et technique outre-mer) définit l'érosion comme un phénomène de grignotage, selon lui, le mot érosion dérive du verbe « erodère » qui signifie « ronger », comme une maladie ronge un corps.

L'érosion est en fait, l'usure, la dégradation graduelle et la transformation que les eaux et les actions atmosphériques font subir à l'écorce terrestre. Elle peut dénaturer la terre en décapant l'horizon humifère (le plus fertile et le plus vivant) et en arrachant sélectivement les éléments nutritifs, les particules fines et les matières organiques. C'est aussi l'ensemble des actions externes des agents atmosphériques, des eaux, des glaciers qui provoquent la dégradation du relief. L'érosion est l'une des manifestations de l'activité externe de la Terre. De manière générale, elle est responsable de l'aplanissement des reliefs au cours du temps, engendrant parfois des transformations de paysage spectaculaires.

Elle se produit en trois phases importantes : Le détachement de particules de sol individuelles de la masse du sol ; leur transport ultérieur par un agent érosif ; et ultimement, leur dépôt lorsque l'agent érosif manque d'énergie suffisante pour un transport ultérieur (R.P.C. Morgan. 2005).

Bien qu'elle soit un phénomène naturel, d'autres paramètres peuvent intervenir pour la déclencher ou l'accélérer. Actuellement, Les interventions humaines ont créé une érosion beaucoup plus élevée que le taux d'érosion naturelle moyen. Elle menace gravement la production agricole durable.

1.3.1. Les mécanismes de l'érosion

L'érosion comporte trois phases étroitement liées : Détachement du matériel rocheux (l'ablation du matériel), le transport et l'accumulation (dépôt du sédiment) (Fig. 1).

Le détachement du matériel rocheux se fait par altération des roches, c'est-à-dire la séparation des éléments d'une roche par l'action de phénomènes physiques et chimiques. L'altération est donc l'ensemble des processus qui décomposent et désagrègent les roches produisant les grains sédimentaires et des constituants dissous. Elle transforme donc les roches en particules appelés sédiments. Il existe trois familles de processus d'altération :

- 1) Les processus physiques provoquant une fragmentation mécanique de la roche sans affecter la composition des minéraux.
- 2) Les processus chimiques entraînant une modification de la composition chimique ou une dissolution des minéraux de la roche. Ils nécessitent la présence d'eau et sont de loin les plus importants.
- 3) Les processus biologiques conduisant également à une fragmentation ou à une détérioration chimique des roches par l'action d'organismes vivants (animaux, plantes, bactéries).

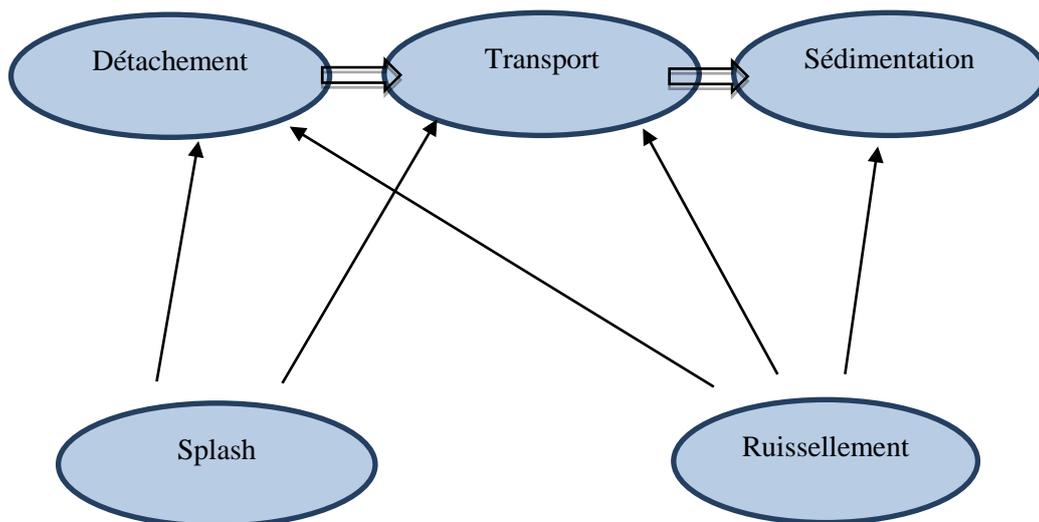


Fig. 1 : Processus de l'érosion hydrique.

L'altération physique provient essentiellement des variations de température. Elle est un processus dominant dans les régions froides et désertiques. Elle mène à la dilation et à la contraction des roches. Ce qui provoque l'émiettement, la desquamation et l'exfoliation des couches superficielles. Divers phénomènes y contribuent selon le climat. Dans les milieux désertiques, la thermoclastie est le processus d'altération physique dominant. Elle fragmente la roche par l'alternance des changements marqués de la température extérieure. Dans les milieux froids. La gélifraction ou la cryoclastie est un autre processus d'altération physique correspondant à un fractionnement de la roche liée à l'action du gel et du dégel. Elle fissure et fait éclater la roche dans lesquelles les eaux infiltrées ont été congelés. Dans les régions soumises à une forte évaporation, on parle de l'haloclastie. Elle résulte des pressions exercées par

la cristallisation des sels. Ces derniers précipitent dans les interstices des roches et par un changement périodique de température et d'humidité subissent un changement de phase, c'est-à-dire se cristalliser ou s'hydrater. L'hydratation des cristaux s'accompagne d'une augmentation de volume et de pression ayant pour conséquence un émiettement des roches.

Outre, les processus précédemment cités, les racines d'arbres et plantes, les organismes vivants tels que les animaux fouisseurs jouent un rôle important dans la dégradation des roches. L'action des animaux est essentiellement mécanique. Elles creusent dans les couches superficielles du sol et participent au détachement des couches rocheuses peu consolidées. Tandis que, les racines d'arbres et des plantes pénètrent dans les anfractuosités des roches consolidées et conduisent à la fragmentation de celles-ci. D'autre part, La respiration racinaire des plantes produit du gaz carbonique qui acidifie les parties liquides environnantes et favorise les processus chimique comme hydrolyse et la dissolution.

L'altération chimique est le résultat de réactions chimiques qui transforment la composition d'une roche calcaire en une configuration plus stable (G. Bell. 1936). La condition préalable fondamentale aux réactions chimiques est la présence d'eau. Celle-ci en contact avec la roche modifie lentement la nature des minéraux constitutifs. Par dissolution, par oxydation, par réaction chimique avec le dioxyde de carbone ou encore par hydratation, elle transporte diverses quantités de particules solubles à travers les sols et les profils d'altération formés d'horizons, pour se rassembler ensuite dans les nappes souterraines, s'écouler dans les cours d'eau et alimenter la sédimentation d'origine chimique dans les bassins.

1.3.2. Les types d'érosion

1.3.2.1. L'érosion éolienne (l'érosion par le vent)

L'érosion éolienne se produit lorsque les vents violents traversent des sols secs, à texture légère dénudés ou les sols fortement pâturés durant les périodes sèches. Le vent détache les particules de sol de la surface. Elles sont transportées par suspension dans l'air ou roulent à la surface du sol.

Les vents peuvent charrier à de grandes distances les particules fines de sable, de limon ou d'argile. Tandis que les plus grosses particules roulent à la surface du sol et se déplacent sur de plus courtes distances. À mesure que la vitesse du vent diminue, les particules de sol se déposent.

L'érosion éolienne se produit le plus souvent dans les régions arides et semi-arides, en raison de la fréquence des conditions sèches. Elle forme des zones nues et lisses sur des sous-sols imperméables. Ces zones varient de quelques kilomètres carrés à des centaines d'hectares. Elles sont difficiles à végétaliser en raison de la faible perméabilité et la salinité de leurs sols.

1.3.2.2. L'érosion hydrique (l'érosion par l'eau)

En dehors des eaux qui coulent dans les cours d'eau, le ruissellement est la circulation de l'eau qui se produit sur les versants. Il apparaît lorsque les eaux de pluies ne peuvent plus s'infiltrer.

L'érosion hydrique est l'une des principales dégradations des sols dans le monde. Elle est le déplacement de l'amont vers l'aval des sols lors du ruissellement. Elle est causée par deux forces principales de détachement : l'Effet de splash et le ruissellement. Le splash est la première étape de l'érosion hydrique. Il se produit lorsque les gouttes de pluie atteignent le sol nu et brise les agrégats du sol. Ces particules dites aussi éclaboussés du sol sont projetées sur la surface du sol. Elles peuvent monter aussi haut (60 cm au-dessus du sol) et se déplacer jusqu'à 1,5 mètre du point d'impact. Elles obturent les espaces entre les agrégats du sol, de sorte que le sol forme une croûte qui réduit l'infiltration et augmente le ruissellement.

Plus tard, L'eau ruisselée transporte les particules détachées vers le bas des reliefs. La taille des particules transportées augmente avec l'énergie cinétique de l'eau. Plus l'eau est profonde, plus les particules en mouvement sont importantes. Elles s'éloignent et aboutissent dans les cours d'eau.

Généralement, on peut observer trois types d'érosion hydrique : Erosion en nappe, érosion en rigole et l'érosion en ravine.

a. L'érosion hydrique en nappe

L'érosion en nappe consiste en la perte du sol en couches minces par impact de gouttes de pluie et l'écoulement superficiel. Elle entraîne la perte des particules de sol les plus fines. Ces dernières contiennent la plupart du temps, des nutriments et matières organiques du sol. En ce type d'érosion, la perte de sol est progressive, et l'érosion passe généralement inaperçue jusqu'à ce que la majeure partie de la couche arable productive ait été perdue.

Les premiers signes d'érosion en nappe impliquent des zones nues de couleur plus claire, flaques d'eau dès que la pluie tombe, racines visibles ou sols pierreux. En ces zones, l'amincissement des horizons qui changent d'épaisseur diminue le rendement des sols.

Les sols les plus vulnérables à l'érosion en nappe sont les sols surexploités et cultivés où il y a peu de végétation pour protéger et retenir le sol.

b. L'érosion hydrique en rigoles

L'érosion en rigoles se produit lorsque les eaux de ruissellement se concentrent et forment des chenaux à la fois petits et bien définis. Ces chenaux distincts sont en général des micro-dépressions de terrains causées par les raies de labour et les sillons plus ou moins creusés par le semoir. Elles montrent des lignes de drainage peu profondes de moins de 30 cm. Elles

provoquent la concentration de l'eau qui ruisselle. Cette concentration augmente le débit et les forces d'arrachement qui accentuent ces micros dépressions et forment des rigoles.

L'érosion en rigoles est courante dans les terres agricoles nues, particulièrement surpâturées, et dans les terres fraîchement cultivées où la structure du sol a été détachée. Ce type d'érosion est souvent décrit comme le stade intermédiaire entre l'érosion en nappe et l'érosion en ravines.

c. L'érosion hydrique en ravines

L'érosion en ravines est un stade avancé d'érosion en rigoles. Les petits chenaux de surface dépassent nettement les 30 cm. Ils sont érodés au point de devenir un facteur de nuisance dans les travaux du sol. La perte de grandes quantités de terre arable et de sous-sol est très visible. Le ruissellement des eaux de surface est à l'origine de la formation de ravines ou l'agrandissement des ravines existantes. Il est généralement le résultat d'une mauvaise conception des exutoires pour les systèmes de drainage locaux en surface et sous la surface. L'instabilité du sol des rives de ravin, associée à un suintement des eaux souterraines, conduit à l'affaissement et à l'effondrement des talus. Ces phénomènes se produisent souvent au printemps, lorsque les conditions hydriques du sol sont les plus propices au problème.

1.3.2.3. L'érosion de masse

Les mouvements de masse sont une partie importante du processus d'érosion. Ils transportent des matériaux d'altitude élevée vers des altitudes plus basses. Ils peuvent se produire pour diverses raisons. La raison la plus fondamentale est la gravité. Elle est la principale force entrant en action. Cependant, elle n'est pas la seule à s'exercer sur une section de terrain dont les propriétés physiques et mécaniques entrent également en scène. Les facteurs de l'augmentation des mouvements de masse comprennent :

La géologie : elle joue un rôle important. Cela inclut le type de roche présent, le pendage des couches de roche ou la nature structurelle de la région.

Le poids du sol : la présence de l'eau dans le sol ajoute un poids supplémentaire. Ce nouveau poids entraîne une pression dans le sol et réduit la force de cohésion et le matériau se met en mouvement.

Le manque de végétation peut également contribuer aux mouvements de masse. La végétation aide à stabiliser le sol. Lorsque celle-ci est coupée, cette stabilité est perdue et le sol peut être facilement déplacé.

Les tremblements de terre sont également une cause fréquente de mouvements de masse. Lorsque le sol tremble, en raison de l'énergie libérée lors du tremblement de terre, des portions du versant peuvent se détacher et se déplacer vers le bas

Alors que tout ce qui précède peut provoquer un mouvement de masse, le contrôle ultime du mouvement de masse est la gravité. Sans l'aide de la gravité, il n'y aurait aucun mouvement

Un mouvement de masse peut ainsi recouvrir des phénomènes allant de la simple chute d'un bloc unique à l'écroulement d'un pan entier de versant. Les processus de mouvement de masse se produisent continuellement sur toutes les pentes ; certains agissent très lentement, d'autres très soudainement, souvent avec des résultats désastreux.

Tout mouvement perceptible de la roche ou du régolithe dans le bas de la pente est souvent appelé, de manière générale, un glissement de terrain. Cependant, les glissements de terrain peuvent être classés de manière beaucoup plus détaillée, en fonction des mécanismes responsables du mouvement et de la vitesse à laquelle il se produit.

1.3.3. Les principaux facteurs de l'érosion

L'érosion des sols résulte de l'interaction entre les facteurs statiques et les facteurs dynamiques. Les facteurs statiques sont reliés à la vulnérabilité et la fragilité des versants ou terrains. Celle-ci représente une caractéristique propre du milieu, dépendante de la nature du terrain et indépendante des facteurs dynamiques. Ces derniers sont les agents de pression qui peuvent être soit naturels (climat et couverture végétale), soit humains.

Plusieurs facteurs déterminent l'importance de l'érosion (Fig. 2). Les plus dominants comprennent les conditions climatiques, hydrologiques, topographiques, pédologiques, géologiques et végétales, ainsi que les conditions socio-économiques (J. Antal et al. 1994).

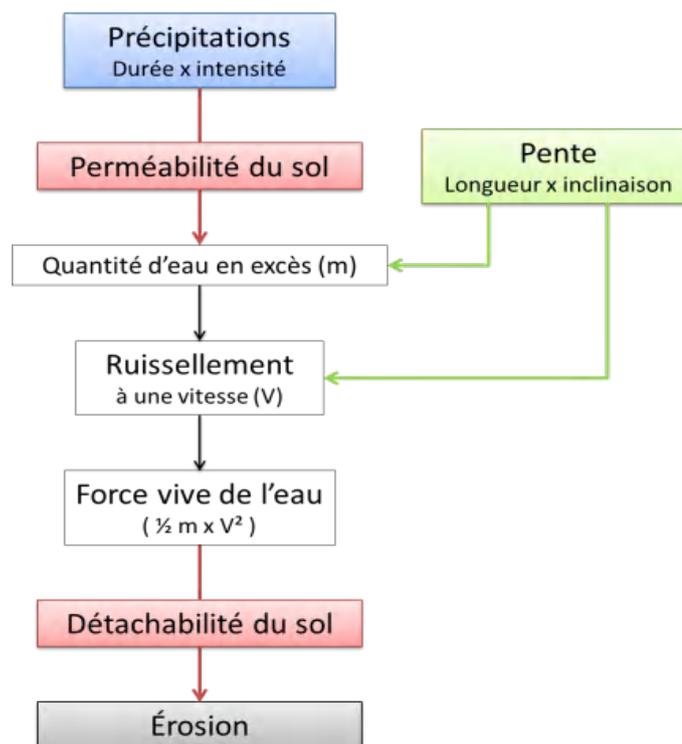


Fig. 2 : Les principaux facteurs de l'érosion hydrique

1.3.3.1. Le Climat

La pluie constitue la cause et l'origine de l'énergie érosive. Sa fréquence, son volume et son intensité sont des facteurs principaux de l'érosion. À mesure que le volume et l'intensité des pluies augmentent le volume de ruissellement augmente et l'effet de battage du sol s'accroît (Fig. 3).

D'autres facteurs climatiques peuvent jouer un rôle primordial, la température par exemple qui intervient entre les périodes pluvieuses et provoque la dessiccation des fragments de surface modifiant ainsi l'infiltrabilité des couches superficielles du sol. L'alternance des périodes d'humectation/dessiccation et des périodes de gel/dégel en sol limoneux engendre en effet, des micro-fissures dans le sol qui faciliteront le détachement des agrégats.

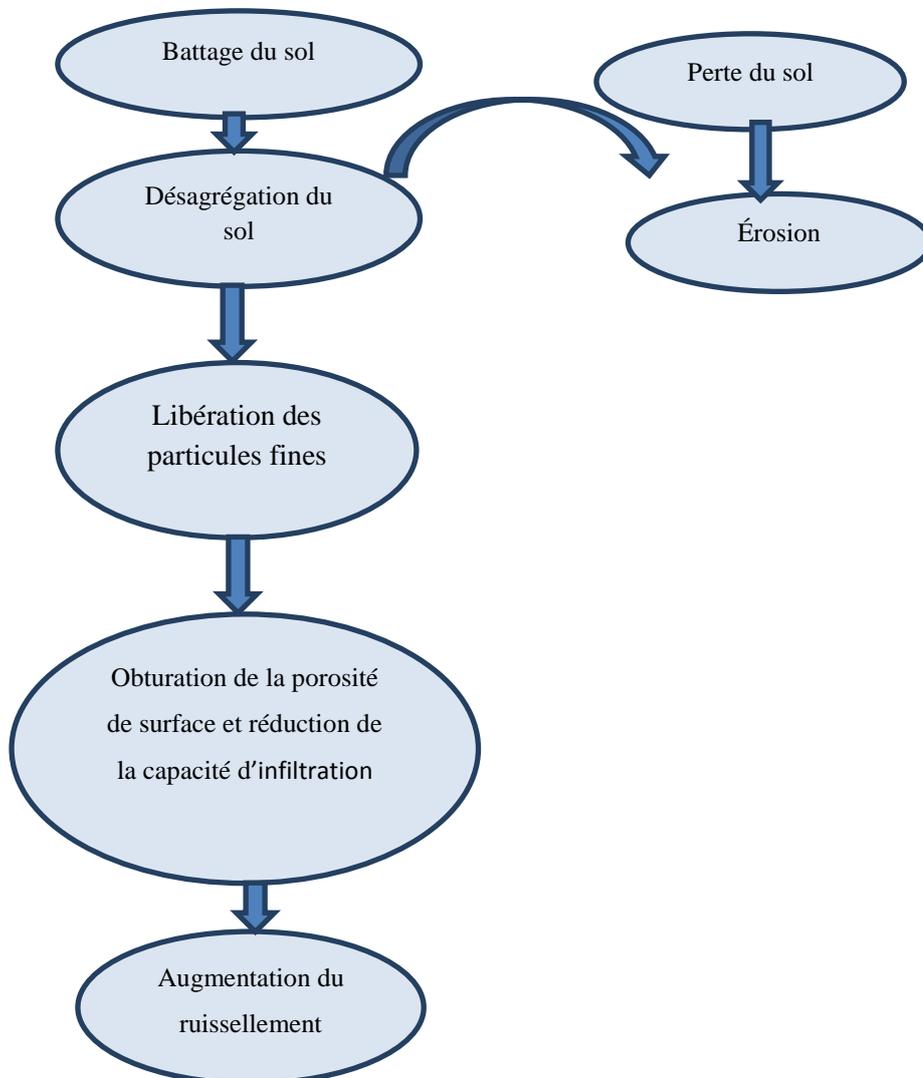


Fig. 3 : Battage et perte du sol

Les variations saisonnières de la température, ainsi que les variations des précipitations, aident à définir la période de l'année où le risque d'érosion est élevé. Lorsque les précipitations tombent sous forme de neige, l'érosion peut ne pas se produire avant le printemps. Cependant, après leur fonte et lors de fortes pluies, il n'est pas rare d'observer du ravinement se former à la surface. Puisque ce dernier est partiellement gelé, l'eau s'infiltré peu et ruisselle, entraînant ainsi des particules de sol avec elle.

1.3.3.2. Les caractéristiques du sol

En plus des facteurs pluies et températures favorisant le ruissellement, l'entraînement des particules du sol est facilité par les propriétés du sol comme sa texture, sa minéralogie, sa stabilité structurale et la matière organique qu'il contient. Les sols à texture fine sont moins sensibles au détachement par la pluie du fait de la masse plus importante de leurs particules ou de la plus grande stabilité des agrégats. Les sols limoneux et limono-sableux sont les plus sensibles à l'érosion et à la battance. Les sols argileux par contre, beaucoup plus fins freinent l'action de détachement par l'eau de ruissellement. Le détachement des particules est important pour des tailles grossières comprises entre 63 et 250 μm . La stabilité des agrégats maintient la structure du sol et s'oppose à l'érosion. Par ailleurs, la matière organique favorise l'agrégation des particules entre elles, de même que l'infiltration ; elles ont ainsi une influence positive sur la stabilité structurale. La matière organique agit aussi bien sur les propriétés physiques, chimiques que biologiques du sol. Cette influence est conditionnée non seulement par sa quantité dans le sol mais également par sa qualité.

1.3.3.3. La couverture végétale

L'absence de la couverture végétale expose le sol au fait direct des gouttes de pluie. La couverture végétale diminue dans une large mesure l'effet "splash". En effet, l'énergie cinétique produite lors des précipitations est dissipée par l'interception des gouttes de pluie.

La protection du sol contre le ruissellement et l'érosion dépend du type de végétation présente sur le sol, sa densité et sa structure et donc sa nature. Les forêts ou les parcelles cultivées protègent efficacement le sol contre l'érosion hydrique. L'eau dans le sol s'infiltré en profondeur. Sa présence crée aussi des conditions favorables pour le développement de la végétation, naturelle ou cultivée. Les sols se conservent, s'enrichissent et donc évoluent. En générale, on peut résumer l'effet protecteur des principaux types de végétation selon l'ordre décroissant suivant (Tableau 1).

Tableau 1 : Influence de la nature de la couverture végétale sur le ruissellement.

La nature de la couverture végétale	Ruissellement
Les Forêts	2%
Les prairies	5%
La culture du blé	25%
La culture du maïs	50%

1.3.3.4. La topographie

Les paramètres topographiques sont fondamentaux pour expliquer l'importance des phénomènes érosifs. La déclivité, la taille, la longueur et la forme de la pente des versants influencent sur l'importance que prendra l'érosion à un endroit donné car elle favorise l'augmentation des vitesses d'écoulement, et par le fait même l'action érosive du ruissellement. Au fur et à mesure que la longueur ou l'inclinaison de la pente augmente, le taux de ruissellement et le potentiel d'érosion augmentent. L'orientation des pentes est également un facteur caractéristique du potentiel d'érosion. Par exemple, une pente orientée au sud et contenant des sols secs peut créer des conditions de croissance si mauvaises que la végétation sera difficile à rétablir.

Egalement, la perméabilité des sols, leur résistance et leur taux de couverture végétale sont des acteurs synchroniques essentiels. En effet, si les sols sont absolument imperméables, non couverts de végétation, le ruissellement de la pluie sera total et ne dépendra, pour une surface de pente donnée, que de l'intensité de la pluie. Par contre, si les sols sont relativement perméables encore peu couverts, la pente aura une influence certaine sur l'infiltration.

En général, Le ruissellement et l'érosion commencent sur des pentes faibles (1 à 2 %). Entre 10 et 30 %, l'érosion est très forte surtout en cas de la réunion des conditions précédemment citées.

1.3.3.5. L'activité humaine

L'activité humaine est l'une des principales causes de l'érosion. Lorsque l'homme perturbe le sol lors de travaux de construction, d'agriculture, d'exploitation forestière et minière, la couche arable de la terre s'affaiblit, ce qui entraîne une dégradation excessive et une érosion.

Les zones urbanisées ont souvent une érosion plus importante qu'en zones rurales. Au fur et à mesure que les populations humaines se développent et occupent les espaces, les sols subissent des dégradations souvent irréversibles à travers la suppression de la végétation, les modifications topographiques et surtout l'imperméabilisation source de concentration du ruissellement

L'agriculture également est un autre aspect par lequel l'homme incite l'érosion. Lorsque le sol est cultivé, la couche arable est fragilisée par la mécanisation. Le sol s'ameublisse et se transforme en sédiments. Ces sédiments sont souvent transportés par le vent ou par les cours d'eau et contribuent d'une part à l'altération de la qualité générale de l'eau, et d'autre part, à celle des couches superficielles des sols générant d'importantes pertes de terres

Le surpâturage et la déforestation conduisent également à la disparition de la couverture végétale laissant donc des surfaces importantes du sol sans protection, qui deviennent par suite plus exposées aux effets érosifs de l'eau de la pluie et du ruissellement.

1.3.4. Méthodes d'évaluation de l'érosion hydrique

Ces méthodes visent généralement à estimer les flux annuels pour un bassin versant ou une parcelle, en se référant à de larges bases de données. Nous ne citerons que celles qui impliquent des paramètres physiques représentatifs.

1.3.4.1. La mesure directe de l'ablation du sol

a. La Méthode des repères

Cette méthode s'applique pour l'étude morpho-dynamique des versants. Elle consiste à utiliser sur le terrain des repères stables et suivre leur déplacement à travers le temps. Ces repères peuvent être naturels (Affleurements rocheux, arbustes, etc...) ou artificiels (Piquets, mince et bien stabilisé, règle, fils, clous, fers à béton, etc...), répétés tout au long du versant. L'enlèvement, le recouvrement ou le déplacement des repères ou les variations de la surface comprise entre un fil ou une règle et sa projection verticale sur le terrain servent à estimer l'ablation ou l'apport de terre.

Cette méthode est aussi applicable dans l'étude morpho-dynamique des cours d'eau. A ce titre, des repères fixes sont placés dans les différentes sections transversales.

Bien que la mesure de l'ablation du sol par cette méthode est directe. Elle reste très délicate à employer et comporte des possibilités d'erreurs graves (F. Fournier, non daté).

b. La méthode des parcelles expérimentales

Cette méthode consiste à suivre l'évolution topographique de la surface du sol d'une parcelle délimitée, d'une superficie de quelques centaines de m². Cette parcelle a pour objectif de fonctionner comme un véritable bassin hydrologique parce qu'il est limité latéralement et amont. Sa base est conçue par un système pour recevoir l'eau et la terre qui en provient lors de chaque précipitation suivie d'un ruissellement (F. Fournier, non daté).

Cette méthode a de nombreux avantages :

1. Evaluer le ruissellement et la perte en terre résultant de l'attaque du sol par l'eau.
2. Etudier les divers facteurs explicatifs de ces deux phénomènes.
3. Comparer les réponses de différentes parcelles à une pluie donnée, ou au contraire, de la même parcelle à des différentes pluies (J. Nouvelot, 1992)

Elle a également pour inconvénients d'être artificiellement fermée à l'amont et qualifiée de donner qu'une idée relative des phénomènes mesurés. Ces résultats présentent essentiellement un intérêt comparatif dans l'analyse des situations différentes.

1.3.4.2. La mesure par des formules empiriques

Plusieurs chercheurs ont essayé, à partir de nombreuses mesures de l'érosion faites ici et là, d'établir des formules de prédictions de la perte en terre, en liaison avec de différents paramètres, parmi :

a. La formule de Musgrave (1947)

La formule de Musgrave figure parmi les premières tentatives lancée pour quantifier empiriquement les pertes de terres. Dans sa formule, il a introduit l'influence de la pluie sur la quantité de sédiments érodés (la proportionnalité de l'érosion E avec la puissance 1,75 de la pluie maximale de durée de 30 minutes). La formule est comme suit :

$$E = F * R * \left(\frac{S}{10}\right)^{1.35} * \left(\frac{L}{72.6}\right)^{0.35} * \left(\frac{P}{1.25}\right)^{1.75} \quad (1)$$

Où :

E : Perte en terre (tonne/ancre/an).

F : Facteur d'érodibilité du sol (tonne/ancre/an).

R : Facteur de couverture de sol ; c'est le rapport entre l'érosion sur un sol couvert et celle sur sol nu.

S : Pente du sol (%).

L : Longueur de la pente (feet).

P : Hauteur d'une précipitation biannuelle de la durée maximale 30 mn (Inches).

b. La formule USLE (1958)

Le modèle universel des pertes en terre, connu par son abréviation USLE (Universal Soil Loss Equation) est un modèle empirique de prévision de l'érosion. Il a été développé par les statisticiens Wischmeier et Smith en 1958. L'équation est basée sur des lois mathématiques appliquées en utilisant des facteurs déjà calculés et déterminés à l'aide d'observations sur terrain et d'analyses de laboratoire (L. Khali Issa. 2016). Ce modèle combine cinq facteurs contrôlant les pertes de terre. Parmi ces facteurs de l'érosion, seul le facteur R peut se calculer à partir des données climatiques. Les autres sont des rapports :

$$E=R*K*LS*C*P \quad (2)$$

Où :

E : Pertes des terres annuelles moyennes du sol (t/ha/km²).

R : indice d'érosivité des pluies et de ruissellement (N/h).

K : Facteur d'érodibilité du sol (t.h/N.ha).

LS : Facteur de longueur et d'inclinaison de la pente.

C : Facteur du couvert végétal et de gestion.

P : Facteur de pratique de conservation des sols pratiqué.

Depuis son lancement, l'équation universelle des pertes en terre a été raffinée et révisée à de nombreuses reprises. En 1990, elle a été révisée et de nouveau publiée sous le nom de

Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). En 2004, ce modèle a été mis à jour de nouveau sous le nom de RUSLE 2, son application est devenu plus facile et rapide grâce à l'utilisation du système d'information géographique et de la Télédétection. Actuellement, ce modèle est le plus utilisé au monde.

c. La formule Fournier (1960, 1999)

Ce modèle appliqué sur des bassins versants de grandes surfaces, permet d'évaluer l'érosion globale. Il est décrit par la formule suivante :

$$E_s = F \cdot \left(\frac{P^2}{P_o}\right) \quad (3)$$

Avec,

E_s : Taux d'érosion en tonnes/km²/an ; $\frac{P^2}{P_o}$: coefficient climatique ; P : pluviométrie mensuelle maximale [mm] et P_o : pluviométrie annuelle [mm] ; F : coefficient tient compte le mode de répartition des précipitations de l'année et leur abondance.

Selon le coefficient de relief $H.tg\alpha$ et le coefficient climatique $\frac{P^2}{P_o}$, Fournier estime le taux d'érosion :

- pour le milieu à relief peu accentué $H.tg\alpha < 6$ et,
 - si $8,1 < \frac{P^2}{P_o} < 20$; $E_s = 6,14 \cdot \frac{P^2}{P_o} - 49,78$
 - si $\frac{P^2}{P_o} > 20$; $E_s = 27,12 \cdot \frac{P^2}{P_o} - 475,4$
- pour le milieu à relief peu accentué $H.tg\alpha > 6$ et,
 - si $\frac{P^2}{P_o} > 9,7$; $E_s = 52,49 \cdot \frac{P^2}{P_o} - 513,21$
 - si $\frac{P^2}{P_o} > 8$ et la région est semi-aride ; $E_s = 91,78 \cdot \frac{P^2}{P_o} - 737,62$

Il existe une autre relation de Fournier, elle permet de calculer l'apport solide annuel moyen. Elle est de la forme suivante :

$$A_s = \frac{1}{36} \cdot \left(\frac{P}{P_o}\right)^2 \cdot 2,65 \cdot \left(\frac{h}{S}\right)^2 \cdot 0,46 \quad (4)$$

Avec,

Q_s : L'apport solide annuel moyen [t/km²/an] ;

h : La dénivelée moyenne d'après la courbe hypsométrique (45% de $h_{max} - h_{min}$) ;

S : La superficie du bassin versant (km²).

d. La formule Gavrilovic (1960)

En 1965, Gavrilovic a pu intégrer d'autres indices tels que le coefficient de température et le coefficient de l'érosion relative pour évaluer l'état de dégradation au niveau d'un bassin. L'équation empirique de type :

$$Es = T * P_0 * \pi * \sqrt{Z^3} \quad (5)$$

Où :

Es : La perte en terre (m³/km²/an).

P₀ : La pluie annuelle en (mm).

T : Le coefficient de température.

$$T = \sqrt{\frac{T_0}{10}} + 0.1 \quad (6)$$

Avec :

T₀ : La température moyenne annuelle en °C.

Z : Le coefficient de l'érosion relative.

$$Z = y \cdot [x \cdot a] \cdot (\delta + \sqrt{I_{moy}}) \quad (7)$$

Où

y : valeur du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type du sol et du climat varie entre 0,05 et 1,0

[x.a] : Coefficient de régularisation du bassin versant, se rapportant à la protection des sols, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles.

δ : Coefficient qui exprime le type et degré des processus visibles d'érosion dans le bassin versant.

I_{moy} : indice de pente moyenne du bassin versant.

e. La formule SOGREAH (1969)

Basée sur les données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 km² et soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000 mm. ; Le modèle SOGREAH pour quantifier les pertes de terre est défini par l'équation suivante :

$$A_s = a \cdot R^{0,15} \quad (8)$$

Où :

A_s : Apport solide spécifique moyen (tonnes/Km² /an).

R : L'écoulement moyen annuel (mm).

a : Le coefficient dépendant de la perméabilité du sol.

f. La formule Tixeront (1960)

Le modèle de Tixeront est défini ainsi (CNEA. 2002) :

$$A_s = a \cdot Lr^{0,15} \quad (9)$$

Avec :

A_s : L'apport solide spécifique moyen (tonnes/Km² /an).

a : Le coefficient empirique qui varie en fonction de la perméabilité du terrain de 3,5 à 3200 :

- 3,5 < a < 74 pour le bassin à perméabilité élevé ;
- 75 < a < 349 pour le bassin à perméabilité moyennement élevé ;
- 350 < a < 1399 pour le bassin à perméabilité faible à moyenne ;
- 1400 < a < 3199 pour le bassin à perméabilité faible ;
- a > 3200 pour le bassin imperméable.

Lr : Écoulement total annuel (mm)], d'où

$$Lr = P_o - D_m \quad (10)$$

Où,

P_o : La pluviométrie moyenne annuelle [mm] ;

D_m : Le déficit annuel de l'écoulement [mm],

D'où

$$D_m = \frac{P_o}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P_o}{L}\right)^2}} \quad (11)$$

Avec

$$L = 300 + 25 \cdot t + 0,05 \cdot t^2 \quad (12)$$

Où,

t : La température moyenne [$^{\circ}\text{C}$].

1.4. Le transport solide

En général, le transport solide est le phénomène qui permet le déplacement d'éléments détachés composés d'élément granulaire (Sédiments fins, sables, galets,...) sous l'action d'un écoulement de l'eau. Ce transport a lieu sur les versants (érosion des sols) et dans le réseau hydrographique (cours d'eau, talwegs, rivières et fleuves).

Dans un cours d'eau, le transport de solides s'effectue selon deux processus relativement distincts (Fig. 4).

- Le *charriage* correspond au déplacement de particules plutôt grossières au contact du fond du cours d'eau par roulement ou saltation.
- La *suspension* concerne les matériaux relativement fins que la composante turbulente de l'écoulement soulève au-dessus du fond et que la vitesse "en moyenne permanente" transporte plus loin.

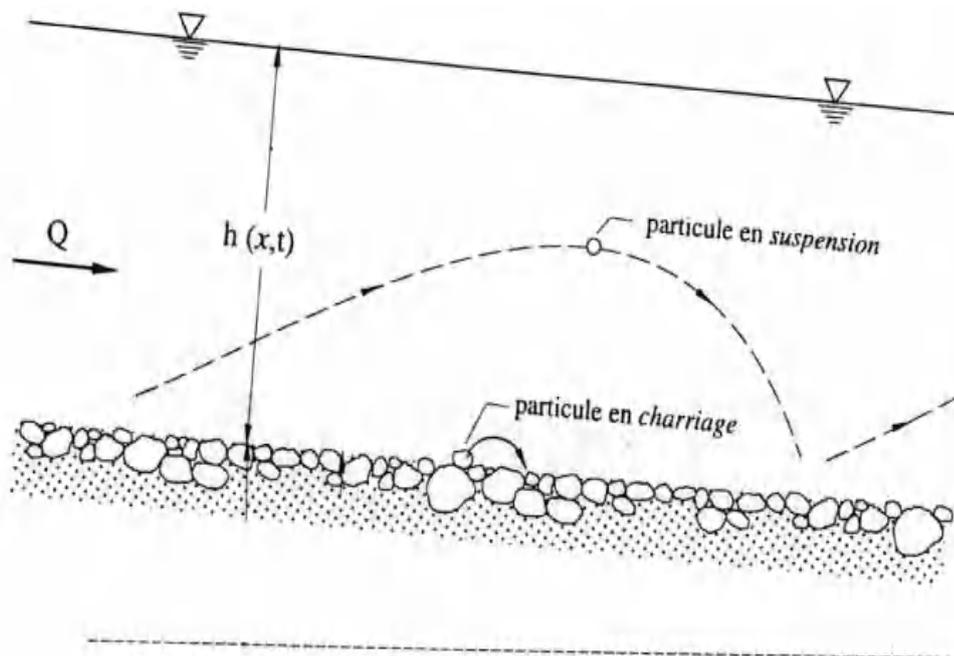


Fig. 4 : Modes de transport solide, d'après Graf et Altinakar. Source Magali Jodeau ; 2004

Le diagramme de Hiulström (1935) (Fig. 5) permet de distinguer entre ces deux processus. Son expérience réalisée au laboratoire a montré une grande liaison entre la vitesse d'un courant et la granulométrie des matériaux transportés. Plus les particules sont grossières, plus grande est la vitesse nécessaire pour leur transport ; pour les particules moyennes à grossières (sable fin à galets), la vitesse du flux nécessaire pour mobiliser les grains augmente

donc avec leur granulométrie. Pour les particules fines, la courbe démontre la nécessité d'une forte vitesse du flux pour les mobiliser. Ce comportement paradoxal est la conséquence de la grande force de cohésion qui existe entre les particules les plus fines. Quand ces particules sont déjà arrachées, elles ne peuvent être transportées à des vitesses nettement plus faibles (D. Pinto Martins. 2008).

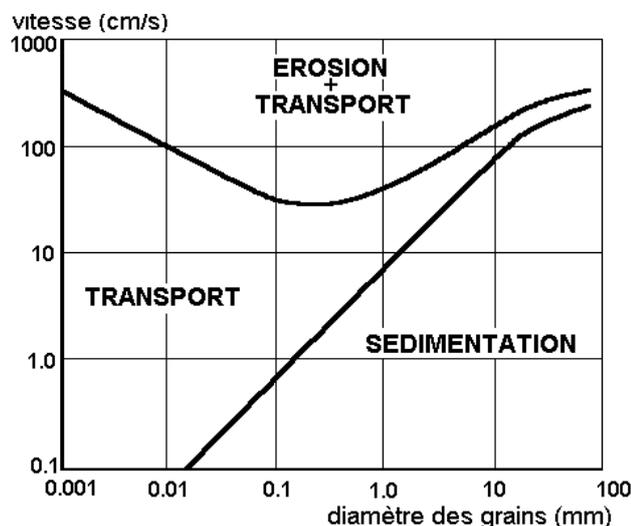


Fig. 5 : Diagramme classique de Hjulstrom (1935) : Etat d'un grain en fonction de la taille et la vitesse du courant.

1.5. Le transport solide en suspension

Le transport en suspension concerne les particules fines organiques ou inorganiques de moins de deux millimètres de diamètre, c'est-à-dire les sables (2000 à 62 μm), limons (62 à 4 μm) et argile (< 4 μm) (Armitage et Wood. 1997). Elles ont pour origine : l'érosion des sols des versants et des sols de fonds de vallée, l'érosion d'un cours d'eau (de berges et du fond du lit), les eaux urbaines, ou les eaux résiduaires industrielles, etc.

La concentration des matières fines en suspension et les taux de sédimentation sont temporellement variables en fonction des variations saisonnières de débit et spatialement variables en fonction des caractéristiques du bassin versant (O. Logan.2004).

Actuellement, La connaissance du transport en suspension par les cours d'eau a une grande importance économique et scientifique. Nous pouvons prévoir et estimer le temps d'envasement des retenues et des barrages, prévoir les possibles modifications du lit des rivières lors d'une renaturation, contrôler le processus de colmatage des lits, qui empêche l'alimentation de la nappe phréatique, surveiller les modifications à long terme dans le transport de sédiments (en suspension et par charriage).

La majorité des problèmes de sédimentation et d'envasement sont causés par des particules. Les fines particules d'argile peuvent demeurer en suspension jusqu'à 200 jours.

1.6. Mesures du transport solide en suspension

La quantité des matières en suspension transportées est souvent considérée comme un indicateur pour évaluer la gestion intégrée des bassins versants et pour déterminer l'efficacité des aménagements entrepris à l'amont (Wren, Bennet, Barkdoll et Kuhnle. 2003).

Outre les nombreuses méthodes empiriques ou de calculs cités précédemment pour la mesure de l'érosion hydrique (à la formation sédimentaire sur les versants), l'estimation du transport solide en suspension dans les cours d'eau par les hydrauliciens s'effectue de façon directe. Ces mesures fournissent une concentration. Le débit solide (masse/temps) est obtenu en intégrant les concentrations, obtenues en différents points d'une coupe transversale, le long de la section tout en multipliant par le champ de vitesses d'écoulement. La concentration moyenne est ensuite obtenue comme étant le rapport du débit solide sur le débit liquide en une même section (EPFL, in W. Rassi. 2004). Parmi les méthodes trouvées dans la littérature spécialisée, on a :

1.6.1. Les préleveurs instantanés

Les préleveurs instantanés sont constitués d'un récipient largement ouvert qui peut se refermer de façon instantanée, au moyen d'une commande appropriée (J. Nouvelot. 1992). L'intérêt est de prélever une quantité d'eau pour ensuite l'analyser au laboratoire.

Cette méthode de mesure affiche des erreurs qui concernent la variation de la concentration en profondeur, la variation des conditions d'écoulement due à la présence du préleveur qui agit alors comme un obstacle à l'écoulement et la petite taille de l'échantillon

1.6.2. Les préleveurs par intégration

Ces préleveurs ont pour avantage par rapport aux préleveurs instantanés de prélever des échantillons en un intervalle de temps suffisamment long pour réduire les fluctuations de concentrations. Ils fonctionnent soit en point par point, ou par intégration, le long d'une verticale. Ce dernier, permet de mesurer la turbidité moyenne à l'aide du prélèvement continu d'un échantillon pendant le temps d'une descente et d'une remontée à une vitesse uniforme d'un appareil de prise le long d'une verticale.

Les inconvénients principaux de cette méthode consistent en :

- la petite taille de l'échantillon.
- le petit diamètre de la conduite d'admission qui permet d'éviter un sur-remplissage rapide mais qui bloque l'entrée des grosses particules sableuses.

1.6.3. Les préleveurs à pompe

Comme leur nom l'indique, ces préleveurs sont constitués d'un embout formé d'un tube métallique faiblement coudé, fixé sur un lest, permettant d'effectuer, grâce à un tuyau flexible et une pompe, des prélèvements en divers points de la section de mesures.

Le principal avantage de cette technique est l'obtention d'un volume d'échantillons quasiment illimité. Les inconvénients résident dans le pompage qui induit de fortes perturbations hydrauliques au point de prélèvement. Seulement, il reste sans grandes conséquences, lorsque le diamètre des sédiments est inférieur à 0,06 mm.

1.6.4. Les Pièges à sédiments

Cette méthode consiste à placer des pièges sous forme de conteneurs pour piéger les sédiments en suspension dans les cours d'eau. Le volume de matériel transporté par l'eau est déterminé directement en fonction de la relation entre la quantité de sédiment saisi dans le piège pendant une période donnée ou un événement. Cette quantité accumulée est séchée et pesée, ce qui permet un calcul du flux sédimentaire moyen par unité de temps.

Des prescriptions d'utilisation de cette méthode sont à respecter : un rapport hauteur sur largeur supérieur à 5, sachant qu'aucun obstacle ne doit entraver l'ouverture et que le piège doit être maintenu par un système de lestage. Dans les retenues, les pièges à sédiments présentent une méthode d'échantillonnage la plus simple et la peu onéreuse.

1.6.5. La Mesure de la turbidité

On mesure la turbidité en unités de turbidité néphalométriques (uTN) à l'aide d'un turbidimètre. Cet appareil est conçu principalement pour l'utilisation sur le terrain. Il envoie un rayon de lumière à travers un échantillon d'eau et mesure la quantité de lumière qui passe à travers l'eau par rapport à la quantité de lumière qui est réfléchiée par les particules dans l'eau. La turbidité peut s'échelonner de moins d'une uTN à plus de 1 000 uTN. À 5 uTN, l'eau est visiblement trouble ; à 25 uTN, elle est noirâtre. Les mesures sont acquises de façon continue et sans perturbation de l'écoulement. Par contre, cette mesure a pour inconvénient d'être faiblement sensible vis-à-vis les sables.

1.6.6. L'estimation du transport par le contrôle de l'envasement des retenues (la bathymétrie)

La bathymétrie aussi précise que possible du site est un prérequis indispensable à l'étude car elle permet de définir la morphologie du fond de la retenue et d'établir une carte de la distribution des stocks sédimentaires associés. C'est aussi une étape essentielle dans la compréhension de l'évolution morpho-sédimentaire en lien avec la gestion des ouvrages (F. Frémion. 2016). Sa réalisation fait appel à des sondes bathymétriques (sondes mono-faisceau ou multifaisceaux) et d'un GPS différentiel à bord des navettes. Grâce à une interface SIG (Système d'Information Géographique), on acquiert et on spatialise en temps réel les données provenant des deux appareils. Les données bathymétriques spatialisées sont de précision centimétrique.

1.7. Conclusion

Les phénomènes d'érosion et d'accumulation sont une partie de l'évolution du relief terrestre. Le détachement, le transport et le départ des matériaux sont des phénomènes naturels visibles en tout temps et tout lieu. Elles façonnent et remodelent la surface de la terre par des agents de l'érosion comme sont la pluie et le ruissèlement.

L'érosion hydrique commence avec l'impact de la goutte de pluie initiale (splash). Des particules minérales ou des fragments de roche se détachent et sont déplacés à courte distance, quelques-uns sont entraînés par l'eau de ruissellement et transportés plus loin c'est le phénomène du « transport solide en suspension ».

Les cours d'eau et leurs régimes hydrologiques jouent un rôle important dans le transport de ces matières. Ils évacuent des bassins versants les sédiments produits, facilitant ainsi l'altération et la production de sédiments ultérieures.

L'homme a été confronté aux problèmes liés au déplacement des sédiments à travers les cours d'eau et à leurs dépôts surtout dans les ouvrages de stockage. Ces dernières années, dans le contexte des phénomènes liés au changement climatique (inondations, sécheresses) l'homme est devenu plus conscient et plus préoccupé par la protection de la ressource en eau.

Par conséquent, l'étude et la quantification de ces matières en suspension transportées s'avèrent cruciales et constituent les premiers pas pour assurer une longue durée de vie des ouvrages de stockage situés en aval des bassins. La compréhension de ce phénomène (envasement des barrages) demande des méthodes d'estimation qui peuvent être définies en termes quantitatifs et qualitatifs. A travers les chapitres qui suivent, nous tenterons de mener une analyse dans ce sens qui permette l'application des relations mathématiques entre les débits solides et liquides mesurés dans des stations hydrométriques, afin d'estimer le transport solide en suspension dans trois bassins hydrographiques, situés dans des milieux différents. Ces relations seront applicables pour prédire les débits solides des périodes postérieures, non mesurés. Le but étant de les comparer ensuite avec l'envasement estimé dans les barrages.

Chapitre

LE CADRE PHYSIQUE DU BASSIN

2

2.1 Introduction

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et par conséquent son régime érosif, en période de crue ou d'étiage. Leur détermination est indispensable. Ce chapitre constitue un premier diagnostic permettant la mise en évidence des facteurs et paramètres géographiques et physiques tels que : la pente, les sols et le couvert végétal, etc. contribuant à la genèse du ruissellement considéré comme l'un des agents de transfert des matières en suspension.

2.2. Présentation des bassins d'étude

Trois bassins situés dans le quart Nord-Est Algérien sont retenus pour cette étude, trois entités hydrologiques représentant des caractéristiques naturelles, physiques et topographiques différentes (Fig. 6) :

- **Le Bassin Kebir Hammam** : Il est situé sur le flanc Nord de l'Atlas Tellien. Il est drainé par Oued El Hammam et Oued Emchekel. Son exutoire est contrôlé par la station hydrométrique d'Ain Charchar. Il couvre une superficie de 1134 km² soit près de 37% de la superficie totale du bassin versant des Côtiers Constantinois Centre dont il fait partie. Il est limité entre les sous bassins d'Oued Safsaf à l'Est et des Côtiers Kebir Bougaroun et Lac Fetzara à l'Ouest. Au Nord, le bassin accole le sous bassin des Côtiers Filfila, sous bassin limitrophe à la mer méditerranéenne. Administrativement, le bassin couvre quatorze (14) communes : cinq dans la wilaya de Skikda, huit dans celle de Guelma et une dans la wilaya d'Annaba. Sur la totalité de ces communes deux seulement sont entièrement incluses dans le bassin (Bouati Mahmoud et Roknia).

- **Les bassins contigus de Reboa et Oued El Hai** sont situés plus au Sud, sur les monts des Aurès, une chaîne montagneuse faisant partie de l'Atlas Saharien. Les cours d'eau et les affluents de ces deux bassins s'écoulent et convergent pour alimenter les deux barrages de Koudiet M'daouar (Reboa) et des Fontaine des Gazelles (Oued El Hai) situés à leurs exutoires. Le bassin de Reboa est le plus petit des trois bassins étudiés. Il se situe plus exactement sur le flanc Nord de l'atlas saharien (entre les deux chaînes atlasiques), sa superficie totalise 575,9 km², ce qui correspond à 5,9 % de la superficie totale du grand bassin des Hauts Plateaux Constantinois (9615 km²) dont il fait partie. A son opposé, sur le flanc sud se situe le bassin d'Oued El Hai. Contrairement aux bassins Kebir Hammam et Reboa qui caractérisent respectivement les régions humides et semi-arides, Oued El Hai définit les régions sub-sahariennes arides. Ce sous bassin occupe la partie amont Nord du grand bassin Chott Melrhir (68750 Km²). Sa superficie est de 1582 km².

Les deux bassins, Reboa et Oued El Hai, sont adjacents au Nord avec les sous bassins de Sebkheth Ez-zemoul et Merdja Zana (Hauts Plateaux Constantinois). A l'Ouest, ils partagent la même ligne de crête avec le grand bassin de Chott Hodna, à l'Est par un ensemble de sous bassins : Oued Boulefreis (Hauts plateaux Constantinois) et Oued Djemorah et Oued El Abiod (Chott Melrhir).

Administrativement, Le bassin de Reboa englobe six communes partiellement incluses appartenant toutes à la wilaya de Batna. Tandis que le territoire du bassin d'Oued El Hai chevauchant entre les deux wilayas de Batna et Biskra, partage avec le bassin de la Reboa trois communes (Oued Chaaba, Tazoult et Oued Taga) à la wilaya de Batna et d'autres au nombre de dix dépendant de la wilaya de Biskra.

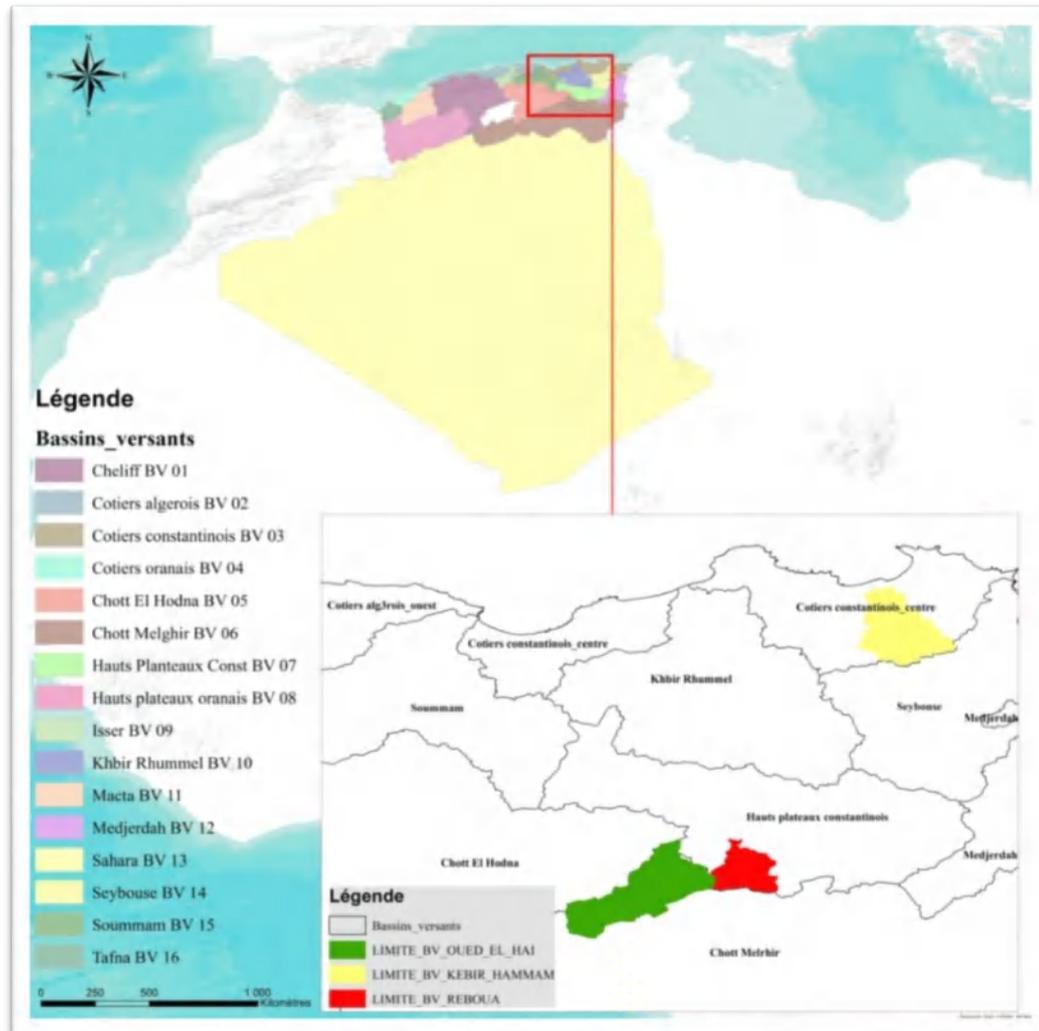


Fig. 6 : Localisation des bassins.

2.3. Le relief des bassins

Du point de vue orographique, le bassin Kebir Hammam est encadré essentiellement par de basses montagnes : Djebel Debar (1060 m) au Sud, Djebel Taya (1211 m), Djebel El Grar (1078 m), Djebel Mermera (993 m) et Djebel Oucheni (1082 m) au Sud Est. La limite Nord du bassin est composée par Djebel El Alia (659 m). Au centre du bassin se trouve les collines découpées par des vallées peu élevées (Fig. 7), aux altitudes variant entre 450 et 850 m. Au Nord, il est formé de plaines de moins de 100 m d'altitude. Ces dernières constituent des terres fertiles exploitées par les riverains pour la production agricole.

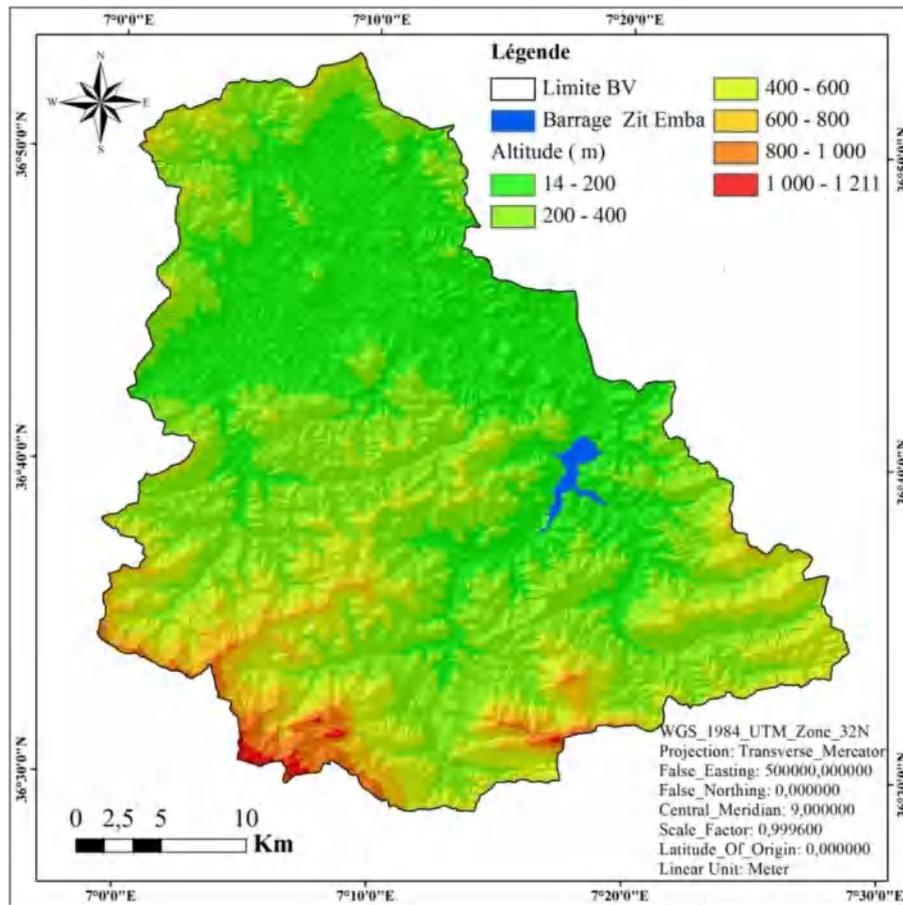


Fig. 7 : Les altitudes -Bassin Kebir Hammam-

En générale, Les altitudes dans le bassin se situent entre 14 et 1211 m (Tableau 2). Les pentes supérieures à 12% représentent près de 50 % de la superficie totale du bassin (Fig. 8 et 9).

Tableau 2 : La répartition des altitudes dans les bassins

Bassin Kebir Hammam			Bassin Reboa			Bassin Oued El Hai		
Classes d'altitudes (m)	Superficie (ai) (Km ²)	Taux (%)	Classes d'altitudes (m)	Superficie (ai) (Km ²)	Taux (%)	Classes d'altitudes (m)	Superficie (ai) (Km ²)	Taux (%)
14-100	167,58	14,78	960-1000	11,18	1,94	340-500	113,57	7,18
100-200	242,24	21,36	1000-1100	91,66	15,92	500-700	156,35	9,89
200-300	236,05	20,81	1100 -1200	104,74	18,19	700-900	208,13	13,16
300-400	196	17,28	1200-1300	86,35	14,99	900-1100	439,42	27,78
400-500	133,53	11,77	1300-1400	66,91	11,62	1100-1300	235,17	14,87
500-600	74,13	6,54	1400-1500	54,16	9,4	1300-1500	207,29	13,11
600-700	35,41	3,12	1500-1600	53,07	9,22	1500-1700	133,62	8,45
700-800	21,09	1,86	1600-1700	44,35	7,7	1700-1900	77,35	4,89
800-900	15,41	1,36	1700-1800	32,51	5,65	1900-2162	10,63	0,67
900-100	8,66	0,76	1800-1900	17,05	2,96			
1000-1100	2,97	0,26	1900-2000	5,26	0,91			
1100-1211	1,05	0,09	2000-2100	2,4	0,42			
			2100-2200	4,92	0,85			
			2200-2321	1,36	0,24			
Total	1134,13	100	Total	575,94	100	Total	1582	100

Tableau 3 : La répartition des pentes dans les bassins

Classes de pentes (%)	Bassin Kebir Rhumel		Bassin Reboa		Basin Oued El Hai	
	Superficie (Km ²)	Taux (%)	Superficie (Km ²)	Taux (%)	Superficie (Km ²)	Taux (%)
0-7	255,76	22,55	319,25	55,43	814,29	51,49
7-12,5	317,75	28,02	166,79	28,96	436,56	27,61
12,5-25	460,73	40,63	84,29	14,64	289,22	18,29
>25	99,83	8,8	5,58	0,97	41,34	2,61
Total	1134,08	100	575,9	100	1581,41	100

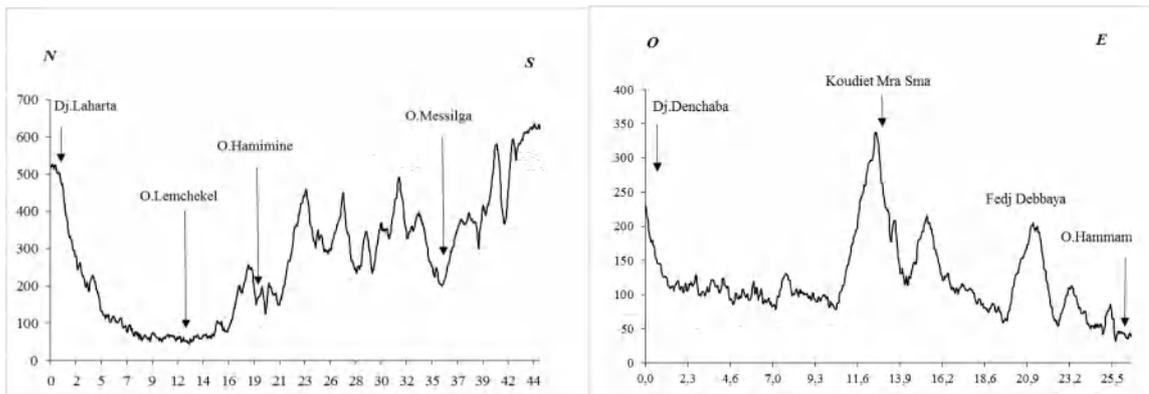


Fig. 8 : Coupes topographiques du relief –Bassin Kebir Hammam-
 a). Nord-Sud ; b). Ouest-Est ; c). Sud-Ouest/ Nord-Nord-Est

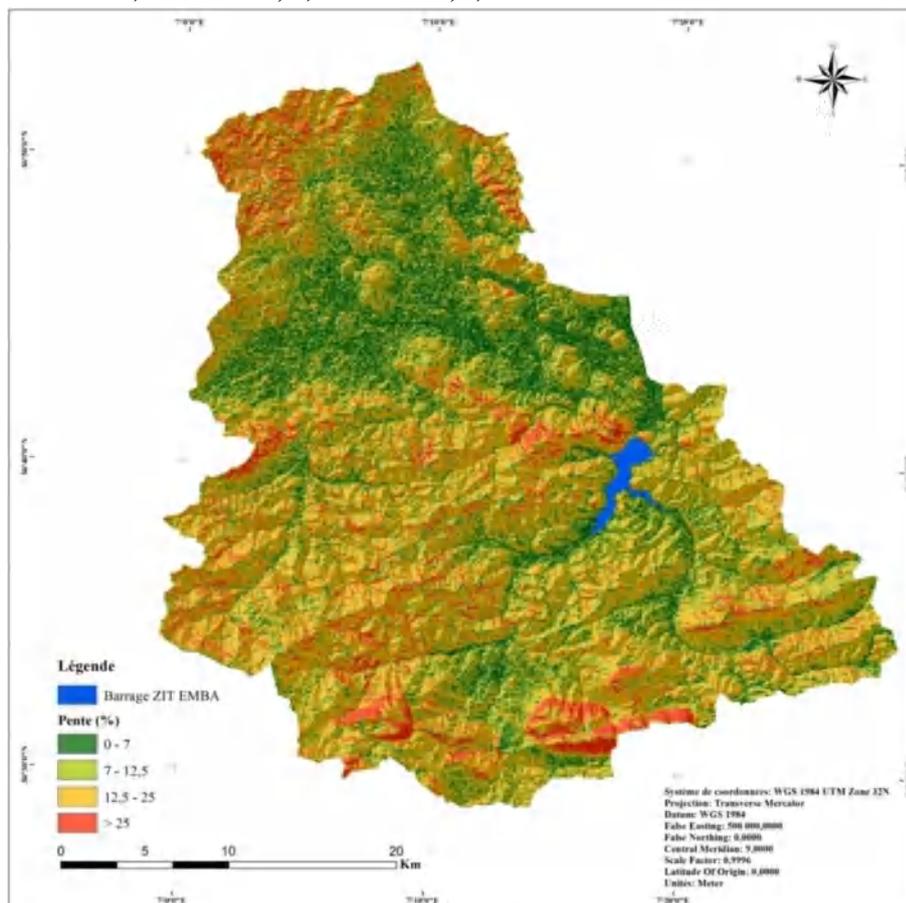


Fig. 9 : Les pentes –Bassin Kebir Hammam-

Le bassin de Reboa est entouré essentiellement de massifs montagneux aux altitudes assez conséquentes (Fig. 10). Les monts de Bouarif, d'orientation Sud-Ouest à Nord constituent ses limites Nord-Est et culminent à 1747 m. Au Sud, Djebel Tagratine représente un vrai chaînon isolé dont l'altitude s'élève à 1375 m. A l'Est, le bassin est limité par Djebel Askeur (1461m) et djebel Ras Errih (1809 m). Tandis qu'à l'Ouest il est limité par les monts d'Isalf Bou El Arrouch (1461 m). Au Sud, le bassin partage avec le bassin Oued El Hai une ligne de crête de 11,5 km de longueur, d'orientation Nord-Ouest à Sud-Est. Djebel Mahmel (1989 m), Djebel Rehrar (1777m) et Djebel Ichmoul (2066 m) représentent une partie de ce grand relief saharien séparant le grand Sud du Nord Algérien.

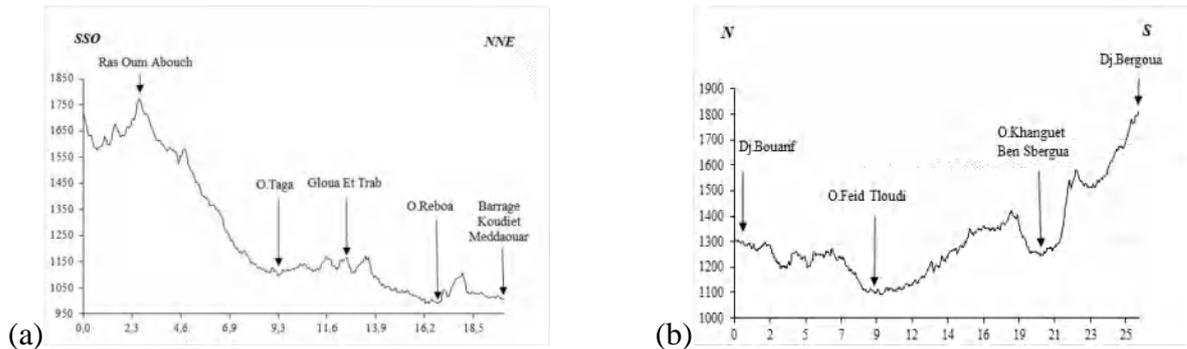


Fig. 10 : Coupes topographiques –Bassin Reboa
a) Sud-Sud-Ouest/Nord-Nord-Est b) Ouest-Nord-Ouest/Est-Nord-Est

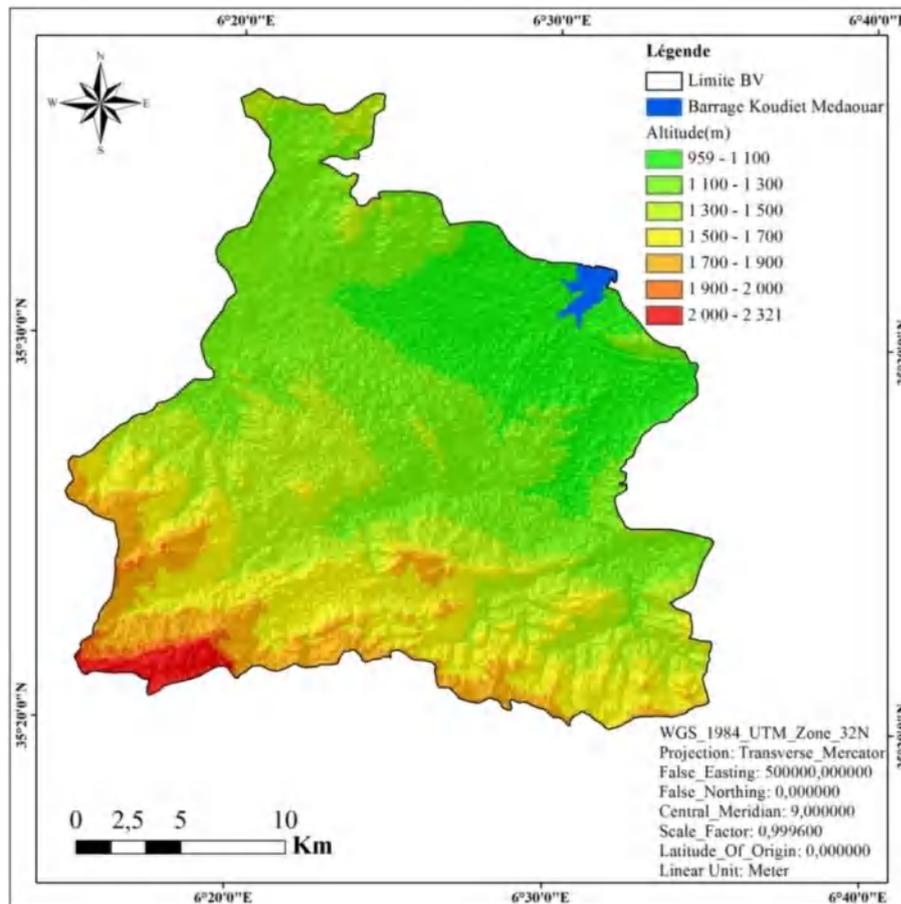


Fig. 11 : Les altitudes –Bassin Reboa-

Les plaines à relief plat occupent de grandes surfaces (Fig. 11). Elles s'étendent au Nord et à l'Est du bassin. Elles représentent plus de 55% du bassin. Les altitudes en ces zones d'accumulations varient entre 900 m à 1500 m (Zone des hautes plaines) et les pentes ne dépassent pas les 12% (Fig. 12).

Entre ces hauts reliefs (Les montagnes) et les plaines, le relief du bassin est formé de collines. Elles constituent de vrais dépôts colluviaux qui dévalent en pentes atténuées vers les plaines et les draas (Tableau 3). Elles apparaissent sous forme de petits reliefs. Ces zones de transition sont nettement découpées par des vallées. Elles sont le plus souvent richement cultivées.

Dans le bassin Oued El Hai, les altitudes varient de 340 à 2162 m (Fig. 13 et 14), et comporte deux grands ensembles topographiques bien distincts : Les montagnes qui encadrent l'ensemble du bassin. Elles sont observées sous une grande ligne de crête au Nord des monts de Belezma. Les points culminants s'observent à Djebel Tichaou (2090 m), Djebel Tuggurt (2090 m) et Djebel Ich Ali (1889 m). A l'Est, le bassin est borné par les djebels : Bouss (1789 m), Haouidja (1070 m) et Makhlouf (1755 m). Ces zones topographiques sont constituées par un relief très accidenté et des pentes les plus abruptes, elles dépassent largement les 25% (Fig.15, Tableau 3).

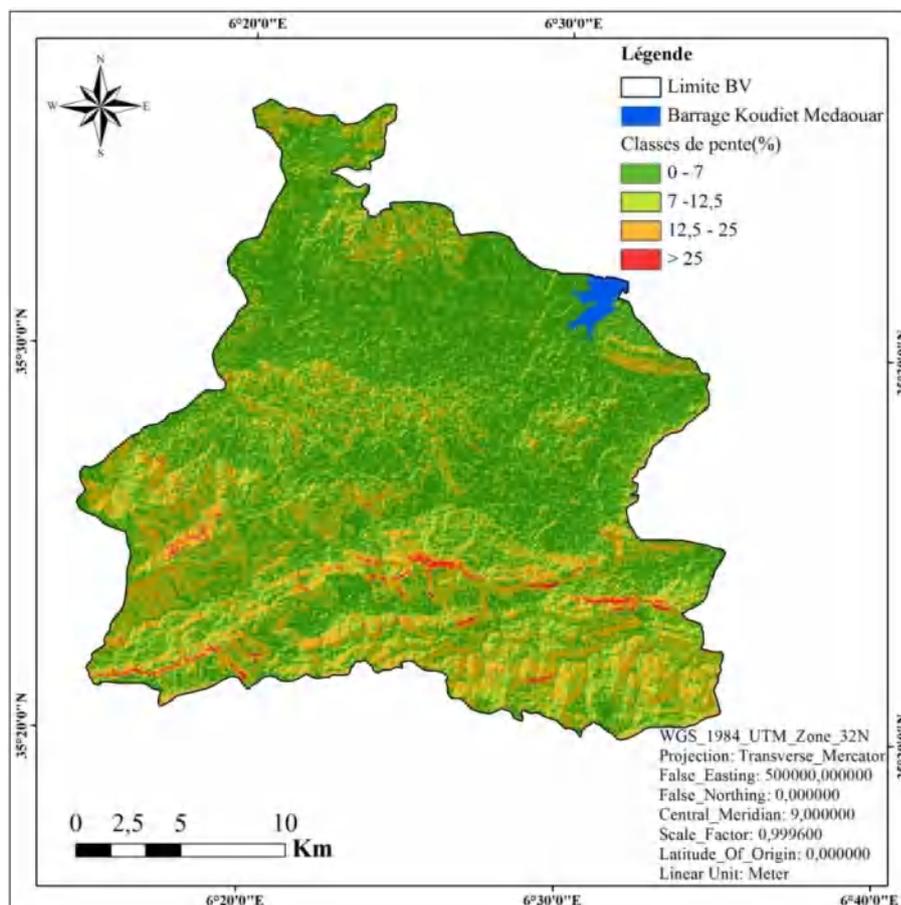


Fig. 12 : Les pentes –Bassin Reboa-

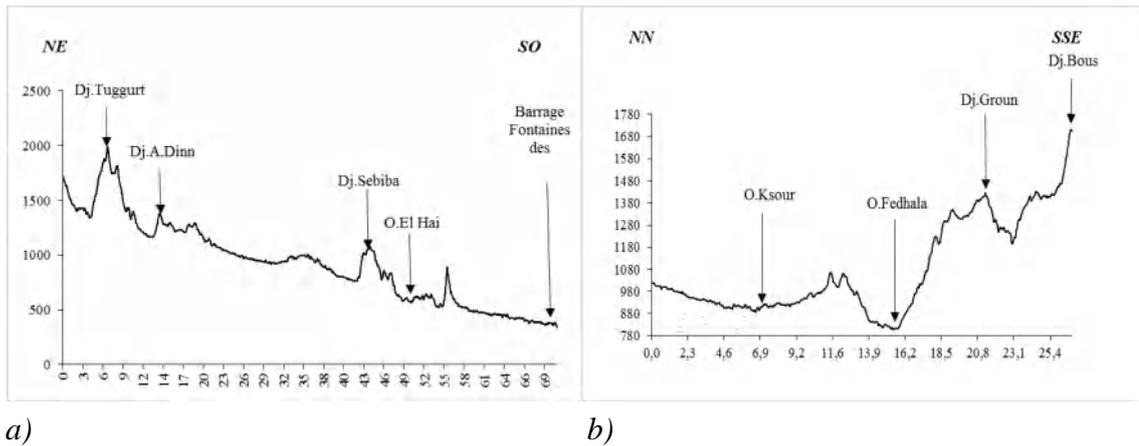


Fig. 13 : Coupes topographiques –Bassin Oued El Hai-
a) Nord- Est/Sud-Ouest b) Nord-Nord-Est/Sud-Sud-Est

Les plaines apparaissent au centre du bassin. Elles sont découpées en deux parties Nord et Sud par un puissant relief composé de Djebel Djar Ed Dechra et Djebel Djar Ouled Bellil, situés en amont de la ville d’El Kantara. Cet ensemble à formations dures a été taillé par Oued El Hai constituant les gorges d’El Kantata. Ces gorges sont situées à mi-chemin entre les deux villes Batna et Biskra. Ils sont l'unique porte du Tell par laquelle on puisse pénétrer dans le Sahara. Une vraie séparation de deux régions aux aspects bioclimatiques totalement opposés.

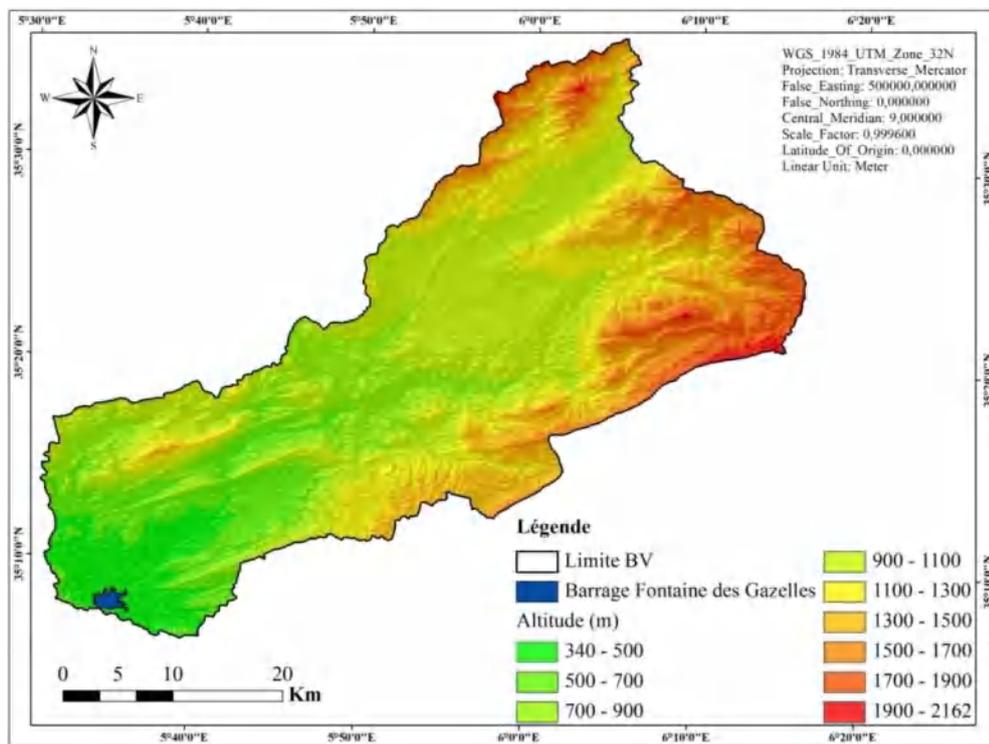


Fig. 14 : Les altitudes –Bassin Oued El Hai-

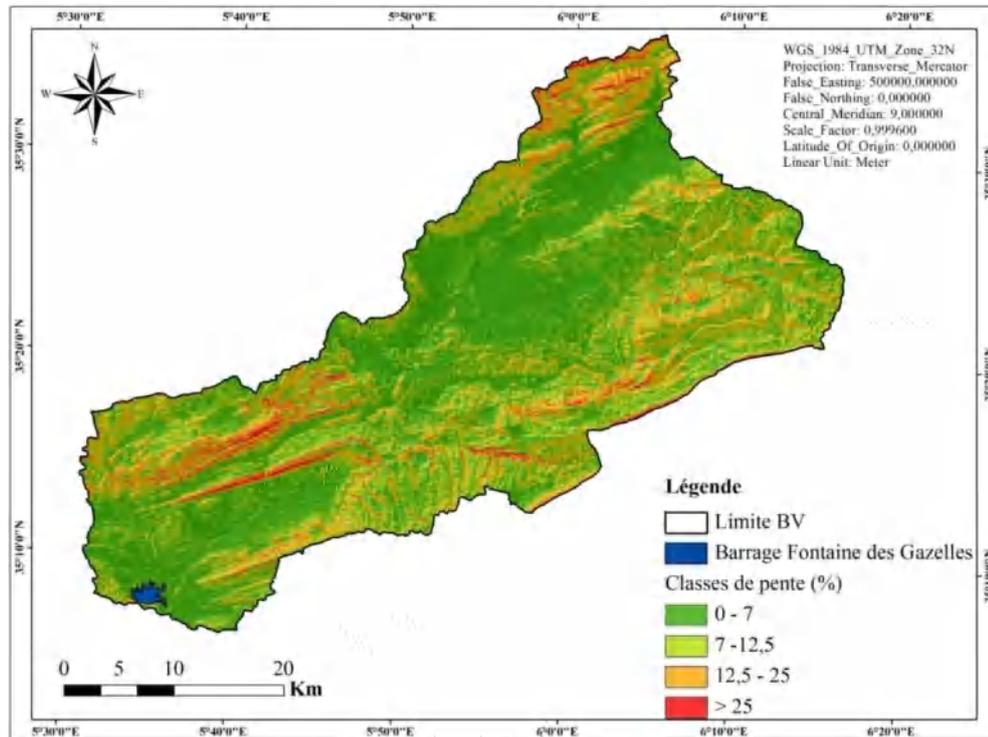


Fig. 15 : Les pentes –Bassin Oued El Hai-

2.3.1. Les indices de relief (Courbe hypsométrique)

La courbe hypsométrique exprime le pourcentage de la superficie du bassin (ou le pourcentage de la surface) en fonction des altitudes supérieures à une côte z donnée. Cette courbe est établie en planimétrant pour différentes altitudes les surfaces situées au-dessus de la courbe de niveau correspondante. Elle fournit une vue synthétique de la répartition des altitudes à l'intérieur, afin de déterminer les altitudes caractéristiques dans les bassins. Elle permet également de juger l'âge et le degré d'érosion des bassins versants. La forme qu'elle donne caractérise l'état de maturité du relief (jeune, en équilibre et vieux) ainsi que sa capacité érosive (Musy, 2005). Une courbe convexe est caractéristique d'un relief accusé et jeune où l'érosion est encore intense, tandis qu'une forme concave reflète un vieux relief non rajeuni par les soulèvements tectoniques et où l'érosion est devenue faible et stable (Bannister, 1980).

L'interprétation de l'aspect de la courbe hypsométrique est donnée en fonction du degré d'érosion associé à l'âge du bassin (Fig. 16) :

- Les bassins jeunes montrent une superficie faible par rapport au changement d'altitude initiale, ce qui est caractéristique des bassins abrupts.
- Les vieux bassins présentent de larges topographies pratiquement planes où l'altitude varie très peu.
- Les bassins, correspondant à la courbe du milieu, sont des bassins proches de l'état dit d'équilibre ou « mature ».

Ainsi ont été tracées les courbes hypsométriques pour les différents bassins.

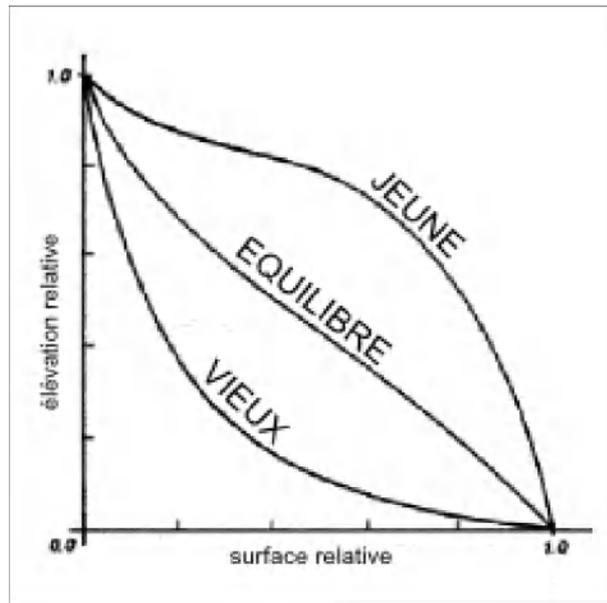
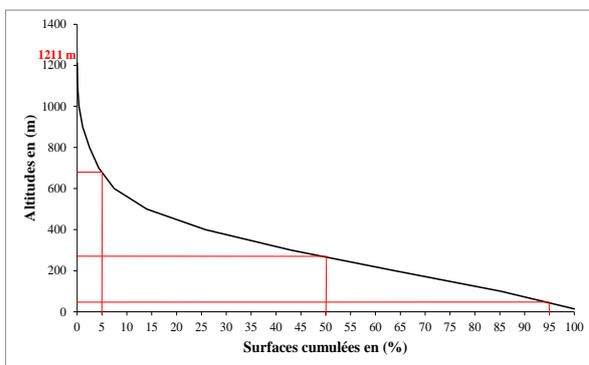
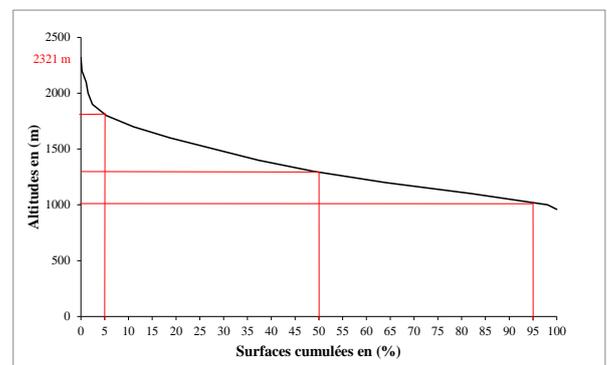


Fig. 16 : Etat de maturité du relief des bassins versant

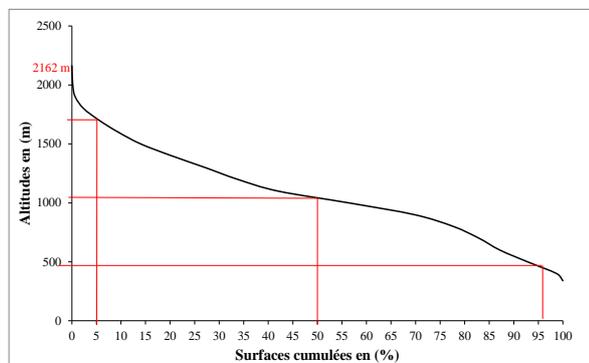
L'allure des courbes hypsométriques montrent que la morphologie des trois bassins tend vers un déséquilibre dans le relief lié à la nature des formations lithologiques, induisant de fortes entailles par les forces érosives hydriques. La courbe hypsométrique du bassin versant Kebir Hammam traduit l'état d'un bassin en situation rhéostasique ; ayant déjà dépassé l'état de maturité et d'équilibre (Fig. 17), il s'oriente vers un stade d'érosion relativement développé.



a)



b)



c)

Fig. 17 : Courbes hypsométriques
a). Bassin Kebir Hammam ; b). Bassin Reboa; c). Bassin Oued El Hai

2.3.1.1. Les Altitudes caractéristiques

Étant utile dans l'évaluation de certains paramètres et la mise en œuvre de modèles hydrologiques, Les attitudes sont déduites à partir des courbes hypsométriques. Les altitudes minimales et maximales sont obtenues directement à partir du Modèle numérique de terrain MNT.

a. L'altitude maximale et minimale

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement situé près de l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes pour déterminer l'amplitude altimétrique du bassin versant, le calcul de la pente et le temps de concentration.

b. L'altitude moyenne

La moyenne est peu représentative en réalité. En morphométrie, elle reste encore une information importante. Elle est un paramètre indicateur sur le temps de parcours de ruissellement direct, donc sur le temps de concentration « Tc » et influence directement le débit de pointe lors d'une averse (Musy, 2005). Elle est calculée comme suit :

$$hmoy = \sum_1^n \frac{ai \cdot di}{A} \quad (13)$$

Où :

ai : La surface partielle en (Km^2) ; di : L'altitude moyenne comprise entre deux courbes de niveau ;
 A : La superficie du bassin versant en (km^2).

c. Les altitudes caractéristiques (h5%, h50%, h95%)

Les altitudes caractéristiques sont lues au point d'abscisse de la surface totale du bassin versant. Sur la courbe hypsométrique, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure à 5% de la surface (h5% et h95%). On déduit également l'altitude médiane h50%.

d. La dénivelée simple

La dénivelée simple « D » est la distance qui sépare les altitudes ayant approximativement 5% de la surface du bassin au-dessus et au-dessous d'elles. Elle est calculée comme suit :

$$D = h_{5\%} - h_{95\%} \quad (14)$$

Tableau 4 : Les résultats d'indices de relief des bassins

Bassin	Sous bassin	Altitude Maximale (m)	Altitude Minimale (m)	Altitude moyenne (m)	h _{5%}	h _{50%}	h _{95%}	D (m)
Kebir Hammam	Oued Emchekel	912	14	332,10	640	300	120	520
	Oued El Hammam	1207	69	365,45	790	338	100	690
	Total	1207	14	298,79	680	269	45	635
Reboa	Reboa	2237	960	1419,89	1810	1410	1020	790
	Timgad	1917	967	1236,78	1390	1195	1020	370
	Total	2321	960	1349,41	1820	1290	1010	810
Oued El Hai	/	2162	340	1071,17	1720	1020	420	1300

L'altitude moyenne du bassin Kebir Hammam ressort seulement de 298 mètres (Tableau 4). Dans les deux bassins Reboa et Oued El Hai, elle représente respectivement des valeurs de 1349 m et 1071 m. La distance verticale séparant les deux courbes maîtresses extrêmes qui délimitent le bassin (h_{5%} et h_{95%}) est plus importante au bassin Oued El Hai (1300 m).

2.3.1.2. Les caractéristiques de pentes

a. La pente moyenne

La pente moyenne des cours d'eau influe sur les caractéristiques du drainage. Elle est calculée comme suit :

$$P_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A}} / 100 \quad (15)$$

Où :

H_{max} , H_{min} : Altitude maximale et minimale du bassin versant en (m), A : Superficie du bassin versant en (Km^2).

b. L'indice de pente globale

L'indice de pente globale est utilisé pour déterminer la dénivelée spécifique du bassin. Il a aussi pour rôle de classer le relief des bassins dont la superficie est inférieure à 25 km^2 . Dans une région géomorphologiquement homogène, la pente diminue de l'amont vers l'aval, par conséquent, l'indice « I_g » décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente. Toutefois, la longueur du rectangle équivalent étant généralement proche de celle du plus long cours d'eau, cet indice reste voisin de la pente longitudinale (FAO, 1996). Il est exprimé par la formule suivante :

$$I_g(m/km) = \frac{D}{L} \quad (16)$$

Où :

D : La dénivelée simple en (m); L : La longueur du rectangle équivalent en (km).

La classification du relief proposé par l'Office de la Recherche Scientifique d'Outre-Mer (ORSTOM) selon indice de pente global de pente (I_g) est comme suit (Tableau 5) :

Tableau 5 : Les classes du relief selon l'indice de pente global « I_g »

Rang	Valeur de « I_g »	Classe du relief
R1	$I_g < 0,002$	Très faible
R2	$0,002 < I_g < 0,005$	Faible
R3	$0,005 < I_g < 0,01$	Assez faible
R4	$0,01 < I_g < 0,02$	Modéré
R5	$0,02 < I_g < 0,05$	Assez fort
R6	$0,05 < I_g < 0,1$	Fort
R7	$I_g > 0,1$	Très fort

Source : ORSTOM

c. La dénivelée spécifique

A la différence de l'indice global « I_g », la dénivelée spécifique « D_s » est indépendante de l'aire du bassin. Elle permet de comparer des bassins de tailles différentes. Elle classe le relief et suit toujours la classification de l'ORSTOM (Tableau 6). Elle est calculée comme suit :

$$D_s = I_g * \sqrt{A} \quad (17)$$

Où :

I_g : indice global de pente ; A : superficie de bassin en (Km^2).

Tableau 6 : Les classes du relief selon la dénivelée spécifique « D_s »

Rang	Valeurs de D_s	Classe du relief
R1	$D_s < 10$	Très faible
R2	$10 < D_s < 25$	Faible
R3	$25 < D_s < 50$	Assez faible
R4	$50 < D_s < 100$	Modéré
R5	$100 < D_s < 250$	Assez fort
R6	$250 < D_s < 500$	Fort
R7	$D_s > 500$	Très fort

Source : ORSTOM

d. Indice de pente de Roche

L'indice de pente de Roche caractérise la pente globale du bassin versant. Il est calculé à partir de la répartition hypsométrique et est défini par Roche à partir du rectangle équivalent. Il s'exprime par la formule suivante :

$$IPR = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_1^n \sqrt{a_i * d_i} \quad (18)$$

Où :

L : La longueur du rectangle équivalent en (km); ai : Le pourcentage de la superficie entre les courbes de niveau; di : La distance entre les courbes de niveau appelée aussi dénivelé.

D'après le tableau 7, les valeurs de la dénivelée spécifique témoignent d'un relief sensiblement fort dans les trois bassins. Les pentes moyennes qui conditionnent la vitesse d'écoulement, la quantité d'eau qui va ruisseler et celle qui va s'infiltrer sont importantes. Elles varient de 3,5% (bassin Kebir Hammam) à 5,6% (bassin Reboa). Ainsi, dans nos bassins, l'écoulement des eaux précipitées prend le pas sur l'infiltration.

Tableau 7 : Les résultats des indices de pentes et classification du relief des bassins

Bassin	Sous bassin	Pmoy (%)	Ig	Ds (m)	Classe du relief	Ipr
Kebir Hammam	Oued Emchekel	3,68	9,18	223,75	Assez fort	0,11
	Oued El Hammam	4,90	12,91	299,25	Fort	0,13
	Total	3,54	8,21	276,43	Fort	0,10
Reboa	Reboa	7,27	15,94	280,01	Fort	0,44
	Timgad	6,07	9,48	148,35	Assez fort	0,50
	Total	5,67	13,95	334,70	Fort	0,13
Oued El Hai	/	4,58	12,50	497,25	Fort	0,12

2.4. L'orientation du relief des bassins

Du fait de son orientation et de toutes ses caractéristiques (pentes, sols, végétation, etc.), le versant détermine de nombreux processus de transferts hydriques et énergétiques, et d'évolution du relief lui-même. En général, dans une vallée ou un versant, il existe un *adret* et un *ubac*. L'*adret* est un terme géographique qui désigne le versant d'une montagne qui subit la plus longue exposition au soleil. L'*ubac* quant à lui désigne le versant à l'ombre, celui qui subit la plus courte exposition. L'orientation des versants joue ainsi un rôle sur la durée de l'insolation et la distribution des précipitations. Elle a une influence manifeste puisqu'elle crée d'une part, des différences dans la végétation spontanée et les cultures des deux versants et d'autre part, des variations plus grandes dans la structure pédologique (dégradation de la roche mère vitesse de la décomposition de la matière organique) et l'organisation du réseau hydrographique. En conséquence, l'érosion hydrique des deux versants agit différemment et se manifeste par des formes et des processus différents aussi.

Sur les versants à exposition Nord, les sols sont généralement bien développés et plus ou moins bien protégés. La présence de couverts végétaux naturels ou cultivés, régularise les écoulements et empêche le détachement des particules. En revanche, sur les versants orientés au Sud, le couvert végétal est souvent discontinu et la rareté des pluies et leur agressivité favorisent non seulement les processus d'érosion mais aussi empêchent la reconstitution des sols, et le substratum affleure fréquemment.

Les cartes d'exposition des versants réalisées (Figure 18, 19 et 20) montrent que la partie des surfaces exposées aux flux Nord souvent humides est plus importante dans les bassins Kebir Hammam et Reboa. Elle dépasse 40% dans les deux bassins. A Oued El Hai, nonobstant, sa

position Sud par rapport aux reliefs, les versants exposés aux Nord sont de l'ordre de 33,2% (Tableau 8).

Tableau 8 : Pourcentages d'exposition des versants par bassin.

Exposition des versants	Bassin Kebir Hammam		Bassin Reboa		Bassin Oued El Hai	
	Superficie (Km ²)	Taux (%)	Superficie (Km ²)	Taux (%)	Superficie (Km ²)	Taux (%)
Plat standard	6,13	0,54	0,24	0,04	0,76	0,05
Nord	204,2	18,01	114,71	19,92	253,92	16,06
Nord-Est	156,82	13,83	88,5	15,37	150,14	9,49
Est	108,64	9,58	62,57	10,86	120,87	7,64
Sud-Est	130,52	11,51	66,29	11,51	189,03	11,95
Sud	168,28	14,84	68,72	11,93	285,84	18,07
Sud-Ouest	123,46	10,89	54,87	9,53	198,59	12,56
Ouest	6,53	8,51	48,35	8,4	157,55	9,96
Nord-Ouest	139,49	12,3	71,67	12,44	224,75	14,21
Total	1134,07	100	575,93	100	1581,45	100

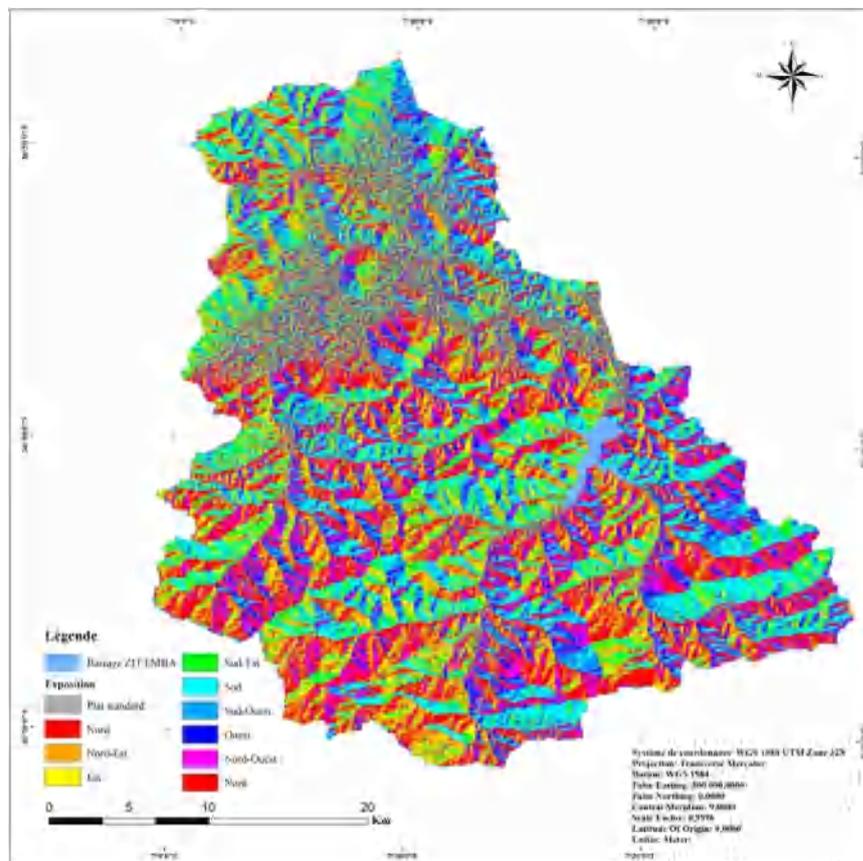


Fig. 18 : Orientation des versants –Bassin Kebir Hammam-

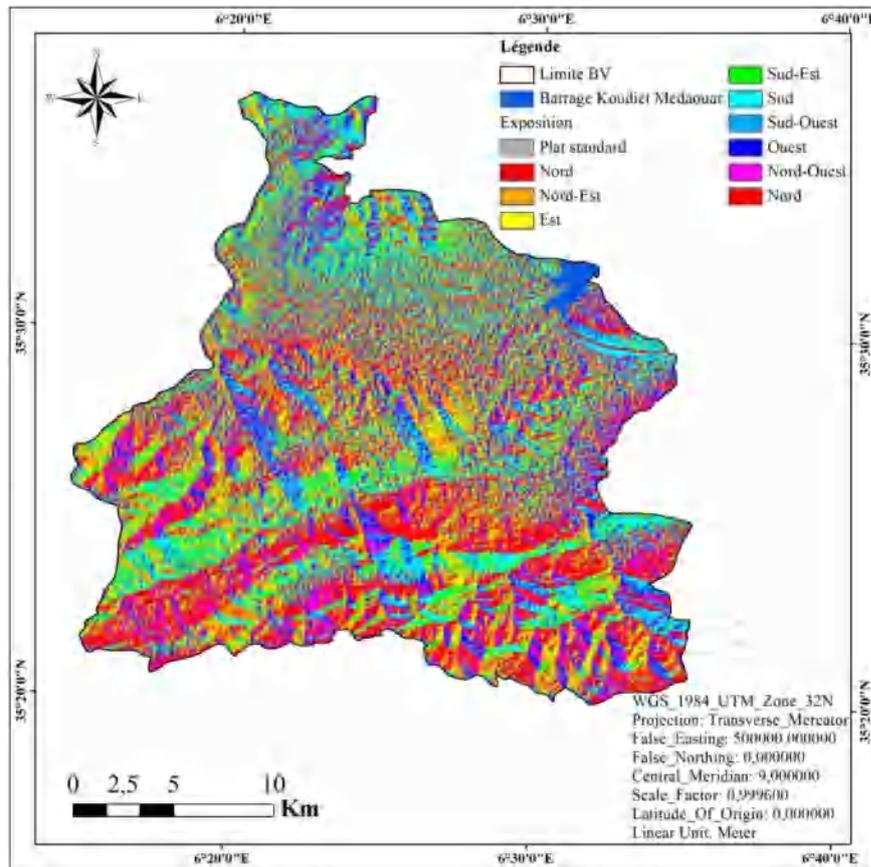


Fig. 19 : Orientation des versants –Bassin Reboa-

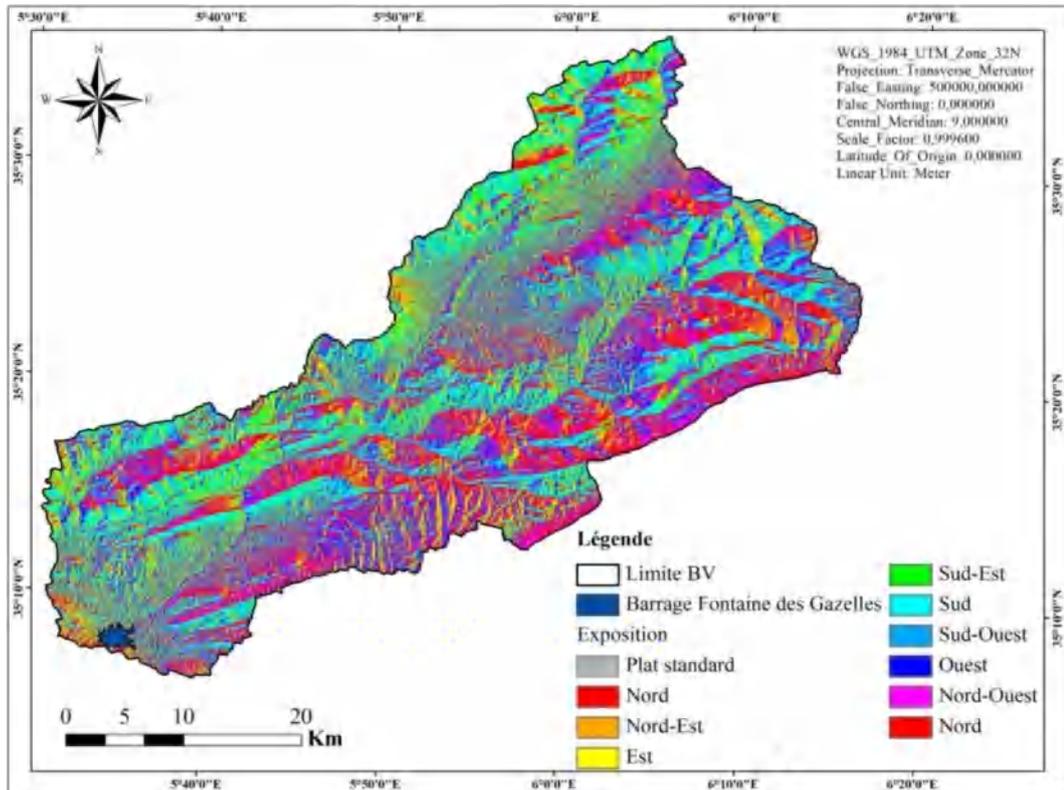


Fig. 20 : Orientation des versants –Bassin Oued El Hai-

2.5. La géologie régionale des bassins

L'histoire géologique des bassins sédimentaires de l'Algérie est très mouvementée et marquée par l'évolution dynamique des plaques qui a organisé l'Algérie en deux domaines bien distincts. Il suffit de regarder la figure 21 pour constater l'existence de cette mosaïque de terrains et de structures plus ou moins complexes dont le résultat se traduit par une grande diversité des ressources en eau et en sol. De manière schématique du Nord au Sud du pays, on peut distinguer : le domaine orogénique du Nord nommé aussi « l'Algérie Alpine » et le domaine cratonique, qui est également la plate-forme saharienne. Ils sont séparés par un accident sud-atlasique appelé « Flexure Sud-atlasique ».

Le bassin Kebir Hammam localisé sur un versant Nord de l'atlas tellien, se rattache aux zones internes septentrionales de la chaîne des maghrébides d'Algérie Nord Orientale (sous domaine allochtone). Tandis que, les deux bassins de la Reboa et Oued El Hai appartiennent à l'autochtone, situés au Nord de l'accident sud-atlasique.

2.5.1. La chaîne Alpine

Elle correspond au territoire Nord de l'Algérie qui se traduit par deux systèmes morpho-structuraux, tellien et atlasique. Ils comprennent plusieurs séries hétéropiques, définissables à partir du Trias au Priabonien, parfois adhérentes à un socle Paléozoïque ou plus ancien de nature cristallophyllienne complexe (J.M. Vila, 1980).

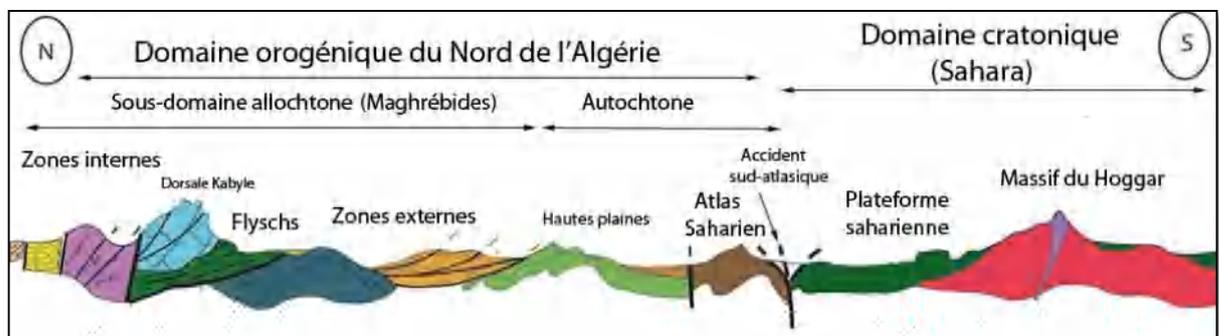


Fig. 21 : Les principales unités structurales de l'Algérie : Coupe Nord-Sud (H. Haddoum).

2.5.1.1. La Dorsale Tellienne (Allochtone)

Cette chaîne alpine de l'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogène alpin péri-méditerranéen (Durand-Delga, 1962). Elle a connu des phases de déformations mésozoïques menant à la mise en place de nappes de charriage. C'est le domaine des nappes ou **sous domaine allochtone**. En Algérie, cette chaîne montre du Nord vers le Sud les domaines suivants :

a. Le domaine interne

Il englobe les massifs kabyles, c'est le socle Kabyle ou Kabylide composé de formations cristallophylliennes paléozoïques et leurs couvertures sédimentaires mésozoïque et tertiaire (Fig. 22). Il est bordé au sud par les unités mésozoïques et cénozoïques de la Dorsale Kabyle appelée aussi « Chaîne calcaire » à cause de l'importance du jurassique inférieur calcaire. En Algérie orientale, la chaîne calcaire et le socle kabyle constituent le corps allochtone le plus septentrional (J.M.Vila, 1980).

a.1. Le socle kabyle

Il correspond à l'élément le plus ancien de chaîne des Maghrébides. Il comporte à sa base des formations gneissiques présentant le faciès des granulites, à ces formations sont associées (Bouillin et Kornprobst, 1974 ; Bouillin, 1977) les péridotites. Au-dessus, se développe une série de gneiss, de marbres et de micaschistes recouverte par un ensemble essentiellement sédimentaire paléozoïque peu métamorphique débutant au cambrien supérieur (Baudalet et Gery, 1979). N'ayant que très peu d'affleurement, ces massifs anciens occupent le centre et Nord-Est du bassin Kebir Hammam (Fig. 22), sur les massifs de djebel El Alia. Ils sont liés à la Dorsale kabyle (Raoult, 1974).

a.2. La chaîne calcaire ou la Dorsale Kabyle

La chaîne calcaire est une couverture de terrains paléozoïques, très peu ou pas métamorphiques (J.F.Raoult, 1974). Elle est représentée par des affleurements rectiligne et discontinus qui se suivent au centre du bassin Kebir Hammam, depuis Djebel Tengout à l'Ouest jusqu'à Zit Emba à l'Est.

Au-dessus de phyllades analogues à celle du socle kabyle (ou en continuité d'affleurement avec celui-ci), la série comporte des terrains d'âge Silurien à carbonifère puis une succession très variable de séries allant du Permo-Trias au Lutétien supérieur. Leurs relations structurales, permettent de définir des sous zones (internes, médianes et externes).

a.2.1. Les séries internes

Les séries internes présentent une grande homogénéité. C'est d'elles que provient la dénomination « chaîne calcaire », par la suite de la prédominance des affleurements de calcaires massifs du lias et du tertiaire.

Ces séries varient relativement peu au-dessus d'un substratum surtout phylladique supportant de rares témoins de Paléozoïque et localement recouvert par un Permo-Trias gréseux rouge. Au secondaire, on y rencontre au total : un Trias moyen supérieur calcaire-dolomitique surmontant les niveaux gréseux rouges et exceptionnellement gypseux, un Lias inférieur dolomitique et calcaire massif, un Lias moyen supérieur fait de calcaires à silex, un Jurassique moyen- supérieur et un Crétacé calcaire de faible épaisseur, parfois noduleux, réduit ou absent. Le Tertiaire est transgressif, soit dès le Paléocène, soit à l'yprésien représenté par des calcaires

massifs à faciès épi-néritiques. Le Lutétien supérieur Priabonien est bréchique et discordant de même que l'Oligocène gréseux et micacé qui lui fait suite.

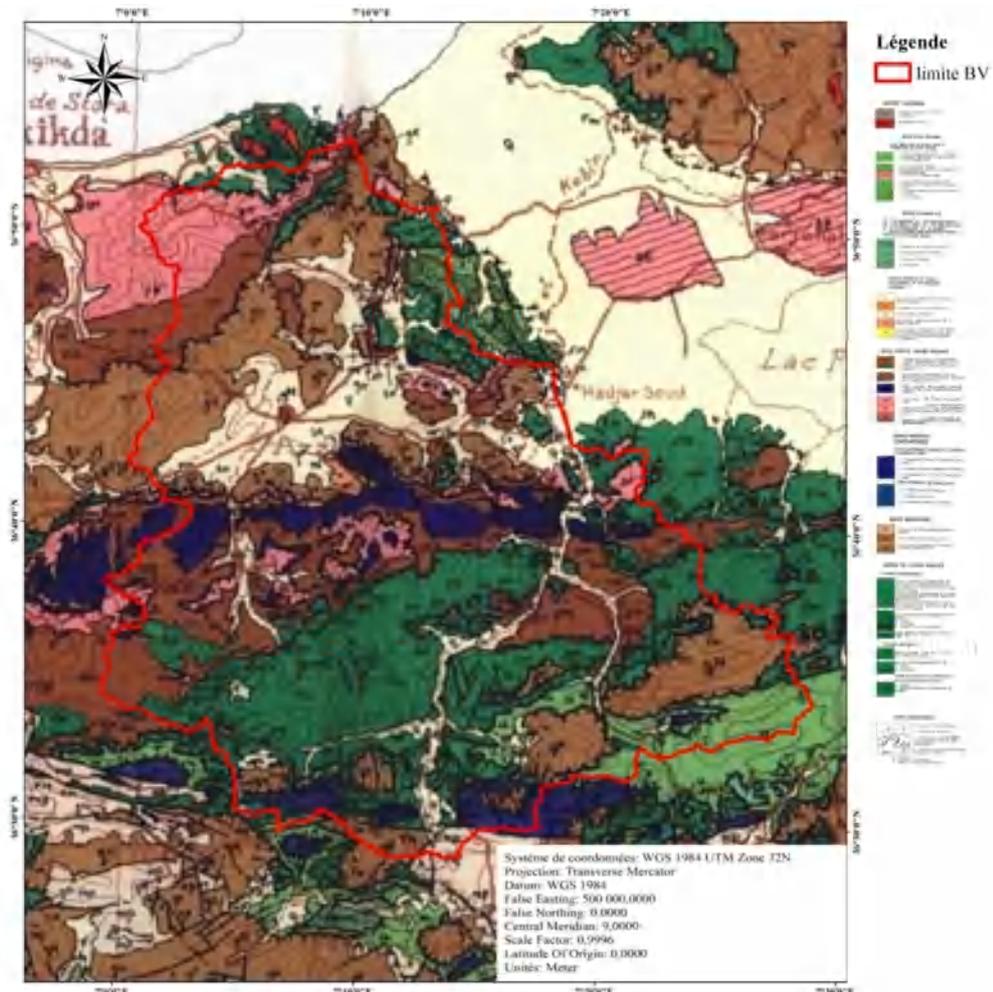


Fig. 22 : La géologie -Bassin Kebir Hammam-

a.2.2. Les séries médianes

Elles comprennent des séries allant du Permo-Trias au Lutétien supérieur. La base de ces séries est comparable à celle des séries internes. La série est marno-calcaire du crétacé supérieur à l'éocène inférieur puis des calcaires à nummulites au lutétien supérieur.

a.2.3. Les séries externes

Elles sont définies par un Lias particulier à Ammonites et Rychonelles et par un Crétacé et un Eocène détritiques. La série la plus complète est celle de Djebel El Abiod à Lias carbonaté, Dogger rouge pélitique à conglomérats, Malm à radiolarites, crétacé inférieur gréseux fin discordant, sénonien à Lutétien détritique grossier à composante surtout calcaire.

b. Domaine des Flyschs

Les flyschs en général occupent une position allochtone par rapport aux zones externes. Ils reposent avec des modalités variés sur les zones internes ou la chaîne calcaire. La constance de leurs faciès est remarquable puisqu'on peut à première approximation les suivre longitudinalement du champ de Gibraltar jusqu'en Sicile, malgré deux interruptions notables au niveau de la frontière Algéro-marocaine et à l'Est du méridien d'Annaba en ce qui concerne le flysch gréseux du crétacé inférieur.

En Algérie orientale, ces formations affleurent dans les zones littorales. Il s'agit essentiellement de deux grands types de séries. Le flysch de type Maurétanien d'âge crétacé-paléogène au Nord, et le flysch Massylien au sud d'âge oligo-miocène (J.P.Gérald, 1969 ; Raoult, 1969, 1972). Le flysch d'âge oligo-miocène constitue le matériel de la nappe ou les flyschs numidiens.

b.1. Flyschs Maurétaniens

À l'est du pays, ces formations montrent de bas en haut : un flysch à petits bancs de micrites de Tithonique-Néocomien, un flysch argilo-gréseux qui atteint Albien moyen, un Vracocénomano-Turonien calcaire conglomératique ou micro-conglomératique à bandes silicifiées blanches, un Sénonien et un Paléocène-Eocène moyen argilo-conglomératiques avec à l'Eocène et notamment à Lutétien (M. Durand Delga, 1971).

Dans le bassin Kebir Hammam, les flyschs maurétaniens affleurent au Sud, entre Roknia et Bouati Mahmoud au Nord de Guelma et Bekkouche Lakhdar à Skikda.

b.2. Les Flyschs Massyliens

Les flyschs massyliens montrent de bas en haut : des sableux et des argiles du néocomien, un flysch crétacé inférieur argilo-quartzitique dont les bancs sont d'épaisseurs décimétrique. Des phanites blanches et noires tout à fait typiques du cénomano-turonien. Ces derniers sont surmontés par un ensemble flysoïde marno-microbréchiens de petits débris du sénonien attribuables à une origine volcanique (J.-P.Bouillin et J.Hernandez, 1975).

Le crétacé supérieur est caractérisé par des argiles vertes alternant avec de microbrèches tendres en petits bancs. C'est le classique « flysch à microbrèches » où les niveaux conglomératiques sont assez rares (Raoult, 1972).

b.3. Les Flyschs numidiens

Le flysch numidien nommé aussi « nappe numidienne » couvre un intervalle allant de l'Oligocène au Burdigalien (J.F.Raoult, J.P. Bouillin, 1971. Lahondère, 1979). Ces flyschs sont constitués de bas en haut : d'argiles varicolores de base dites « sous numidiennes » à Tubotoculum, d'âge oligocène moyen et supérieur, de grès grossiers, blanc jaunâtre numidiens d'âge oligocène

terminal-aquitainien et élément fondamental de la série. Sur ces derniers reposent des argiles, marnes claires et silexites supra-numidiennes (J.F.Raoult, 1974) d'âge Burdigalien inférieur.

Les affleurement des grés numidiens dans le bassin Kebir Hammam encadrent sensiblement la zone où apparaît la dorsale kabyle. Ils forment les sommets de Djebel Bou Asloudja, Djebel Mekdoua et Bou Fernana.

c. Les zones externes

Les zones externes connues aussi par le domaine tellien sont caractérisées par un ensemble de nappes allochtones constituées principalement de marnes d'âge Crétacé moyen à Néogène chevauchant vers le sud l'avant pays allochtone. Du Nord au Sud de ces formations on peut distinguer :

c.1. Les nappes Ultra-telliennes

Ces zones comportent un crétacé inférieur marneux et micritique, un crétacé moyen de même nature, un sénonien épais analogue, très clair, riche en microfaunes, un éocène marneux dano-paléocène, calcaireux Yprésien-Lutétien et un Lutétien supérieur marneux sombres.

Les formations ultra-telliennes apparaissent au Sud-Est du bassin Kebir Hammam. Elles présentent des caractères proches de ceux des flyschs massyliens.

c.2. Les nappes Telliennes Sensu Stricto

Ces formations ont souvent été souvent confondues avec les formations de type plate-forme réputées autochtones. Elles sont constituées par un Lias inférieur-moyen carbonaté massif de type plate-forme surmonté de Jurassique plus marneux, puis par le crétacé détritique qui devient marneux à argilo-calcaire et enfin l'Eocène aux marnes.

c.3. Les nappes Péni-telliennes

Ces formations présentent des caractères proches à ceux du néritique Constantinois. Elles étaient précédemment confondues avec les formations de type plate-forme réputées autochtones. Ces séries affleurent à l'extérieur des trois bassins étudiés, en lambeaux charriés sur les massifs néritiques (J.M.Vila, 1980). Elles comprennent des formations jurassico-crétacées qui se distinguent par des faciès crétacés (J.C.Lahondère, 1983).

d. Avant- pays allochtone

Dans le domaine externe précédemment décrit existe des unités plus externes, structurées au Miocène moyen. Ces formations qu'on appelle séries de l'avant pays allochtone ou tellien et dont le bassin de Timgad fait partie, se déplacent entre les nappes telliennes au Nord et l'autochtone ou para-allochtone atlasique au Sud. A l'échelle régionale des bassins, on peut distinguer de l'Ouest vers l'est :

d.3. Les unités allochtones de type selloua

Les unités allochtones de type Sellaoua affleurent au sud du môle néritique constantinois. Elles n'apparaissent pas dans la zone d'étude des trois bassins, par contre, elles se situent au sud du bassin Kebir Hammam et au Nord-Est des deux bassins Oued El Hai et Reboa.

Ces formations d'âge crétacé à miocène sont essentiellement marneuses. Entre l'autochtone des hautes plaines et le chevauchement de la nappe néritique, ces unités écaillées sont le siège de raccourcissements considérables attribuables à des chevauchements de grande ampleur.

2.5.1.2. La dorsale atlasique (l'Autochtone)

Il s'agit du domaine atlasique. Il est séparé du Sahara par une énorme faille d'ampleur continentale, elle est continue depuis le Maroc (Agadir) jusqu'en Tunisie (Gabès) passant en Algérie par Biskra, Laghouat, ect. C'est un accident majeur qui limite au Nord l'Atlas saharien (domaine plissé) de la plate-forme peu ou pas plissée d'où l'appellation d'Accident Sud Atlasique (ASA). Ce domaine est divisé en deux domaines principaux : l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien. Ce dernier est né d'un long sillon subsident pincé entre les hauts plateaux et la Plate-forme Saharienne. Sur sa partie Sud se situe le bassin d'Oued El Hai (Fig. 24). Ce domaine est formé de sédiments allant du Trias à l'Eocène avec le Mio-Pilo-quaternaire discordant.

2.5.2. Le domaine de plate-forme saharienne

Elle s'étend sur tout le sud du pays entre l'Ahaggar et l'atlas (la bordure septentrionale du craton africain). Il est limité des hauts plateaux par des failles en échelon qui se suivent d'Ouest en Est, elles forment L'Accident Nord Atlasique (ASA). Ce domaine est formé de sédiments allant du Trias à l'Eocène avec le Mio-Pilo-quaternaire discordant. Dans l'Atlas saharien on distingue respectivement d'Est en Ouest : Les Nememcha, Les Aurès, le Hodna, les Monts des Ouled Naïl, Le Djebel Amour, Le Djebel Ksour.

2.6.2. Les formations sédimentaires

2.6.2.1. D'âge Secondaire

a. Les formations Triasiques

Les formations triasiques sont peu étendues dans le secteur des trois bassins, voire absent aux deux bassins : Kebir Hammam et Reboa. En revanche, elles affleurent au Nord du bassin Oued El Hai sur les piedmonts Sud de Djebel Tuggurt et au sud-est dans la région de Maâfa. Elles ne sont jamais en position stratigraphique normale, mais sous forme de pointements diapiriques ou en lames éjectées le long d'accidents tectoniques.

Elles comportent des masses confuses de marnes bariolées rouges riches en cristaux de quartz bipyramidés, de gypses, de dolomies noires bréchifiées.

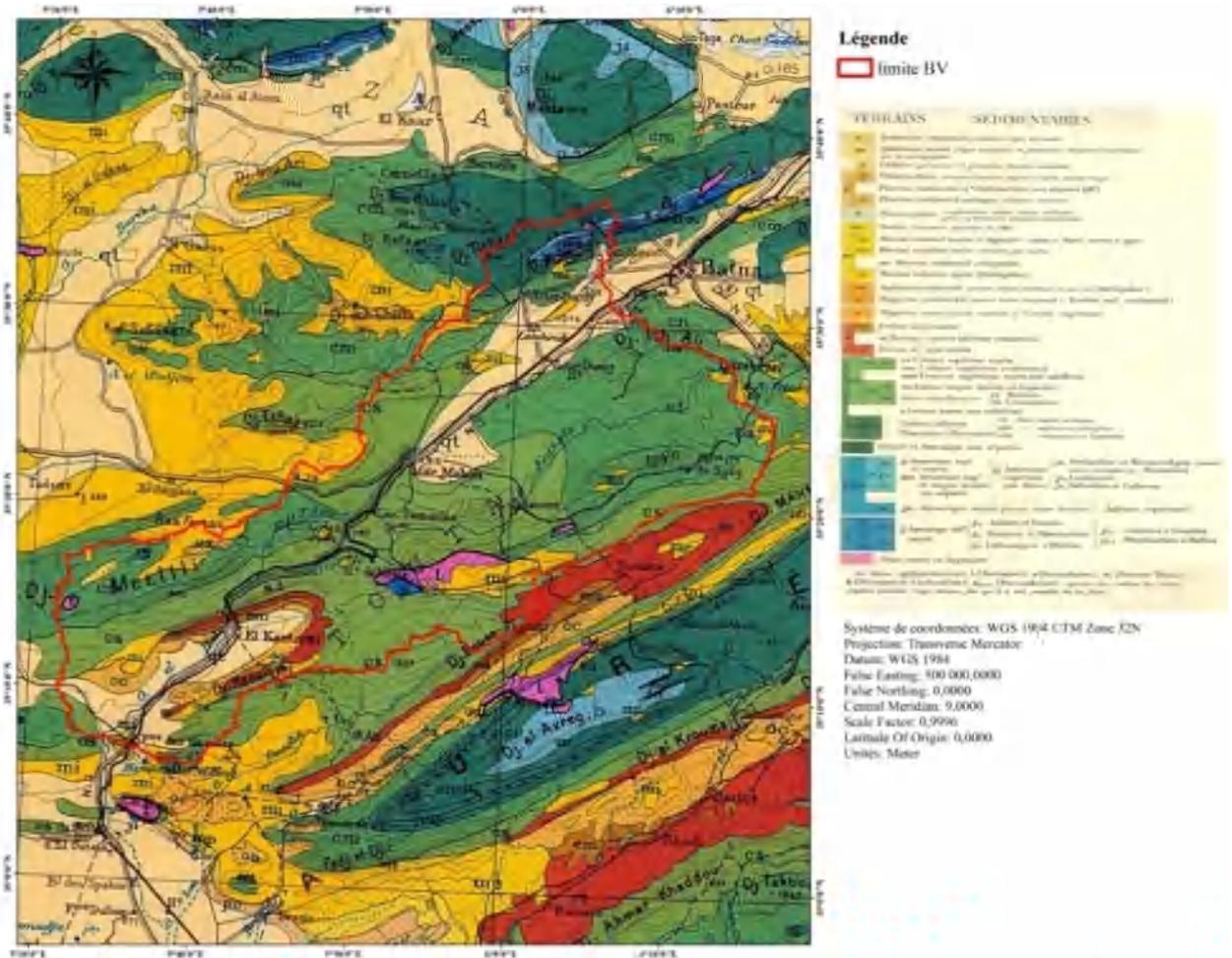


Fig. 24 : La géologie -Bassin Oued El Hai-

b . Le Jurassique

Les formations jurassiques ne sont guère développées dans le bassin Reboa. Elles affleurent encore assez rarement dans les deux bassins Kebir Hammam et Oued El Hai. On les voit au Nord-Est du bassin Kebir Hammam à Koudiet Toumiette et au Nord-Est sur les monts de djebel Bordjem (Au nord des monts de Belezma) près de Maafa dans le bassin d'Oued El Hai. Ces formations se caractérisent en générale par une sédimentation carbonatée.

Les formations jurassiques (Lias) du bassin Kebir Hammam correspondent à une puissante série de Dolomies sombres saccharoïdes qui présente quelques mètres de couches de passage progressif en petite alternances à des pélites et des schistes calcaires.

Au bassin Oued El Hai, le jurassique inférieur (Lias) est formé des calcaires micritiques à algues. Le jurassique moyen (Dogger) est constitué de calcaires à silex. Plus haut, le jurassique supérieur renferme des calcaires à grains fins et micritiques en bancs blanchâtres et violacés surmontés par des marnes et calcaires marneux.

c. Le crétacé

Les formations d'âge crétacé affleurent au Sud du bassin Kebir Hammam. Aussi, elles sont très développées sur de grandes surfaces au bassin d'Oued El Hai et au Nord comme au Sud du bassin de Reboa.

Au Sud du bassin Kebir Hammam, elles appartiennent à des domaines paléogéographiques différents : Domaine des flyschs d'une part (Fig. 25), de l'autre au domaine tellien des séries plus externes. Les affleurements crétacés rapportés à la série maurétanienne comportent des argiles vertes et rouges de teinte assez vive dans laquelle se trouve des calcaires azoïques, gris clairs, finement sableux de stratigraphie oblique. Alors que les affleurements ultra-telliens regroupent un ensemble de terrains tectonisés. Elles correspondent à des formations marneuses feuilletées, généralement claires associées à des calcaires gris et blanchâtre.

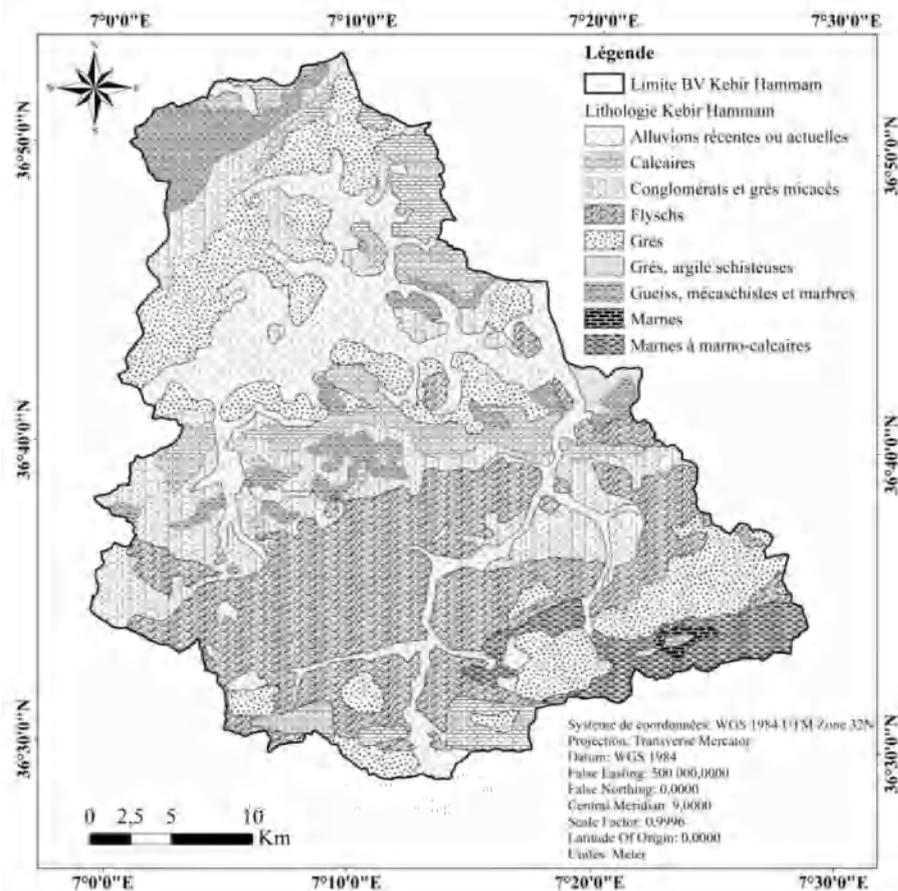


Fig. 25 : La lithologie –Bassin Kebir Hammam-

Aux deux bassins Reboa et Oued El Hai, les formations du crétacé supérieur voient la tendance réalisée au crétacé inférieur. Sur les monts de Belezma se déposent essentiellement des séries marneuses et marno-calcaires à intercalations siliceuses et dolomitiques au Cenomanien supérieur- Turonien.

2.6.2.2. D'âge Tertiaire

a. Le paléogène (Le nummulitique)

a1. Le Paléocène

Le passage du Crétacé supérieur au Paléocène se fait progressivement. Le milieu étant toujours marin. Cet étage est mal identifié dans le secteur d'étude. Néanmoins, cette série est observée au Sud des bassins Reboa et Oued El Hai. Elle est composée de marnes blanches à fines passées de calcaires.

a2. L'Eocène

Les formations d'âge éocène affleurent très peu dans les trois bassins. La mauvaise qualité de leurs affleurements est liée à l'abondance des formations superficielles.

Au bassin Kebir Hammam, l'éocène inférieur appartient au domaine des Flyschs Maurétaniens. Il s'agit d'un ensemble clair de marnes sableuses légèrement micacées en débris de phyllades et de quartzites.

Au sud des deux bassins Reboa et Oued El Hai, affleure l'Eocène inférieur et moyen marin du Nummulitique. Elles sont composées par des marnes jaunes, verdâtres légèrement gypseuses et des calcaires argileux. Elles longent la ligne de crête allant de Djebel Bouss à djebel Mahmel au Sud de Bouzina et le relief qui entoure la ville d'El Kantara (Djebel Haouidja, djebel Setha, djebel Mimoun, etc.).

a3. L'Oligocène

Les formations Oligocènes affleurent sur de grandes surfaces dans le bassin Kebir Hammam. Elles apparaissent du col d'Azzaba au Nord-Ouest jusqu'en petite Kabylie. Ces formations sont de type Olistostromes à matériel composés de Flyschs Massyliens et Maurétaniens. Elles apparaissent en discordance avec le Sokle Kabyle. Elles sont essentiellement constituées de marnes grises d'âge Oligocène moyen sur lesquelles reposent des grés micacés parfois quartzifiés alternant avec des niveaux marneux d'âge Oligocène supérieur à Oligocène-Aquitainien inférieur (J.-F.Raoult, J.-P.Bouillin) (1971,1974, 1978).

L'oligocène continental situé dans la partie occidentale de l'Aurès (synclinal d'El Kantara) est composé de marnes rouges à gypses, localement gréseuses et de conglomérats grossiers que Laffitte rattache à l'Aquitainien.

b. Le Néogène

b1. Le Miocène

Les formations marines d'âge Miocène caractérisent surtout de grandes surfaces du bassin Reboa (Fig. 26). Elles correspondent aux affleurements situés de part et d'autre l'anticlinal de

Djebel Bouarif, au Sud-Est de la ville de Batna. Aussi, aux affleurements situés dans les bordures méridionales du bassin d'Oued El Hai, sur les piedmonts Nord de Djebel Metlili à l'Est de la ville de Barika.

Ces formations reposent souvent en discordance et comportent plusieurs lithostratigraphiques. Leur base est constituée de formations détritiques le plus souvent continentales. La superposition de ces formations comprend à la base des conglomérats rouges et des calcaires Aquitano-Burdigaliens, des marnes avec des bancs de grès et des argiles verdâtres gypsifères Tortoniens surmontés par des marnes, grès et sables bruns-rouges Messéniens.

b2. Le Mio-pliocène

Ces formations recouvrent le Sud du bassin Kebir Hammam et la partie Nord du bassin Reboa. Elles apparaissent le plus souvent dans de mauvaises conditions. Au bassin Kebir Hammam le Mio-pliocène est Continental. Il s'agit d'argile grise à intercalations de gypse, conglomérats variés et calcaires lacustres.

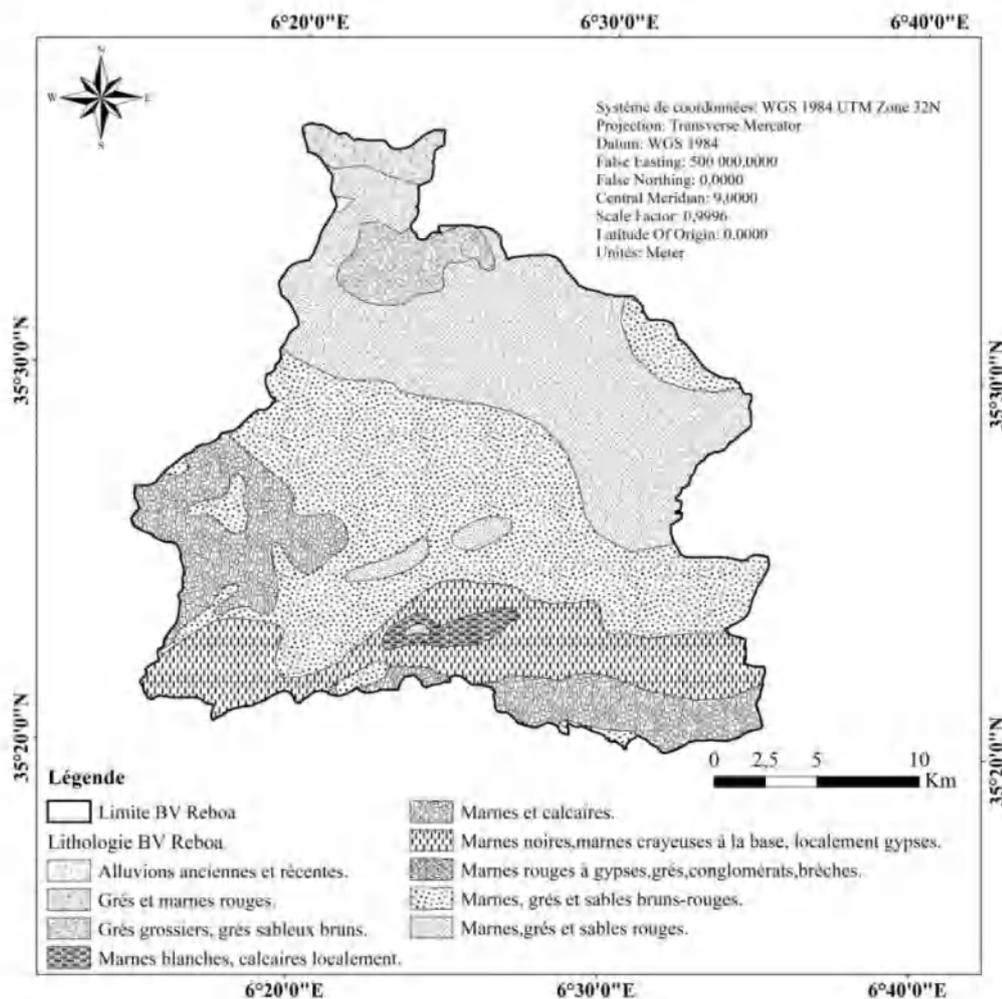


Fig. 26 : La lithologie –Bassin Reboa-

Aux bassins Reboa et Oued El Hai, le Pliocène repose sur le Miocène marneux, avec une légère discordance constituée par des grès, sables, argiles, marnes brunes et gypses, avec quelques poudingues. Dans le bassin d'Oued El Hai, il est caractérisé par une formation gréseuse épaisse de plusieurs dizaines de mètres. Elle débute par quelques bancs de grès relativement tendres bruns rosâtres à petits galets, qui alternent avec des marnes gréseuses rosâtres

2.6.2.3. D'Age Quaternaire

Les formations d'âge quaternaires apparaissent dans les trois bassins. Elles sont observées dans la partie nord des trois bassins, ainsi qu'au sud des bassins Kebir Hammam et Oued El Hai. Ces formations sont généralement développées le long des lits des cours d'eau et aux des surfaces topographiquement basses (plaines et vallées actuelles). Il s'agit de terrains variés correspondant à des dépôts emboîtés, des plus récents vers les plus anciens.

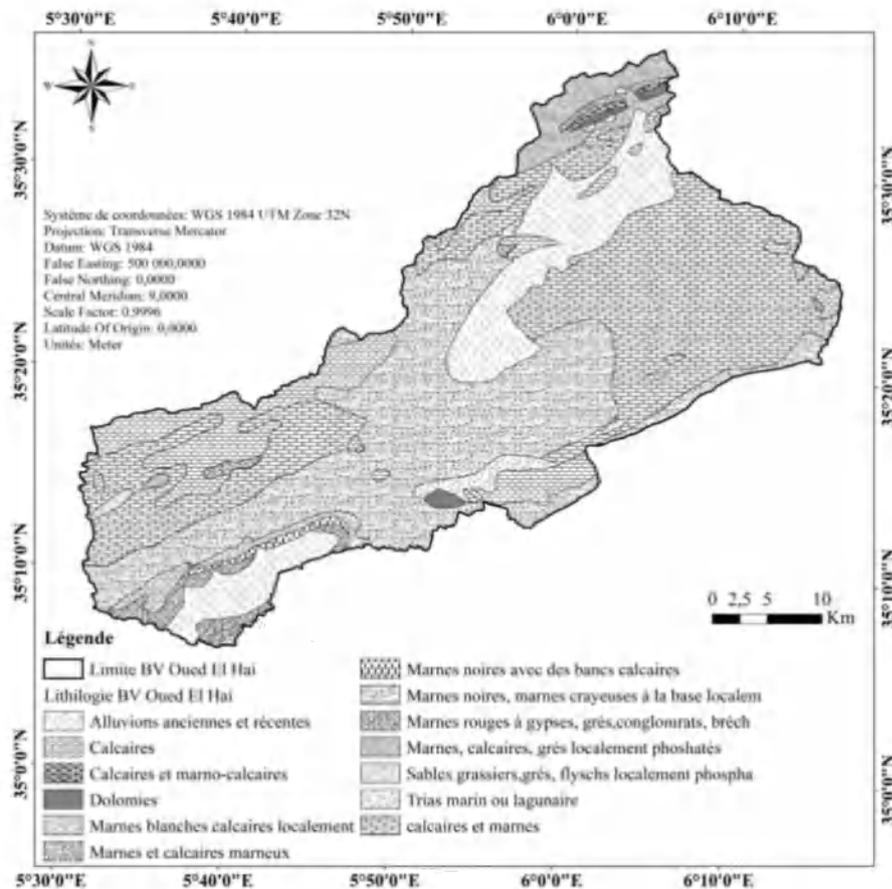


Fig. 27 : La lithologie –Bassin Oued El Hai-

Au bassin Kebir Hammam, les dépôts quaternaires sont d'origine continentale. Ils sont constitués de bas en haut :

- Des encroutements calcaires dits « mouloyens » sur les zones calcaires ou marno-calcaires villafranchien.

- Des épandages dits « salteniens » ; il s'agit de formations caractérisées en surface par des blocs à grés.

- Des éboulis anciens et des encroutements rouges rapportés à l'Amirien.

- Des terrasses fluviales emboîtées représentant le Tensiftien le Soltanien et le Rharbien.

Aux bassins Reboa et Oued El Hai (Fig. 26 et 27), les formations d'âge quaternaires sont formées par du matériel très grossier ancien. Il montre de bas en haut :

- Des conglomérats, formes de gros galets dans une matrice sableuse et calcaire (Guiraud, 1973).

- Des lentilles limono-argileuses rougeâtres alternant avec des lentilles grossières.

- Des limons argileux gris d'une cinquantaine de centimètres.

Dans les grandes vallées qui longent les massifs montagneux des encroutements calcaires et des formations quaternaires variées et des dépôts Gharbiens sur les bords convexes des méandres.

2.7. Sols et végétation des bassins

Aborder même sommairement, le cadre naturel des bassins implique d'aborder les notions phytogéographiques de leur espace. L'étude des sols et leur occupation par les végétaux présente un facteur essentiel. Elle détermine le taux de protection des bassins contre l'érosion hydrique. Un bassin versant bien couvert et dont la végétation est bien développée protège son sol de l'action directe des pluies de diverses manières. Elle freine le ruissellement et maintient une bonne porosité à la surface du sol. De plus, son système racinaire maintient en place les particules emprisonnées dans un réseau racinaire dense qui accroît la résistance du sol. Autant l'apport en matière organique, suite à l'activité microbienne dans la zone racinaire, améliore la structure du sol et sa cohésion, autant les risques d'érosion hydrique diminuent.

Dans une autre vision hydrologique, la nature, la genèse et la répartition spatiale des sols sur lesquels se manifeste l'écoulement sont étroitement liées à un certain nombre de facteurs, notamment la géologie (nature de la roche mère), le sol, la topographie le climat et la végétation. Le climat par son influence mécanique ou chimique est d'une importance capitale dans les processus pédogénétiques. Les précipitations, les écarts thermiques et la couverture végétale, déterminent le degré d'altération de la roche mère dont est issue la partie minérale du sol et ses propriétés physico-chimiques. En revanche, sur les versants dénudés, le ruissellement se produit vite et intensément. Il prend des formes diversifiées en fonction de la pente, de la nature des matériaux et de la rugosité de surface. Au fil du temps, il agresse le sol, de plus en plus profondément, jusqu'à l'affleurement de la roche en place, et transporte les sédiments. Le processus continue jusqu'à une généralisation du ravinement et la formation de badlands. Ceci explique que les zones dépourvues d'une bonne couverture végétale courent toujours un plus grand

risque vis à vis de l'érosion. Ce risque s'atténue au fur et à mesure que le taux de couverture du bassin augmente. La protection du sol est déterminée également par le type de couverture végétale (Forêt, maquis, herbacées, cultures), et aussi par rapport à la période de couverture.

Les contrastes géologiques, topographiques inscrits antérieurement entre bassins ou encore au sein du même bassin conduisent évidemment à des sols différents et par conséquent à des occupations différentes.

2.7.1 Les Sols des bassins

La connaissance des sols dans une thématique telle que l'érosion hydrique est primordiale. Il est important de disposer de données d'inventaire à une échelle adaptée pour mieux les exploiter. En Algérie, les études pédologiques, toutes échelles confondues, n'ont pas connu une avancée significative. Aussi, pour notre travail, trois travaux réalisés à l'échelle du pays ou régionales ont été pris en compte : les cartes réalisées en 1954 par D.H.Durand restituées à une échelle 1/500000 et complétées par les travaux de Benchetrit en 1956, et les cartes effectuées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) sur quelques bassins versants.

Les sols sont ainsi classés en fonction de leur nature (caractéristiques physico-chimiques) et en fonction de leur sensibilité à la formation d'une croûte de battance qui souvent est à l'origine de l'apparition du ruissellement à leur surface. et par conséquent à leur érodibilité (Méthode de Bissonais, INRA 1998). En se basant sur ce critère, on peut classer les sols rencontrés sur le territoire des trois bassins en trois classes (Tableau 9).

Tableau 9 : Effet sur la stabilité structurale pour chaque type de sols

Faible	Neutre	Forte
Sols calcaires. Sols calciques.	Sols éoliens d'ablation.	Sols Podzoliques. Sols alluviaux. Sols alluviaux basiques. Sols insaturés. Sols insaturés humifères. Sols nus.

a. Sols de faible érodibilité

a.1. Les sols calcaires ou rendzines

Les sols calcaires sont composés essentiellement de roches calcaires. Ils montrent un seul horizon différencié riche en calcaire.

Ils sont localisés sur les parties Sud et Est du bassin Kebir Hammam (Fig. 28) au-dessus de la chaîne calcaire Kabyle et occupent une superficie de 130,5 km², soit 11,5% du bassin. Ils occupent plus de la moitié de la surface du bassin Reboa (53,7%) et Oued El Hai (50,47%) au Nord de Djebel Mahmel et Ichmoul. Ces sols se caractérisent par une texture perméable et légère suite à une présence importante de la matière organique ce qui les rend humifères (calcaires humifères).

a.2. Les sols calciques

Les sols calciques occupent 44,4% de la surface du bassin Reboa (Fig. 29) et plus de 22% de la superficie totale du bassin Oued El Hai. Il s'agit de sols peu épais, plus ou moins riches en calcaire. Leur complexe absorbant saturé surtout par du calcium, très pauvre en sels solubles. Ils contiennent des proportions importantes de matières organiques. Les matériaux qui les constituent sont façonnés par le vent et reposent le plus souvent sur des calcaires ou des gypses pulvérulents, ce qui les rend défavorables à l'agriculture. Ils supportent une végétation moins enracinée telles que l'Alfa, l'armoïse. Ils servent en général de pâturage aux moutons.

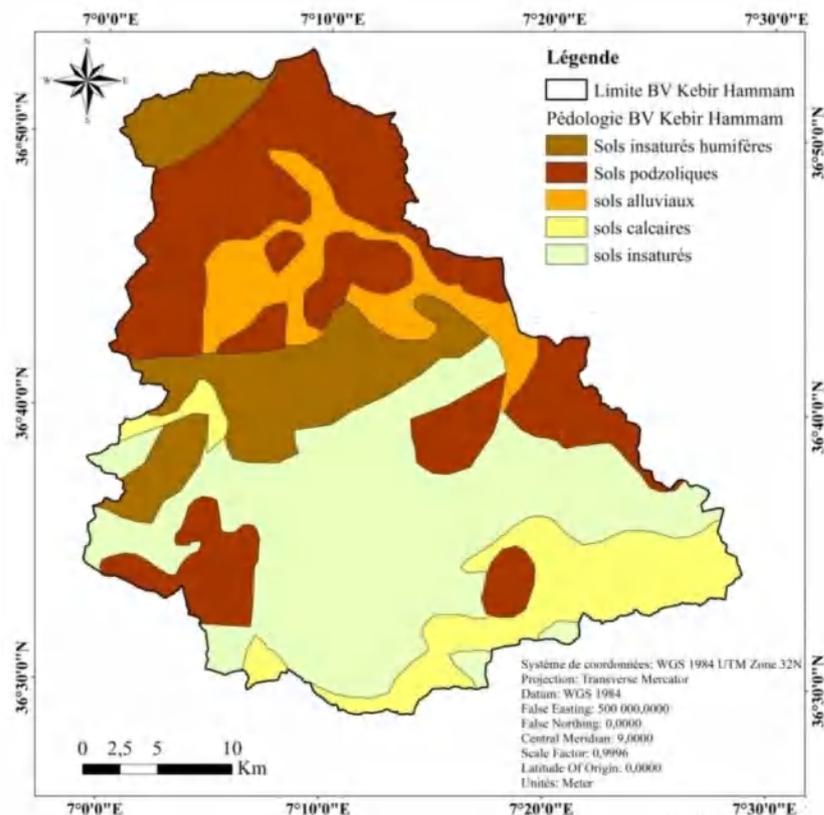


Fig. 28 : La pédologie –Bassin Kebir Hammam-

b. Sols d'érodibilité neutre

b.1. Sols éoliens d'ablation

Cette catégorie de sols est située dans la partie avale du bassin d'Oued El Hai (Fig.30). Elle est actuellement occupée par les eaux du barrage des fontaines de gazelles. Ces sols ont pour caractéristique d'être pauvres en terre fine emportée par le vent. Ils sont formés par du matériau plus ou moins grossiers, des cailloux plus ou moins gros, suivant la nature du dépôt soumis à traction du vent (J.H. Durand, 1956).

L'étude des sols dans ces régions a montré que, contrairement à l'opinion souvent admise (sols ne contenant pas de sels solubles), il est fréquent d'y voir des sols salins dans les bas-fonds mal drainés ou alimentés en eau par une nappe phréatique superficielle.

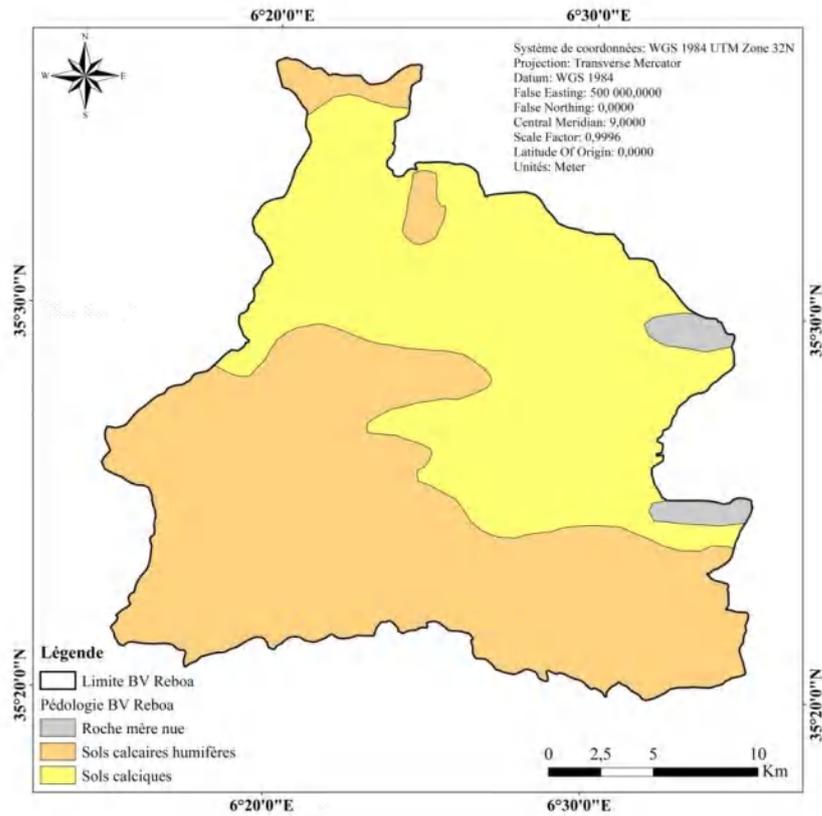


Fig. 29 : La pédologie –Bassin Reboa-

c. Sols de forte érodibilité

c.1. Les sols nus (Roche mère)

Il s'agit à des affleurements de la roche mère non évolués. Ils apparaissent sur des surfaces très réduites à l'Est du bassin Reboa sur le versant Nord de Djebel Delaa et à Djebel Haouidja au Sud du bassin d'Oued El Hai (Fig. 30) (emplacement actuel du barrage des Fontaines de gazelles).



Photo 1 : Les sols alluviaux à Ain Touta –bassin Oued El Hai-

Ces sols portent parfois une broussaille ou un maquis très dégradé. Outre les affleurements de la roche mère, le ravinement y est intense.

c.2. Les sols alluviaux

Les sols alluviaux caractérisent les dépôts récents réalisés par les cours d'eau, le plus souvent au cours des crues. Ce type de sols est peu étendu dans le bassin Kebir Hammam. Il couvre une surface de 96,4 Km², soit près de 9% de superficie du bassin. Il constitue les terrasses des vallées des cours d'eau de : Oued Fendek, Oued Redjata, Oued Oued El Adjou et Oued Emchekel. Il donne les meilleurs sols agricoles, du fait de leur position topographique. Il est fréquemment rajeuni à chaque crue. Le plus souvent, ces sols sont pourvus d'une nappe fortement battante à faible profondeur (en relation avec les crues et l'étiage du cours d'eau). Leur texture est légère, riche en limons et bien alimentée en eau.

Au bassin Oued El Hai, ces sols sont plutôt acides. Ils constituent les sols de la plaine et des terrasses alluviales d'Ain Touta (Photo 1). Ils se caractérisent par une texture équilibrée à lourde. Ils évoluent sur les formations d'âge quaternaires. Cette catégorie de sols est marquée par quelques phénomènes d'érosion. Ces derniers affectent particulièrement les sols à la bordure des lits des cours d'eau dont l'importance dépend du niveau d'eau en écoulement, la perméabilité et la position par rapport au lit, ainsi que la vitesse d'écoulement.

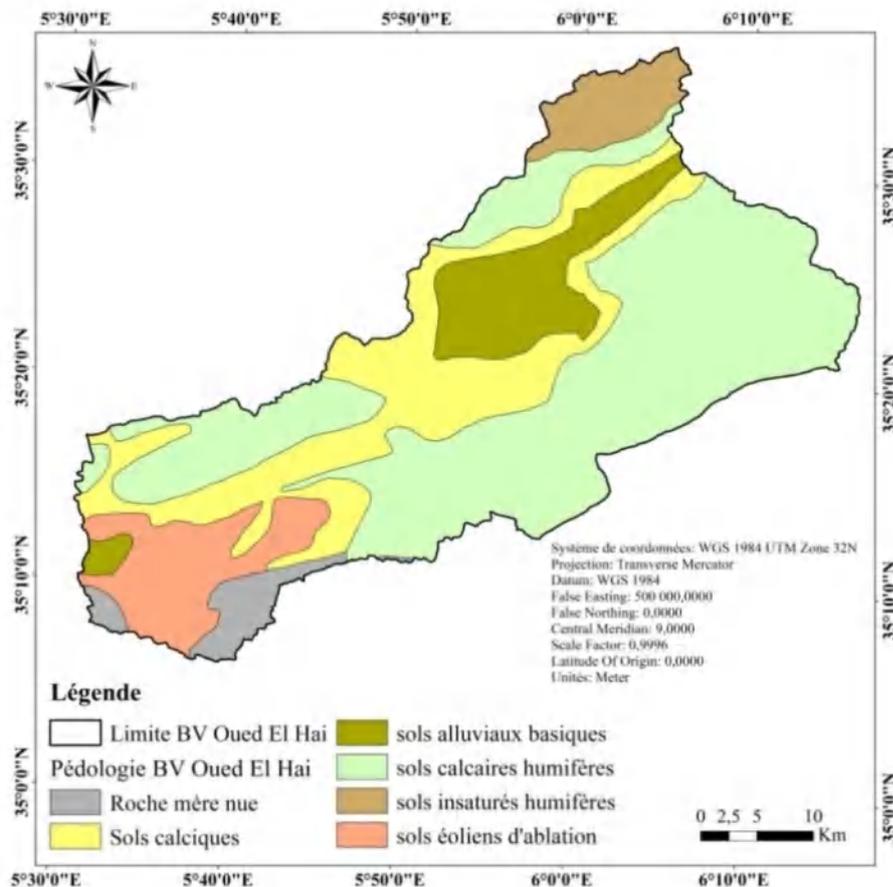


Fig. 30 : La pédologie –Bassin Oued El Hai-

c.3. Les podzols

Sont des sols très évolués. On les rencontre principalement en climat humide sous couvert forestier. Ce sont des sols acides que l'on retrouve dans le bassin du Kebir Rhumel Hammam, résultant d'un fort lessivage qui a pour effet d'entraîner les éléments basiques des horizons supérieurs vers un horizon plus profond d'accumulation de substances humiques et un horizon d'accumulation de minéraux. Les sols podzoliques se forment en Algérie à partir de roches non calcaires (M. Benchetrit, 1956). Ils présentent dans le bassin Kebir Hammam trois horizons bien différenciés. Le plus profond étant l'horizon d'accumulation de l'argile et du fer. Ils sont visibles sous les forêts de : Faid Edba, Tsmara, et Larsahas, à l'Est, et sous la forêt de Zaitnia au Nord de Mechta Toumiette ainsi que sur les versants de Djebel Ragouba. Ils englobent de belles forêts d'arbres acidophiles avec sous-bois dense sur les grès numidiens. Ils s'étendent sur une superficie de 344,6 Km², soit 30,4% de la superficie du bassin Kebir Hammam.

c.4. Les sols insaturés

Ce sont des sols épais, noirs, très riches en matières organiques. Ils se forment sur les roches dépourvues de calcaire. Ils donnent des terres agricoles très fertiles. L'humidité est le paramètre essentielle pour provoquer une certaine modification du complexe absorbant qui devient insaturé mais sans que cette insaturation soit suffisante pour provoquer l'acidification du sol (J.H.Durand ; 1954). Ils présentent un horizon différencié. L'argile peut être plus abondante en surface qu'en profondeur. Ces sols s'aperçoivent au centre et au Nord-Est du bassin Kebir Hammam sous les forêts d'Oued Bergouga et Oued Soudane. Ils couvrent 393,7 km², soit près de 34,7% de sa superficie totale du bassin.

Les sols insaturés humifères acides caractérisés par un seul horizon apparaissent sur une roche mère imperméable. Leur teneur en matières organiques dépassent les 25%. Subséquemment à leur position topographique ils donnent de bons sols forestiers, des sols à arbres fruitiers ou des sols à pâturages. Au bassin Kebir Hammam, ces sols couvrent seulement 14.9% de sa surface. On les retrouve également dans le bassin d'Oued El Hai (Fig.33), dans les Monts de Belezma et plus exactement aux Djebel Tuggurt et Bordjem avec un pourcentage négligeable.

2.7.2. La Végétation

Pour mieux cerner l'importance de la végétation dans les trois bassins et déterminer son rôle dans la protection des sols contre l'érosion hydrique, les principaux types de végétation ont été classés par ordre décroissant de degré de protection. A cet effet, les dernières cartes d'occupation du sol de l'année 2012 établies par le Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (BNEDER) ont été exploitées.

a. Végétation en continu et permanente

Cette classe de végétation concerne la forêt dense, les jachères naturelles, les prairies de plus d'un an, les cultures arbustives avec plantes de couverture. En ces espaces l'érosion est toujours négligeable et le ruissellement est très faible particulièrement en forêts dense, où la

frondaison dispersée sur plusieurs étages et la litière de feuilles mortes, couvrent le sol toute l'année et le protègent contre l'énergie des gouttes de pluie.

Dans les trois bassins est composée de forêt, maquis, des terrains reboisés et de terrains arboricoles. Ces espaces quasiment naturels occupent dans le bassin Kebir Hammam un total de 56093 ha soit plus de 49,4% de sa superficie totale (Fig. 31, Tableau 10). Ces espaces forestiers se localisent particulièrement dans sa partie Nord, entre les monts de djebels El Alia et Djebel Laharta. Les plus vastes sont : la forêt d'Oued Bergouga, Oued Soudane et la forêt de Larsahas, situées à des altitudes de plus de 560 m. Elles sont composées de maquis denses et clairs et de forêts claires de chêne liège. Au Sud, les forêts s'étagent sur des altitudes de 200 à 500 m. Actuellement, presque 50% de ces forêts sont touchées par les incendies puis rapidement reboisées (BNEDER, 1995). Les maquis denses occupent un territoire important, de grandes surfaces des versants Ouest des Djebels Makdoua et Chbebik et autour de la commune de Roknia et Bouati Mahmoud au Sud. Tandis que, les terrains arboricoles s'étendent sur une superficie plus ou moins faible. Ils occupent une superficie de 787 ha soit 0,7 % de la superficie du bassin. Ces terrains renferment un patrimoine arboricole important représenté par les vignes et l'olivier. Ce dernier est d'une valeur économique importante. Il est généralement localisé sur les bas piedmonts et les collines isolées.

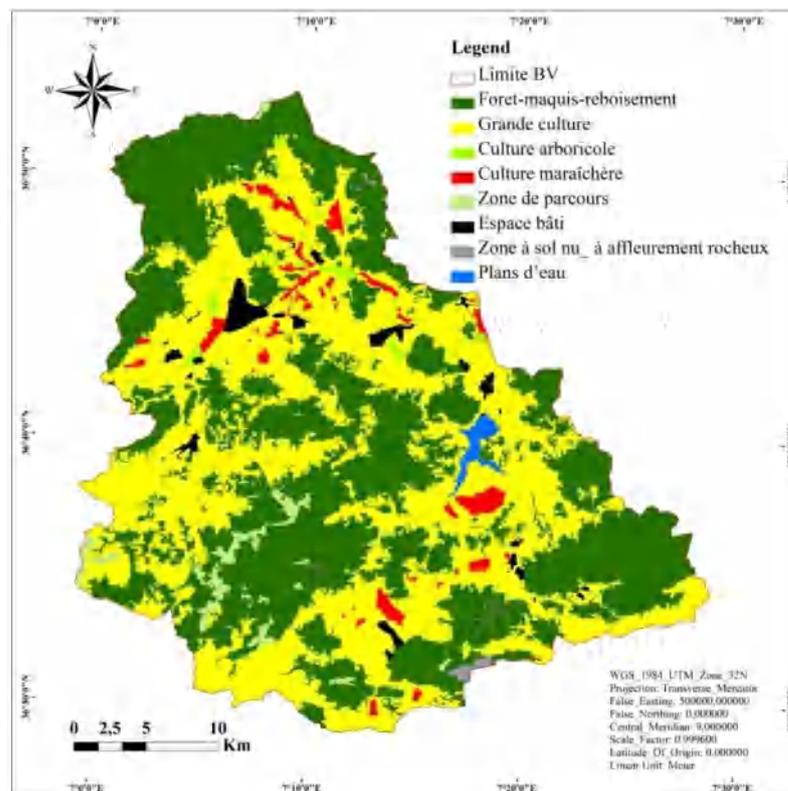


Fig. 31 : L'occupation du sol –Bassin Kebir Hammam-

Tableau 10 : occupation du sol –Bassin Kebir Hammam-

Bassin Kebir Hammam		
Nature du sol	Superficie (Ha)	%
Culture arboricole	787	0,69
Culture maraîchère	2797	2,47
Grande culture	50281	44,33
Zone à sol nu à affleurement rocheux	33	0,03
Espace bâti	1767	1,56
Zone de parcours	1856	1,64
Foret-maquis-reboisement	55306	48,76
Plans d'eau	600	0,53
Total	113427	100

Au bassin Reboa (Fig.32, Tableau 11), cette classe de végétation occupe une superficie de 17262 ha, soit 29,9 % de la superficie totale du bassin. Les forêts entourées de grandes surfaces de maquis sont localisées au Nord sur les monts de Djebel Bouarif, au Sud-Ouest du bassin sous formes d'îlots sur les monts de Djebel Askeur, Djebel Ras Rih, djebel Tagratine, Aslaf et djebel Tmagoult sur des altitudes de plus de 1700 mètres. Ils sont essentiellement composés de chêne vert associé au Pin d'Alep, de Genévriers et de Cyprès. Actuellement, une grande partie de ces espaces boisés est en dégradation avancée.

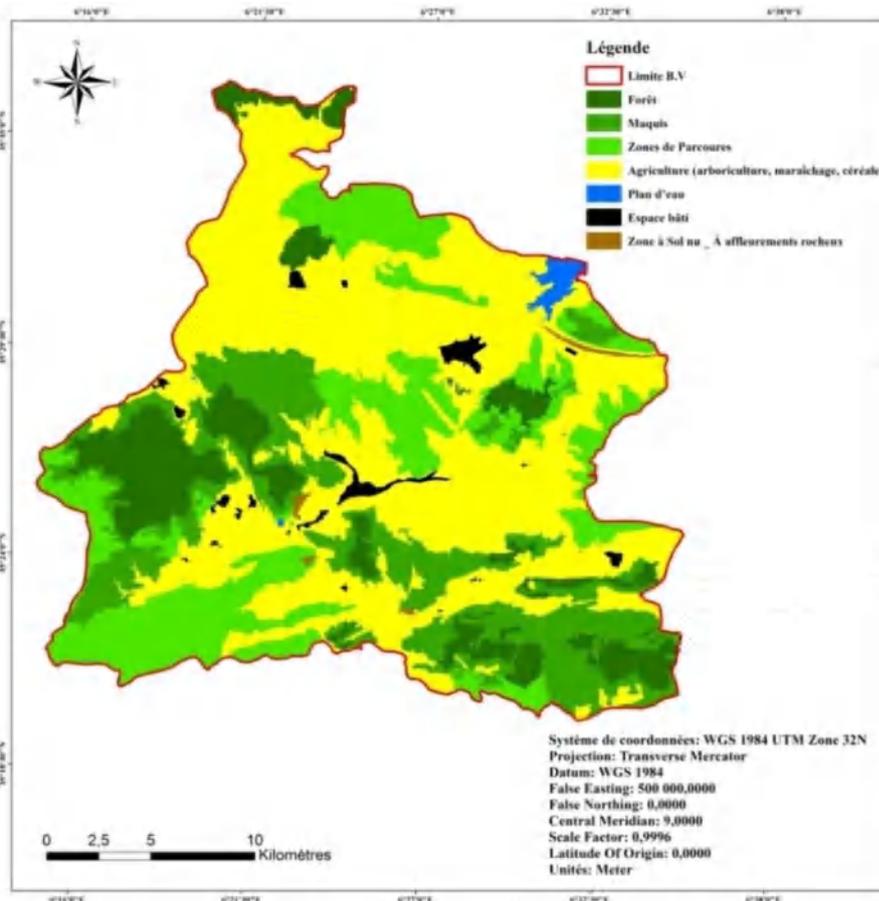


Fig. 32 : L'occupation du sol –Bassin Reboa-

Les formations forestières occupent aussi le Nord-Est et l'Est montagnard du bassin Oued El Hai (Fig.33, Tableau 11). Au Nord-Est, elles se localisent entre 1400 et 1600 mètres d'altitude sur les monts de Belezma (Djebel Tuggurt) et Djebel Ich Ali, à l'Est, sur les monts de Djebel Bous et Djebel El Akhal. Ces espaces se trouvent actuellement dans un état très dégradé. Ils sont constitués essentiellement de Cèdre, Pin l'Alep, Chêne vert, et de Genévrier. En général, cette végétation assure une bonne couverture du sol contre l'agressivité pluviale et les ruissellements superficiels. Cependant, sa superficie est relativement faible (8,8%).

Les maquis couvrent une superficie plus importante (42,6%). Il assure des surfaces de protection optimale contre l'érosion hydrique.

L'arboriculture se localise autour des vallées d'Oued El Hai et les piedmonts sud d'El Kantara et quelques parcelles aménagées au fond des forêts. Les denses palmeraies aménagées en terrasses (Aidaoui, 1994) apparaissent au bas des gorges d'El Kantara..

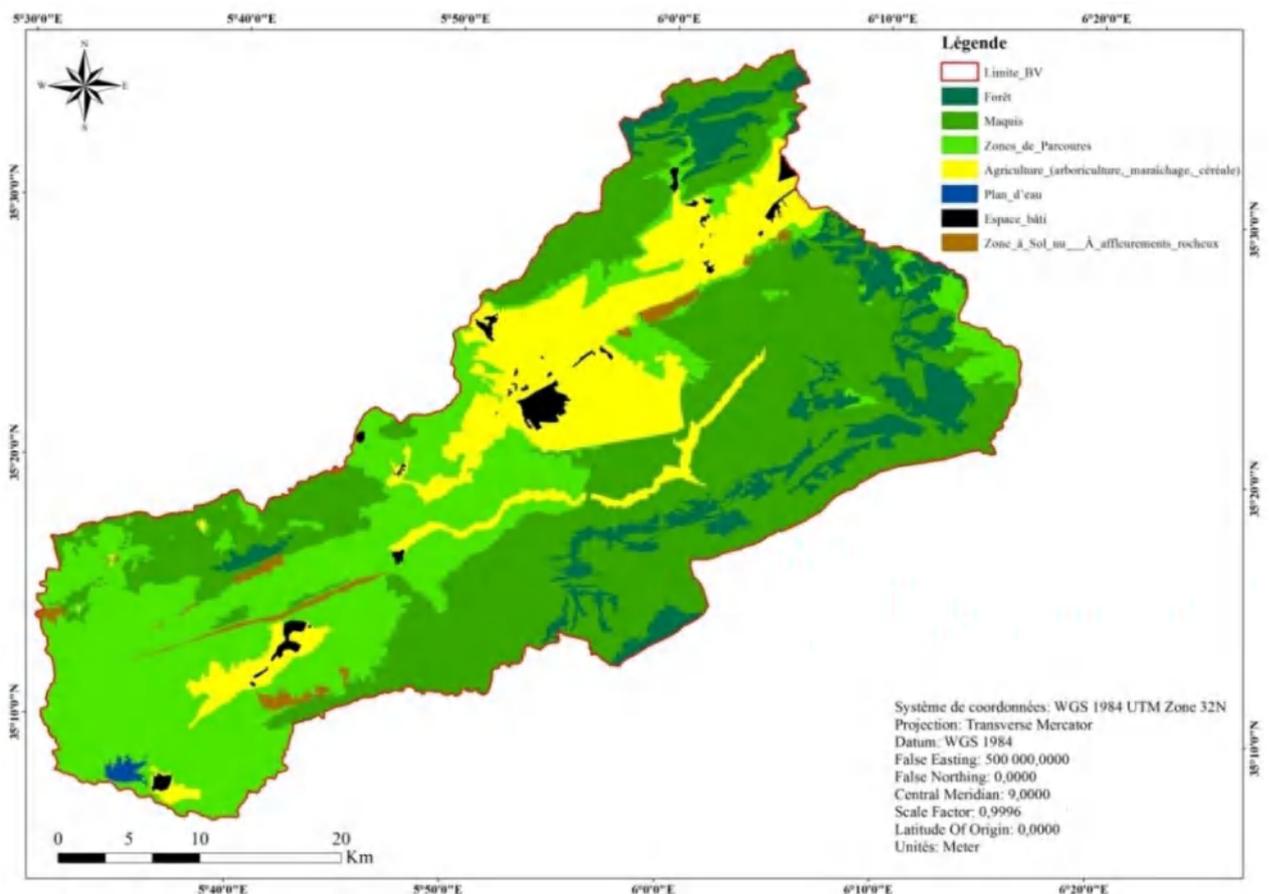


Fig. 33 : L'occupation du sol –Bassin Oued El Hai-

Tableau 11 : Occupation du sol –Bassin Reboa et Oued El Hai-

Nature du sol	Bassin Oued El Hai		Bassin Reboa	
	Superficie (Ha)	%	Superficie (Ha)	%
Forêt	13910	8,8	6926	12,02
Maquis	67356	42,59	10336	17,94
Zone à Sol nu et à affleurements rocheux	1902	1,2	187	0,32
Zones de Parcours	48669	30,77	12200	21,18
Agriculture (arboriculture, maraîchage, céréale)	24046	15,2	26830	46,58
Plan d'eau	361	0,23	399	0,69
Espace bâti	1908	1,21	723	1,26
Total	158152	100	57601	100

b. Végétation temporaire et discontinue

Ce type englobe l'ensemble des cultures vivrières ou industrielles, les plantes de couverture ou de culture fourragère implantées tardivement ou encore celles qui démarrent lentement. Les phénomènes d'érosion y sont évidemment intermédiaires mais extrêmement dépendants de la précocité et de la densité de plantation, de la pente et des techniques culturales.

Dans les champs cultivés traditionnellement, il n'en va pas de même car les cultivateurs plantent souvent très tôt après les premières averses et presque toujours en associant plusieurs cultures dont les couverts se complètent et se succèdent dans le temps et dans l'espace. En culture intensive, on ne peut pas prendre le risque de devoir recommencer les semis si des périodes sèches succèdent aux premiers orages. Les plantations se font donc nécessairement relativement tard après le labour, souvent deux à trois semaines après les semis. Le labour favorise un enracinement profond et la fertilisation permet de rattraper le retard de végétation et d'augmenter la densité de plantation.

Aux bassins étudiés, ce sont des terrains occupés par des cultures englobant la céréaliculture, la jachère, les cultures industrielles et maraîchères. Ils se concentrent au niveau des pentes faibles à moyennes et s'étendent sur 53078 ha soit 46,8 % de la superficie totale du bassin Kebir Hammam. Au Nord, les terres agricoles sur le sous bassin de l'Oued Emcheckel, couvre 40,48% de la superficie dont 34,28% sont des céréales. Ils occupent les bas piémonts d'Esbt, sur des pentes le plus souvent supérieures à 12%. A Ain Charchar, ils occupent une superficie de 4412 ha. Tandis que dans la plaine de Azzaba, bien qu'elle soit située sur de très bonnes terres, ils n'occupent que 3341 ha. Au Sud au sous bassin d'Oued El Hammam, les terres agricoles se localisent sur les terrasses de l'Oued Mouguer. La plus grande superficie est occupée par les céréalicultures. Elle détient une superficie de l'ordre de 8950 ha à la commune de Roknia et de 3843 à la commune de Bouati Mahmoud.

A Reboa, les espaces partiellement protégés concernent les zones de plaines (46%). Ces parcelles sont destinées à la production céréalière, aux cultures maraichères et à la pratique de la

jachère. Elles occupent densément le sol pour une courte période de l'année, le reste du temps le sol est nu et est soumis à l'érosion hydrique, notamment lors des pluies torrentielles.

Les surfaces végétales discontinues ou saisonnières du bassin de Oued El Hai occupent la plaine d'Ain Touta, Bouzina, Beni Fedhala et Maafa. Elles sont consacrées à la céréaliculture et au jardinage pratiqué par quelques riverains au bord des cours d'eau. Cette végétation occupe les sols pendant seulement une période de l'année (couverture végétale saisonnière). Sa superficie est de 15,2% du total surfacique du bassin.

c. Absence de végétation (les terrains improductifs)

L'absence de la végétation augmente le risque d'érosion. Cette dernière est alors d'autant plus considérable que la pente est forte et le climat agressif. En général, les terrains dénudés ou cultivés tardivement développent une érosion rapide et accélérée. Ces terrains concernent les zones à sols nus, à affleurement rocheux, les espaces bâtis et les zones de parcours.

Ils couvrent 3656 ha soit 3,2% de la superficie totale du bassin Kebir Hammam. Les terrains improductifs regroupent les terrains rocheux, les tissus urbains et les zones de parcours. Ces espaces affichent dans le sous bassin d'Oued Emcheckel une surface plus importante que celle du sous bassin de l'Oued El Hammam.

A Reboa, ils s'étendent sur une superficie de 13109 ha soit plus de 22% de la superficie totale du bassin. Ils englobent les parcours fortement pâturés, les taillis et les broussailles à faible densité de recouvrement. Dans ces espaces presque dénudés, le ruissellement et l'érosion hydrique sont largement favorisés. Ils sont situés sur les piedmonts et dans les dépressions topographiques. Cette légère végétation est constituée d'une association de Halfa, Artémisia et de Peganum.

Au bassin de Oued El Hai, les terrains dénudés occupent les piedmonts, les vallons et les massifs rocheux montagneux. Ils représentent de grands parcours sahariens et de nombreux affleurement rocheux (33 % de la superficie totale du bassin). L'absence et la discontinuité de végétation en ces zones laisse la place aux terrains nus exposés à l'érosion.

2.8. Conclusion

Le transport des matières en suspension sur les versants dans les trois bassins est régi par le phénomène d'érosion hydrique. Celle-ci résulte de plusieurs facteurs complexes et interdépendants : les pentes, la lithologie, l'exposition des versants au flux du Nord et l'occupation de leur sol par la végétation. Par degré d'influence, ces facteurs sont classés par bassin et peuvent-être interprétés comme suit :

Le déplacement des matières solides dans le bassin Kebir Hammam est influencé en premier lieu par les pentes fortes qui caractérisent particulièrement son territoire Sud (les zones situées en amont du barrage Zit Emba). Plus de 49 % des pentes du bassin sont classées au-delà de 12,5 %. Les formations lithologiques arrivent en deuxième position, le bassin est particulièrement constitué de formations hétérogènes ; les plus vulnérables à l'érosion occupent

un taux de 41,9 % de sa surface. Elles sont constituées de flyschs, de marnes et d'alluvions. La couverture végétale, en revanche, assure en générale une bonne protection au bassin. Elle est nuancée entre la forêt et les maquis qui fournissent une protection optimale contre les effets érosifs, et les terrains cultivés qui garantissent une de protection de courte durée dans l'année. Ce type de végétation occupe un espace de plus de 48 % de la superficie totale.

Dans le bassin Reboa et Oued El Hai, le caractère diluvien des pluies accentue la dégradation des matériaux sur les versants des bassins. Plusieurs facteurs interviennent au même temps pour déstabiliser les matériaux sur les versants : les formations lithologiques composant les deux bassins sont essentiellement marneuses. Elles sont respectivement de 39 % à Reboa et de 33 % à Oued El Hai ; les pentes dépassant les 12,5% sont plus importantes à Oued El Hai (50%) qu'à Reboa (12%) ; et la végétation permanente (Forêts et maquis) est peu dense à Reboa (30% du bassin). A Oued El Hai, elle est essentiellement formée de maquis très dégradé qui occupent les massifs Nord du bassin (51% du territoire du bassin).

CHAPITRE
LE CLIMAT DES BASSINS

3

3.1. Introduction

En tous lieux du globe où l'érosion hydrique se manifeste, le climat constitue l'origine et la source d'énergie érosive. Les précipitations tout autant que les températures sont les premiers agents externes causaux et les facteurs éminents de ce phénomène.

Les variations de températures provoquent la fissuration de la roche et des matériaux après leur premier affleurement et produisent des particules dont les plus fines (en suspension) sont capables de se déplacer à travers les cours d'eau. En périodes sèches, le taux de ces matières en suspension a tendance à augmenter, ce qui, par conséquent induit des concentrations élevées dans les cours d'eau. En périodes humides, en revanche, par effet de dilution celles-ci diminuent.

Les précipitations sont le facteur primordial de la dynamique érosive. D'une part, elles alimentent les cours d'eau vecteur essentiel de charriage des matériaux issus de l'érosion, d'autre part, elles influencent directement le détachement de ces derniers par le phénomène de splash, processus élémentaire de l'érosion pluviale par lequel les particules sont plus tard mobilisées.

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer l'influence de ces deux facteurs climatiques sur les périodes érosives traitées dans le chapitre 4. Un intérêt particulier est porté aux précipitations annuelles, mensuelles et journalières maximales.

3.2. Le climat en Algérie et sa tendance

En Algérie, le plus grand pays d'Afrique, il existe trois types de climat : le climat méditerranéen le long de la côte, le climat de transition de la bande collinaire et montagneuse du Nord, un peu plus continental et modérément pluvieux, et enfin le climat désertique de la grande surface occupée par le Sahara. Situé sur la rive Sud du bassin méditerranéen entre 18° et 38° de latitude Nord et 9° et 12° de longitude, son climat est conditionné par la circulation de deux masses d'air : La première septentrionale, d'origine polaire et la deuxième méridionale d'origine tropicale qui peuvent provenir de l'atlantique ou du continent africain par des courants dirigés vers le Nord, le Nord-Ouest ou le Nord-Est (A. Bouanani, 2004).

Au Nord, l'Algérie (Fig. 34) est soumise à un climat méditerranéen. Il est caractérisé par des hivers pluvieux et doux et des étés chauds et secs. Il reçoit une pluviométrie moyenne de plus de 800 mm (1942-1990). Le Nord-Ouest régit par les conditions d'abris des plateaux ibériques ne reçoit que 400 mm en moyenne (A. Medjareb et al, 2005). Les températures moyennes minimales et maximales varient respectivement entre 5° et 15°C en hiver et de 25° à 35°C en été.

Au centre, entre l'Atlas Tellien et l'Atlas saharien où s'étendent les Hautes Plaines à l'Est, et les Hauts plateaux à l'Ouest, le climat est de type semi-aride, caractérisé par des précipitations faibles et irrégulières. Elles varient de 300 mm à 600 mm. En hiver la température peut descendre au-dessous de 0°C. Par contre, elle dépasse 30 voire même 40°C en été.

Au Sud,, le climat est aride et désertique dès que l'on franchit la chaîne atlasique saharienne. Les précipitations sont faibles et rares et très irrégulières. Les températures en été peuvent atteindre 50 °C.

Il faut souligner qu'à la décroissance des précipitations au fur et à mesure que l'on avance vers le Sud, se superpose aussi une décroissance de l'Est vers l'Ouest.

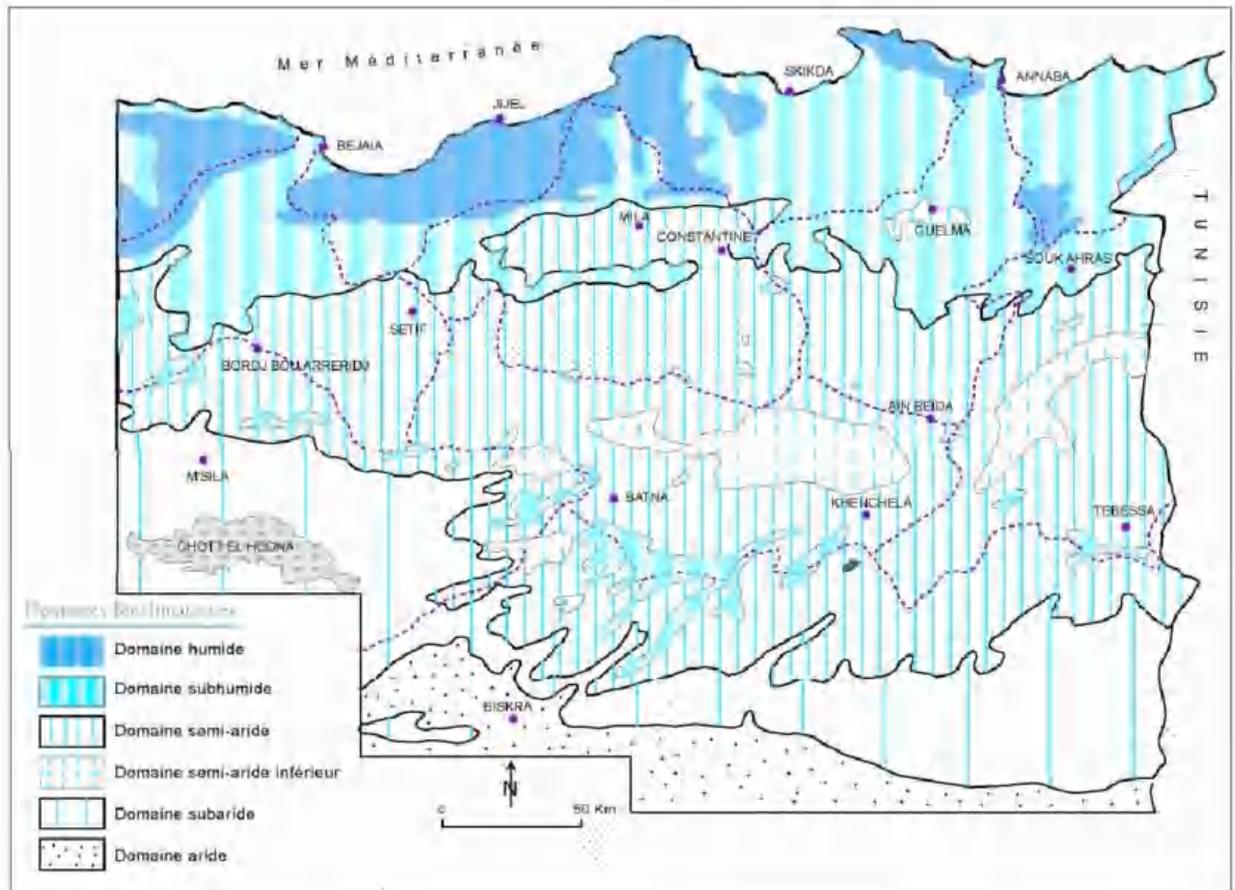


Fig. 34 : Les domaines bioclimatiques du Nord-Est de l'Algérie, d'après M.COTE 1998.

Nombreuses sont les études qui ont porté de l'intérêt à l'évolution et la variabilité du climat en Algérie. Parmi les plus récentes, celle menée par Z. Nouaceur en 2013. Cette étude fait référence à l'évolution des températures et des précipitations de quelques stations du littoral Algérien sur une période de plus de quarante ans. Elle atteste la tendance à l'augmentation des températures dès le milieu des années quatre/vingt et le retour des pluies à partir de 2003 sous forme d'épisodes pluvieux, après une sécheresse significative, pratiquement continue de 1987 à 2002.

Toutes les caractéristiques du climat de l'Algérie décrites plus haut sont réunies dans les trois bassins retenus pour l'étude : Le Bassin *Kebir Hammam* situé sur le littoral, il représente la zone humide, il en porte toutes les caractéristiques ; le bassin de *Reboa*, situé en zone intermédiaire, plus précisément dans les Hauts plateaux, il représente la zone semi-aride et le bassin d'*Oued El Hai*, situé sur le versant Nord de l'Atlas saharien qui représente la zone aride.

3.3. Le réseau de surveillance pluviométrique et les séries d'observation

L'étude climatique dépend directement des données disponibles observées et des mesures effectuées au niveau des stations pluviométriques ou météorologiques existantes. Les données climatiques utilisées dans cette étude sont la pluviométrie et la température. Elles proviennent de deux sources. Les premières ont été collectées auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) et concernent exclusivement les pluies. Elles couvrent des séries allant de 44 à 45 ans. Les secondes relèvent du réseau de surveillance de l'Office National de la Météorologie (ONM). Elles contiennent des séries de données plus longues (de 47 à 49 ans) et concernent les températures et les précipitations

Vingt-six postes pluviométriques ont été retenus dans ce travail (Fig. 35,36 et 37), soit une moyenne de 7 à 8 stations par bassin (Tableau 12). Elles sont spatialement bien réparties sur le territoire des trois bassins. Leurs données sont de qualité moyenne. D'une part, elles comportent des lacunes, allant de quelques mois à quelques années, d'autre part, elles ne sont pas dépourvues d'erreurs liées à la chaîne d'acquisition de données. Elles nécessitent ainsi un contrôle et un traitement primaire qui vont permettre leur validation, afin de les rendre pertinentes et exploitables. L'historique de ces postes pluviométriques démontre l'existence des premières mesures disponibles peu avant 1910. Les données les plus anciennes sont celles de la station de Berrahal (1903).

Tableau 12 : Quelques caractéristiques des stations pluviométriques

Bassin versant	Station	Code	Nature	Coordonnées lambert en (m)			Moyenne des (mm)
				X	Y	Z	
Bassin Kebir Hammam	Bekkouche Lakhder	031102	St.p	898999	386205	/	44 (1969/2013)
	Bouati Mahmoud	031105	St.p	914150	375600	150	44 (1969/2013)
	Azzaba pépinière	031106	St.p	892300	391350	91	44 (1969/2013)
	Bou Snib	030905	St.p	882100	362950	900	44 (1969/2013)
	El Harrouch	030906	St.p	869700	379700	137	44 (1969/2013)
	Ain Charchar	031201	St.p	909500	393200	34	44 (1969/2013)
	Berrahal	031302	St.p	923350	403100	40	44 (1969/2013)
	Skikda (O.N.M)	/	St.m	878825	405961	7	49 (1967/2016)
Bassin Reboa	Ain Tinn	070405	St.p	839600	237500	1650	45 (1969/2014)
	Baiou	070407	St.p	829650	242650	1510	45 (1969/2014)
	Seguene	070309	St.p	809300	260600	1400	45 (1969/2014)
	Bouhmar	070408	St.p	837150	244000	1275	45 (1969/2014)
	Foum Toub	070406	St.p	849800	241000	1160	45 (1969/2014)
	Sidi Mancar	070410	St.p	833700	253250	1112	45 (1969/2014)
	Batna Ferme Exp	070316	St.p	814700	257350	1040	45 (1969/2014)
	Reboa	070403	St.p	848100	250250	1002	45 (1969/2014)
	Timgad	070409	St.p	841750	250900	1000	45 (1969/2014)
	Batna (O.N.M)	/	St.m	814721	277978	1052	47 (1970/2017)
Bassin Oued El Hai	Biskra Secteur	061416	St.p	776100	178200	130	45 (1969/2014)
	Bouzina	061302	St.p	810000	225000	1350	45 (1969/2014)
	Djemorah	061305	St.p	782350	199800	400	45 (1969/2014)
	Mena	061304	St.p	801200	213800	1005	45 (1969/2014)
	El Outaya (Ferme driss)	061205	St.p	767350	190250	222	45 (1969/2014)
	Oued Chelih	061211	St.p	799400	252600	1180	45 (1969/2014)
	Medina Lanasser	061503	St.p	849700	230500	1570	45 (1969/2014)
	Biskra (O.N.M)	/	St.m	777331	171306	87	47 (1970/2017)

St.p : Station pluviométrique ; *St.m* : Station météorologique.

Les chroniques choisies sont des totaux mensuels. Elles répondent à des critères de pourcentages de lacunes faibles et de longues durées d'observation. Dans tous les cas, seules les stations possédant un historique de données d'au moins 40 années ont été prises en compte, puisque les tendances, à moins d'être fortement prononcées, peuvent difficilement être détectées sur des séries plus courtes. La moyenne de la série retenue commune va de (1969/1970) à (2012/2013) pour un bon nombre de stations. Pour d'autres stations comme les stations météorologiques de Skikda, Batna et Biskra dans les trois bassins, les séries peuvent être postérieures à 2013.

Le comblement de données a été effectué par le logiciel HYDROLAB développé par J.P Laborde en 1998, interfacé via EXCEL. La macro « Bouche trous », a servi à combler en moyenne 10 % des données lacunaires des séries choisies sur l'ensemble des trois bassins, mois par mois entre les stations dont les caractéristiques physiques et géographiques sont similaires (Tableau 13).

Tableau 13 : Les lacunes dans les données pluviométriques par Station

Bassin	Station	Nbres d'années	Nbres de valeurs	Nbres de lacunes	% de lacunes
Kebir Hammam	Bekkouche Lakhder	44	528	78	14,77
	Bouati Mahmoud	44	528	38	7,20
	Azzaba pépinière	44	528	29	5,49
	Bou Snib	44	528	56	10,61
	El Harrouch	44	528	23	4,36
	Ain Charchar	44	528	24	4,55
	Berrahal	44	528	48	9,09
	Skikda ONM	49	588	34	5,78
	Total	/	4284	330	7,70
Reboa	Ain Tinn	45	540	24	4,44
	Baiou	45	540	50	9,26
	Seguen	45	540	12	2,22
	Bouhmar	45	540	39	7,22
	Foum Toub	45	540	17	3,15
	Sidi Mancar	45	540	22	4,07
	Batna Ferme Exp	45	540	13	2,41
	Reboa	45	540	159	29,44
	Timgad	45	540	8	1,48
	Batna ONM	47	564	85	15,07
	Total	/	5424	429	7,91
Oued El Hai	Biskra Secteur	45	540	92	17,04
	Bouzina	45	540	137	25,37
	Djemorah	45	540	54	10,00
	Mena	45	540	60	11,11
	El Outaya (Ferme driss)	45	540	222	41,11
	Oued Chelih	45	540	49	9,07
	Medina Lanasser	45	540	31	5,74
	Biskra ONM	51	563	40	7,10
	Total	/	4343	685	15,82

Pour suivre l'évolution des températures et calculer les bilans hydriques nous avons fait recours aux chroniques des stations climatologiques existantes qui sont au nombre de trois à savoir (Skikda, Batna et Biskra).

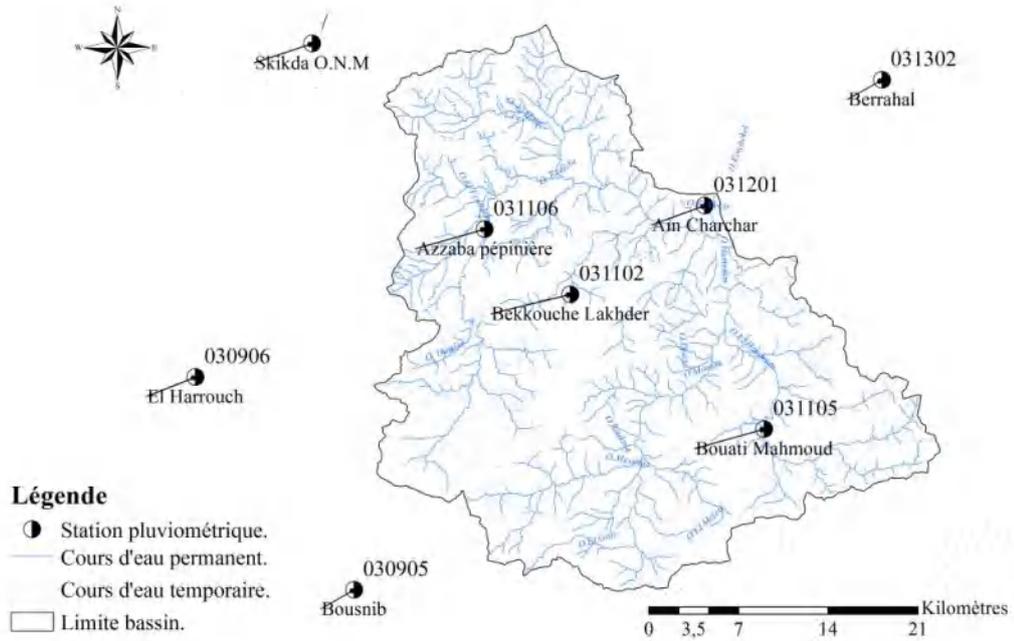


Fig. 35 : Localisation des stations pluviométriques –Bassin Kebir Hammam-

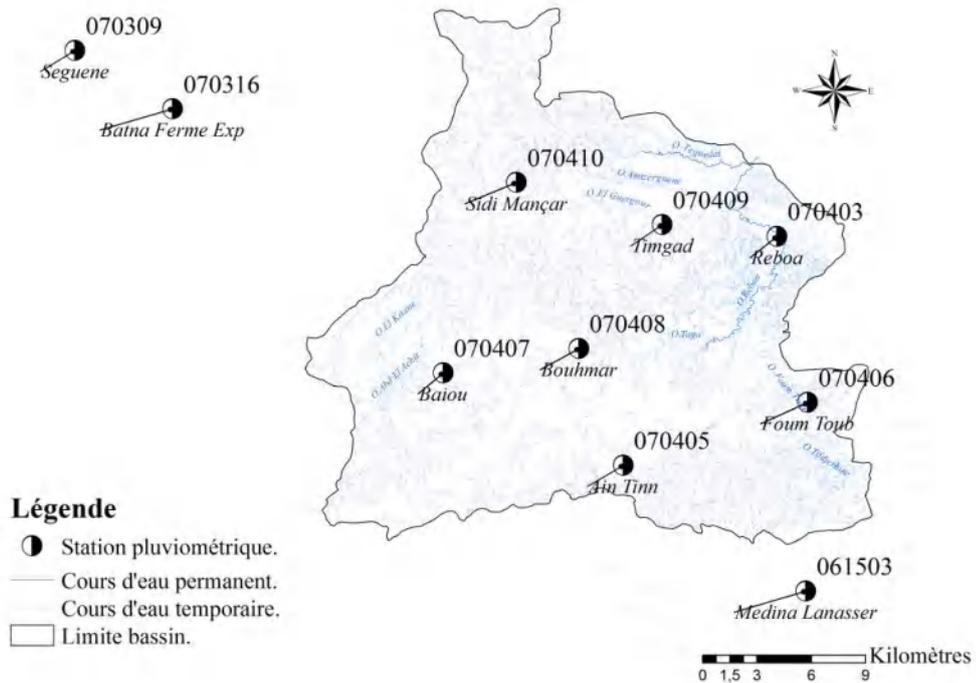


Fig. 36 : Localisation des stations pluviométriques –Bassin Reboa-

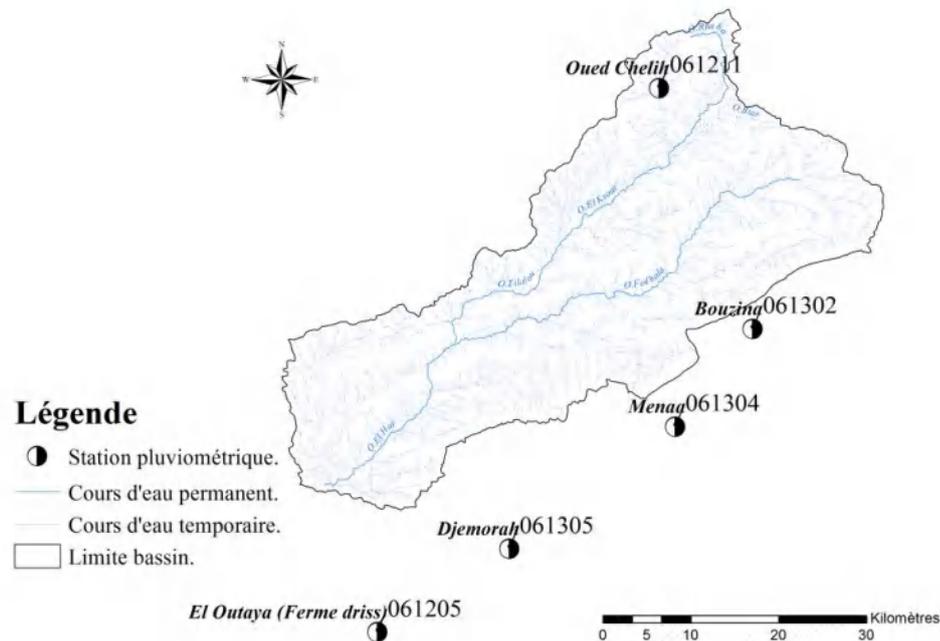


Fig. 37 : Localisation des stations pluviométriques –Bassin Oued El Hai-

3.4. Etude des pluies

3.4.1. Evaluation de la variabilité interannuelle du régime des précipitations observées

L'interprétation des figures (Fig. 38, 39 et 40), et le tableau 14, montrent qu'à pas de temps annuel, le régime des précipitations n'est homogène, ni dans l'espace ni dans le temps. Il est profondément caractérisé par la variabilité et des fluctuations conséquentes pour l'ensemble des stations étudiées. Les moyennes interannuelles des 26 stations varient d'un minimum de 547 mm enregistré à la station de *Bekkouche Lakhdar*, à un maximum de 773 mm à la station de *Ain Charchar* (bassin *Kebir Hammam*), de 197 mm à la station de *Ain Tinn* à 443 mm à *Seguene* et *Foum Toub* (bassin du *Reboa*) et de 121 mm à la station d'*El Outaya* à 443 mm.à la station de la *Medina Lanasser* (bassin *Oued El Hai*).

De façon générale, selon les données recueillies, la pluviométrie diminue du Nord vers le Sud dans un rapport de plus de 40%.

L'année excédentaire pour le bassin *Kebir Hammam* s'observe à la station d'*Ain Charchar* avec un taux maximum de 108 % (839 mm), enregistré en (2008/2009). Au bassin *Reboa*, la station de *Bouhmara* enregistre un surplus de 377 mm, soit 115% de la moyenne interannuelle en (2003/2004), *Batna Ferme* et *Batna O.N.M* observent un excédent d'une valeur

de 225 mm à la même année. A *Oued El Hai*, l'année excédentaire (1969/1970) est enregistrée à la station d'*El Outaya* avec 255 mm (219%).

Les déficits relevés au niveau des stations sont aussi importants, Les taux des années déficitaires observés au bassin *Kebir Hammam* varient de 38%, enregistré à la station de *Berrahal*, située au Nord-Est du bassin à 45%, à la station de *Skikda O.N.* Le taux des années déficitaires augmente de façon générale du Nord vers le Sud. Il est de l'ordre de 78%, aux deux stations de *Bouhmar* et *Timgad*, enregistré respectivement en (1970/1971) et (1977/1978). A la station de *Djemorah*, le déficit est à son maximum, 94% en 1971/1972.

Les années déficitaires s'accroissent au fur et à mesure que l'on se dirige vers le Sud avec des taux élevés pouvant atteindre 200%. Cela s'explique en grande partie par le caractère irrégulier et aléatoire des pluies, des pluies qui peuvent intervenir intensément et en un laps de temps très court.

Tableau 14 : Les pluies déficitaires et excédentaires par station

Bassin versant	Station	Pluies Déficitaires				Moyenne	Pluies Excédentaires			
		Min	Année	mm	%		Max	Année	mm	%
Bassin Oued El Hammam	Bekkouche Lakhder	187,1	2001/2002	-360,385	-65,8	547,48	989,4	2004/2005	441,91	80,7
	Bouati Mahmoud	380,4	1996/1997	-312,414	-45,1	692,81	1045,14	2010/2011	352,32	50,9
	Azzaba pépinière	294,3	1996/1997	-327,048	-52,6	621,35	978,3	1986/1987	356,95	57,4
	Bou Snib	331,2	1985/1986	-366,981	-52,6	698,18	1012,6	2002/2003	314,41	45,0
	El Harrouch	343,1	1987/1988	-240,320	-41,2	583,42	932,2	1984/1985	348,78	59,8
	Ain Charchar	325,4	1973/1974	-447,877	-57,9	773,28	1612,4	2008/2009	839,12	108,5
	Berrahal	444,69	2001/2002	-272,165	-38,0	716,85	1145,54	2011/2012	428,68	59,8
	Skikda ONM	411,5	1973/1974	-341,965	-45,4	753,46	1118,6	2002/2003	365,13	48,5
Bassin Reboa	Ain Tinn	101,8	1996/1997	-95,951	-48,5	197,75	324,2	1976/1977	126,44	63,9
	Baiou	187,1	2000/2001	-191,391	-50,6	378,49	615,1	1995/1996	236,60	62,5
	Seguene	195,6	2001/2002	-247,470	-55,9	443,07	785	1975/1976	341,93	77,2
	Bouhmar	69,2	1970/1971	-257,167	-78,8	326,37	704,1	2003/2004	377,73	115,7
	Foum Toub	203,8	1977/1978	-239,582	-54,0	443,38	741,3	2008/2009	297,91	67,2
	Sidi Mancar	146,22	1976/1977	-173,163	-54,2	319,38	531,8	2008/2009	212,41	66,5
	Batna Ferme Exp	185,8	1993/1994	-192,961	-50,9	378,76	603,8	2003/2004	225,03	59,4
	Reboa	78,7	1996/1997	-210,402	-72,8	289,10	587,7	1975/1976	298,59	103,3
	Timgad	61,5	1977/1978	-225,896	-78,6	287,40	491,8	1972/1973	204,40	71,1
	Batna ONM	165,11	2016/2017	-155,347	-48,5	320,46	476,55	2003/2004	156,09	48,7
Bassin Oued	Biskra Secteur	24,3	1983/1984	-106,824	-81,5	131,12	310,3	2008/2009	179,17	136,6
	Bouzina	159,42	2008/2009	-136,894	-46,2	296,31	564,62	1977/1978	268,30	90,5
	Djemorah	8,5	1971/1972	-139,098	-94,2	147,60	323,1	1970/1971	175,50	118,9
	Mena	102,4	1998/1999	-136,407	-57,1	238,81	502,7	1995/1996	263,89	110,5
	El Outaya (Ferme)	37,97	1983/1984	-83,233	-68,7	121,20	386,8	1969/1970	265,59	219,1
	Oued Chelih	93,3	1998/1999	-228,899	-71,0	322,20	516,5	1971/1972	194,30	60,3
	Medina Lanasser	225,1	1996/1997	-218,312	-49,2	443,41	896,4	2003/2004	452,98	102,2
	Biskra ONM	34,4	1983/1984	-88,980	-72,1	123,38	263,95	2003/2004	140,57	113,9

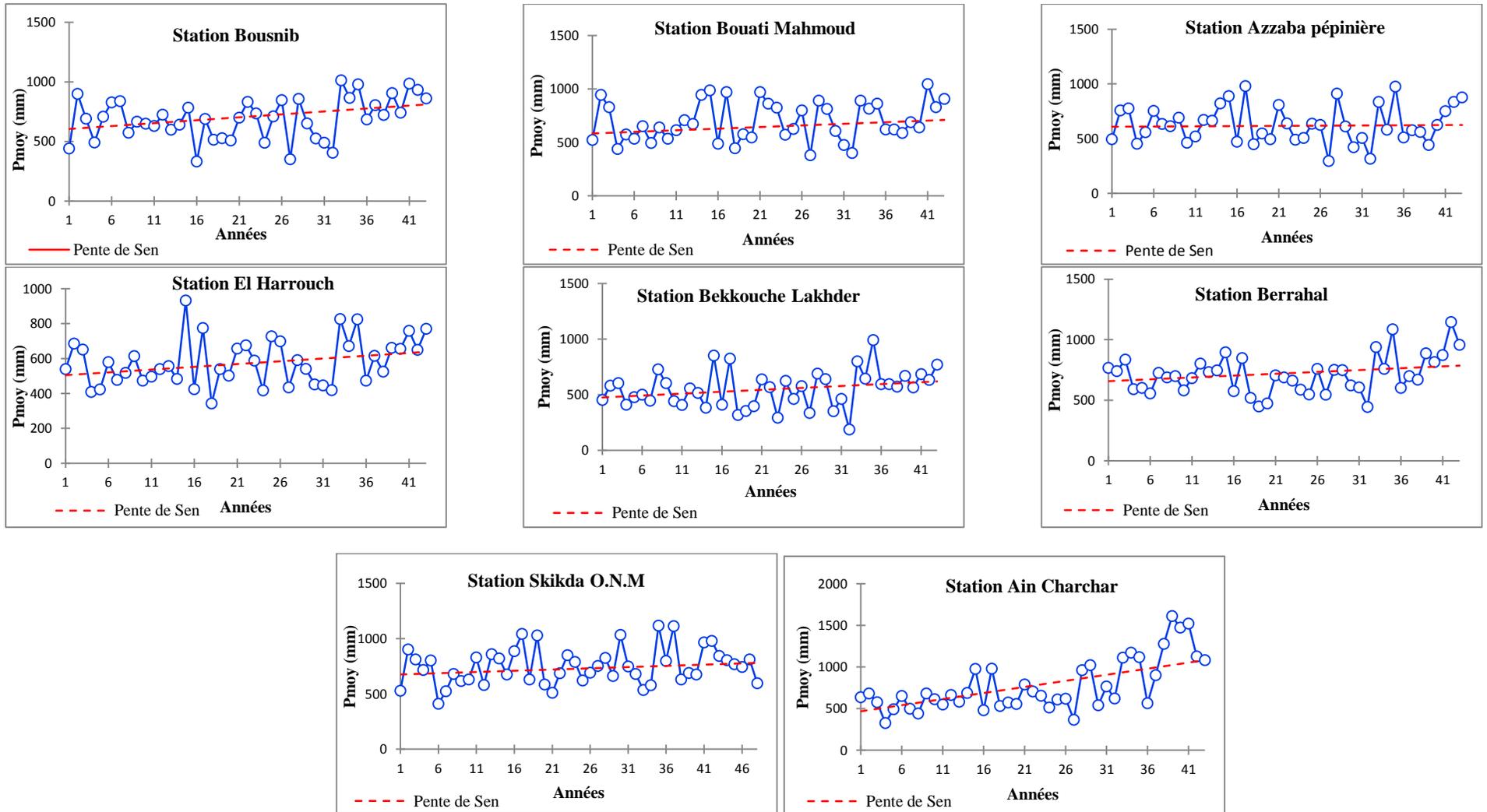


Fig. 38 : Evolution de la pluie annuelle aux stations du bassin *Kebir Hammam* et pentes de Sen (lignes en pointillés rouges).

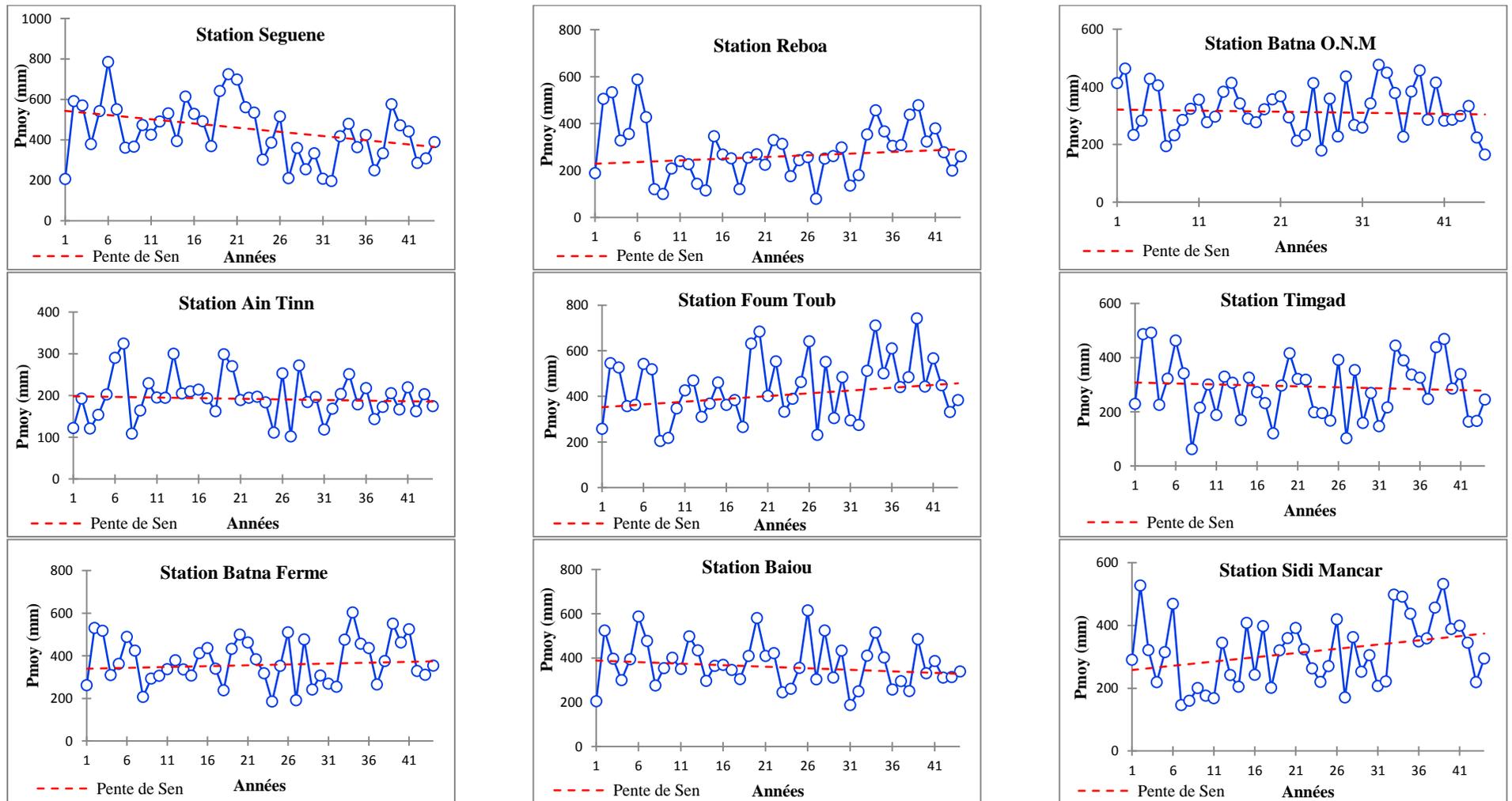


Fig. 39 : Evolution de la pluie annuelle aux stations du bassin *Reboa* et pentes de Sen (lignes en pointillés rouges).

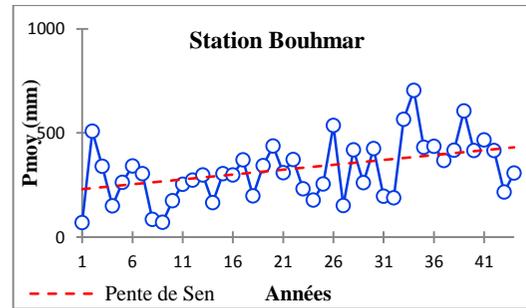


Fig. 39 (Suite) : Evolution de la pluie annuelle aux stations du bassin *Reboa* et pentes de Sen (lignes en pointillés rouges).

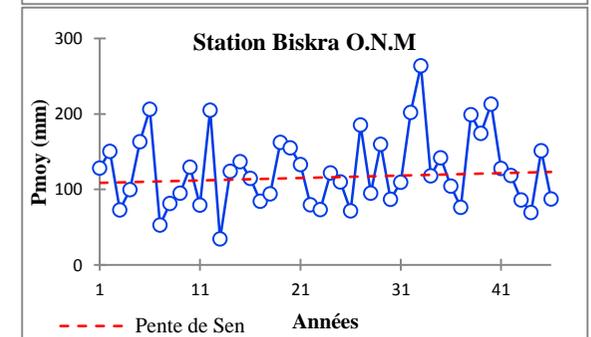
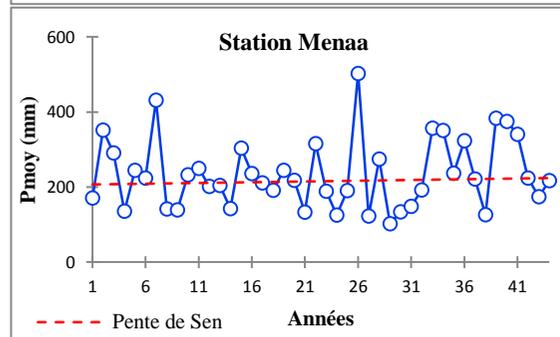
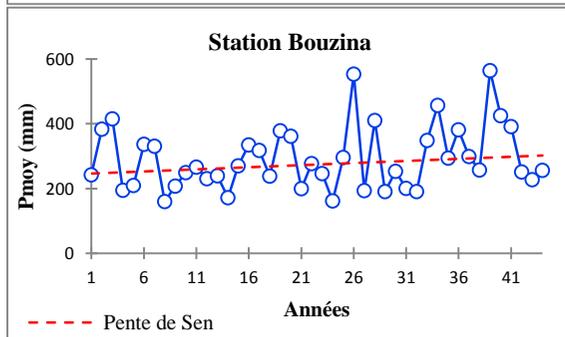
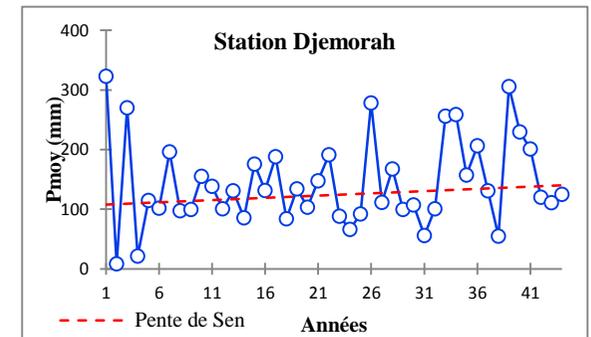
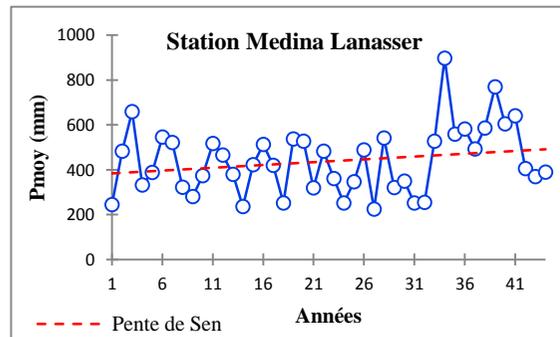
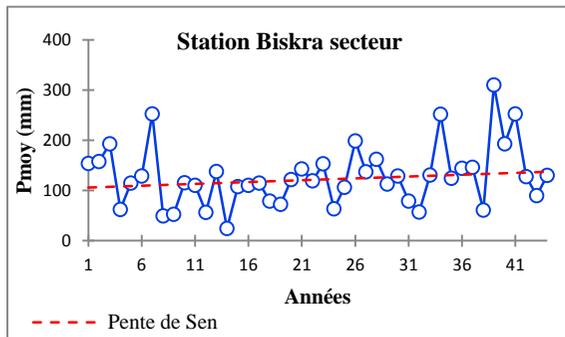


Fig. 40 : Evolution de la pluie annuelle aux stations du bassin *Oued El Hai* et pentes de Sen (lignes en pointillés rouges).

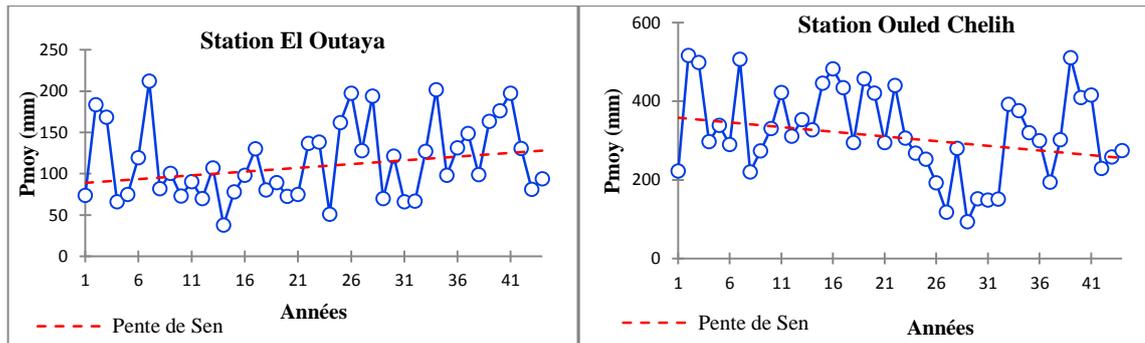


Fig. 40 (Suite) : Evolution de la pluie annuelle aux stations du bassin Oued El Hai et pentes de Sen (lignes en pointillés rouges).

3.4.2. Le cycle des précipitations annuelles et leur tendance

Pour évaluer les changements et les tendances de la variabilité pluviométrique, nous avons utilisé une approche statistique et graphique afin de vérifier l'existence d'une tendance dans l'évolution de la pluie au cours des quatre décennies. Les tests non paramétriques de tendance de Pettitt (1979) et de Mann-Kendall (1979) sont utilisés pour vérifier l'évolution globale des régimes pluviométriques.

Le test de Pettitt permet de détecter des ruptures dans les séries chronologiques. L'hypothèse H_0 testée est la suivante : « il n'y a pas de rupture ». Le test repose sur les signes des différences entre valeurs qui forment l'échantillon. Une série temporelle résultante est élaborée. Au maximum observé sur la série correspond vraisemblablement la date de rupture. La valeur p-value de la statistique permet de savoir si cette rupture est statistiquement significative au seuil de α .

Le test de Mann-Kendall permet quant à lui d'examiner l'existence d'une tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) sur une série chronologique. L'hypothèse H_0 testée est « il n'y a pas de tendance ». Si $p\text{-value} < \alpha$, seuil de significativité choisi, l'hypothèse H_0 est rejetée et on conclut à l'existence d'une tendance significative, au seuil choisi. La robustesse du test a été validée par plusieurs essais de comparaison effectués par Yue et al (2004).

D'un point de vue pratique, les tests ont été appliqués en s'appuyant sur les fonctions existantes dans le logiciel XLSTAT sur des données mensuelles et annuelles des précipitations, en considérant un risque α au seuil de 5%. A la représentation graphique seuls les résultats des séries annuelles ont été pris en considération et ceux présentant des ruptures pour le test de Pettitt afin de ne pas surcharger les graphiques. Sur l'ensemble de ces graphes on a rajouté les droites de tendance linéaire calculées par le tableur Excel. La droite en trait rouge discontinu sur les graphiques est la droite de tendance linéaire sur la période.

Nous fournissons dans la première ligne, la valeur p (p-value) du test de Pettitt et l'année probable de rupture si elle est significative. Pour le test de Mann-Kendall nous indiquons le p-value, la valeur de la pente de Sen, aussi le sens de la tendance (+ si hausse, - si diminution) si

elle est significative. L'ensemble des résultats obtenus est synthétisé dans le Tableau 15. Nous commentons ici les résultats les plus significatifs par bassin.

Interprétation des résultats

Le test de Pettitt appliqué sur l'ensemble des séries moyennes annuelles (1968/2003) des stations pluviométriques situées dans bassin *Kebir Hammam* met en évidence 3 ruptures significatives à la hausse (Fig. 41). La première à la station *d'Ain Charchar*, cette rupture est significative à partir 1996. Pour les deux autres, elles sont communes et visibles dès 2001 aux stations *Bousnib* et *Bekkouche Lakhder*. Les variations pluviométriques enregistrées en ces stations varient de 25% à la station *Bousnib* et *Bekkouche Lakhder* et atteignent les 41% à la station *d'Ain Charchar*.

L'analyse des tendances de Mann-Kendall et de pentes de Sen affirme les résultats du test de Pettitt pour une seule station celle d'*Ain Charchar*. La tendance à la hausse des précipitations à cette dernière est très significative et bien marquée ($p\text{-value} < 0.0001$). En revanche dans le reste des stations, les tests statistiques utilisés ne déclarent aucune tendance significative.

Au bassin *Reboa*, les résultats des deux tests statistiques et graphiques s'accordent pour enregistrer des ruptures et des tendances significatives aux mêmes stations. A la station *Bouhmar*, le test de Pettitt localise une rupture significative en 2001. La droite de tendance est en croissance ($P\text{-value} = 0.01$) avec un taux de 36%. A *Seguene*, la situation est inversée à celle de la station *Bouhmar*, le test de Pettitt la situe en 1992. La tendance significative par Mann-Kendall et la pente de Sen la qualifie à la baisse avec un taux de plus de 30%. Ce résultat met en évidence la probabilité d'une évolution pluviométrique vers une aridité au niveau de cette station.

Aucune des stations analysées du bassin *Oued El Hai* ne montre de rupture ou de tendance significative, sauf à celle du *Medina Lanasser*. Celle-ci est visible uniquement par le test de Pettitt qui la situe vers 2001 ($p\text{-value} = 0.02$). Dans le reste des stations, il est encore plus délicat de tenter de détecter des ruptures ou des tendances bien significatives.

Globalement, il apparaît que l'étude des tendances des 26 stations pluviométriques étudiées par ces deux tests statistiques et graphiques donne des résultats similaires. Sur l'ensemble, 77% des stations ne représentent aucune tendance. Tandis que pour le reste (6 stations), elles partagent une période de transition des valeurs pluviométriques allant de 1996 à 2001 avec un record pour l'année 2001.

Tableau 15 : Résultats de l'application du test Pettitt et Mann-Kendall sur les pluies moyennes annuelles

Bassin	Station	Test Pettitt			Test MANN-KENDALL			
		Année	p-value	Signification	Tau de Kendall	p-value	Pente de Sen	Signification
Kebir Hammam (1968/2013)	Bekkouche Lakhder	2001	0,04	+	0,178	0,09	3,408	/
	Bouati Mahmoud	/	/	/	0,142	0,17	2,832	/
	Azzaba pépinière	/	/	/	0,051	0,63	1,621	/
	Bou Snib	2001	0,008	+	0,19	0,07	3,750	/
	El Harrouch	/	/	/	0,17	0,10	2,860	/
	Ain Charchar	1996	0,0002	+	0,408	0,00	13,852	+
	Berrahal	/	/	/	0,116	0,27	2,105	/
	Skikda (O.N.M)	/	/	/	0,097	0,33	1,721	/
Reboa (1968/2013)	Ain Tinn	/	/	/	-0,07	0,46	-0,467	/
	Baiou	/	/	/	-0,13	0,18	-1,824	/
	Seguene	1992	0,001	-	-0,27	0,008	-4,430	-
	Bouhmar	2001	0,026	+	0,25	0,013	4,217	+
	Foum Toub	/	/	/	0,10	0,314	1,915	/
	Sidi Mancar	/	/	/	0,17	0,098	2,107	/
	Batna Ferme Exp	/	/	/	0,02	0,853	0,270	/
	Reboa	/	/	/	0,05	0,618	0,960	/
	Timgad	/	/	/	-0,08	0,417	-1,235	/
	Batna (O.N.M)	/	/	/	-0,02	0,833	-0,176	/
Oued El Hai (1968/2013)	Biskra Secteur	/	/	/	0,10	0,323	0,570	/
	Bouzina	/	/	/	0,08	0,417	0,890	/
	Djemorah	/	/	/	0,05	0,604	0,425	/
	Menaa	/	/	/	-0,01	0,945	-0,057	/
	El Outaya (Ferme	/	/	/	0,11	0,286	0,579	/
	Oued Chelih	/	/	/	-0,20	0,052	-2,449	/
	Medina Lanasser	2001	0,022	+	0,14	0,162	2,078	/
	Biskra (O.N.M)	/	/	/	0,09	0,359	0,481	/

(/) Aucune tendance ; (+) Tendance à la hausse ; (-) Tendance à la baisse

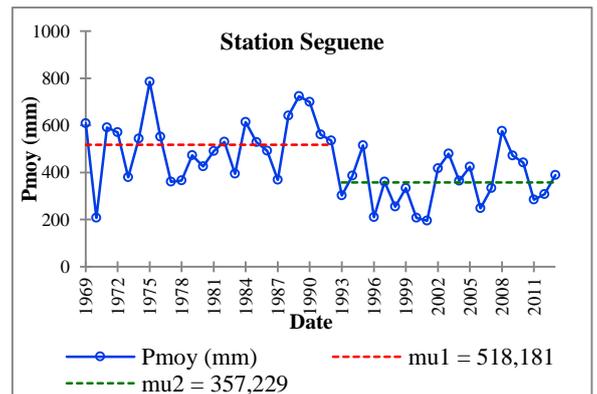
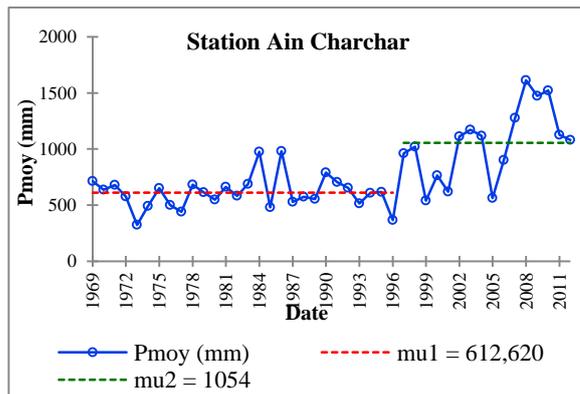


Fig. 41 : Séries des stations présentant une rupture en moyenne.

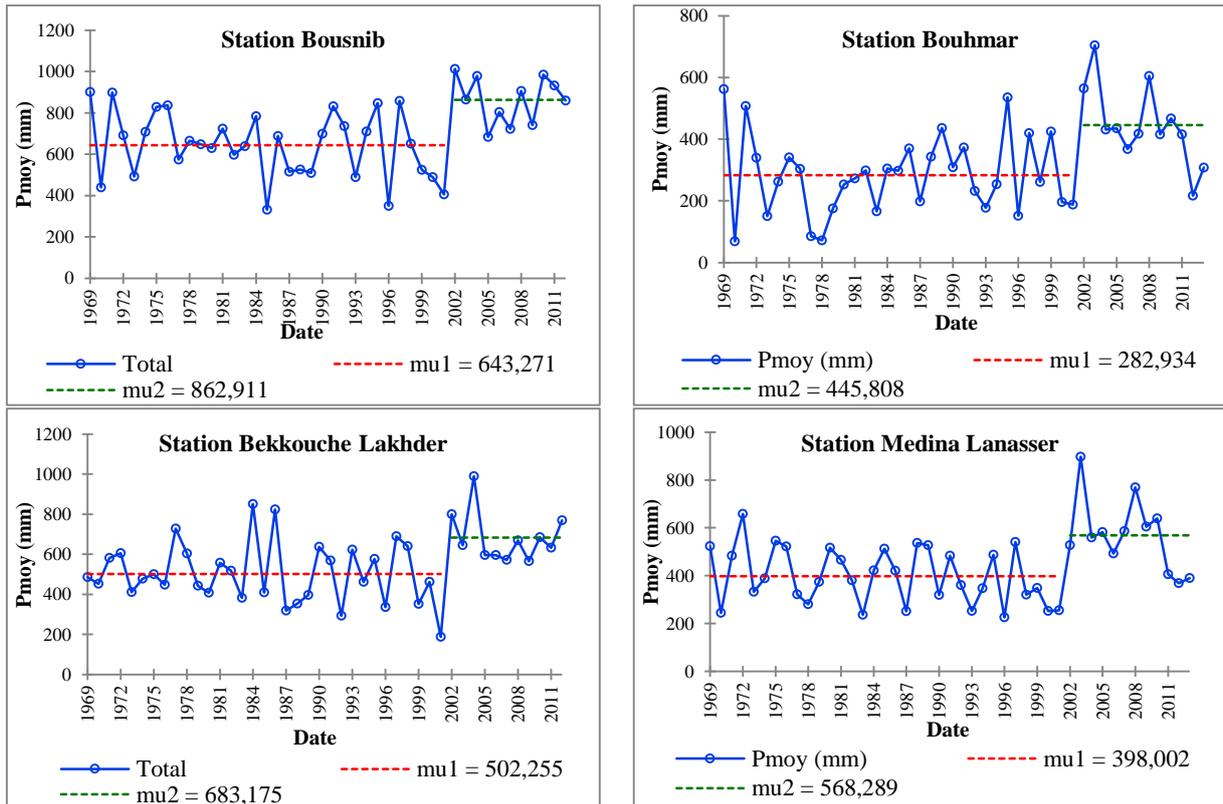


Fig. 41 (suite) : Séries des stations présentant une rupture en moyenne.

3.4.3. Les indices annuels de sécheresse

La sécheresse est un phénomène naturel récurrent et complexe. De nos jours, son évaluation et sa prévision fournit des informations précieuses pour la bonne gestion des ressources en eau afin de faire face à ses conséquences. Bien qu'elle exprime en générale des conditions climatiques extrêmes, elle ne dispose pas de définition précise. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles les chercheurs ont des difficultés à reconnaître et à planifier les périodes de sécheresse. Par conséquent, sa détermination repose sur les indices statistiques pour décider quand commencer la mise en œuvre des mesures de conservation de l'eau ou d'atténuation (Khadr et al, 2009).

Plusieurs indices ont été proposés pour quantifier la sévérité de la sécheresse et sont liés à des variables météorologiques. Parmi les indices de sécheresse les plus répandus on a : l'indice de déficit pluviométrique (IDP) et l'indice pluviométrique standardisé (SPI). Ces deux indices simples et puissants sont basés essentiellement sur les données pluviométriques.

3.4.3.1. L'indice de déficit pluviométrique IDP

Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne. Il est le rapport de la hauteur de précipitation d'une année à la hauteur moyenne annuelle de précipitation de la série. Il s'exprime par la formule suivante :

$$IDP (\%) = \frac{P_i - P_m}{P_m} * 100 \quad (19)$$

Où :

IDP : indice de déficit pluviométrique annuel en (%) ;

Pi : précipitation annuelle en (mm) ;

Pm : précipitation moyenne en (mm).

Cet indice permet de déterminer le nombre des années déficitaires et leur succession (Annexe 1). Une année est qualifiée humide si cet indice est positif et sèche lorsqu'il est négatif.

Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances.

Nous avons choisi de construire le tableau 16, afin de distinguer le nombre d'années sèches et humides sur l'ensemble des stations. Pour une période moyenne de 45 ans d'observations nous avons enregistré 630 années sèches sur 541 années humides pour l'ensemble des trois entités représentés par l'étude des 26 stations pluviométriques. Ce constat n'indique pas nécessairement la succession de la sécheresse dans le temps. Par contre, il met en évidence l'extension de celle-ci.

Le bassin *Kebir Hammam* considéré naturellement comme l'un des bassins les plus arrosés par sa position géographique (proche de la mer méditerranéenne) est affecté par la sécheresse autant que les deux autres bassins *Reboa* et *Oued El Hai* situés entre une zone semi-aride à aride. La séquence de sécheresse la plus longue dans ce bassin est enregistrée à la station de *Ain Charchar* entre 1969 et 2002. Une période de 33 années déficitaires entrecoupées uniquement de 4 années humides non successives.

Le bassin *Reboa* est caractérisé par un cycle interannuel de précipitation très contrasté, les années sèches et humides s'alternent sur l'ensemble de ses stations. La succession des années sèches marquent essentiellement les stations de : *Batna Ferme* et *Sidi Mançar* (1977-84), *Reboa* (1978-2003), *Bouhmar* (1973-1986) et *Seguene* (1993-2014).

A *Oued El Hai*, les cycles de sécheresse s'allongent de plus en plus. Ils varient de 25 à 28 années. La période de sécheresse la plus longue est enregistrée à la station de *Biskra secteur*. Elle va de 1977 à 2003, entrecoupée par six années humides non successives.

Par ailleurs, toutes ces stations n'empêchent pas le fait qu'elles affichent des années successivement sèches, voyait aussi un certain retour vers des conditions plus humides. Les stations d'*El Harrouch*, *Berrahal*, *Skikda ONM* et plus encore à la station de *Biskra* à *Oued El Hai* ont enregistré le retour de quatre années humides (2008-2012). Les stations de *Bekkouche Lakhdar*, *Sidi Mançar*, *Reboa*, *Timgad*, et *Bouhmar* situées au bassin de *Reboa*, ainsi qu'aux stations de *Bouzina* et *Medina Lanasser* se sont montrés humides entre 2002 et 2011. Sur certaines de ces dernières la succession des années humides se prolonge parfois jusqu'à 2015.

Tableau 16 : Nombres d'années sèches et humides par indice IDP

Bassin versant	Station	Nbres d'années sèches	Nbres d'années humides	Pourcentage des années sèches
Kebir Hammam	Bekkouche Lakhder	19	25	43
	Bouati Mahmoud	25	19	57
	Azzaba pépinière	23	21	52
	Bou Snib	20	24	45
	El Harrouch	23	21	52
	Ain Charchar	29	15	66
	Berrahal	22	22	50
	Skikda ONM	24	25	49
Reboa	Ain Tinn	26	19	58
	Baiou	24	21	53
	Seguen	24	21	53
	Bouhmar	24	21	53
	Foum Toub	23	22	51
	Sidi Mancar	22	23	49
	Batna Ferme Exp	25	20	56
	Reboa	25	20	56
	Timgad	22	23	49
		Batna ONM	22	25
Oued El Hai	Biskra Secteur	28	17	62
	Bouzina	27	18	60
	Djemorah	27	18	60
	Menaa	28	17	62
	El Outaya (Ferme driss)	25	20	56
	Oued Chelih	25	20	56
	Medina Lanasser	23	22	51
		Biskra ONM	25	22

3.4.3.2. L'Indice Pluviométrique Standardise SPI

L'indice SPI « Standardized Precipitation Index » a été développé par McKee et al ; (1993) en vue de quantifier le déficit des précipitations pour des échelles de temps multiples qui vont refléter l'impact de la sécheresse sur la disponibilité des différents types de ressources en eau pour une période donnée. Etudier cet indice permet également de distinguer les années sèches des années humides ou les années déficitaires des années excédentaires (Tableau 17). Une sécheresse sévit lorsque le SPI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque le SPI devient positif. On effectue une classification de la sécheresse suivant les valeurs du SPI (Annexe 2). Il est exprimé mathématiquement comme suit :

$$SPI = \frac{Pi - Pm}{\sigma P} \quad (20)$$

Où :

Pi : La moyenne interannuelle des précipitations en (mm) ;

Pm : La moyenne de la série des précipitations en (mm) ;

σP : L'écart type de la série des précipitations.

Tableau 17 : La classification de la sécheresse suivant les valeurs du SPI

Classes de l'SPI	Degré de sécheresse
2 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
1,0 à 1,49	Modérément humide
de -0,99 à 0,99	Proche de la normale
-1,0 à -1,49	de Modérément
-1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

Dans l'ensemble des stations (Tableau 18), l'indice SPI indique la dominance bien marquée des années normales (65,5% des années). Les années humides ($P > 1$) pour la période moyenne commune étudiée (1969-2003) et pour l'ensemble des stations ne représentent que 16.5% du total des années, elles sont légèrement inférieures aux années sèches ($P < 1$) qui représentent 18%, avec une prépondérance marquée des années modérément sèches (12,7%). La probabilité qu'une sécheresse bien qu'elle soit modérée tend ainsi, à se produire aussi bien au Sud (bassin *Reboa* et *Oued El Hai*) qu'au Nord (bassin *Kebir Hammam*). Les années extrêmement sèches sont rares (0,6 % des années). Elles marquent une à deux années dispersées à travers les stations *Bekkouche Lakhdar*, *Azzaba pépinière*, *Bousnib* et *Skikda O.NM* contrôlant le bassin *Kebir Hammam*.

Par bassin, pour la période considérée (1968 -2013), les stations situées au Nord (bassin *Kebir Hammam*) ont connu des années humides successives. Entre 1968 et 2003, la plus grande fréquence des années normales se voit interrompre souvent par des années sèches de sévérité différente (modérée à forte). L'exception touche cependant la station d'*Ain Charchar*, entre 1968 et 2013, où le SPI est supérieur à 1, ce qui reflète des années humides sur pratiquement toute la période. Entre 2003 et 2013, l'ensemble des stations voyaient un retour des années humides. La station d'*Ain Charchar* observe une humidité modérée à extrême, 8 sur 10 années.

Dans le bassin de *Reboa*, les années humides et années sèches se succèdent, entre 1969 et 2002. Les premières représentent 17.4% de la série étudiée et les secondes 18.7%. Les années considérées comme normales dominent avec 63.9%. Au-delà de 2003, les stations observent un retour vers une période humide relevée principalement à : *Reboa*, *Foum Toub*, *Bouhmar*, *Timgad* et *Sidi Mancar*.

Dans le bassin de *Oued El Hai* les années humides représentent un total de 60 années sur 505 années traitées sur l'ensemble des stations, soit 11.8%. Les années sèches modérées à fortes sont récurrentes mais de façon discontinue. Les années proches de la normale caractérisent aussi ce bassin avec presque la moitié des années (47.7%).

La normalité semble donc prédominer sur l'ensemble des bassins. La fréquence de retour des années proches de la normale dans l'ensemble des stations est d'une année sur deux. Les années d'humidité extrême se produisent une fois tous les 22 ans (*Oued El Hai*) à 27 ans (*Kebir Hammam*), tandis que les années de sécheresses extrêmes observées dans quelques stations du bassin *Kebir Hammam* ne reviennent qu'une fois tous les 60 ans. Les années de sécheresses

extrêmes sont totalement absentes sur les bassins de *Reboa* et *Oued El Hai*, bassins alimentés essentiellement par les sommets des Aurès bien arrosés

Tableau 18 : Résultats de la classification du SPI par station

Bassin	Station	H.E	H.F	H.M	N	S.M	S.F	S.E	Total
Bassin Kebir Hammam	Bekkouche Lakhder	1	2	2	31	5	2	1	44
	Bouati Mahmoud	4	0	5	28	5	2	0	44
	Azzaba pépinière	1	2	3	28	5	4	1	44
	Bou Snib	0	2	2	26	9	3	2	44
	El Harrouch	1	2	4	30	6	1	0	44
	Ain Charchar	3	1	5	32	3	0	0	44
	Berrahal	2	1	5	28	5	3	0	44
	Skikda ONM	1	2	3	33	7	1	2	49
	Moyenne	2	2	4	30	6	2	1	45
	Fréquence	27	30	12	2	8	22	60	/
<i>Reboa</i>	Seguene	1	2	4	30	4	4	0	45
	Batna Ferme Exp	1	1	7	28	5	3	0	45
	Reboa	2	3	3	30	5	2	0	45
	Ain Tinn	1	4	1	31	4	4	0	45
	Foum Toub	2	2	3	29	6	3	0	45
	Baiou	2	2	5	29	5	2	0	45
	Bouhmar	1	3	3	30	5	3	0	45
	Timgad	0	5	3	29	6	2	0	45
	Sidi Mancar	1	4	3	28	7	2	0	45
	Batna O.N.M	4	0	6	25	10	2	0	47
	Moyenne	2	3	4	29	6	3	0	45
	Fréquence	30	17	12	2	8	17	/	/
<i>Oued El Hai</i>	Biskra secteur	4	1	3	29	7	1	0	45
	Bouzina	2	2	4	29	8	0	0	45
	Medina Lanasser	2	1	3	31	7	1	0	45
	Menaa	2	2	5	26	10	0	0	45
	Ouled Chelih	0	4	4	29	3	4	1	45
	Doucen	2	2	2	29	7	3	0	45
	El Outaya (Ferme)	1	1	5	36	2	0	0	45
	Djemorah	3	3	2	32	3	2	0	45
	Biskra O.N.M	1	5	2	31	7	1	0	47
	Moyenne	2	2	4	30	6	1	0	45
	Fréquence	23	23	13	1	8	33	/	/

H.E : Humidité extrême ; *H.F* : Humidité forte ; *H.M* : Humidité modérée ; *N* : Année normale ; *S.M* : Sècheresse modérée ; *S.F* : Sècheresse forte ; *S.E* : Sècheresse extrême.

3.4.4. Ajustement des pluies annuelles a une loi de probabilité

L'ajustement d'une loi de distribution à un échantillon de données consiste, une fois le type choisi, d'estimer les paramètres de cette loi de telle sorte que l'échantillon-mère soit le plus vraisemblable possible (au sens du maximum de vraisemblance) ou qu'au moins certaines statistiques de l'échantillon-mère (moyenne, variance par exemple) correspondent le plus possible à cette loi.

Le logiciel d'analyse de données et de statistiques Hyfran Plus est un outil rapide et facile, son utilisation nous a facilité le choix automatique de la loi qui s'ajuste au mieux à la distribution des pluies annuelles (Tableau 19), ainsi, le calcul direct de ses paramètres.

L'ajustement des séries pluviométriques des différentes stations (Annexe 3) montre que graphiquement les valeurs des pluies moyennes annuelles s'ajustent au mieux à une loi log-normale ⁽¹⁾. Seulement, L'acceptation et l'application de cette loi d'ajustement nécessite de juger son adéquation par des tests statistiques.

3.4.4.1. Le test Khi^2

Dans toute région donnée, une variable hydro-climatique suit la même loi en tous sites d'observations (Dubreuil, 1980). Seulement son choix repose sur des critères et des méthodes d'ordre statistique. Ces derniers permettent d'analyser les données issues des observations et d'admettre la faisabilité de l'adéquation du modèle statistique d'ajustement.

En général, l'adéquation d'une loi à un échantillon de données est approuvée par le test de (Khi-Deux), variable aléatoire dont la distribution a été étudiée par Pearson. Ce test d'hypothèses est une règle de décision qui permet, sur la base des données observées et avec des risques d'erreur déterminés, d'accepter ou de refuser une hypothèse statistique.

2.4.4.2. Règle de décision

Pour vérifier la fiabilité de ce test pour chaque ajustement, il faut d'abord calculer la valeur de χ^2 et de déterminer la probabilité correspondante à partir de la table de la fonction Khi-deux en fixant un seuil de signification α . Les règles d'emploi sont les suivantes :

1. Le découpage en classes doit introduire des classes d'égale probabilité théorique et d'un effectif théorique d'au moins 5 valeurs par classe.
2. La probabilité de khi^2 sur un échantillon de population inconnue, représente l'adéquation et a donc 50% de chances d'être comprise entre 0.25 et 0.75, comme 90% de l'être entre 0.05 et 0.95. L'adéquation est admise si $p_value > \alpha$. Le seuil du risque d'adéquation choisi est égal à 0.05 et sa signification peut se résumer ainsi :
 - a) L'adéquation est admise si $p_value > 0.05$ (H_0), on a 95% de chances de voir se vérifier l'hypothèse d'adéquation mais également avec 5% de chances de se tromper (H_A).
 - b) Si $p_value < 0.05$, on rejette l'adéquation (H_0), avec 95% de chances d'avoir raison mais également avec 5% de chances de se tromper.

Il est à noter que le choix du seuil n'est pas figé à 0.05. Pour les séries longues, on peut aller jusqu'à 25 %.

La répartition statistique des précipitations annuelles permet l'estimation de la fréquence d'apparition de certaines valeurs de pluie dont la prédétermination permet par exemple de situer

(1)

$$F(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \frac{1}{u} e^{-\frac{\ln^2(u)}{2\delta^2}} du \quad u = \frac{x - x_0}{s}$$

le niveau optimal dans le cadre du remplissage des barrages, référence étant souvent faite aux valeurs médianes.

Le test d'adéquation de Khi-deux (tableau 19) semble montrer que la loi Log-Normale est la meilleure loi de distribution pour les stations des trois bassins. Le tableau 20 présente les quantiles estimés pour différentes périodes de retour (2, 10, 20, 50, 100, 1000 ans) pour les valeurs de pluies annuelles enregistrées en période déficitaire comme excédentaire.

Tableau 19 : Intervalles de confiance et Test d'adéquation (Khi Deux) pour les stations étudiées

Bassin	Station	Moyenne annuelle	Intervalle de confiance						Khi ²	p-value	nulle (H0)
			-95%	95%	-90%	90%	-80%	80%			
Kebir Hammam	BekkoucheLakhder	548,91	498,09	599,73	506,55	591,27	516,12	581,70	4,05	0,40	Acceptée
	Bouati Mahmoud	693,91	637,77	750,06	647,12	740,70	657,69	730,13	7,18	0,13	Acceptée
	Azzaba pépinière	628,15	575,68	680,62	584,42	671,88	594,29	662,00	7,18	0,13	Acceptée
	Bou Snib	693,46	639,70	747,22	648,65	738,26	658,77	728,14	6,22	0,18	Acceptée
	El Harrouch	582,23	540,92	623,54	547,80	616,65	555,57	608,88	4,08	0,40	Acceptée
	Ain Charchar	774,67	677,81	871,53	693,94	855,40	712,18	837,16	8,24	0,14	Acceptée
	Berrahal	716,85	668,72	764,99	676,73	756,98	685,79	747,92	3,14	0,54	Acceptée
	Skikda ONM	751,57	703,99	799,15	711,89	791,25	720,83	782,31	6,96	0,14	Acceptée
Reboa	Ain Tinn	195,90	179,90	211,91	182,57	209,24	185,58	206,23	9,26	0,05	Acceptée
	Baiou	374,53	343,22	405,85	348,43	400,64	354,32	394,74	2,28	0,68	Acceptée
	Seguene	439,31	395,58	483,05	402,86	475,77	411,09	467,54	3,68	0,45	Acceptée
	Bouhmar	321,00	277,60	364,40	284,82	357,18	292,99	349,01	8,70	0,07	Acceptée
	FoumToub	439,22	398,17	480,26	405,00	473,43	412,72	465,71	4,44	0,35	Acceptée
	Sidi Mancar	315,49	283,06	347,92	288,46	342,52	294,56	336,42	7,55	0,11	Acceptée
	Batna Ferme Exp	375,27	343,20	407,34	348,54	402,01	354,57	395,97	3,31	0,51	Acceptée
	Reboa	283,67	247,34	319,99	253,39	313,94	260,22	307,11	4,84	0,30	Acceptée
	Timgad	283,71	250,58	316,84	256,09	311,33	262,33	305,09	6,81	0,15	Acceptée
Batna ONM	322,33	306,52	338,14	301,92	342,75	297,85	346,82	3,61	0,46	Acceptée	
Oued El Hai	Biskra Secteur	128,31	110,06	146,57	113,10	143,53	116,53	140,09	1,69	0,79	Acceptée
	Bouzina	292,39	262,65	322,13	267,60	317,18	273,20	311,58	4,75	0,31	Acceptée
	Djemorah	143,78	121,62	165,94	125,31	162,25	129,48	158,08	8,59	0,07	Acceptée
	Menaa	234,62	206,56	262,68	211,23	258,01	216,51	252,73	5,66	0,23	Acceptée
	El Outaya (Ferme	115,17	101,01	129,32	103,37	126,96	106,03	124,30	6,63	0,40	Acceptée
	Oued Chelih	320,75	286,81	354,70	292,46	349,05	298,85	342,66	4,07	0,40	Acceptée
	Medina Lanasser	441,59	396,39	486,79	403,91	479,27	412,42	470,76	4,27	0,23	Acceptée
	Biskra ONM	124,52	109,97	139,08	112,39	136,66	115,12	133,92	7,03	0,13	Acceptée

Les résultats peuvent être interprétés comme suit : une précipitation moyenne de 669,56 mm (Station *Bouati Mahmoud*) se produit une fois tous les deux ans (Tableau 20). Tandis qu'à la station de *Seguene* ou à la station de *Ouled Chelih*, les valeurs ayant la même période de retour sont respectivement de 418,6 mm et 300,6 mm.

Tableau 20 : Quantiles estimés pour les stations

Fréquence	Déficitaires					Moyenne	Excédentaires				
	0,001	0,010	0,020	0,050	0,100		0,900	0,950	0,980	0,990	0,999
Période de retour	1000	100	50	20	10	2	10	20	50	100	1000
Variable réduite	-3,09	-2,33	-2,05	-1,64	-1,28	0,00	1,28	1,64	2,05	2,33	3,09
BekkoucheLakhder	193,57	247,39	270,03	307,93	346,05	522,28	788,28	885,85	1010,18	1102,62	1409,24
Bouati Mahmoud	293,37	359,75	386,92	431,55	475,52	669,56	942,79	1038,83	1158,69	1246,18	1528,15
Azzaba pépinière	241,86	302,36	327,44	369,01	410,36	596,83	868,04	965,29	1087,84	1178,07	1472,80
Bou Snib	287,95	355,37	383,08	428,74	473,86	674,42	959,87	1060,88	1187,33	1279,90	1579,58
El Harrouch	282,39	335,78	357,19	391,88	425,52	568,97	760,79	826,09	906,33	964,10	1146,38
Ain Charchar	225,99	300,96	333,36	388,60	445,33	720,12	2294,65	1164,49	1334,46	1555,62	1723,06
Berrahal	355,64	420,48	446,37	488,24	528,72	700,24	927,40	1004,29	1098,48	1166,13	1378,73
Skikda ONM	375,02	443,08	470,25	514,16	556,61	736,31	974,03	1054,44	1152,90	1223,60	1445,66
Ain Tinn	80,45	99,57	107,44	120,43	133,28	190,59	272,54	301,62	338,08	364,81	451,49
Baiou	152,46	189,09	204,19	229,14	253,85	364,31	522,84	579,22	649,98	701,90	870,55
Seguene	141,33	184,85	203,43	234,86	266,84	418,63	656,75	746,18	861,48	948,08	1239,99
Bouhmar	56,29	84,42	97,56	121,19	146,95	290,03	572,40	694,06	862,20	996,35	1494,19
FoumToub	154,93	198,49	216,83	247,58	278,55	422,10	639,63	719,62	821,68	897,63	1150,00
Sidi Mancar	100,09	131,39	144,78	167,48	190,61	300,86	474,87	540,46	625,18	688,92	904,31
Batna Ferme Exp	144,55	181,53	196,91	222,45	247,91	363,31	532,45	593,38	670,34	727,12	913,17
Reboa	61,40	87,89	99,88	121,02	143,52	261,94	478,05	566,94	686,91	780,68	1117,40
Timgad	65,82	92,75	104,83	125,95	148,26	263,57	468,56	551,56	662,70	748,97	1055,36
Batna ONM	135,16	165,91	178,50	199,20	219,59	309,71	436,81	481,53	537,37	578,15	709,66
Biskra Secteur	24,20	35,71	41,03	50,53	60,79	116,76	224,26	269,84	332,31	381,79	563,35
Bouzina	103,41	132,42	144,64	165,11	185,72	281,21	425,80	478,94	546,73	597,17	764,70
Djemorah	19,80	31,37	36,97	47,29	58,85	127,33	275,47	342,84	438,56	516,79	818,64
Menaâ	65,64	88,66	98,69	115,92	133,73	221,41	366,59	422,91	496,73	552,96	746,82
El Outaya (Ferme driss)	27,16	38,32	43,33	52,09	61,36	109,31	194,72	229,34	275,74	311,77	439,85
Oued Chelih	87,42	118,64	132,29	155,78	180,13	300,63	501,74	580,15	683,15	761,78	1033,77
Medina Lanasser	148,83	192,34	210,78	241,80	273,17	420,05	645,93	729,73	837,12	917,35	1185,57
Biskra ONM	32,14	43,96	49,15	58,12	67,45	114,03	192,79	223,74	264,55	295,82	404,55

En outre nous avons calculé la période de récurrence des pluies totales maximales et minimales des séries (Tableau 21). A titre d'exemple, à la station de *Bekkouche Lakhder*, la pluie totale maximale de 989,4 mm (2004/2005) a une période de retour de 104 ans. Tandis l'application du même calcul à une précipitation totale maximale proche de celle-ci à la station d'*Azzaba Pépinière* (978,3 mm) donne une période de retour de 32 ans.

Tableau 21 : Périodes de retour pour les précipitations maximales et minimales

Bassin	Station	Max (année)	Fréquence (f)	Période de récurrence	Min (année)	Fréquence (f)	Période de récurrence
Bassin Kebir Hammam	BekkoucheLakhder	989,40 (04/05)	0,990	104,4	187,10 (01/02)	0,004	257,18
	Bouati Mahmoud	1045,14 (10/11)	0,965	28,4	380,40 (96/97)	0,028	36,1
	Azzaba pépinière	978,30 (86/87)	0,969	32,6	294,30 (96/97)	0,016	61,0
	Bou Snib	1012,60 (02/03)	0,949	19,5	331,20 (85/86)	0,010	100,1
	El Harrouch	932,20 (84/85)	0,992	120,5	343,10 (87/88)	0,022	45,1
	Ain Charchar	1612,40 (08/09)	0,992	129,9	325,40 (73/74)	0,040	24,9
	Berrahal	1145,54 (11/12)	0,993	149,3	444,69 (01/02)	0,029	34,2
	Skikda ONM	1118,60 (02/03)	0,981	53,4	411,50 (73/74)	0,009	112,3
Bassin Reboa	Ain Tinn	324,20 (76/77)	0,984	60,8	101,80 (96/97)	0,022	45,7
	Baiou	615,10 (95/96)	0,981	52,7	187,10 (00/01)	0,018	56,3
	Seguene	785,00 (75/76)	0,981	52,2	195,60 (01/02)	0,027	37,7
	Bouhmar	704,10 (03/04)	0,983	60,1	69,20 (70/71)	0,014	72,2

Tableau 21 (Suite) : Périodes de retour pour les précipitations maximales et minimales

Bassin	Station	Max (année)	Fréquence (f)	Période de récurrence	Min (année)	Fréquence (f)	Période de récurrence
Bassin Reboa	FoumToub	741,30 (08/09)	0,975	39,8	203,8 (77/78)	0,023	43,0
	Sidi Mancar	531,80 (08/09)	0,962	26,4	146,22 (76/77)	0,036	27,8
	Batna Ferme Exp	603,80 (03/04)	0,971	34,9	185,8 (93/94)	0,022	45,8
	Reboa	587,70 (75/76)	0,981	52,0	78,70 (96/97)	0,018	55,6
	Timgad	491,80 (72/73)	0,948	19,4	61,50 (77/78)	0,005	196,3
	Batna ONM	476,55 (03/04)	0,960	24,9	165,11 (16/17)	0,018	56,2
Bassin Oued El Hai	Biskra Secteur	310,30 (08-09)	0,992	124,5	24,30 (83-84)	0,011	95,0
	Bouzina	564,62 (77-78)	0,992	125,7	159,42 (08-09)	0,060	16,6
	Djemorah	323,10 (70-71)	0,973	37,1	8,50 (71-72)	0,003	298,6
	Menaâ	502,70 (95-96)	0,992	126,7	102,40 (98-99)	0,047	21,4
	El Outaya (Ferme)	386,80 (69-70)	0,990	510,5	37,97 (83-84)	0,035	28,3
	Oued Chelih	516,50 (71-72)	0,941	16,8	93,30 (98-99)	0,007	145,2
	Medina Lanasser	896,40 (03-04)	0,996	246,3	225,10 (96-97)	0,048	21,0
	Biskra ONM	263,95 (03-04)	0,993	139,9	34,40 (83-84)	0,011	94,0

3.4.5. Le cycle inter-mensuel et mensuel des précipitations

L'étude mensuelle des précipitations de l'année et leurs variations déterminent, en relation avec d'autres facteurs, l'écoulement saisonnier et par là même le régime des cours d'eau, l'érodabilité des sols et le transport des matériaux en suspension (Bouanani, 2005). Leur analyse permet d'avoir un aperçu sur leur distribution et leur concentration à travers les mois de l'année.

L'étude du cycle mensuel des pluies étudiées dans l'ensemble des stations pluviométriques des trois bassins sera compléter par le calcul de deux autres indices de concentration des pluies : l'indice de Fournier (IF) et l'indice de Fournier-Arnouldus (IFA). Ces deux indices expliquent aussi l'impact d'érosivité des pluies. L'indice de Fournier s'exprime par le carré de la pluviométrie moyenne, du mois le plus pluvieux de l'année, à la pluviométrie annuelle. Le second est une forme modifiée par Arnould. Il consiste à effectuer la somme des indices de Fournier pour les douze mois de l'année. Ils s'expriment par les formules suivantes :

$$IF = \frac{P_{max}^2}{P} \quad (21)$$

$$FA = \sum_1^{12} \frac{p^2}{P} \quad (22)$$

Où

IF : Indice de Fournier.

Pmax : La pluviométrie du mois le plus pluvieux (humide) (mm).

IFA : Indice de Fournier-Arnouldus.

p : La pluviométrie moyenne mensuelle (mm).

P : la pluviométrie moyenne annuelle (mm).

3.4.5.1. Le coefficient de variation

L'analyse des données mensuelles relatives aux différentes périodes étudiées pour l'ensemble des stations pluviométriques met en évidence une forte variabilité mensuelle des précipitations sur toutes les stations pluviométriques. Le degré de variabilité exprimé par le

coefficient de variation montre son augmentation dans le sens inverse de la moyenne et de l'écart type. Les valeurs les plus grandes du coefficient de variation sont remarquables dans la majorité des stations en saison estivale. Il ressort du tableau 22 que plus de 58% de ces valeurs sont inférieures à 1.

Au bassin *Kebir Hammam*, si l'écart type reste relativement constant d'un mois à l'autre, le coefficient de variation connaît des fluctuations importantes, notamment pour les mois dont la valeur est inférieure à la moyenne. La valeur maximale enregistrée est de 2,28 à la station *d'Azzaba Pépinière* au mois de juillet.

Aux stations pluviométriques contrôlant le bassin de *Reboa* et *Oued El Hai*, les valeurs élevées du coefficient de variation ne concernent pas uniquement la période sèche, mais aussi quelques mois de la période humide. Cette rupture de la période humide par des mois secs accentue un peu plus cette variabilité. Aux stations *Seguene*, *Reboa*, *Ain Tinn*, *Bouhmar*, le coefficient de variation dépasse la valeur de 1 aux mois d'Octobre, Novembre et même de Janvier.

Aux stations de *Biskra Secteur*, *Menaâ*, *Djemorah* et *Biskra O.N.M* situées au sud du bassin *Oued El Hai*, le coefficient de variation est supérieur à 1. Ce qui exprime une sécheresse absolue des 12 mois de l'année.

Tableau 22 : Moyenne, écart-type, et coefficient de variation des séries Pluviométriques mensuelles

Bassin	Station	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Année
<i>Kebir Hammam</i>	Bousnib													
	Moyenne	42,19	64,49	93,15	106,55	95,27	84,11	70,30	69,52	41,91	13,74	6,43	10,53	698,18
	Ecartype	41,49	45,58	66,37	81,16	61,42	58,14	37,49	45,09	38,50	17,69	10,77	13,13	175,47
	CV	0,98	0,71	0,71	0,76	0,64	0,69	0,53	0,65	0,92	1,29	1,67	1,25	0,25
	El Harrouch													
	Moyenne	35,26	52,17	67,68	91,32	83,44	75,68	66,41	54,21	35,54	12,07	3,02	6,62	583,42
	Ecartype	31,45	36,82	52,32	72,01	59,36	49,97	42,24	34,81	26,51	12,83	6,45	8,61	132,90
	CV	0,89	0,71	0,77	0,79	0,71	0,66	0,64	0,64	0,75	1,06	2,13	1,30	0,23
	Bekkouchelakhder													
	Moyenne	29,60	48,05	64,20	89,72	86,35	76,67	66,71	47,46	22,16	9,67	1,13	5,75	547,48
	Ecartype	32,21	46,69	67,69	61,62	51,24	60,14	52,47	39,75	20,25	16,53	2,34	8,81	163,48
	CV	1,09	0,97	1,05	0,69	0,59	0,78	0,79	0,84	0,91	1,71	2,08	1,53	0,30
	Bouati Mahmoud													
	Moyenne	41,05	65,17	79,46	105,03	97,12	87,30	79,06	60,64	48,66	15,98	4,54	8,80	692,81
	Ecartype	37,30	49,87	67,59	76,07	62,17	60,92	47,13	36,67	41,57	19,69	8,37	10,88	180,44
	CV	0,91	0,77	0,85	0,72	0,64	0,70	0,60	0,60	0,85	1,23	1,84	1,24	0,26
	Ain Charchar													
	Moyenne	39,23	73,98	91,95	134,70	112,89	104,65	84,57	66,71	42,91	12,58	2,12	6,99	773,28
	Ecartype	33,59	57,03	75,17	93,42	78,33	80,52	59,83	58,23	36,00	16,94	4,91	9,81	311,19
	CV	0,86	0,77	0,82	0,69	0,69	0,77	0,71	0,87	0,84	1,35	2,32	1,40	0,40
	Berrahal													
	Moyenne	29,63	70,99	87,92	130,99	108,28	91,01	73,72	63,00	37,37	13,12	3,15	7,69	716,85
	Ecartype	25,06	58,45	60,86	89,96	63,16	63,83	50,91	43,03	36,64	16,62	4,46	11,13	158,33
	CV	0,85	0,82	0,69	0,69	0,58	0,70	0,69	0,68	0,98	1,27	1,42	1,45	0,22
Azzaba pépinière														
Moyenne	27,13	59,68	85,88	109,83	95,92	92,74	67,85	46,90	23,25	6,89	1,01	4,26	621,35	
Ecartype	26,60	49,61	66,66	69,45	57,69	71,14	41,89	38,68	24,07	10,10	2,30	7,03	174,43	
CV	0,98	0,83	0,78	0,63	0,60	0,77	0,62	0,82	1,04	1,47	2,28	1,65	0,28	

Tableau 22 : (Suite) Moyenne, écart-type, et coefficient de variation des séries Pluviométriques mensuelles

Bassin	Station	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Année
	Skikda O.N.M													
	Moyenne	43,16	71,90	103,03	135,84	111,50	92,46	81,21	55,97	33,95	11,10	2,50	10,85	753,46
	Ecartype	34,50	47,45	66,25	85,35	59,54	55,48	47,97	35,22	30,42	10,76	4,32	16,53	162,58
	CV	0,80	0,66	0,64	0,63	0,53	0,60	0,59	0,63	0,90	0,97	1,73	1,52	0,22
	Seguene													
	Moyenne	43,26	38,47	47,93	48,01	43,08	34,97	53,40	48,02	40,51	22,75	9,45	13,22	443,07
	Ecartype	29,88	38,86	48,64	39,17	35,06	28,42	43,75	34,83	37,31	25,87	14,93	17,04	144,42
	CV	0,69	1,01	1,01	0,82	0,81	0,81	0,82	0,73	0,92	1,14	1,58	1,29	0,33
	Batna Ferme Exp													
	Moyenne	45,00	32,27	33,64	35,89	34,42	28,76	40,21	42,34	38,83	22,30	9,39	15,72	378,76
	Ecartype	31,22	30,56	29,26	27,14	29,03	21,84	26,73	31,75	30,00	20,68	13,21	14,23	106,88
	CV	0,69	0,95	0,87	0,76	0,84	0,76	0,66	0,75	0,77	0,93	1,41	0,91	0,28
	Reboa													
	Moyenne	36,79	22,39	23,70	26,53	22,02	17,89	34,13	31,62	36,98	19,68	7,52	9,85	289,10
	Ecartype	35,66	25,97	23,03	27,95	18,08	12,55	27,88	27,05	30,91	20,96	9,58	12,65	123,60
	CV	0,97	1,16	0,97	1,05	0,82	0,70	0,82	0,86	0,84	1,06	1,28	1,28	0,43
	Ain Tinn													
	Moyenne	23,30	17,78	21,83	17,18	13,45	11,82	19,08	20,50	17,89	12,14	6,90	15,89	197,75
	Ecartype	20,40	11,83	24,46	14,47	11,15	9,42	14,48	15,21	12,88	9,11	8,15	17,58	53,49
	CV	0,88	0,67	1,12	0,84	0,83	0,80	0,76	0,74	0,72	0,75	1,18	1,11	0,27
	FoumToub													
	Moyenne	46,97	38,20	34,75	42,61	42,16	31,75	49,70	46,46	48,43	24,94	14,37	23,04	443,38
	Ecartype	35,82	39,75	32,03	40,12	45,08	25,84	32,28	33,88	45,07	23,39	20,60	24,18	136,37
	CV	0,76	1,04	0,92	0,94	1,07	0,81	0,65	0,73	0,93	0,94	1,43	1,05	0,31
	Baiou													
	Moyenne	41,39	32,39	38,25	32,75	28,25	25,94	42,77	44,10	38,73	22,93	8,15	22,85	378,49
	Ecartype	40,81	30,06	38,34	24,80	24,59	17,82	27,70	27,93	30,06	20,29	8,70	27,16	105,22
	CV	0,99	0,93	1,00	0,76	0,87	0,69	0,65	0,63	0,78	0,88	1,07	1,19	0,28
	Bouhmar													
	Moyenne	34,09	30,41	30,10	35,34	29,65	23,63	40,99	36,45	29,70	18,61	6,33	11,06	326,37
	Ecartype	43,58	40,08	31,59	35,16	31,26	20,85	39,61	32,78	32,15	22,81	13,08	17,71	145,64
	CV	1,28	1,32	1,05	0,99	1,05	0,88	0,97	0,90	1,08	1,23	2,07	1,60	0,45
	Timgad													
	Moyenne	34,66	24,80	21,61	22,98	24,99	18,88	31,26	34,35	37,45	13,14	8,83	14,44	287,40
	Ecartype	32,61	26,80	24,05	22,64	26,56	18,53	25,65	30,47	31,21	16,04	15,82	19,58	110,53
	CV	0,94	1,08	1,11	0,99	1,06	0,98	0,82	0,89	0,83	1,22	1,79	1,36	0,38
	Sidi Mançar													
	Moyenne	33,53	27,48	28,72	29,62	37,11	25,49	33,94	35,92	33,12	20,09	7,16	7,20	319,38
	Ecartype	30,58	29,39	26,08	24,18	37,28	19,79	24,33	28,30	30,21	24,76	9,03	9,01	108,64
	CV	0,91	1,07	0,91	0,82	1,00	0,78	0,72	0,79	0,91	1,23	1,26	1,25	0,34
	Batna O.N.M													
	Moyenne	34,43	24,37	28,66	30,20	29,06	26,57	32,88	35,04	36,28	18,61	6,01	18,34	320,46
	Ecartype	23,18	20,26	25,26	25,86	23,06	18,57	21,28	25,40	33,78	18,51	8,36	19,93	82,22
	CV	0,67	0,83	0,88	0,86	0,79	0,70	0,65	0,72	0,93	0,99	1,39	1,09	0,26
Oued	Biskra secteur													
	Moyenne	14,79	13,42	16,30	10,64	18,74	9,09	16,20	14,48	10,26	4,54	0,52	2,14	131,12
	Ecartype	17,82	21,33	16,83	13,44	25,46	12,56	20,23	19,91	16,12	7,61	1,13	3,85	62,28
	CV	1,20	1,59	1,03	1,26	1,36	1,38	1,25	1,38	1,57	1,68	2,16	1,80	0,47
Hai	Bouzina													
	Moyenne	36,11	28,15	28,57	28,68	24,18	25,94	31,08	32,94	29,09	15,84	3,91	11,82	296,31
	Ecartype	33,91	27,28	26,44	19,92	21,68	21,59	28,46	23,00	28,38	14,38	6,60	14,23	100,21
	CV	0,94	0,97	0,93	0,69	0,90	0,83	0,92	0,70	0,98	0,91	1,69	1,20	0,34
	Medina													
	Moyenne	49,53	40,61	40,81	41,55	37,32	30,91	45,02	42,00	44,82	26,45	13,25	31,13	443,41
	Ecartype	42,92	34,60	36,40	38,28	29,06	26,49	34,24	31,56	41,86	27,80	21,49	32,85	147,49
	CV	0,87	0,85	0,89	0,92	0,78	0,86	0,76	0,75	0,93	1,05	1,62	1,06	0,33

Tableau 22 : (Suite) Moyenne, écart-type, et coefficient de variation des séries Pluviométriques mensuelles

Bassin	Station	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Année
Oued El Hai	Mena													
	Moyenne	31,71	25,28	24,71	21,21	20,80	21,08	27,44	24,03	19,69	11,25	2,94	8,68	238,81
	Ecartype	26,75	29,13	24,03	20,83	22,19	19,59	28,10	19,19	26,72	14,34	8,24	13,49	95,46
	CV	0,84	1,15	0,97	0,98	1,07	0,93	1,02	0,80	1,36	1,27	2,81	1,55	0,40
	OuledChelih													
	Moyenne	38,46	29,08	32,58	34,81	30,16	26,70	35,39	33,47	30,12	12,18	5,63	13,64	322,20
	Ecartype	29,24	27,44	28,23	28,52	24,38	23,62	24,56	24,47	32,36	13,62	9,00	18,84	110,80
	CV	0,76	0,94	0,87	0,82	0,81	0,88	0,69	0,73	1,07	1,12	1,60	1,38	0,34
	El Outaya													
	Moyenne	17,31	17,42	14,73	9,08	11,39	6,78	11,84	17,08	9,12	3,80	1,44	1,22	121,20
	Ecartype	34,60	27,67	16,46	8,68	13,53	6,07	10,48	21,46	12,46	4,82	2,29	1,72	61,30
	CV	2,00	1,59	1,12	0,96	1,19	0,90	0,89	1,26	1,37	1,27	1,59	1,41	0,51
	Djemorah													
	Moyenne	13,35	15,12	15,42	18,08	20,96	12,65	13,95	16,20	12,84	4,00	0,72	4,31	147,60
	Ecartype	20,34	21,82	15,58	32,24	37,91	13,48	16,85	21,07	20,14	7,44	2,65	8,49	76,47
	CV	1,52	1,44	1,01	1,78	1,81	1,07	1,21	1,30	1,57	1,86	3,68	1,97	0,52
	Biskra													
	Moyenne	14,75	13,08	15,86	9,48	12,83	7,65	13,91	13,00	12,18	4,54	1,31	4,96	123,38
Ecartype	13,78	17,00	17,34	9,79	18,07	8,56	19,05	16,10	17,01	5,99	5,05	8,60	49,10	
CV	0,93	1,30	1,09	1,03	1,41	1,12	1,37	1,24	1,40	1,32	3,84	1,73	0,40	

3.4.5.2. Variabilité mensuelle des pluies

L'interprétation des données pluviométriques mensuelles pour l'ensemble des stations du bassin *Kebir Hammam* montre que le régime pluviométrique passe par deux périodes bien distinctes (Fig. 42). La première humide débute au mois d'Octobre et s'achève au mois de Mars sur l'ensemble des stations étudiées. L'exception concerne la station *d'El Harrouch*, la période humide y est la plus longue. Elle commence plus tôt au mois de Septembre pour s'étaler jusqu'au mois de Mai. Les pluies moyennes mensuelles enregistrées lors de cette période varient de 48,05 mm, valeur moyenne maximale enregistrée à la station de *Bekkouche Lakhder* au mois d'Octobre à 136,3 mm, valeur moyenne maximale enregistrée à la station *Skikda O.N.M* au mois de Décembre. La deuxième est sèche et correspond à la saison estivale (de Juin à Août). Elle est caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué. Le mois de Juillet est le plus déficitaire. A la station *d'Azzaba* les pluies enregistrées en ce mois atteignent seulement de 1,01 mm. L'écart pluviométrique entre les mois les plus pluvieux et les mois les plus secs dépassent 95% dans toutes les stations pluviométriques.

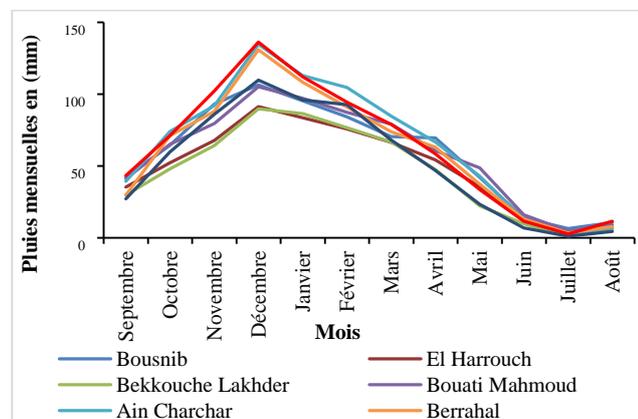
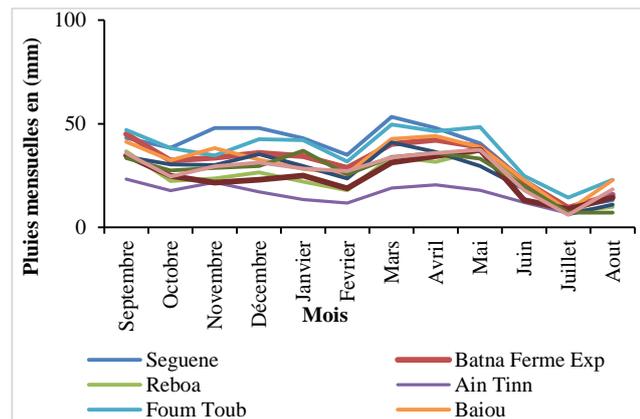


Fig. 42 : Distribution des pluies moyennes inter-mensuelles
-Stations bassin *Kebir Hammam*-

Les données mensuelles pluviométriques choisies pour le bassin *Reboa* montrent également deux périodes humides (Fig. 43). La première débute vers l'Automne au mois de Septembre et s'achève en début d'Hiver (mois de Janvier). Cette période est perceptible sur les stations de : *Seguene*, *Batna ferme*, *Bouhmar* et *Sidi Mancar*. Dans le reste des stations, la période humide reste indéterminable (succession de mois humides et d'autres relativement secs). Le maximum des pluies est enregistré au mois de Septembre sur 10 stations pluviométriques. A la station *Seguene*, la pluie maximale pour la période étudiée est d'une valeur moyenne de 48,0 mm, enregistrée au mois de Décembre. La deuxième reprend au mois de Mars après un mois déficitaire (Février). Elle s'étale jusqu'au mois de Mai sur l'ensemble des stations pluviométriques. Les maximums pluviométriques mensuels varient d'un mois à un autre à travers les stations étudiées. La période sèche caractérise les mois d'été (Juin, juillet et Août). Le mois de Juillet reste le plus déficitaire dans la majorité des stations. A la station de *Batna O.N.M*, les pluies minimales enregistrées en ce mois sont de l'ordre de 6,1 mm. Souvent, l'essentiel des pluies de ces mois secs est occasionné essentiellement par des orages violents et de courtes durées. L'écart entre les pluies moyennes minimales et maximales atteint 71% sur toutes les stations du *Reboa*.



**Fig. 43 : Distribution des pluies moyennes inter-mensuelles
-Stations bassin *Reboa*-**

Aux stations pluviométriques du bassin *Oued El Hai*, la situation climatique est analogue à celle du bassin de *Reboa* : Deux périodes humides (Fig. 44). La première commence au mois de Septembre et s'achève en Novembre, et la seconde apparaît au mois de Février et se prolonge jusqu'au mois de Mai. Pour la première période, le maximum pluviométrique apparaît au mois de Septembre dans 5 stations parmi les 9 étudiées. Les stations *Medina Lanasser* et *Ouled Chelih* ont enregistré les valeurs mensuelles maximales respectives de 49.54 et 38.48 mm. Pour la deuxième période, les valeurs maximales s'observent surtout au mois de Mars (5 stations) et Avril (3 stations). La station *Medina Lanasser* a enregistré le maximum de pluie avec un volume de 45.02 mm au mois de Mars. La période sèche va de Juin à Août. Le mois de Juillet est encore le plus déficitaire dans toutes les stations étudiées. A la station de *Biskra Secteur* et *Djemorah*, les pluies minimales enregistrées en ce mois sont respectivement de 0.52 et 0.72 mm. L'écart entre les pluies moyennes minimales et maximales varie de 16 mm à *El Outaya* et 36 mm à *Medina Lanasser*, station qui a enregistré le plus de pluies.

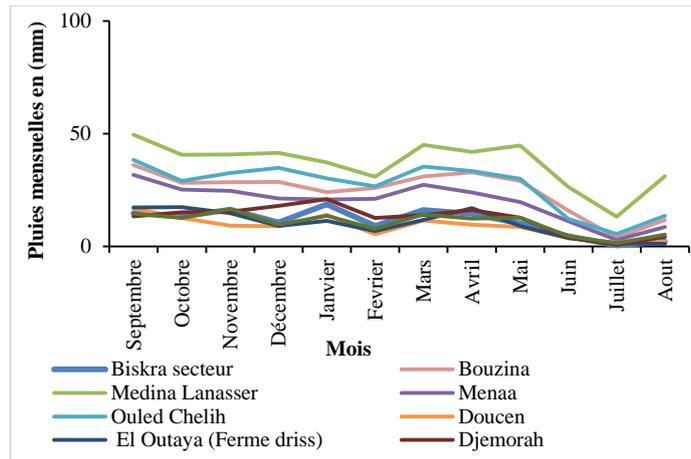


Fig. 44 : Distribution des pluies moyennes inter-mensuelles –stations bassin *Oued El Hai-*

3.4.5.3. La concentration des pluies

Dans le bassin *Kebir Hammam*, les pluies de Décembre sont dominantes dans toutes les stations (Tableau 23). L'indice de Fournier varie de 14,2 (Station *El Harrouch*) à 24,4 (Station *Skikda O.N.M*). L'indice de Fournier-Arnoldus ne suit pas la même chronologie que le premier. Il varie de 65,7 (Station *Bekkouche Lakhder*) à 91,7 (Station *Ain Charchar*).

Dans le bassin *Reboa*, le mois de concentration des pluies varie d'une station à une autre. Cependant, les valeurs de l'indice de Fournier IF évoluent vers les mois automnaux (Mars, Avril et Mai) dans sept stations. L'indice de Fournier-Arnoulds, s'estompe en comparant des valeurs calculées au bassin *Kebir Hammam*. Il varie de 17,7 (station *Ain Tinn*) et 42,0 (Station *Seguene*).

Quant aux stations de *Oued El Hai*, les pluies se concentrent au mois de Septembre aux stations *Bouzina*, *Medina Lanasser*, *Menaâ* et *Ouled Chelih*. L'indice de Fournier en général varie de 2,2 (Station *Biskra O.N.M*) et 5,53 (Station *Medina Lanasser*). Tandis que, les valeurs de l'indice de Fournier-Arnoulds fléchissent autour de 12,4 (Station *Biskra ONM*) et 39,4 (Station *Medina Lanasser*).

Des relations entre ces deux indices ont été établies ainsi que leurs relations avec les pluies moyennes inter-annuelles. Malgré les paramètres pris en considération pour leur calcul, les deux indices montrent l'existence d'une bonne corrélation entre eux. Le coefficient de corrélation étant de 0,92 au bassin *Kebir Hammam* et de 0,97 à *Oued El Hai*. En revanche, bien que les deux indices accordent de bons rapports avec les pluies moyennes interannuelles en générale, l'indice IFA est celui qui répond le plus fidèlement à cette relation. Les valeurs du coefficient de corrélation entre les deux termes arrivent à 0,99 aux deux bassins *Reboa* et *Oued El Hai*. Cet indice tient compte de la moyenne des précipitations mensuelles, ce qui implique la participation de l'ensemble des pluies précipitées, à l'érosion hydrique dans les bassins. Par contre, l'indice de Fournier n'intègre que les précipitations d'une courte période (un mois pluvieux) sachant que l'année est soumise à plusieurs événements pluvieux.

Tableau 23 : L'indice de fournier

Bassin	Station	Mois pluvieux	pi (mm)	P	IF	IFA	Relation « R » IF/IFA
Kebir Hammam	Bekkouche Lakhder	Décembre	89,72	547,48	14,70	65,78	0,94
	Bouati Mahmoud	Décembre	105,03	692,81	15,92	76,47	
	Azzaba pépinière	Décembre	109,83	621,35	19,41	78,78	
	Bou Snib	Décembre	106,55	698,18	16,26	77,33	
	El Harrouch	Décembre	91,32	583,42	14,29	65,79	
	Ain Charchar	Décembre	134,70	773,28	23,47	91,77	
	Berrahal	Décembre	130,99	716,85	23,93	86,28	
	Skikda ONM	Décembre	135,84	753,46	24,49	90,57	
Reboa	Seguene	Mars	53,40	443,07	6,44	42,01	0,92
	Batna Ferme Exp	Septembre	45,00	378,76	5,35	34,98	
	Reboa	Mai	36,98	289,10	4,73	27,67	
	Ain Tinn	Septembre	23,30	197,75	2,74	17,71	
	Foum Toub	Mars	49,70	443,38	5,57	40,16	
	Baiou	Avril	44,10	378,49	5,14	34,76	
	Bouhmar	Avril	40,99	326,37	5,15	30,88	
	Timgad	Mai	37,45	287,40	4,88	27,18	
	Sidi Mancar	Janvier	37,11	319,38	4,31	30,23	
	Batna O.N.M	Mai	37,46	326,48	4,30	30,08	
	Oued El Hai	Biskra secteur	Janvier	18,74	131,12	2,68	
Bouzina		Septembre	36,11	296,31	4,40	28,00	
Medina Lanasser		Septembre	49,53	443,41	5,53	39,44	
Menaâ		Septembre	31,71	238,81	4,21	23,07	
Ouled Chelih		Septembre	38,46	322,20	4,60	30,62	
El Outaya (Ferme driss)		Octobre	17,42	121,20	2,50	13,29	
Djemorah		Janvier	20,96	147,60	2,98	15,09	
Biskra O.N.M		Novembre	16,64	125,70	2,20	12,44	

3.4.6. Les régimes pluviométriques saisonniers

Une étude plus approfondie des régimes pluviométriques devrait en particulier saisir la répartition des pluies selon les saisons. Celle-ci, permet de mieux traduire les nuances entre les différents climats des bassins. Il a été calculé dans les postes pluviométriques l'indice de concentration des pluies de Peguy IP (Tableau 24). Cet indice traduit la concentration des pluies au cours des trois mois consécutifs dont la somme des hauteurs d'eau est la plus forte. Sa formule est la suivante :

$$IP = \frac{\text{Σ3 mois successifs les plus pluvieux}}{\text{La moyenne mensuelle de l'année la plus pluvieuse}} \quad (23)$$

Tableau 24 : Concentration des pluies par indice de Peguy

Bassin	Station	Les mois pluvieux	La somme des mois	Ipeguy
Kebir Hammam	Bekkouche Lakhder	Déc. jan. fév.	252,75	2,57
	Bouati Mahmoud	Déc. jan. fév.	289,46	2,15
	Azzaba pépinière	Déc. jan. fév.	298,49	2,77

Tableau 24 (Suite) : Concentration des pluies par indice de Peguy

Bassin	Station	Les mois pluvieux	La somme des mois	Ipeguy
	Bou Snib	Déc. jan. fév.	285,92	2,08
	El Harrouch	Déc. jan. fév.	250,45	2,26
	Ain Charchar	Déc. jan. fév.	352,25	2,51
	Berrahal	Déc. jan. fév.	330,28	2,56
	Skikda ONM	Nov. déc. jan	350,37	2,61
Reboa	Seguene	Mar. avr. mai.	141,93	1,41
	Batna Ferme Exp	Mar. avr. mai.	121,38	1,41
	Reboa	Mar. avr. mai.	102,73	1,65
	Ain Tinn	sept. oct. Nov.	62,91	1,40
	Foum Toub	Mar. avr. mai.	144,59	1,45
	Baiou	Mar. avr. mai.	125,60	1,49
	Bouhmar	Mar. avr. mai.	107,14	1,47
	Timgad	Mar. avr. mai.	103,07	1,68
	Sidi Mancar	Mar. avr. mai.	102,98	1,43
	Batna O.N.M	Mar. avr. mai.	107,22	1,47
Oued El Hai	Biskra secteur	Nov. déc.jan.	45,68	0,53
	Bouzina	Mar. avr. mai.	93,11	0,46
	Medina Lanasser	Mar. avr. mai.	131,84	0,42
	Menaa	sept. oct. nov.	81,69	0,52
	Ouled Chelih	sept. oct. nov.	100,12	0,45
	El Outaya (Ferme	sept. oct. nov.	49,46	0,69
	Djemorah	Nov. déc. jan	54,46	0,58
	Biskra O.N.M	sept.oct. nov.	43,89	0,54

La distribution saisonnière de la précipitation est aussi variable par station et par bassin. A travers la lecture des valeurs représentées au tableau 24 on peut déduire ce que :

Dans les stations pluviométriques du bassin *Kebir Hammam*, Les précipitations sont significatives aux trois saisons (hiver, printemps, automne), bien qu'un peu plus prononcées en hiver. Les pluies cumulées en cette saison dépassent largement 40% des totaux annuels de la période étudiée. L'indice de concentration des pluies de Peguy (Tableau 24) en cette saison montre une certaine stabilité sans grandes variations. Il a atteint une valeur moyenne de 2. L'exception concerne la station de *Skikda*. La concentration des pluies débute en automne et se prolonge jusqu'à la saison d'hiver (Tableau 25). En Eté, le régime pluvial s'inverse complètement pour enregistrer des valeurs minimales qui varient entre 1,96% à *Azzaba pépinière* et 4,4% à *Bousnib*, des cumuls totaux des précipitations. L'automne et le printemps se partagent équitablement le reste des pluies annuelles.

Les postes pluviométriques du bassin *Reboa*, manifestent un régime saisonnier assez peu changeant. En majorité, le bassin reçoit les pluies printanières avec un maximum affectant tous les mois de la saison selon les années. Les valeurs de l'indice de concentration saisonnière de Peguy s'affaiblissent de 1,41 à la station de *Seguene* et *Batna Ferme* à 1,68 à la station de *Timgad*.

Les stations de *Bouzina* et *Medina Lanasser* affichent au bassin *Oued El Hai* un maximum pluviométrique printanier. Il est un peu précoce (automne) pour le reste des stations. Les valeurs de l'indice de Peguy reculent en comparaison avec ceux des bassins *Kebir Hammam* et *Reboa*. Ils varient de 0,42 à la station de *Bouzina* à 0,69 à la station *El Outaya*.

La saison estivale assure elle aussi une pluviométrie à peine inférieure aux autres saisons de l'année dans toutes les stations étudiées. Les mois consécutifs les moins arrosés sont juin, juillet et aout et les taux pluviométriques faibles enregistrés par rapport aux totaux annuels sont dû aux orages assez fréquents qui ponctuent le début de cette saison du fait de températures maximales journalières plus élevées.

Tableau 25 : Distribution saisonnière des pluies par station

Bassin	Station		Saisons				
			Automne	Hiver	Printemps	Été	Total
Kebir Hammam	Bousnib	mm	199.84	285.92	181.72	30.70	698.18
		%	28.62	40.95	26.03	4.40	100
	El Harrouch	mm	155.11	250.45	156.16	21.71	583.42
		%	26.59	42.93	26.77	3.72	100
	Bekkouche	mm	141.85	252.75	136.34	16.55	547.48
		%	25.91	46.17	24.90	3.02	100
	Bouati Mahmoud	mm	185.68	289.46	188.36	29.32	692.81
		%	26.80	41.78	27.19	4.23	100
	Ain Charchar	mm	205.15	352.25	194.19	21.69	773.28
		%	26.53	45.55	25.11	2.80	100
	Berrahal	mm	188.53	330.28	174.09	23.96	716.85
		%	26.30	46.07	24.28	3.34	100
	Azzaba pépinière	mm	172.69	298.49	138.00	12.16	621.35
		%	27.79	48.04	22.21	1.96	100
Skikda O.N.M	mm	218.09	339.80	171.13	24.45	753.46	
	%	28.94	45.10	22.71	3.24	100	
Reboa	Seguene	mm	129.66	126.07	141.93	45.42	443.07
		%	29.26	28.45	32.03	10.25	100
	Batna Ferme Exp	mm	110.91	99.06	121.38	47.41	378.76
		%	29.28	26.15	32.05	12.52	100
	Reboa	mm	82.88	66.45	102.73	37.05	289.10
		%	28.67	22.98	35.53	12.82	100
	Ain Tinn	mm	62.91	42.45	57.46	34.92	197.75
		%	31.81	21.47	29.06	17.66	100
	Foum Toub	mm	119.92	116.53	144.59	62.35	443.38
		%	27.05	26.28	32.61	14.06	100
	Baiou	mm	112.02	86.95	125.60	53.92	378.49
		%	29.60	22.97	33.18	14.25	100
	Bouhmar	mm	94.60	88.62	107.14	36.00	326.37
		%	28.99	27.15	32.83	11.03	100
	Timgad	mm	81.07	66.85	103.07	36.41	287.40
		%	28.21	23.26	35.86	12.67	100
	Sidi Mançar	mm	89.73	92.22	102.98	34.45	319.38
		%	28.10	28.87	32.24	10.79	100
Batna O.N.M	mm	87.46	85.83	104.19	42.97	320.46	
	%	27.29	26.78	32.51	13.41	100	
Oued El Hai	Biskra secteur	mm	44.5	38.5	40.9	7.2	131.1
		%	33.9	29.3	31.2	5.5	100
	Bouzina	mm	92.8	78.8	93.1	31.6	296.3
		%	31.3	26.6	31.4	10.7	100
	Medina Lanasser	mm	131.0	109.8	131.8	70.8	443.4
		%	29.5	24.8	29.7	16.0	100
	Menaâ	mm	81.7	63.1	71.2	22.9	238.8
		%	34.2	26.4	29.8	9.6	100
	Ouled Chelih	mm	100.1	91.7	99.0	31.4	322.2
		%	31.1	28.5	30.7	9.8	100

Tableau 25 (Suite) : Distribution saisonnière des pluies par station

Bassin	Station		Saisons				
			Automne	Hiver	Printemps	Été	Total
Oued El Hai	El Outaya	mm	49.5	27.3	38.0	6.5	121.2
		%	40.8	22.5	31.4	5.3	100
	Djemorah	mm	43.9	51.7	43.0	9.0	147
		%	29.7	35.0	29.1	6.1	100.0
	Biskra O.N.M	mm	43.7	30.0	39.1	10.8	123
		%	35.4	24.2	31.6	8.8	100

3.4.7. Analyses fréquentielle des précipitations journalières maximales

L'étude des pluies journalières maximales présente un intérêt tout particulier lorsqu'on parle en termes de risque. L'estimation de la récurrence de pluies extrêmes fournit des éléments indispensables pour la construction d'infrastructures telles que les digues (A. Benkhaled, 2007). Autant, L'estimation de leur fréquence d'occurrence ou de manière équivalente la période de retour par une loi d'ajustement a toujours été d'un grand intérêt pour anticiper des catastrophes, telles que des inondations, et ainsi permettre un aménagement réfléchi du territoire.

Le choix de la loi d'ajustement peut être crucial. Une analyse statistique d'ajustement automatique des séries annuelles des pluies maximales a été réalisée par Hyfran Plus (Annexe 4). Plusieurs lois de distribution ont été testées et l'ajustement retenu à partir de représentation graphique et du test du χ^2 . Les fréquences empiriques ont été calculées à partir de la relation de Hazen ⁽²⁾. Les paramètres de la loi ont été déterminés par la méthode de maximum de vraisemblance pour un intervalle de confiance 95%.

Il ressort de ces résultats que la loi log-normale répond la mieux aux données des pluies annuelles maximales journalières de toutes les stations des bassins à comparer des autres lois. Les figures en annexe 4 présentent résultats et le tableau 26 synthétise les quantiles de diverses périodes de retour (5, 10, 20, 50,100 et 1000 ans).

Tableau 26 : Quantités des précipitations maximales journalières

Bassin	Période de retour	2	10	20	50	100	1000	Moyenne	Ecart type	CV
	Fréquence	0.5	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999			
	Variable réduite de Gumbel	0.00	1.28	1.64	3.05	2.32	3.09			
Kebir Hamman	Bekkouche Lakhder	142,26	240,17	278,60	329,27	368,07	502,92	310,22	122,44	0,39
	Bouati Mahmoud	53,09	93,15	109,24	130,71	147,32	205,95	123,24	51,96	0,42
	Azzaba pépinière	41,71	61,04	67,99	76,77	83,24	104,44	72,53	21,23	0,29
	Bou Snib	56,94	99,47	116,52	139,22	156,77	218,62	131,26	54,95	0,42
	El Harrouch	47,00	83,58	98,39	118,23	133,63	188,31	111,52	48,06	0,43
	Ain Charchar	49,92	70,51	77,76	86,82	93,43	114,78	82,20	21,94	0,27
	Berrahal	55,32	91,71	105,85	124,38	138,50	187,22	117,16	44,76	0,38

² La fréquence de Hazen est alors calculée selon la formule :

$$F_{Hazen} = \frac{1}{N}(r - 0.5)$$

Tableau 26 (Suite) : Quantités des précipitations maximales journalières

Bassin	Période de retour	2	10	20	50	100	1000	Moy enne	Ecar type	CV
	Fréquence	0.5	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999			
	Variable réduite de Gumbel	0.00	1.28	1.64	3.05	2.32	3.09			
<i>Reboa</i>	Ain Tinn	45,34	76,73	89,07	105,35	117,82	161,23	99,26	39,35	0,40
	Baiou	40,21	65,60	75,37	88,11	97,78	130,92	83,00	30,77	0,37
	Seguene	46,09	80,54	94,35	112,74	126,95	177,06	106,29	44,51	0,42
	Bouhmar	35,51	62,68	73,64	88,29	99,64	139,82	83,26	35,46	0,43
	Foum Toub	46,79	75,15	85,96	99,99	110,59	146,68	94,19	33,87	0,36
	Sidi Mancar	34,10	61,51	72,71	87,77	99,50	141,43	82,84	36,52	0,44
	Batna Ferme Exp	35,90	53,59	64,38	74,45	82,01	107,58	69,65	24,65	0,35
	<i>Reboa</i>	28,48	50,64	59,61	71,63	80,95	114,07	67,56	29,11	0,43
	Timgad	30,88	51,36	59,33	69,78	77,75	105,29	65,73	25,25	0,38
<i>Oued El Hai</i>	Biskra Secteur	27,53	54,36	65,93	81,91	94,67	142,03	77,74	39,10	0,50
	Bouzina	33,68	55,52	63,98	75,04	83,46	112,42	70,68	26,71	0,38
	Djemorah	26,37	61,15	77,61	101,50	121,38	200,37	98,06	59,90	0,61
	Menea	35,98	60,97	70,81	83,79	93,74	128,38	78,95	31,37	0,40
	El Outaya (Ferme driss)	25,02	59,30	75,73	99,73	119,83	200,42	96,67	60,46	0,63
	Oued Chelih	34,47	62,05	73,31	88,43	100,21	142,27	83,46	36,68	0,44
	Medina Lanasser	45,74	80,38	94,31	112,89	127,28	178,12	106,45	45,00	0,42

Globalement, l'évolution des quantiles de pluie est proportionnelle à celles des durées de retour. Les coefficients de variations des valeurs pour le bassin *Kebir Hammam* sont compris entre 0.27 et 0.43. A *Reboa*, ils passent de 0.35 à 0.44 et de 0.40 et 0.38 et 0.63. Ces valeurs témoignent de l'homogénéité spatiale des pluies annuelles maximales journalières d'une station à une autre et d'un bassin à l'autre.

Tableau 27 : Nombres de jours de pluies maximales par mois et par station

Bassin	Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Année
<i>Kebir Hammam</i>	Bousnib	2	4	10	9	7	5	3	2	4	0	0	0	46
	El Harrouch	2	1	6	11	10	8	4	1	3	0	0	0	46
	Bekkouche lakhder	3	2	6	14	8	6	4	3		0	0	0	46
	Bouati Mahmoud	2	5	5	11	9	4	2	4	2	1	0	1	46
	Ain Charchar	3	2	4	21	3	8	2	1	2	0	0		46
	Berrahal	1	5	10	11	7	3	6		2	0	0	1	46
	Azzaba pépinière	3	8	8	13	5	5	1	2	1	0	0	0	46
	Moyenne	2	4	7	13	7	6	3	2	2	0	0	0	47
<i>Reboa</i>	Seguene	6	4	6	4	3	1	5	6	6	2	1	1	45
	Batna	6	6	5	4	3	2	4	3	7	3	1	1	45
	<i>Reboa</i>	5	4	6	3	2	1	2	5	11	2	0	4	45
	Ain Tinn	7	5	8	3	3	1	6	4	4	0	0	4	45
	Foum Toub	4	8	3	4	4	2	4	5	4	2	1	4	45
	Baiou	8	4	7	5	1	1	5	3	3	4	0	4	45
	Bouhmar	7	5	4	2	3	1	7	5	5	3	0	3	45
	Timgad	6	4	4	3	4	1	4	3	11	3	0	2	45
	Sidi Mancar	8	2	4	5	7	2	3	3	3	4	0	4	45
	Moyenne	6	5	5	4	3	1	4	4	6	3	0	4	45

Tableau 27 (Suite) : Nombres de jours de pluies maximales par mois et par station

Bassin	Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août	Année
Oued El Hai	Biskra	5	5	4	2	9	3	4	4	6	1	0	0	43
	Bouzina	8	5	2	6	2	1	4	2	7	2	0	4	43
	Medina Lanasser	5	3	7	5	4	2	3	4	4	3	0	3	43
	Menaa	10	5	7	4	1	1	6	3	4	1	0	1	43
	Ouled Chelih	9	4	7	4	1	3	7	2	4	1	0	1	43
	El Outaya	10	6	8	0	1	0	4	8	5	1	0	0	43
	Djemorah	6	5	4	2	5	3	3	6	5	1	0	3	43
	Moyenne	<u>8</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>1</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>43</u>

D'après le tableau 28, on peut voir qu'au bassin *Kebir Hammam*, il pleut presque la moitié de l'année. Le nombre de jours des pluies maximales dans les stations situées au bassin *Kebir Hammam* correspondent à la période allant du mois de Novembre au mois de Février. A la station *d'Ain Charchar*, la fréquence annuelle des pluies maximales est de 21 jours enregistrés au mois de Décembre. A la station de *Bekkouche Lakhder*, une valeur annuelle des pluies maximales enregistrée est de 295,20 mm en année hydrologique 1998/1999, sa période de retour calculée est de 14 ans (Tableau 28).

Aux bassins *Reboa* et *Oued El Hai*, les pluies annuelles maximales des plus importantes apparaissent sur deux périodes. Les premières sont automnales, elles vont de Septembre à Novembre. La deuxième printanière, elle commence le mois de Mars et se prolonge jusqu'au mois de Mai. A la station *Ain Tinn*, la pluie annuelle maximale journalière enregistrée est de 143 mm, sa période de retour calculée est de 398 ans. Tandis qu' à la station *Medina Lanasser* la pluie annuelle maximale journalière enregistrée en 2005/2006 est de 160 mm, sa période de retour est de 452 ans.

Tableau 28 : Périodes de retour des pluies maximales journalières

Bassin	Station	Pjmax	Année	Fréquence	Période de retour
Bassin Oued El Hammam	Bekkouche Lakhder	295,20	1998/1999	0,929	14,10
	Bouati Mahmoud	130,10	1999/2000	0,979	48,70
	Azzaba pépinière	77,59	1982/1983	0,982	54,60
	Bou Snib	174,00	1971/1972	0,995	194,40
	El Harrouch	142,00	1982/1983	0,993	144,60
	Ain Charchar	88,50	1996/1997	0,983	59,60
	Berrahal	176,00	1972/1973	0,998	597,00
Bassin Reboa	Ain Tinn	143,00	1982/1983	0,997	389,00
	Baiou	128,00	1969/1970	0,999	843,80
	Seguene	129,80	1982/1983	0,991	114,70
	Bouhmar	102,50	2007/2008	0,992	118,80
	Foum Toub	139,00	1989/2000	0,998	618,70
	Sidi Mancar	81,30	1970/1971	0,970	33,80
	Batna Ferme Exp	64,60	2010/2011	0,951	20,40
	<i>Reboa</i>	88,37	2007/2008	0,994	171,30
Timgad	93,70	2007/2008	0,997	387,10	

Tableau 28 (Suite) : Périodes de retour des pluies maximales journalières

Bassin	Station	Pjmax	Année	Fréquence	Période de retour
Bassin Oued El Hai	Biskra Secteur	66,30	2003/2004	0,951	20,50
	Bouzina	82,30	1976/1977	0,989	91,00
	Djemorah	92,00	1972/1973	0,972	35,10
	Menaa	98,40	1976/1977	0,993	137,80
	El Outaya (Ferme driss)	129,13	2011/2012	0,993	135,20
	Oued Chelih	79,60	1988/1989	0,966	29,40
	Medina Lanasser	160,00	2005/2006	0,998	452,3

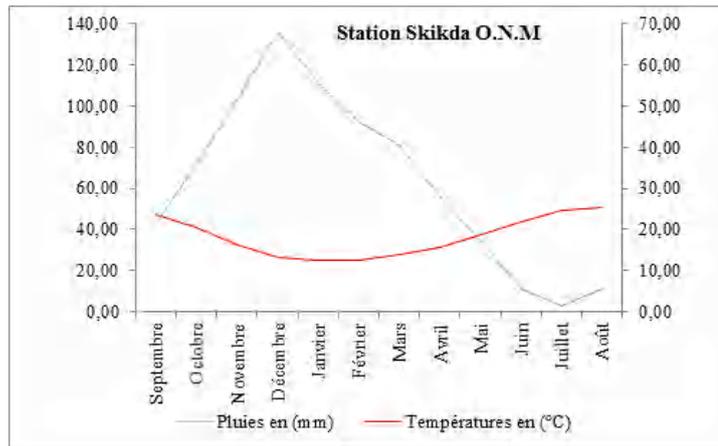
3.5. Le régime thermique

La température de l'air autant que la pluviométrie est une caractéristique importante du climat. Tout comme les précipitations, les températures déterminent la distribution possible de la couverture végétale et constituent un facteur de la genèse et de l'évolution des sols. La raréfaction des précipitations annuelles conduit à une diminution de la densité de la végétation, qui devient progressivement plus mince et plus clairsemé. A ce stade, les sols sont directement exposés aux contraintes d'humidité et de température exercées par les forts écarts journaliers et saisonniers ce qui provoque leur désagrégation.

Encore, les températures généralement élevées et les faibles précipitations conduisent à une production médiocre de matières organiques et à une oxydation rapide. La rareté des matières organiques entraîne à son tour une faible agrégation et une stabilité médiocre des agrégats, d'où une forte probabilité d'érosion éolienne et hydrique.

Le climat du *Kebir Hammam* est caractérisé par la douceur de ses températures. Sa position géographique face à la mer méditerranéenne joue le rôle de régulateur. Le cycle des températures annuel est caractérisé globalement par deux grandes saisons (Fig. 45) : la saison chaude (mai à octobre) : les températures varient au niveau de la station de Skikda, de 18 à 25°C en moyenne. Les maxima moyens fluctuent de 23 à 29°C et de 13 à 22°C pour les minima moyens (Tableau 29).

La saison fraîche (Novembre à Avril) : les températures moyennes varient généralement entre 13 et 16°C. Les maxima moyens entre 16 à 21°C et les minima moyens changent de 10 à 14°C et les maxima moyens de 9 à 15°C. Les amplitudes thermiques dans ces deux saisons ne dépassent pas les 7°C.



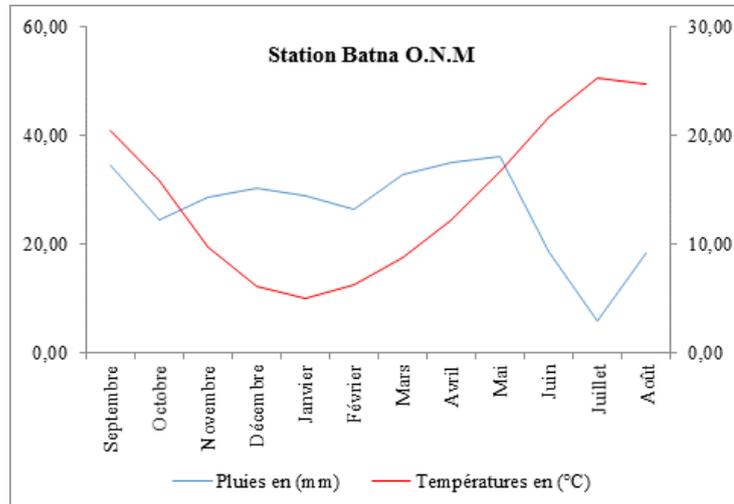
**Fig. 45 : Diagramme ombrothermique de Gaussen
-Station Skikda O.N.M-**

Les deux bassins de la *Reboa* et *Oued El Hai* se caractérisent plutôt par un climat d'abri, en raison de leur position topographique en creux et de leur orientation. Les hivers froids caractérisent surtout le bassin *Reboa*. Les basses températures moyennes annuelles à la station de *Batna O.N.M* s'observent au mois de janvier, 5°C à *Batna* et 11°C à *Biskra*. Les moyennes maximales mensuelles sont au mois de juillet 25.35 à *Batna* et 34.07 à *Biskra*.

Tableau 29 : Les températures moyennes, maximales, minimales mensuelles par station

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aoû	Année
Skikda													
Moyenne	23,58	20,59	16,47	13,38	12,43	12,36	13,79	15,69	18,76	21,84	24,73	25,45	18,26
Ecartype	1,16	1,56	1,30	1,32	1,25	1,31	1,22	1,22	1,32	1,35	1,42	1,35	0,83
CV	0,05	0,08	0,08	0,10	0,10	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05
Max	27,95	25,49	21,13	18,01	16,94	16,74	18,50	20,53	23,17	26,36	28,94	29,72	22,79
Min	20,57	17,63	13,72	10,27	9,27	9,06	10,70	12,95	15,84	19,17	22,10	22,90	17,99
Ampl	7,38	7,86	7,41	7,74	7,67	7,68	7,80	7,58	7,33	7,20	6,83	6,82	4,80
Batna													
Moyenne	20,49	15,86	9,72	6,21	5,06	6,26	8,83	12,22	16,71	21,66	25,35	24,77	14,43
Ecartype	2,25	2,50	1,99	1,58	1,64	1,66	2,07	2,50	2,79	3,30	2,49	2,85	1,68
CV	0,11	0,16	0,20	0,25	0,32	0,26	0,23	0,20	0,17	0,15	0,10	0,12	0,12
Max	29,21	24,25	17,50	13,01	12,52	13,46	17,29	21,00	26,24	31,99	36,01	35,14	23,13
Min	14,31	10,01	4,82	1,22	0,40	0,65	3,08	6,04	9,92	14,36	17,84	17,30	8,33
Ampl	14,90	14,24	12,68	11,79	12,13	12,81	14,21	14,95	16,32	17,62	18,17	17,84	14,81
Biskra													
Moyenne	28,66	22,92	16,39	12,23	11,56	13,26	16,67	20,68	25,67	30,92	34,07	33,35	22,20
Ecartype	1,14	1,72	1,20	1,03	1,14	1,41	1,67	1,56	1,86	1,51	1,28	1,53	0,78
CV	0,04	0,07	0,07	0,08	0,10	0,11	0,10	0,08	0,07	0,05	0,04	0,05	0,04
Max	40,36	34,48	29,24	22,63	17,83	17,43	19,14	23,28	27,53	32,53	37,65	41,02	28,59
Min	23,34	18,09	12,21	7,88	6,92	8,04	11,30	15,13	19,90	24,64	27,92	27,74	16,93
Ampl	17,02	16,39	17,03	14,75	10,91	9,39	7,83	8,15	7,64	7,89	9,72	13,28	11,67

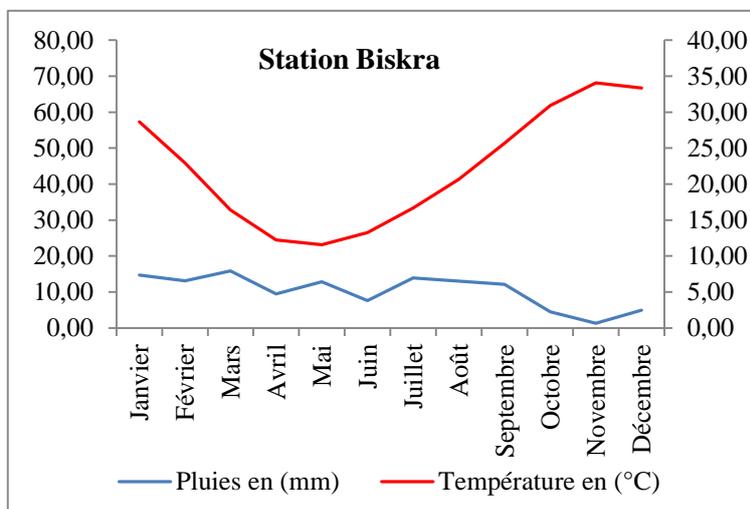
A la station de *Batna O.N.M Reboa*, s’observent deux saisons (Fig. 46). La première Sèche qui va de juin à Octobre, les températures moyennes varient de 16 à 25°C. Les maxima progressent de 26 à 36°C et les minima de 9 à 17°C. La deuxième humide de Novembre à Mai, les températures moyennes en cette période varient de 5 à 16°C. Les minima varient de 0.4 à 9°C. Les maxima de 12 à 27°C. Les amplitudes dépassent largement les 10°C sur l’ensemble des mois.



**Fig. 46 : Diagramme ombrothermique de Gausse
-Station Batna O.N.M-**

Au bassin d’*Oued El Hai*, les températures moyennes mensuelles à la station de *Biskra* varient de 11°C en janvier à 34°C (Fig. 47). La moyenne interannuelle est de 22°C. Le climat est sec au cours de l’année. Les minima varient de 6 à 27°C et les maxima de 17 à 41°C. Les amplitudes dépassent les 17°C.

Les températures, relativement tièdes sur le territoire du bassin *Kebir Hammam*, diminuent vers l’intérieur (bassin *Reboa*) en raison de la continentalité et de l’effet orographique. Elles remontent à nouveau et de façon nette dans le Bas du bassin *Oued El Hai* (effet de la latitude).



**Fig. 47 : Diagramme ombrothermique de
Gausse
-Station Biskra O.N.M-**

3.6. Bilans hydriques

L'eau a comme propriété particulière d'être renouvelable et en transit permanent. Comme ressource renouvelable, elle suit un cycle naturel, un cheminement qui s'accompagne d'un ensemble de transformations. De l'atmosphère, où se forment les nuages, les précipitations arrivent au sol, favorisent le développement des plantes et alimentent les cours d'eaux après avoir ruisselé ou s'être infiltrées. Les cours d'eaux à leur tour aboutissent à la mer ou par évaporation assure le retour d'une partie à l'atmosphère.

Il s'agit d'un mouvement perpétuel, mais non uniforme. Le cycle peut être parcouru rapidement ou lentement. En quelques jours une goutte d'eau évaporée peut tomber sous forme de pluie et revenir à celle-ci. C'est ce qu'on appelle le bilan hydrique. Il est le processus que peut suivre la quantité d'eau tombée sur le sol jusqu'à son retour à l'atmosphère. Il exprime une égalité des pertes et des gains d'eau. Son calcul est simple dans son principe. Il s'agit de résoudre l'expression :

$$P = ETR + R + I \quad (24)$$

Où :

P : Lamé d'eau précipitée en moyenne annuelle.

ETR : Lamé d'eau évapo-transpirée annuelle.

R : Lamé d'eau écoulée.

I : Lamé d'eau infiltrée.

Toutes ces valeurs seront exprimées en lame d'eau, c'est-à-dire en millimètres. L'évapotranspiration, composée de l'évaporation directe, s'effectue à partir des sols humides, des différents plans d'eau et également de la transpiration des végétaux est estimée selon la formule de Thornthwaite suivante :

$$ETP = 16. \left(\frac{10.T}{I}\right)^a \quad (25)$$

Où :

ETP : l'évapotranspiration potentielle en (mm).

T : température moyenne mensuelle en (C°).

I : indice thermique mensuel obtenu par l'équation : $I = \sum_1^{12} i$

i : exposant climatique obtenu par l'équation : $i = \frac{T^{1.514}}{5}$.

a : Indice liée à la température qui est calculé par la formule :

$$a = 0.016.I + 0.5 \quad (26)$$

Certains travaux jugent que les valeurs de l'ETP calculées par la méthode de Thornthwaite sont sous estimées dans les régions arides, ou bien sur estimées dans les régions

humides. C'est pour cette raison que l'ETP calculée est multipliée par un facteur de correction K qui est fonction du temps, du mois et de la latitude du lieu :

$$ETP_{\text{corrigé}} = ETP \cdot K \quad (27)$$

Où :

K : facteur de correction mensuelle dépendant de la latitude et du mois, il est obtenu par l'abaque de la durée d'éclairage.

Les résultats des bilans hydrologiques des trois bassins sont calculés par la méthode de Thornthwaite. La quantité d'eau nécessaire pour qu'un sol soit saturé, prise en compte varie d'un domaine climatique à un autre. Elle est de 100 mm dans un domaine humide, valeur adoptée pour le calcul du bilan hydrique du bassin *Kebir Hammam* et de 50 mm aux domaines semi-arides à arides (cas des bassins *Reboa* et *Oued El Hai*). Ce bilan hydrique mensuel permet de calculer l'évapotranspiration réelle (ETR), le déficit agricole (Da) et l'excédent (ex). La comparaison des valeurs de l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) et des hauteurs des précipitations mensuelles permet de calculer l'évapotranspiration réelle (ETR). Plusieurs cas peuvent se présenter :

1. Si : $P > ETP$ on considère que $ETR = ETP$, la quantité d'eau qui correspond à $P - ETR$ est stockée dans le sol jusqu'à saturation de celui-ci. L'excédent dépassant la réserve cumulée maximale en eau du sol, constitue le surplus et est disponible pour l'écoulement et l'infiltration.
2. Si $P = ETP$, $ETR = ETP = P$ les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol mais il n'y aura pas de surplus pour alimenter la RFU.
3. Si : $P < ETP$, on considère que $ETR = P$ + tout ou partie de réserve en eau du sol jusqu'à épuisement de celle-ci. Lorsqu'il y aura épuisement des réserves et que $ETP > ETR$, $ETP - ETR = Da$.
4. La valeur de l'évapotranspiration réelle annuelle est la somme des valeurs des 12 mois de l'évapotranspiration mensuelle.

Dans le bassin versant *Kebir Hammam*, l'année hydrologique se divise en deux périodes égales : l'hiver hydrologique, de octobre à avril inclus ($P > ETP$). L'été hydrologique, de la mi-mai à septembre inclus ($ETP > P$), au cours duquel les plantes utilisent la totalité des précipitations (Tableau 30). Le bilan de Thornthwaite admet que l'alimentation des cours d'eau est assurée par les précipitations entre le mois de Décembre et le mois de Mars, période de saturation de la réserve utile RFU. Ces surplus alimentent à la fois la vie des plantes pendant l'hiver, l'écoulement pendant toute l'année et la Réserve utile (RFU) qui servira d'appoint pendant l'été.

Cependant, les valeurs de l'évapotranspiration réelle montrent une variabilité d'un mois à un autre. Elles sont maximales entre le mois de Juin et le mois de Juillet. Elles représentent une proportion importante par rapport aux précipitations (68%) pour la période étudiée.

Tableau 30 : Bilan hydrique du bassin *Kebir Hammam* (Station Skikda O.N.M)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jillet	Août	Total
P (mm)	43,2	71,9	103,0	135,8	111,5	92,5	81,2	56,0	33,9	11,1	2,5	10,8	753,5
T(°C)	23,6	20,6	16,5	13,4	12,4	12,4	13,8	15,7	18,8	21,8	24,7	25,4	18,3
I	10,5	8,5	6,1	4,4	4,0	3,9	4,6	5,6	7,4	9,3	11,2	11,7	87,4
ETP	105,3	81,4	53,3	35,9	31,2	30,9	38,0	48,6	68,2	91,0	115,2	121,7	820,6
K	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	0,9	0,8	/
ETP*K	91,6	70,0	54,9	39,5	37,8	37,6	47,2	56,3	70,2	88,3	99,1	102,2	794,7
ETR	43,2	73,8	54,9	39,5	37,8	37,6	47,2	56,4	97,3	11,1	2,5	10,8	512,0
P-ETP	-48,4	1,9	48,1	96,4	73,7	54,8	34,1	-0,4	-36,3	-77,2	-96,6	-91,4	/
RU	0,0	1,9	50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	63,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Da	48,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	36,3	77,2	96,6	91,4	314,0
Ex	0,0	0,0	0,0	46,4	73,7	54,8	34,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	209,0

Dans les bassins de *Reboa* et *Oued El Hai*, l'articulation des différents termes du bilan ne dégage aucun excédent (Tableau 31 et 32) vu les fortes évapotranspirations. L'hiver hydrologique à la station de *Batna O.N.M* est court. Il va de Décembre à Mars. Tandis que l'été hydrologique se prolonge sur le reste des mois (d'Avril à Novembre). L'évapotranspiration réelle totalise 314,6 mm/an, soit plus de 98% des précipitations enregistrées.

Tableau 31 : Bilan hydrique du bassin *Reboa* (Station Batna O.N.M)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jillet	Août	Total
P (mm)	34,4	24,4	28,7	30,2	29,1	26,6	32,9	35,0	36,3	18,6	6,0	18,3	320,5
T(°C)	20,5	15,9	9,7	6,2	5,1	6,3	8,8	12,2	16,7	21,7	25,4	24,8	14,4
I	8,5	5,7	2,7	1,4	1,0	1,4	2,4	3,9	6,2	9,2	11,7	11,3	65,4
ETP	93,6	63,0	29,6	14,8	10,8	15,0	25,5	42,1	68,3	101,9	130,1	125,5	720,0
K	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	0,9	0,8	/
ETP*K	81,4	53,5	30,4	16,1	13,0	18,1	31,3	48,8	70,3	98,9	111,9	105,4	679,3
ETR	34,4	24,3	28,6	17,6	15,8	21,9	31,3	61,4	36,3	18,6	6,1	18,3	314,6
P-ETP	-47,0	-29,2	-1,8	14,1	16,0	8,5	1,6	-13,8	-34,0	-80,3	-105,8	-87,1	/
RFU	0,0	0,0	0,0	14,1	30,1	38,6	40,1	26,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Da	47,0	29,2	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	13,8	34,0	80,3	105,8	87,1	399,0
Ex	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

A la station Météorologique de *Biskra*, le bilan hydrique est déficitaire sur toute l'année. L'évapotranspiration annuelle calculée est de 107 mm/an (98% des précipitations). La recharge de la réserve et le volume d'eau qui retourne aux cours d'eaux est négatif sur tous les mois de l'année.

Tableau 32 : Bilan hydrique du bassin *Oued El Hai* (Station Biskra O.N.M)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jillet	Août	Total
P (mm)	12,6	7,5	13,7	12,8	12,1	4,5	1,3	4,9	14,6	13,0	15,5	9,4	121,9
T(°C)	11,6	13,3	16,6	20,6	25,6	30,9	34,0	33,4	28,6	22,9	16,4	12,2	22,2
I	3,6	4,4	6,2	8,6	11,9	15,8	18,2	17,7	14,1	10,0	6,0	3,9	120,2
ETP	14,6	20,3	35,2	59,3	100,1	157,7	199,1	190,0	131,2	76,4	33,9	16,7	86,2
K	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	0,9	0,9	/
ETP*K	12,9	17,2	36,3	64,6	120,2	189,3	242,9	220,4	135,1	74,1	29,5	14,3	1156,7
ETR	12,7	7,5	13,7	12,8	12,1	4,5	1,3	4,9	0,0	13,0	15,5	9,3	107,2
P-ETP	-0,2	-9,7	-22,6	-51,8	-108,1	-184,8	-241,6	-215,5	-120,5	-61,1	-14,0	-5,0	/
RFU	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Da	0,2	9,7	22,6	51,8	108,1	184,8	241,6	215,5	135,1	61,1	14,0	5,0	1049,5
Ex	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

3.7. Conclusion

Le climat à travers les bassins change considérablement. L'influence des barrières montagneuses telliennes et atlasiques créent des baisses dans les moyennes des précipitations (de 40%) et une augmentation des températures (de 17 %) du Nord (bassin *Kebir Hammam*) au Sud (bassin *Oued El Hai*).

Les pluies montrent une variabilité spatio-temporelle. Dans le bassin du *Kebir Hammam*, la latitude et la proximité de la mer méditerranée lui confèrent un climat humide, caractérisé par de faibles écarts thermiques, de faibles évaporations et des pluies sur une longue période. Dans le bassin de *Reboa* situé à l'intérieur du pays, et dans le bassin de *Oued El Hai* plus au Sud, les températures présentent les plus grandes amplitudes au cours de l'année et les pluies sont de plus en plus rares et se concentrent en quelques mois de l'année. Elles fluctuent à tous les pas de temps (annuel, mensuel et saisonnier) par bassin. Les moyennes pluviométriques pour une période presque commune de 1969 à 2013 varie de 547 mm (Station *Bekkouche Lakhder*) à 773 mm (station *Ain Chachar*) au bassin *Kebir Hammam* ; de 197 mm (Station *Ain Timn*) à 443 mm (station *Foum Toub*) au bassin *Reboa* ; et de 121 mm (Station *El Outaya*) à 433 mm (Station *Medina Lanasser*) à *Oued El Hai*. L'abondance pluviométrique mensuelle dans le bassin *Kebir Hammam* s'étend de Octobre à Mars ; aux bassins *Reboa* et *Oued El Hai*, deux périodes sont observées : de Septembre à Janvier et de Mars à Mai à *Reboa* ; de Septembre à Novembre et de Février à Mai à *Oued El Hai*. Les mois de Juin à Août sont secs dans toutes les stations.

Les chroniques annuelles ne marquent aucune tendance en général sur 77 % des stations étudiées, sauf sur quelques-unes. Les tests de Pettitt et Mann-Kendall ont montré une tendance à la hausse essentiellement dans trois stations situées au bassin *Kebir Hammam* et deux aux bassins *Reboa* et *Oued El Hai* ; et une tendance à la baisse à la station *Seguene* au bassin *Reboa*.

La normalité des années indiquée par l'indice pluviométrique Standardise SPI prédomine et l'indice de déficit pluviométrique IDP affiche la succession des années sèches qui se prolonge du Nord au Sud.

Le bilan hydrique calculé est positif au bassin *Kebir Hammam* de Décembre à Mars, période d'alimentation des cours d'eau suite à une saturation des sols. En revanche, il est déficitaire sur l'ensemble des mois au bassin *Reboa* et *Oued El Hai*. L'évaporation réelle est beaucoup plus grande conséquence des températures élevées.

Chapitre
L'HYDROLOGIE DES BASSINS

4

4.1. Introduction

Dans une thématique telle que l'érosion hydrique, l'étude des débits des cours d'eau à un moment précis et leur évolution dans le temps, est une information importante. Ceux sont des agents de transport de matériaux produits par les phénomènes d'érosion hydrique. Leur connaissance permet d'étudier leur comportement et leur régime hydrologique et par conséquent de déterminer les périodes pendant lesquelles ils sont le plus vulnérables.

L'étude des écoulements dans ce chapitre est anticipée par l'étude morpho-métrique du réseau hydrographique qui compose les trois bassins versants. Elle aura pour objectif de caractériser les écoulements par un ensemble de paramètres hydrologiques tels que : la structure du réseau (Classification de STRAHLER), les longueurs caractéristiques, les profils en long des cours d'eau principaux, etc... qui pourraient intervenir et influencer les débits.

Le comportement hydrologique des écoulements dans les trois bassins est saisi par l'étude de la variabilité des débits saisonniers, annuels et inter annuels. La réaction hydrologique des bassins versants face aux précipitations est déterminée par les apports à l'exutoire et la distribution des valeurs de débits classés.

L'étude de ce chapitre a nécessité une attention particulière à l'analyse des débits extrêmes (crues et étiages). L'étude des débits maximums et l'estimation des volumes de crues, ainsi que leurs périodes d'occurrence constituent en effet une information importante pour caractériser le comportement hydrologique de chaque bassin. Aussi, le calcul des volumes de ces 2 phénomènes est crucial pour la protection des ouvrages hydrauliques existants et la gestion des ressources hydriques.

4.2. Les caractéristiques morpho-métriques du réseau hydrographique

L'étude Morpho-métrique d'un bassin versant consiste à évaluer quantitativement sa forme, son relief, la disposition et la quantité du réseau hydrographique. Leur connaissance permet une meilleure compréhension des phénomènes physiques et hydrologiques régissant l'écoulement de surface. Bon nombre d'indices morpho-métriques caractérise le réseau hydrographique, mais seuls ceux jugés utiles et importants pour notre étude seront traités.

Afin d'affiner l'étude morpho-métrique et celle du réseau hydrographique, les bassins Kebir Hammam et *Reboa* ont été divisés en deux sous entités hydrographiques.

4.2.1. Le réseau hydrographique

Un réseau hydrographique est un ensemble structuré de chenaux qui assurent le drainage superficiel d'un bassin versant. Permanent ou temporaire, il se distingue par son cours principal. Sa formation est fortement liée aux caractéristiques des terrains traversés (géologie, lithologie et tectonique). Ainsi, que d'autres facteurs morphologiques, climatiques et de taux de couverture végétale du bassin. La lithologie intervient beaucoup sur le degré de ramification des cours

d'eau, tandis que la tectonique et le relief ont pour effet d'influer les tracés. Les principaux oueds du réseau hydrographique dans les trois bassins ont tous subi, plus ou moins, cette influence.

Le réseau hydrographique principal du bassin Kebir Hammam est dense. L'étude du profil en long (Fig. 49a) montre dans l'ensemble des pentes hydrographiques extrêmement fortes de l'amont vers l'exutoire.

Le cours d'eau du sous bassin Oued Hammam prend ses sources au Sud-Est du bassin à Djebel Mechoura et à l'Ouest dans la commune de Nechmeya (Guelma), à une altitude de 795 m. Sa longueur à l'exutoire du bassin est de plus de 38 km (Fig. 48 et 50, Tableau 33). Ce cours d'eau est alimenté dans sa partie Ouest par d'importants cours d'eau à savoir ; Oued El Grar (27,3 km), Oued Rouknia (7,7 km) et Oued Mouguer (16,6 km), etc.

Tableau 33 : Les principaux cours d'eau par bassin

Bassin versant	Région	Superficie (km ²)	Cours d'eau principal	Linéaire total (km)
Kebir Hammam	Skikda	1134,13	Oued Hammam-Oued Kebir	38,00
Reboa	Batna	575,94	Oued <i>Reboa</i>	43,14
Oued El Hai	Batna-Biskra	1581,48	Oued El Hai-Oued Fedhala	97,56

Oued Emchekel prend naissance au Nord-Est du sous bassin à Djebel Guettara (883 m) et Djebel Fedj Seris (915 m). Son écoulement résulte de la rencontre en amont d'Oued El Fendek (32 km)-Oued Redjata et (5,9 km) et Oued El Hadjer (36 km).

Ces deux cours d'eau principaux convergent en aval des deux villes Bekkouche Lakhdar et *Ain Charchar* pour former de nouveau quelques kilomètres d'Oued El Kebir.

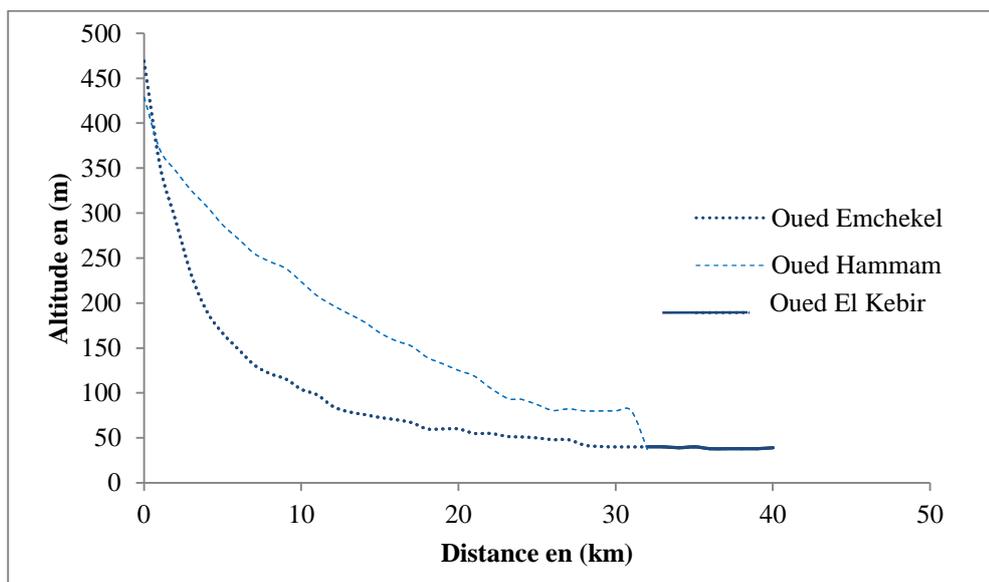


Fig. 48 : Profil en long O.Hammam et O.Emchekel

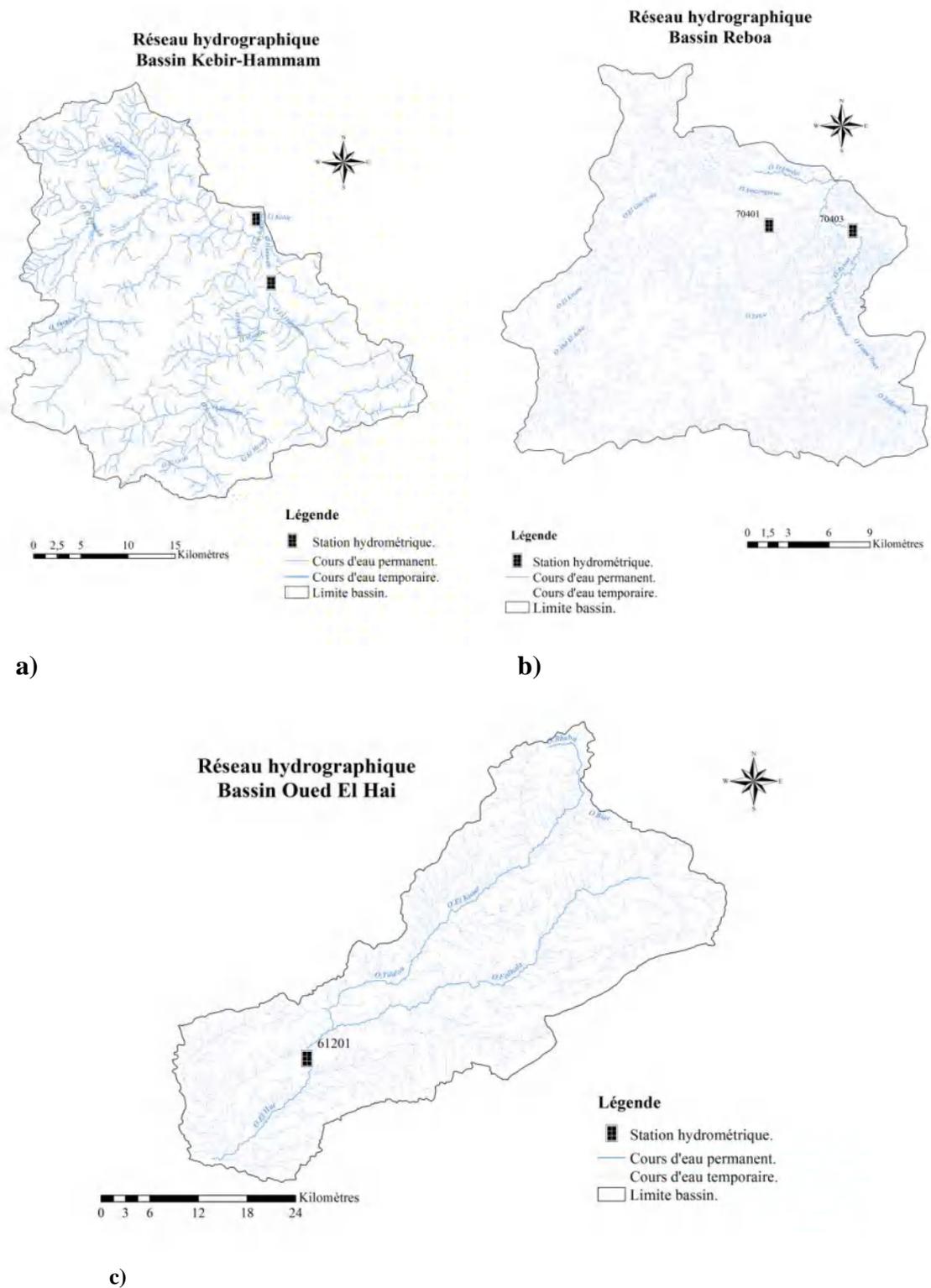


Fig. 49 : Réseau hydrographique et localisation des stations hydrométriques

a) Bassin Kebir Hammam; b) Bassin Reboa; c) Bassin Oued El Hai

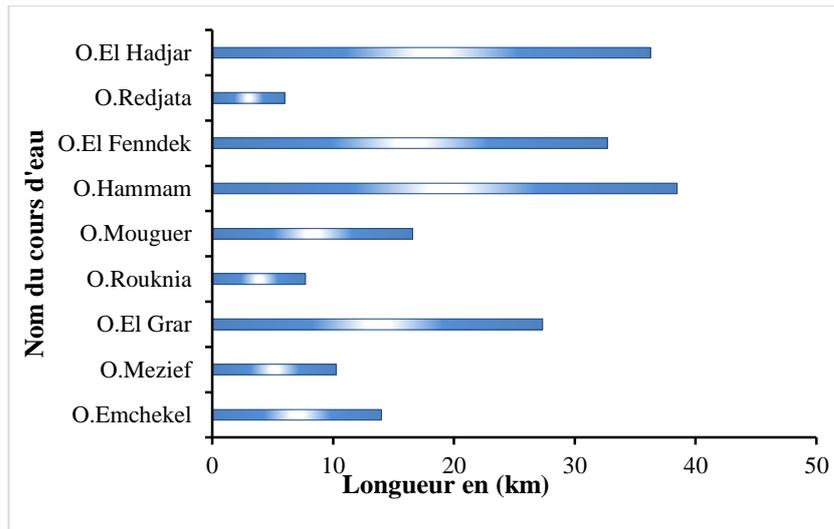


Fig. 50 : Longueurs des principaux cours d'eau –bassin Kebir Hammam-

Le réseau hydrographique du bassin de Oued *Reboa* (Fig. 49b), reflète parfaitement la nature du climat du bassin. Il est marqué par un écoulement épisodique dû au manque des précipitations et aux fortes évaporations qui caractérisent la région. Ce petit bassin situé sur le versant Nord des Aurès est drainé par deux principaux cours d'eau, Oued *Reboa* et Oued Amizerguene-Oued Guergour (Tableau 33). Oued *Reboa* est le cours d'eau le plus important (43 km). Il draine la partie Est du bassin et ses apports liquides alimentent les eaux du barrage Koudiet Meddaouar. Les premiers affluents de Oued *Reboa* apparaissent sur les piedmonts Sud-Est de Djebel Mahmel (2321 m). Il débute par Oued Taga (7,6 km) et change constamment d'appellation pour rejoindre un peu plus en aval Oued Oum Achra et former Oued *Reboa* (Fig. 51, et 52).

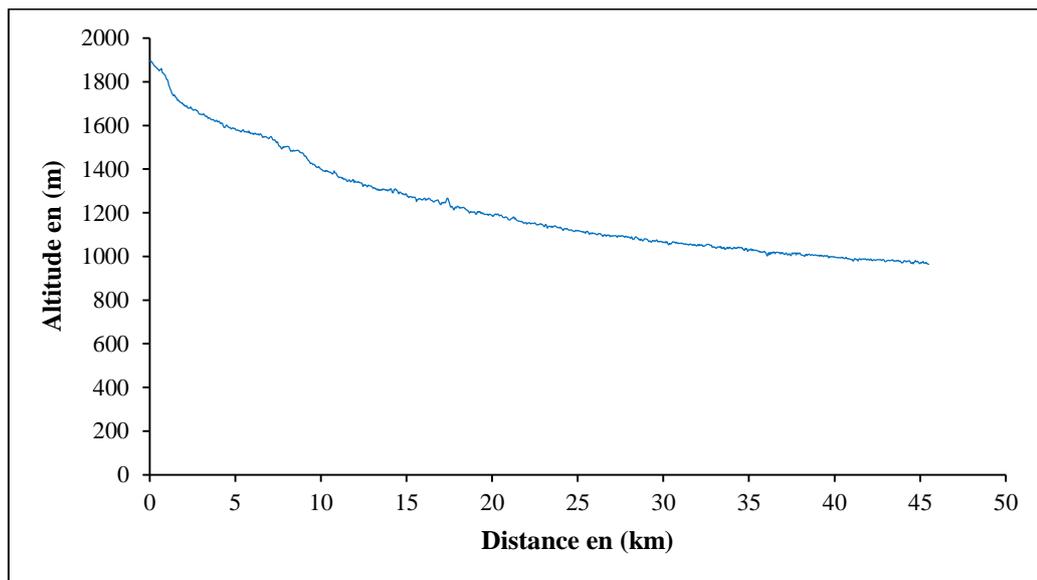


Fig. 51 : Profil en long de Oued *Reboa*

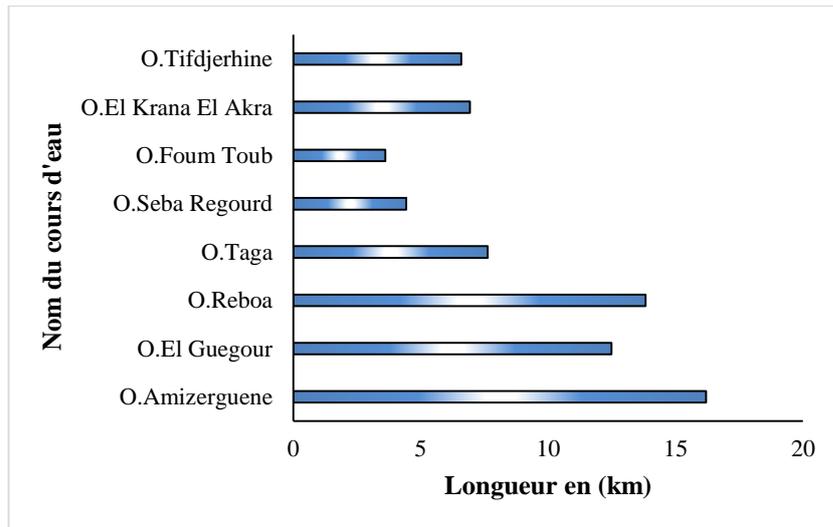


Fig. 52 : Longueurs des principaux cours d'eau –bassin Reboa-

Dans le bassin de Oued El Hai, les conditions des écoulements du réseau hydrographique sont similaires à celles de *Reboa*. La disposition du bassin à la limite des deux zones climatiques semi-aride et aride (Sud de l'atlas Saharien) laisse apparaître des écoulements de type temporaires. Ils débutent au Nord-Est sur les monts de Belezma, plus précisément à Djebel Tuggurt (2091 m) et Djebel Ich Ali (1815 m). Ses principaux cours d'eau Oued Fedhala (Fig. 49 c), d'une longueur de 71 km et Oued Tilalou de 64,8 km, de direction Nord-Est à Sud-Ouest se rencontrent en amont de la ville d'*El Kantara* pour constituer Oued El Hai (26,5 km) (Fig. 53, et 54).

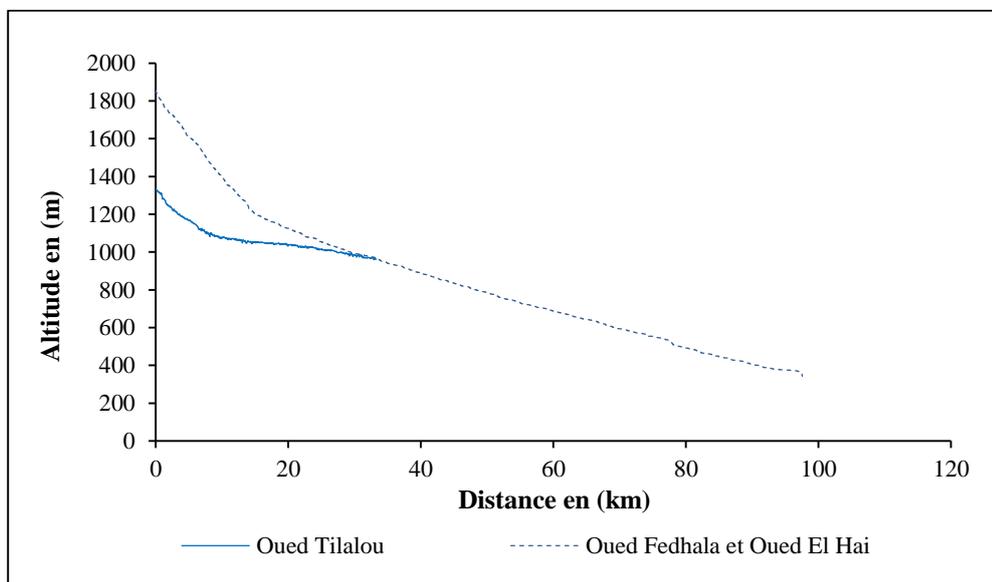


Fig. 53 : Profil en long d'Oued El Hai

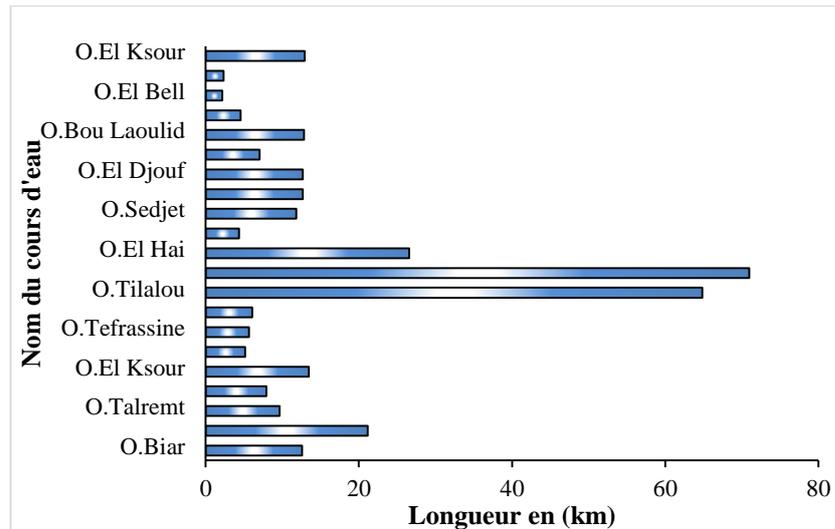


Fig. 54 : Longueurs des principaux cours d'eau –bassin Oued El Hai-

4.2.2. Typologie du Réseau hydrographique

Le climat pourrait sensiblement agir sur le réseau hydrologique et en conséquence, sur la réponse hydrologique du bassin versant. En altérant le caractère pérenne (présence permanente ou quasi-permanente d'eau) ou temporaire des écoulements de surface (présence intermittente), la variabilité hydrologique pourrait avoir des conséquences sur les périodes et les volumes des matériaux transportés.

Hormis le climat, la lithologie et l'occupation du sol, le fonctionnement hydrologique est également sous la dépendance de la hiérarchisation du réseau hydrographique. Le type, le nombre et la longueur des cours d'eau sont pris en compte, ils sont indispensables pour la caractérisation du régime hydrologique d'un bassin. Les cours d'eau temporaires sont aperçus habituellement dans les zones amont et souvent en état de déséquilibre. Ils apparaissent immédiatement après les fortes pluies, produisant souvent une forte érosion, transportant et déposant de grandes quantités de matériaux issus des sols. Ils sont généralement d'ordre inférieur 1 et 2, et leur nombre important est la cause d'une réponse rapide du réseau hydrographique aux pluies diluviennes.

Les cours d'eau permanents généralement d'ordre 4, 5 et 6 sont considérés comme pérennes, Ils font face à une dynamique érosive permanente imperceptible dont l'étude hydro-sédimentaire est beaucoup assez complexe.

Ainsi, les cours d'eau des trois bassins versants sont de classes variées. Le bassin Kebir Hammam connaît un réseau hydrographique beaucoup plus développé que les 2 autres, particulièrement dans sa partie Sud où le taux de couverture végétale est faible. Son réseau hydrographique permanent est très important. Il représente un rapport de 58,1% de la longueur totale du réseau du bassin et concerne essentiellement les cours d'eau d'ordre 4, 5 et 6. En revanche, le réseau temporaire est légèrement moins important, il représente 41,9 % de la

longueur totale du réseau hydrographique du bassin correspondant particulièrement aux cours d'eau d'ordre dont le nombre est de 758 (Fig. 55a) et la longueur de 631,2 km.

Les cours d'eau temporaires, sont très répandus dans les bassins de *Reboa* et Oued El Hai (Fig. 55 b et c). Ils sont particulièrement sensibles au climat de la région. A *Reboa*, plus de 98% du linéaire hydrographique est composé de cours d'eau dont le régime hydrologique est temporaire (plus de 667 Km). Le nombre des cours d'eau d'ordre 1 est de 666 (53%), ce qui correspond à un linéaire de 346,7 Km.

Dans le bassin Oued El Hai, nonobstant l'importance de sa surface drainée, les cours d'eau permanents ne représentent qu'un linéaire de 1,25 % du total du bassin. Les cours d'eau temporaires, quant à eux, en représentent plus de 98 %. Le nombre des cours d'eau d'ordre 1 est de 2853, celui des cours d'eau d'ordre 4, 5 et 6 est de 796.

Chaque saison, le nombre de ces cours d'eau temporaires est amené à s'accroître en fonction de la nature géologique et pédologique de ce bassin, et aux caractères des précipitations.

4.2.3. Les descripteurs de la forme et de la taille

Les indices morpho-métriques de la taille et de la forme des bassins versants peuvent aider à analyser et à comprendre l'aptitude de chaque bassin versant vis-à-vis des variations de l'écoulement. Ils jouent un rôle dans la propagation et la genèse de l'écoulement superficiel et la généralisation des crues lors des épisodes pluvieux de l'année.

Plusieurs indices sont proposés. On mettra l'accent sur les indices suivants :

4.2.3.1. L'indice de compacité de Gravelius

L'indice auquel il est le plus généralement fait référence est l'indice de compacité de Gravelius (1914). Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface. Si le périmètre du bassin est noté P et sa surface A, le coefficient de compacité de « *kg* » s'exprime par:

$$Kg = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (28)$$

Où :

Kg : Indice de compacité de Gravelius; *A* : Surface du bassin versant (km^2); *P*: Périmètre du bassin versant (km).

Ce coefficient est supérieur à 1 lorsque la forme du bassin est allongée et proche de 1 pour un bassin de forme quasiment circulaire et plus compact.

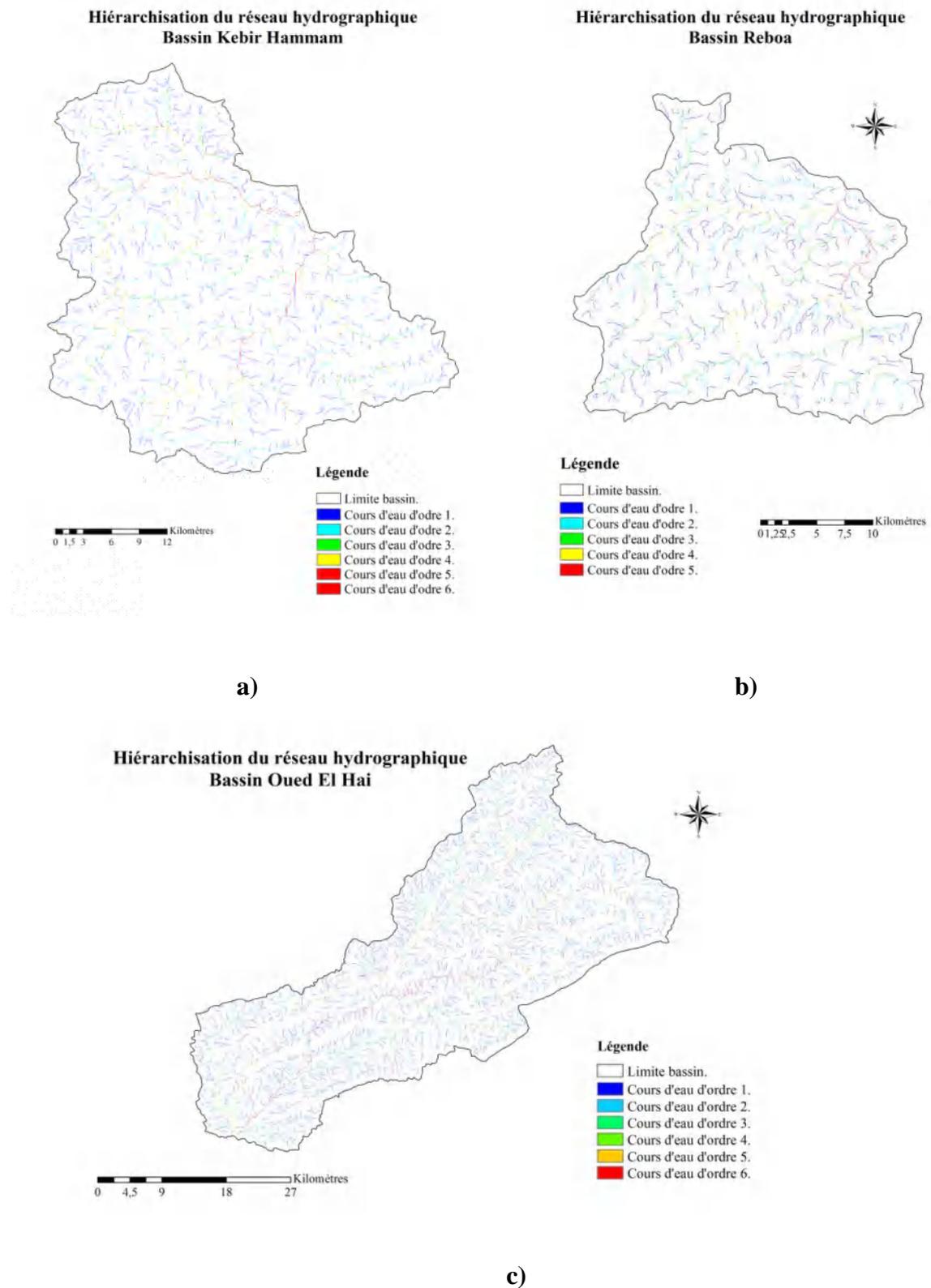


Fig. 55 : Hiérarchisation du réseau hydrographique
a) Bassin Kebir Hammam; b) Bassin *Reboa*; c) Bassin Oued El Hai

4.2.3.2. Indice de Horton

Il exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal (Horton, 1932).

$$KH = \frac{A}{L_{WP}} \quad (29)$$

Où :

KH : Indice de Horton sans dimension ; *A* : La superficie du bassin versant en (km²); *L_{WP}* : Longueur du cours d'eau principal (km).

Lorsque *KH* est inférieur à 1, le bassin est de forme allongée. Inversement, la forme du bassin est ramassée si celui-ci est supérieur à 1.

4.2.3.3. Rapport de circularité

En se référant toujours à la forme circulaire du bassin versant, Miller (1953) avait proposé un indice de circularité. Il est le rapport de l'aire du bassin par rapport à celle d'un cercle de périmètre identique à celui d'un bassin. Il s'exprime comme suit :

$$C_r = \frac{A}{\pi \left(\frac{P}{\pi}\right)^2} \quad (30)$$

Où :

A : La superficie du bassin versant en (km²) ; *P* : Périmètre du bassin versant (km).

L'interprétation de cet indice indique une forme circulaire et une pente relativement faible pour une valeur proche de 1 (Singh, 1992). Pour de pareils bassins, l'infiltration est partiellement uniforme et le temps que prend l'eau pour regagner l'exutoire est moins élevé que celui d'un Bassin Versant de forme allongée (Reddy et al; 2004).

4.2.3.4. Rapport d'élongation

Le rapport d'élongation complète l'indice de compacité de Gravelius pour comparer les temps de concentration des eaux à l'exutoire. Plus la valeur de « E » est proche de 1 plus la forme du bassin versant est proche de la forme circulaire. Il est le résultat de la formule suivante :

$$E = \frac{D_{cr}}{L_{max}} = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L_{max}} \quad (31)$$

Où :

E : Rapport d'élongation ; D_{cr} : Le diamètre d'un cercle ayant une superficie A équivalente à la superficie du bassin versant A (km) ; L_{max} : Longueur horizontale maximale du bassin versant (Km) ; A : La superficie du bassin versant en (km²).

4.2.3.5. Indice de forme

L'indice de forme (Horton, 1945) est le rapport de l'aire du BV à sa longueur. Il est utilisé pour prédire l'intensité de l'écoulement à l'exutoire d'un Bassin. Lorsque sa valeur dépasse la valeur de 0,5, indique un bassin de forme plutôt circulaire, et un débit de pointe élevé d'une durée relativement courte (Singh, 1992 ; Reddy et al. 2004). Sa formule est la suivante :

$$If = \frac{A}{L_{max}^2} \quad (32)$$

Où :

A : La superficie du bassin versant en (km²) ; L_{max} : Longueur horizontale maximale du bassin versant (Km).

4.2.3.6. Le Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (donc même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Ses côtés, longueur « **Leq** » et largeur « **leq** », sont tels que $L \times l = A$ et $2(L + l) = P$. Ils sont égaux quand le bassin a la compacité d'un carré, alors $K_g = 1,12$. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit côté du rectangle, La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau.

La notion du rectangle équivalent est introduite dans les calculs de pente. Il permet aussi de comparer facilement entre les bassins en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement, On a :

$$Leq = \frac{kg\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{kg}\right)^2} \right] \quad (33)$$

Où :

Leq : la longueur du rectangle équivalent en (km); leq : La largeur du rectangle équivalent en (km); K ; indice de compacité de Gravelius; A : La superficie du bassin versant en (km²).

Les résultats des descripteurs de la taille et de la forme obtenus sont illustrés dans le tableau 34.

Tableau 34 : Les indices de taille et de forme

Bassin versant	Sous bassin	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Kg	KH	C _r	E	I _f	Leq (km)	leq (km)
Kebir Hammam	Hamмам	537,55	127,03	1,53	0,41	0,42	0,73	0,42	53,46	10,06
	Emchekel	594,38	134,3	1,54	0,37	0,41	0,72	0,41	56,66	10,49
	Total	1134,13	184,04	1,53	0,71	0,42	0,84	0,55	77,36	14,66
Reboa	Reboa	308,56	111,57	1,78	0,17	0,31	0,61	0,30	49,56	6,23
	Timgad	244,68	90,57	1,62	0,15	0,37	0,66	0,34	39,01	6,27
	Total	575,94	135,99	1,59	1,63	0,39	0,73	0,42	58,08	9,92
Oued El Hai	/	1581,48	238,36	1,68	0,19	0,35	0,62	0,30	103,97	15,21

En tenant compte des valeurs obtenues plus haut (Tableau 34), les indices de taille et de forme calculés pour chaque bassin indiquent globalement une forme allongée des bassins. Les valeurs de l'indice de compacité de Gravelius obtenu, varie entre 1,53 et 1.68. Ces valeurs trouvées indiquent l'allongement des trois bassins, bien qu'à vue d'œil, les bassins de *Reboa* et *Kebir Hammam* montrent plutôt une forme plus compacte. Les valeurs de l'indice de Horton et d'élongation le confirment avec des valeurs proches de 1. En conséquence, en se référant strictement à ces valeurs calculées, les temps de concentration des eaux jusqu'aux exutoires des deux bassins doivent être faibles.

4.2.4. Les descripteurs du réseau hydrographique

4.2.4.1. La densité de drainage

La densité de drainage est le rapport de la longueur totale des chenaux d'écoulement à la superficie du bassin versant, Elle reflète la dynamique du bassin et le type de ruissellement, Elle est calculée comme suit :

$$Dd = \frac{\sum Li}{A} \quad (34)$$

Où :

Dd : densité de drainage (km/km²) ; *Li* : longueur total des cours d'eau dans le bassin (km); *A* : surface du bassin versant (km²).

En général, La densité de drainage dépend de la géologie, des caractéristiques topographiques du bassin et des conditions climatologiques et anthropiques,

4.2.4.2. La Fréquence des talwegs

La fréquence des talwegs est une classification topologique du réseau hydrographique .Elle est donnée par la méthode proposée par Horton en 1945 et modifiée par Strahler en 1957, Les principes de cette classification sont les suivants :

- Tout cours d'eau dépourvu d'affluent est d'ordre 1.
- Au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre $n + 1$.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.

4.2.4.3 La Densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de chenaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum Ni}{A} \quad (35)$$

Où :

F : La densité hydrographique (km^2) ; Ni : nombre de cours d'eau d'ordre i ; A : superficie du bassin (km^2).

4.2.4.4. Le coefficient de torrentialité

Le coefficient de torrentialité est étroitement lié à la densité de drainage, Il donne une idée sur le comportement du réseau de drainage soit sur la façon de l'arrivée des eaux provenant des cours d'eau d'ordre inférieur à la rivière principale. Lorsque ce coefficient est égal à 0,58, il désigne que plus de la moitié du bassin versant est constitué de cours d'eau de premier ordre.

$$Ct = F1 * Dd \quad (36)$$

Où :

$F1$: La fréquence des cours d'eau d'ordre 1; Dd : La Densité de drainage totale du bassin en (km/km^2).

4.2.4.5. Le temps de concentration

Le temps de concentration des eaux de ruissellement sur un bassin versant se définit comme le temps nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis le point le plus éloigné du bassin versant jusqu'à son exutoire, Il est composé de trois termes différents:

- Le temps d'humectation : temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.
- Le temps de ruissellement : temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur).
- Le temps d'acheminement : temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Pratiquement, le temps de concentration peut être déduit par différentes formules, le plus souvent empiriques. Ici, il est déterminé par trois relations, celle de Giandotti, Ventura et Passini. Les formules de calculs sont les suivantes :

- Giandotti :

$$tc \text{ (heures)} = \frac{4\sqrt{A}+1,5*Lwp}{0,8\sqrt{h_{moy}-h_{min}}} \quad (37)$$

- Ventura :

$$tc \text{ (minutes)} = 76,6 \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{I}} \quad (38)$$

- Passini :

$$tc \text{ (minutes)} = 64,8 * \frac{\sqrt[3]{Lwp*A}}{\sqrt{I}} \quad (39)$$

Où

A : La superficie du bassin (km^2); L_{WP} : Longueur du cours d'eau principal (km); h_{moy} : L'altitude moyenne en (m); h_{min} : l'altitude minimale dans le bassin versant; I : La pente moyenne du bassin versant exprimée en (%).

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques du réseau des bassins versant.

Tableau 35 : Les indices de l'organisation du réseau hydrographique

Bassin	Sous Bassin	Cours d'eau principal	Ni	$\sum Li$ (Km)	Lmoy (Km)	Dd (Km/Km ²)	F	Ct	Temps de concentration « tc » (heures)		
									Giandotti	Ventura	Passini
Kebir Hammam	Hamam	Hamam	5	553,9	0,79	1,03	1,30	0,67	10,65	13,31	13,09
	Emchekel	Emchekel	5	675,5	0,83	1,14	1,36	0,78	11,03	16,15	16,17
	Total	Hamam	6	1234,1	0,82	1,09	1,33	0,61	14,41	22,75	20,45
Reboa	Reboa	Reboa	5	357,4	0,50	1,16	2,31	1,40	7,87	8,28	9,49
	Timgad	Timgad	5	310,4	0,59	1,27	2,15	1,52	9,34	8,07	9,38
	Total	Reboa	5	667,9	0,54	1,16	2,15	0,70	7,87	12,82	10,04
Oued El Hai	/	Oued El Hai	6	2556,4	0,45	1,62	3,60	2,92	14,12	23,62	26,46

L'analyse des résultats (Tableau 35) de la densité de drainage dans les trois bassins montre qu'il y a une certaine concordance entre les paramètres hydrographiques calculés et la géologie. A l'échelle des trois bassins versants, il s'avère qu'elle est un paramètre essentiel du fonctionnement hydrologique. En effet, aux densités moyennes (1,62 et 1,16 km/km²) des bassins de Oued El Hai et Reboa dont les substrats sont essentiellement marneux, s'oppose une densité inférieure (1,06 km/km²) au bassin Kebir Hammam dont la structure et la lithologie sont variées.

Les temps de concentration calculés par les deux méthodes de Ventura et Passini montrent des écarts modérés. Ils sont presque analogues. Par contre, ceux calculés par la méthode de Giandotti, présentent des écarts importants. Le temps de concentration le plus court est noté dans le bassin versant de Reboa (7 heures), en raison de sa forme et sa petite taille. Pour les bassins de Kebir Hammam et oued El Hai, il tourne autour de 14 heures selon la même formule.

Le coefficient de torrentialité exprimé par la fréquence des talwegs d'ordre 1 et la densité de drainage varie d'un bassin à un autre. Il est de 0,61 et 0,70 dans les bassins Kebir Hammam et *Reboa* et traduit ainsi une perméabilité des substrats et par conséquent une infiltration importante. Alors que dans le bassin d'Oued El Hai, il est de 2,92. Cette valeur traduit des caractéristiques morpho-métriques du bassin adapté à l'écoulement,

Il est toujours utile de noter ici que dans les études morpho-métriques du réseau hydrographique, il convient d'être particulièrement prudent dans le choix des grandeurs que l'on mesure ou dans la définition d'indices. Cette prudence est d'autant plus nécessaire que les modèles numériques de terrain et les logiciels de gestion de l'information géographique (SIG) permettent de calculer très aisément des valeurs de ces grandeurs ou de ces indices dont rien ne garantit a priori qu'elles soient indépendantes de la résolution (taille du pixel) des données utilisées.

4.3. Le réseau de mesure des bassins

Les sources principales de la documentation hydrologique sont les Archives de l'Agence National des Ressources Hydriques (ANRH). Celle-ci assure la mesure et la surveillance des cours d'eau plus sur le plan quantitatif que qualitatif.

Ce réseau fonctionne depuis plusieurs décennies. Il fournit des données plus ou moins fiables et ne couvre que certaines unités physiques du bassin. Il est souvent jugé peu dense, même si en moyenne chaque sous bassin est équipé par une station hydrométrique. Notant en plus qu'aujourd'hui, ce nombre a diminué suite aux crues ou après la création de certains barrages.

Le dispositif de mesures des débits sur l'ensemble des bassins étudiés est constitué de quatre stations hydrométriques. La première est celle de *Ain Charchar*, située en aval du barrage Zit Emba. Elle contrôle une superficie de plus de 1130 km², drainée par deux principaux cours d'eau Oued Hammam et Oued El Emcheckel.

Le bassin *Reboa* dénombre deux stations hydrométriques. Elles sont toutes les deux situées en amont du barrage Koudiet El Meddaouar.

Plus au sud, le bassin Oued El Hai est équipé lui aussi d'une seule station de mesures hydrométriques. Elle est située en amont du barrage des Fontaines des gazelles.

Les quatre stations considérées dans l'étude des débits sont opérationnelles depuis plus de 25 ans, période jugée suffisante pour justifier une étude statistique exploitable et fiable afin de déterminer le régime hydrologique relatif à chaque bassin. Ordinairement, Elles comportent des années de mesures incluant des données lacunaires. Celles-ci ont été comblées par le logiciel « Hydrolab ». L'hydrogramme de l'année aux données manquantes a été comparé à l'hydrogramme d'une station voisine située au sein du même bassin versant (Grand bassin).

A partir de cette analyse, ce traitement a permis d'enrichir l'historique des 4 stations hydrométriques reprises dans le Tableau 36. Plusieurs lacunes par station ont ainsi pu être récupérées, ce qui a permis de multiplier le nombre d'années utilisables pour le traitement des débits.

Les séries exploitées par bassin diffèrent d'une station à l'autre : Pour la station de *Ain Charchar*, les débits journaliers validés concernent la période-cible 1968-2003. Pour celles de *Reboa* et *Timgad*, les données fournies couvrent une période allant de l'année 1969 à 2012, et pour la station d'*El Kantara* la période prise en compte est beaucoup plus courte, elle va de 1968 à 1999.

Tableau 36 : Caractéristiques des stations hydrométriques

Bassin	Station	Code station	Surface contrôlée (Km ²)	Coordonnées		Période étudiée
				X (m)	Y (m)	
Kebir Hammam	<i>Ain Charchar</i>	031101	1134,13	883,37	407,77	(68/69)-(02/03)
Reboa	<i>Reboa</i>	070401	308,56	820,36	393,37	(69/70)-(11/12)
	<i>Timgad</i>	070403	244,68	814,33	393,49	(69/70)-(11/12)
Oued El Hai	<i>El Kantara</i>	061201	1581,48	746,75	390,31	(68/69)-(98/99)

4.4. Les modules moyens annuels et interannuels

4.4.1. L'abondance des modules

L'écoulement moyen annuel dénommé également module est une notion fondamentale en hydrologie. Il est une caractérisation de l'abondance annuelle en eau totale d'eau s'écoulant au cours d'une année en un point d'un cours d'eau.

La variation annuelle des modules au niveau des quatre stations hydrométriques étudiées est illustrée par les figures. Les débits ont été rapportés à l'unité de surface de chaque bassin pour calculer les débits spécifiques exprimés en « litre par seconde par kilomètre carré » et la lame d'eau écoulée en « millimètres » (Tableau 37). L'intérêt est de faciliter la comparaison entre les différents bassins.

A la station *Ain Charchar* le débit annuel moyen fluctue d'une année à une autre (Fig. 56) en réponse, principalement, à la quantité de précipitation reçue par le bassin versant. Le débit moyen interannuel enregistré est de 4,54 m³/s, ce qui correspond à un débit spécifique de 4,02 l/s/km², soit une lame d'eau ruisselée de 126,72 mm.

De 1968 (0,55 m³/s) à 2003 (8,8 m³/s), les débits montrent de fortes fluctuations. Sur une série choisie de 35 ans, les années humides sont de l'ordre de 15 non consécutives. Le plus fort débit enregistré est de 15,43 m³/s (1986/1987), ce qui correspond à un débit spécifique de 13,66

l/s/km² et une lame d'eau ruisselée de 430,64 mm. Le minimal des débits est de 0,3 m³/s enregistré au cours de l'année hydrologique 1966/1997.

L'examen visuel de la figure 56 et l'analyse de la série chronologique des débits moyens annuels de cette station met en évidence la succession de trois phases climatiques. La première phase dure 12 ans (1968 à 1980), les débits annuels ont une évolution de faible amplitude, avec une moyenne interannuelle des débits de 3,52 m³/s. Ensuite, la phase la plus humide apparaît et dure 7 ans de 1980 à 1987. La moyenne interannuelle des débits observés est de 8,56 m³/s. Elle est suivie d'une phase relativement sèche allant de 1987 au 2003, avec un débit moyen interannuel de 3,55 m³/s.

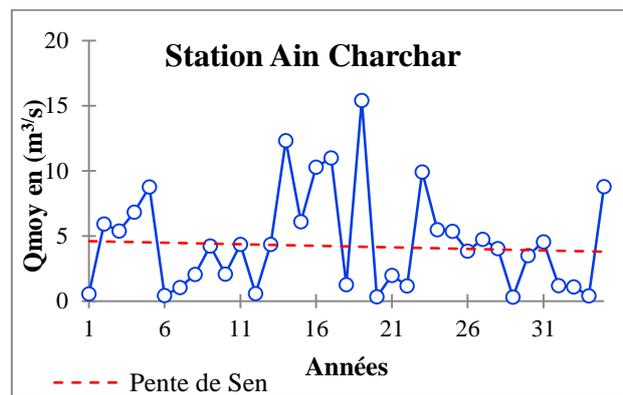


Fig. 56 : Variation des débits à la station de *Ain Charchar*.

Dans le bassin de *Reboa*, les modules les plus importants proviennent d'Oued *Reboa* (Fig. 57). Le débit moyen interannuel enregistré à la station qui contrôle ce cours d'eau est de 0,55 m³/s, ce qui correspond à un débit spécifique de 1,78 l/s/km² et une lame d'eau ruisselée de 56 mm. Le débit le plus fort enregistré en 2007/2008 est de 5,1 m³/s, le plus faible l'est en 1987/1988 avec une valeur de 0,06 m³/s.

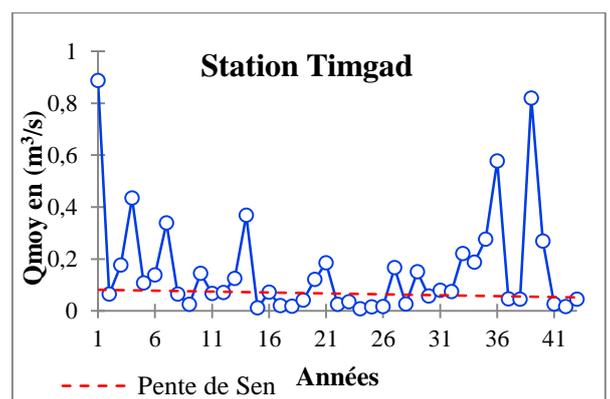
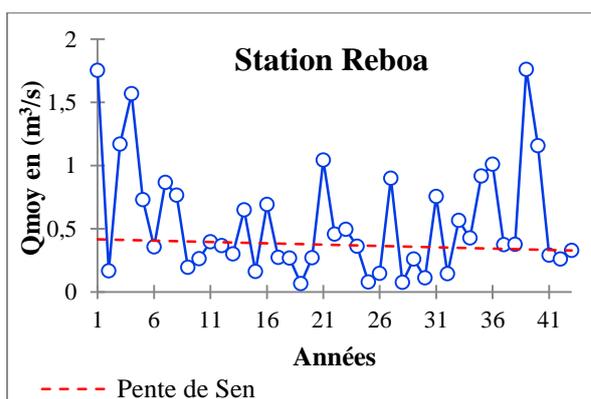


Fig. 57 : Variation des débits aux stations *Reboa* et *Timgad*.

Tableau 37 : Débits moyens annuels par station

Année	Station Ain Chachar			Station Reboa			Station Timgad			Station El Kantara		
	Q _i (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	E (mm)	Q _i (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	E (mm)	Q _i (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	E (mm)	Q _i (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	E (mm)
68/69	0,55	0,49	15,30	/	/		/	/	/	0,27	0,17	5,32
69/70	5,92	5,24	165,19	1,75	5,68	179,16	<u>0,89</u>	<u>3,63</u>	<u>114,35</u>	1,08	0,68	21,48
70/71	5,39	4,77	150,33	0,17	0,54	16,97	0,06	0,26	8,25	0,23	0,14	4,50
71/72	6,84	6,05	190,81	1,17	3,79	119,58	0,18	0,72	22,76	1,02	0,64	20,32
72/73	8,78	7,77	245,17	1,57	5,09	160,46	0,43	1,78	56,01	<u>1,37</u>	<u>0,87</u>	<u>27,40</u>
73/74	0,44	0,39	12,17	0,73	2,37	74,61	0,11	0,44	13,86	0,35	0,22	7,00
74/75	1,04	0,92	29,09	0,36	1,16	36,45	0,14	0,56	17,77	0,35	0,22	6,88
75/76	2,06	1,82	57,42	0,87	2,81	88,66	0,34	1,39	43,70	0,69	0,44	13,76
76/77	4,23	3,74	117,98	0,77	2,48	78,36	0,06	0,26	8,28	0,64	0,40	12,72
77/78	2,09	1,85	58,26	0,19	0,63	19,76	0,02	0,10	3,18	0,45	0,29	8,99
78/79	4,36	3,86	121,59	0,26	0,85	26,83	0,14	0,59	18,66	0,21	0,13	4,15
79/80	0,59	0,52	16,47	0,40	1,28	40,46	0,07	0,27	8,54	0,68	0,43	13,54
80/81	4,35	3,85	121,40	0,37	1,19	37,47	0,07	0,29	9,10	0,74	0,47	14,68
81/82	12,33	10,91	344,08	0,30	0,97	30,75	0,13	0,51	16,12	0,14	0,09	2,77
82/83	5,23	4,63	145,86	0,65	2,11	66,43	0,37	1,50	47,43	0,31	0,20	6,23
83/84	10,30	9,12	287,56	0,16	0,53	16,61	0,01	0,05	1,50	0,18	0,12	3,64
84/85	10,99	9,73	306,79	0,69	2,24	70,69	0,07	0,29	9,18	0,36	0,23	7,12
85/86	1,26	1,11	35,11	0,27	0,89	27,91	0,02	0,08	2,60	0,42	0,26	8,29
86/87	<u>15,43</u>	<u>13,66</u>	<u>430,64</u>	0,27	0,87	27,44	0,02	0,07	2,23	0,37	0,24	7,44
87/88	0,33	0,29	9,28	<u>0,06</u>	<u>0,21</u>	<u>6,62</u>	0,04	0,17	5,29	0,06	0,04	1,28
88/89	1,98	1,76	55,39	0,27	0,87	27,52	0,12	0,50	15,64	0,16	0,10	3,11
89/90	1,16	1,03	32,46	1,04	3,38	106,69	0,18	0,76	23,82	0,19	0,12	3,84
90/91	9,92	8,78	276,95	0,46	1,48	46,70	0,02	0,10	3,15	0,32	0,20	6,33
91/92	5,50	4,86	153,41	0,49	1,60	50,52	0,04	0,14	4,56	0,44	0,28	8,78
92/93	5,37	4,76	149,99	0,36	1,17	36,83	<u>0,01</u>	<u>0,03</u>	<u>1,03</u>	0,34	0,21	6,71
93/94	3,85	3,41	107,44	0,08	0,25	7,94	0,01	0,06	1,88	0,01	0,01	0,18
94/95	4,75	4,20	132,57	0,15	0,47	14,96	0,02	0,07	2,07	0,18	0,11	3,50
95/96	4,04	3,57	112,74	0,90	2,92	92,01	0,17	0,68	21,51	0,85	0,54	17,05
96/97	<u>0,30</u>	<u>0,27</u>	<u>8,42</u>	0,08	0,25	7,80	0,03	0,11	3,45	0,04	0,03	0,79
97/98	3,50	3,09	97,58	0,26	0,85	26,71	0,15	0,62	19,47	0,66	0,42	13,15
98/99	4,55	4,03	127,00	0,11	0,36	11,31	0,06	0,23	7,40	0,17	0,11	3,48
99/00	1,19	1,05	33,16	0,75	2,44	77,09	0,08	0,32	10,19	/	/	/
00/01	1,11	0,98	30,92	0,14	0,47	14,77	0,07	0,30	9,61	/	/	/
01/02	0,40	0,36	11,23	0,57	1,83	57,76	0,22	0,90	28,37	/	/	/
02/03	8,80	7,78	245,47	0,43	1,38	43,63	0,19	0,77	24,15	/	/	/
03/04	/	/	/	0,92	2,97	93,64	0,28	1,13	35,50	/	/	/
04/05	/	/	/	1,01	3,28	103,33	0,58	2,36	74,33	/	/	/
05/06	/	/	/	0,37	1,21	38,27	0,05	0,19	5,98	/	/	/
06/07	/	/	/	0,38	1,22	38,47	0,05	0,18	5,81	/	/	/
07/08	/	/	/	<u>1,76</u>	<u>5,71</u>	<u>180,07</u>	0,82	3,35	105,57	/	/	/
08/09	/	/	/	1,16	3,75	118,37	0,27	1,10	34,65	/	/	/
09/10	/	/	/	0,29	0,94	29,76	0,03	0,11	3,39	/	/	/
10/11	/	/	/	0,26	0,85	26,67	0,02	0,07	2,06	/	/	/
11/12	/	/	/	0,33	1,06	33,45	0,04	0,18	5,78	/	/	/
Moyenne	4,54	4,02	126,72	0,55	1,78	56,03	0,15	0,63	19,96	0,43	0,27	8,53
Ecartype	3,87	3,42	107,93	0,44	1,43	45,12	0,20	0,82	25,77	0,33	0,21	6,52
CV	0,85	0,85	0,85	0,81	0,81	0,81	1,29	1,29	1,29	0,76	0,76	0,76

A la station de *Timgad*, le débit moyen interannuel est presque quatre fois inférieur à celui enregistré à la station *Reboa* appartenant au même bassin. Ce constat n'empêche pas une bonne corrélation entre les débits des deux stations. Le coefficient de corrélation étant de 0,84. Le débit moyen interannuel à cette station est de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond à un débit spécifique de $0,63 \text{ l/s/km}^2$ et une lame d'eau $19,96 \text{ mm}$.

L'évolution des modules dans les deux stations va en conséquence dans le même sens. De 1969 à 1973, les débits passent par une phase humide. La moyenne interannuelle à *Reboa* est de $1,16 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,39 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station *Timgad*, succède une longue période sèche allant de 1974 à 2007. Les débits moyens interannuels enregistrés sont respectivement de $0,44 \text{ m}^3/\text{s}$ à *Reboa* et $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ à *Timgad*. A partir de septembre 2007 jusqu'au aout 2012, les débits moyens enregistrent une augmentation relativement faible. Ils sont de $0,76$ à la station *Reboa* et $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station *Timgad*.

Plus au sud, les débits de Oued El Hai (station *El Kantara*) des nombreux cours d'eau qui sillonnent le territoire fluctuent également d'année en année (Fig. 58). Cette fluctuation est principalement modulée par les conditions météorologiques de la région. D'une année à l'autre les quantités d'eau précipitées varient dans des rapports parfois importants et conséquemment les débits. Le module moyen interannuel enregistré est de $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,27 \text{ l/s/km}^2$ et $8,53 \text{ mm}$). Le débit moyen maximum enregistré est à peine de $1,27 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,87 \text{ l/s/km}^2$; $27,4 \text{ mm}$). Le minimum enregistré est de $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1993/1994

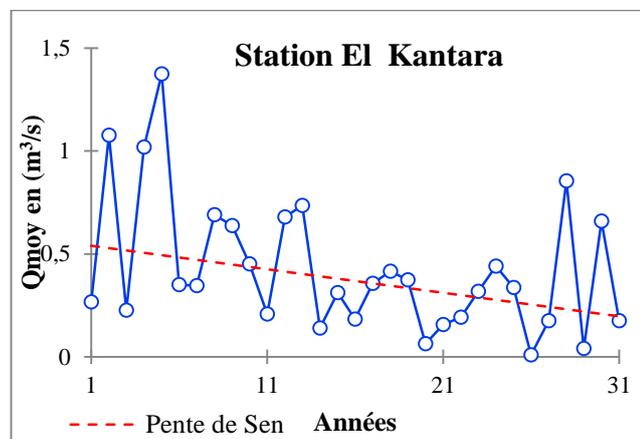


Fig. 58 : Variation des débits à la station *El Kantara*.

L'évolution en général des débits passent par deux périodes bien distinctes, La première relativement humide va de 1968 à 1973 avec un débit moyen interannuel enregistré de $0,79 \text{ m}^3/\text{s}$. Au-delà de 1973, les débits diminuent pour enregistrer une valeur moyenne interannuelle de $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.4.2. Le coefficient de variation

Les coefficients de variation sont en général importants, Ils varient de 0,76 enregistré à la station d'*El Kantara* à 1,29 à la station *Reboa*. Cette variation dans l'ensemble est liée à la fluctuation essentiellement pluviale.

4.4.3. Les variations de l'hydraulicité

L'hydraulicité est par définition le rapport du débit moyen annuel sur le débit interannuel, ou module, calculé sur la période.

L'hydraulicité est d'autant plus faible que le bassin est moins arrosé. Une alternance de périodes excédentaires et déficitaires non conformes est présente dans toutes les stations, avec l'importance des périodes déficitaires par rapport à celles excédentaires. Ainsi, plus de 50% des valeurs sont inférieures à la moyenne annuelle (Annexe 5).

Dans le bassin Kebir Hammam, l'hydraulicité est comprise entre 0,07 et 3,38 (Fig. 59). La série de 35 ans de mesures comporte 20 années de mauvaise hydraulicité. A *Reboa*, sur une série de 43 ans, les années de mauvaise hydraulicité arrivent à 38 années avec un coefficient d'hydraulicité qui varie de 0,12 à 3,21 et à *Timgad*, 30 années sur 43 sont de mauvaise hydraulicité (Fig. 60 et 61). A Oued El Hai, les valeurs du coefficient descendent pour arriver à 0,02 (Fig. 62). Cet état de fait, confirme l'hypothèse formulée au chapitre 2 quant à la tendance climatique "sèche". Si Certaines valeurs du coefficient sont élevées à 3,21, c'est en conséquence des fortes crues de saison froide qu'a connu le bassin

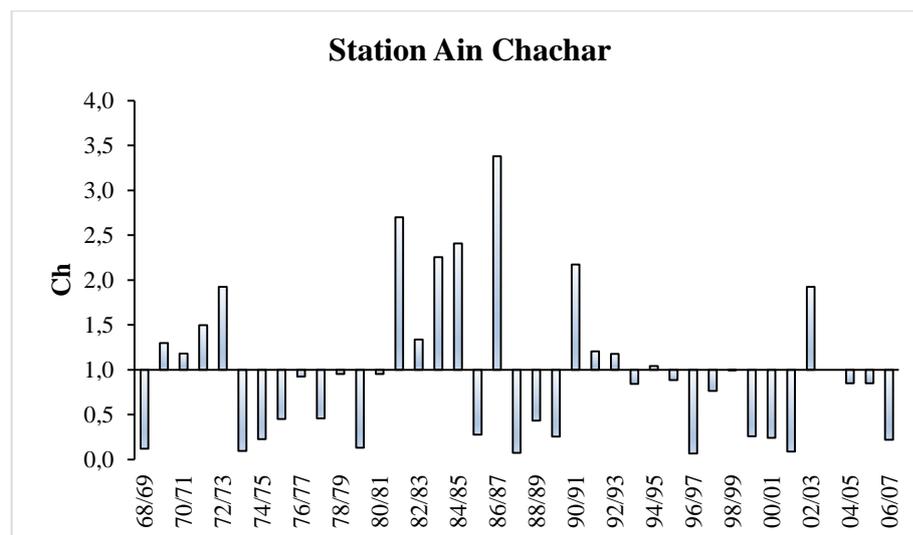


Fig. 59 : Variation de l'hydraulicité –Station Ain Chachar-

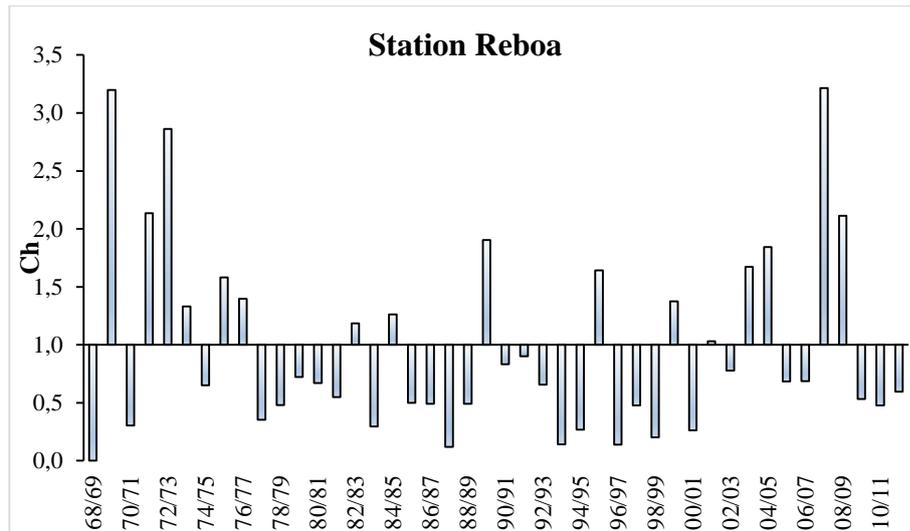


Fig. 60 : Variation des débits à la station *Reboa*.

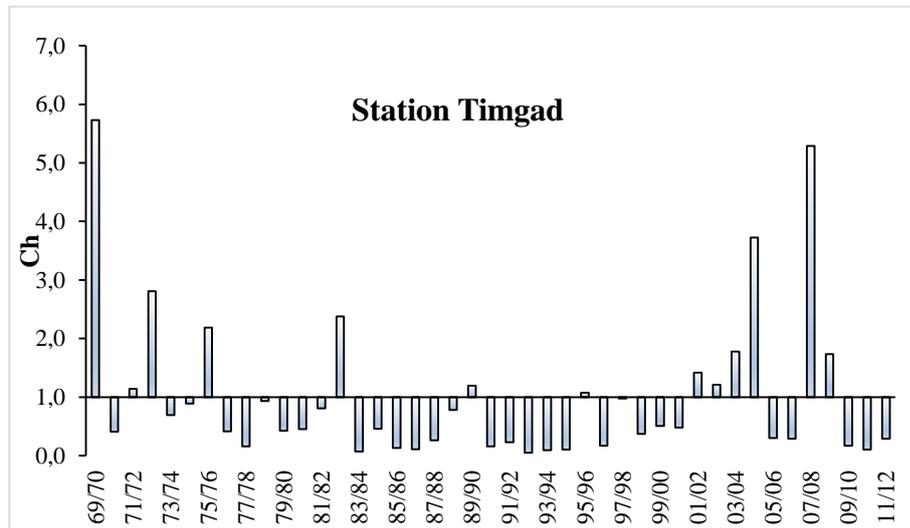


Fig. 61 : Variation des débits à la station *Tingad*.

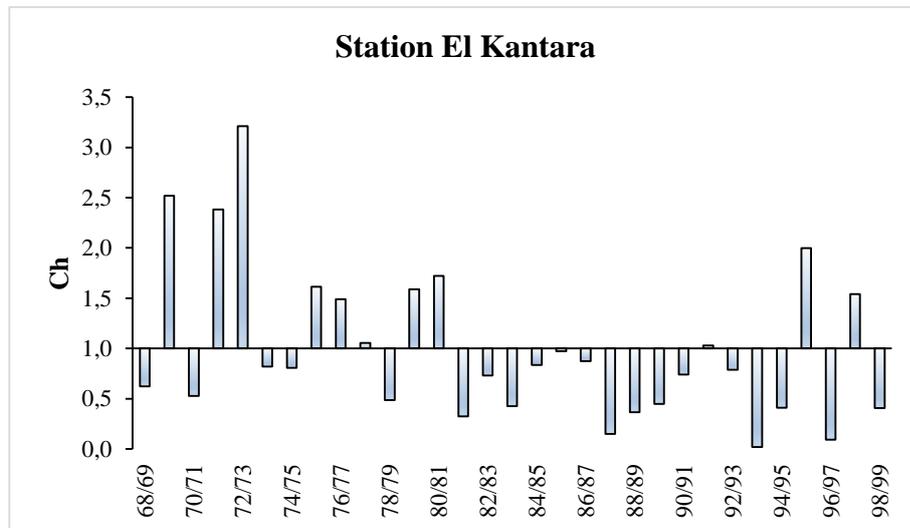


Fig. 62 : Variation de l'hydraulicité –Station *El Kantara*–

4.4.4. Tendence des Modules

Le tableau 38 présente les résultats des tests statistiques de Mann-Kendall et de Pettitt effectués sur les débits moyens annuels. Bien qu'ils ne révèlent aucune tendance statistiquement significative dans l'évolution du débit moyen annuel aux stations des bassins Kebir Hammam et *Reboa*, le test de Pettitt indique à la station *El Kantara*, que les débits moyens annuels se caractérisent par une situation à écoulement déficitaire. L'année hydrologique 1980/1981 se présente comme l'année de rupture. Le déficit entre les deux périodes (1968/1969 et 1980/1999) atteint -53,4 %, Cette situation est confirmée par le test de Mann-Kandall qui indique une baisse significative. La valeur de p-value est 0,025 et la pente de Sen étant de -0,01.

Tableau 38 : Résultats des tests de tendance sur les modules interannuels

Station	Test de Mann-Kendall				Test de Pettitt		
	p-value	τ de Kendall	Sens de la tendance	Pente de Sen	p du test	Date de rupture	Excédent/ Déficit (%)
<i>Ain Charchar</i>	0,53	-0,08	/	-0,02	0,94	/	/
<i>Reboa</i>	0,09	-0,18	/	0,00	0,63	/	/
<i>Timgad</i>	0,53	-0,07	/	0,00	0,42	/	/
<i>El Kantara</i>	0,02	-0,29	-	-0,01	0,03	1980/1981	-54,84

4.4.5. Relations pluies-débits

Du fait de nombreux autres facteurs qui influencent le ruissellement (Evapotranspiration, interception par le couvert végétal, alimentation des nappes, lithologie, stockage de la réserve...), La relation entre les modules moyens annuels et les précipitations moyennes annuelles est perceptible dans toutes les stations, mais elle reste relative. Certaines tendances et pointes sont les mêmes pour le débit et les précipitations, mais on ne peut relier d'autres observations. Les figures 63, 64 et 65 montrent des coefficients de corrélation de l'ordre de 0,60 à la station *Ain Charchar*, 0,74 et 0,58 aux stations *Reboa* et *Timgad* et 0,65 à la station *El Kantara*. Ceci est assez logique car la réserve utile modifie le lien qui peut exister entre les deux variables.

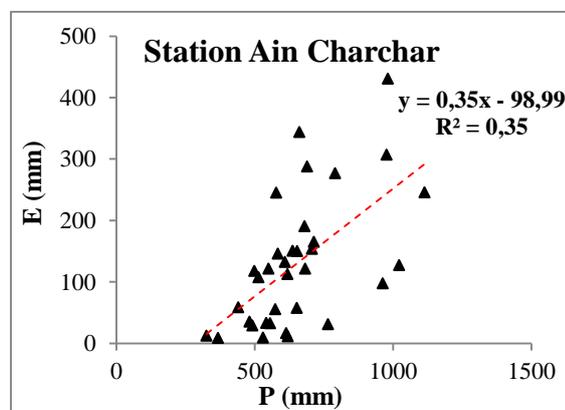


Fig. 63 : Relations pluies-débits –Station *Ain Charchar*-

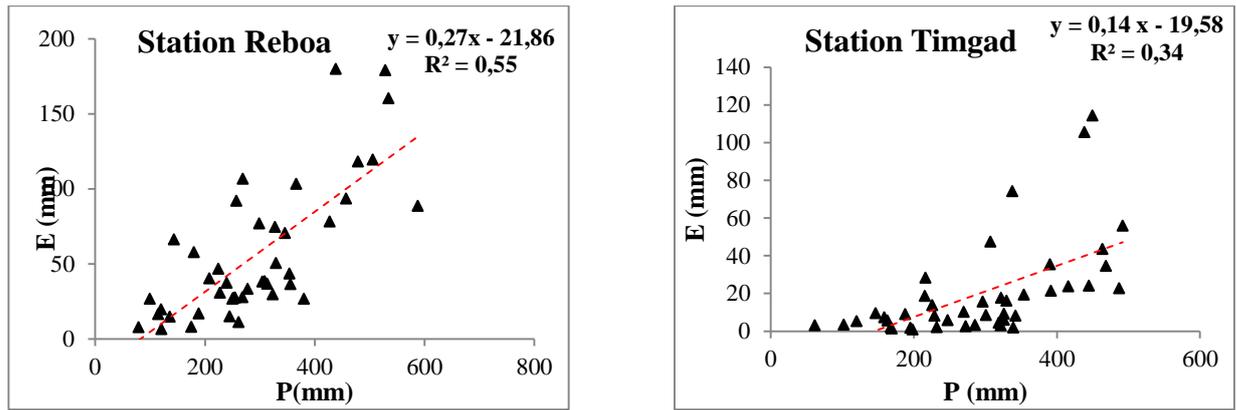


Fig. 64 : Relations pluies-débits –Stations Reboa et Timgad-

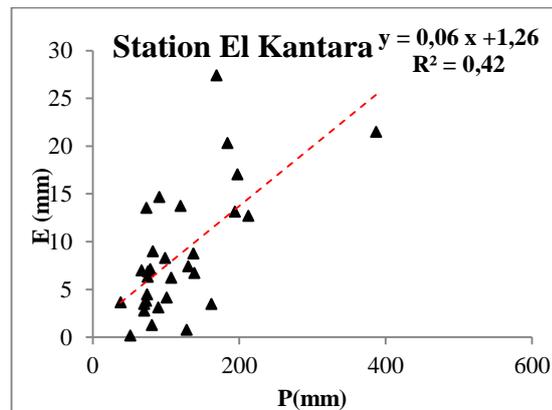


Fig. 65 : Relations pluies-débits –station El Kantara-

4.4.6. Les bilans hydrologiques des bassins

Un *bilan hydrologique* consiste en un bilan d'eau, fondé sur le principe que, pendant un certain intervalle de temps, le total des apports à un bassin versant doit être égal au total des sorties plus la variation, positive ou négative, du volume d'eau stocké dans le bassin.

Le calcul des trois processus qui le composent (précipitations, écoulements et déficits d'écoulement) permet surtout de déterminer l'hydrologie du bassin et d'étudier la variabilité de ces termes, plus sur le plan spatial que temporel, Pour cerner au mieux cette variabilité, il est courant de suivre sur une longue période, l'évolution du bilan hydrologique. À l'échelle d'un bassin versant, il se définit par l'équation simplifiée suivante :

$$P(mm) = E (mm) + D, E (mm) \quad (40)$$

Où :

P : La d'eau précipitée en (mm) ; E : La lame d'eau écoulée en (mm); $D.E$: Le déficit d'écoulement en (mm).

4.4.6.1. La lame d'eau précipitée

De 1969 à 2003, la moyenne annuelle des précipitations à la station de *Ain Charchar* est de 652,3 mm (Fig. 66a). Lors de cette période près des deux tiers des années (23 sur 34 années) dépassent la moyenne interannuelle. La lame d'eau maximale précipitée est de 1113 mm enregistrée en 2002/2003, la minimale est de 325,4 mm observée l'année 1973/1974.

Pour les stations de *Timgad* et *Reboa*, la série étudiée est plus longue, elle est de 43 ans (1969 - 2012), La lame d'eau maximale précipitée à la station *Reboa* est de 587,7 mm (Fig. 66b). A la station de *Timgad*, elle est de 491,8 mm (Fig. 66c). Les minimales dans les deux stations se situent entre 61 et 78 mm.

A *El Kantara*, les lames d'eau précipitées sont souvent insignifiantes (Fig. 66d). Sur une période de 30 années (1969-2000), plus de la moitié (17 années) sont au-dessous de la moyenne (118,3 mm). Ces valeurs varient de 38 mm (1983/1984) à 386,5 mm (1969/1970).

Les moyennes calculées, permettent de noter ainsi une assez faible dispersion des données pour la station de *Ain Charchar* située au Nord, le coefficient de variation est à peine de 0,3. Pour les stations méridionales, il est de 0,4 aux stations *Reboa* et *Timgad*. Ces valeurs restent assez fortes malgré l'importance de l'échantillon traitée. A la station d'*El Kantara*, il est encore un plus élevé (0,6).

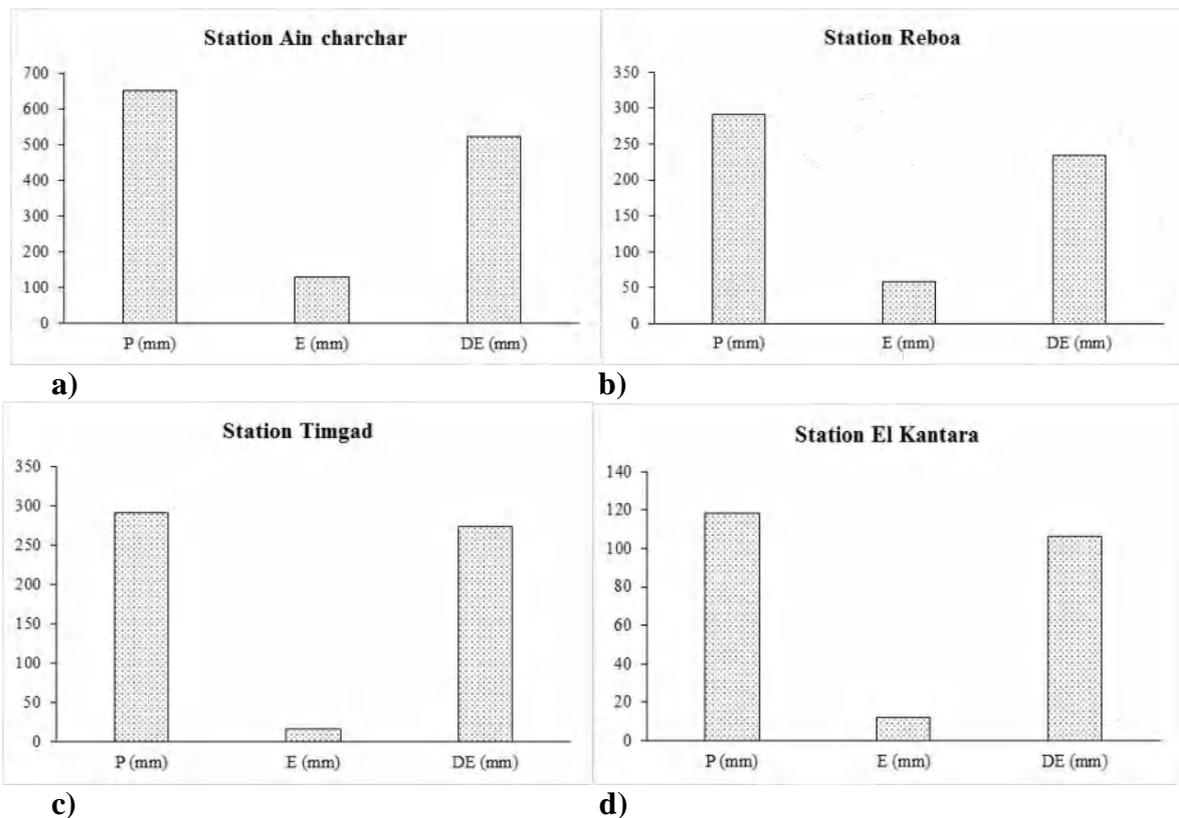


Fig. 66 : Bilans hydrologiques par station
a) Station *Ain Charchar*; b) Station *Reboa* ; d) Station *Timgad*; d) Station *El Kantara*.

4.4.6.2. La lame d'eau écoulée

La répartition annuelle des lames d'écoulement correspond en grande partie à celle des précipitations (Tableau 40). Durant les années pluvieuses les débits peuvent atteindre des valeurs importantes. C'est le cas à la station d'*Ain Charchar* où en 1986/1987, la lame d'eau enregistrée a atteint 430 mm suite à une pluviométrie importante de 981mm, ce qui représente 43% du total précipité. Cependant, les disparités géographiques de ce paramètre sont remarquables. La lame d'eau décroît en fonction de la latitude ; à la station d'*Ain Charchar*, située dans le Tell la moyenne enregistrée est de 130 mm, à *Reboa* située dans la zone des Hauts plateaux elle passe à (58 mm) soit la moitié de celle de *Ain Charchar*, à la station de *Timgad* (17 mm) et à *El Kantara*, (versant Sud de l'Atlas Saharien), elle atteint la valeur minimale de 11,6 mm.

Les coefficients de variations sont importants et forts sur l'ensemble des stations. Par exemple, à *Timgad*, l'écart type sur l'échantillon est au-dessous de la moyenne (22,52 mm), le coefficient de variation est 1,29, ce qui reflète parfaitement la dispersion des données autour de la moyenne.

4.4.6.3. Le déficit d'écoulement

Dans chaque bassin, les valeurs annuelles des déficits d'écoulement sont moins variables que les écoulements mais sont plus importants. Dans le bassin Kebir Hammam la moyenne enregistrée est de 522 mm, ce qui représente 80 % de la moyenne des pluies précipitées (Tableau 40). Dans le bassin de *Reboa*, la moyenne du déficit des écoulements des deux stations *Reboa* et *Timgad* sont respectivement de 233 mm et 273 mm. A Oued El Hai, les déficits d'écoulement sont de plus en plus importants. Ils varient à travers les années (1969/1999) de 33.1 mm (1983/1984) à 357,8 mm (1969/1970), ce qui correspond respectivement à 87 et 92,5% par rapport aux pluies précipitées.

Les écarts entre les moyennes dans les trois bassins sont de plus de la moitié (55 %) entre le bassin Kebir Hammam et *Reboa* et de plus de 79 % entre le Kebir Hammam et Oued El Hai.

Les écarts type calculés dans les trois bassins (Tableau 39) sont largement inférieurs à la moyenne. Les coefficients de variation varient également d'un bassin à un autre. Il est de 0,3 au bassin littoral Kebir Hammam et passe à une valeur de 0,6 à Oued El Hai situé sur les versants Sud de l'atlas saharien.

4.4.6.4. Le coefficient d'écoulement

Le bilan hydrologique est aussi caractérisé par un indice qui est très souvent utilisé en hydrologie de surface, le coefficient d'écoulement. Il est le rapport, exprimé en pourcentage, entre la quantité d'eau écoulée et la quantité d'eau précipitée (Tableau 39).

$$C_e = \frac{E}{P} * 100 \quad (41)$$

Où :

C_e : Coefficient de ruissellement en (%) ; *E* : Hauteur d'eau ruisselée en (mm) ; *P* : Hauteur d'eau précipitée en (mm).

Ici, les valeurs du coefficient d'écoulement ne croissent pas obligatoirement en fonction des précipitations. La faiblesse du coefficient de ruissellement prouve que la pluie tombant sur le bassin est presque entièrement absorbée par le terrain, retenue par la végétation ou évaporée pendant la durée du ruissellement.

Il est de 5,2% au bassin de *Timgad* et 10 % à Oued El Hai (Tableau 39) en raison notamment de l'importance de la surface drainée (1660 km²).

Tableau 39 : Bilan hydrologique par station

Années	Station Ain Chachar				Station Reboa				Station Timgad				Station El Kantara			
	P (mm)	E (mm)	D,E (mm)	Ce (%)	P (mm)	E (mm)	D,E (mm)	Ce (%)	P (mm)	E (mm)	D,E (mm)	Ce (%)	P (mm)	E (mm)	D,E (mm)	Ce (%)
69/70	713,4	165,2	548,2	23,2	528,3	186,8	341,5	35,4	449,6	99,9	349,7	22,2	386,8	29,0	357,8	7,5
70/71	636,6	150,3	486,3	23,6	188,5	17,7	170,8	9,4	228,7	7,2	221,5	3,2	73,8	6,1	67,7	8,2
71/72	680,2	190,8	489,4	28,1	505,3	124,7	380,6	24,7	486,9	19,9	467,0	4,1	183,5	27,5	156,0	15,0
72/73	577,7	245,2	332,5	42,4	534,0	167,3	366,7	31,3	491,8	48,9	442,9	10,0	168,6	37,0	131,6	22,0
73/74	325,4	12,2	313,2	3,7	327,3	77,8	249,5	23,8	225,7	12,1	213,6	5,4	66,3	9,5	56,8	14,3
74/75	492,0	29,1	462,9	5,9	355,3	38,0	317,3	10,7	321,9	15,5	306,4	4,8	75,2	9,3	65,9	12,4
75/76	652,4	57,4	595,0	8,8	587,7	92,4	495,3	15,7	463,4	38,2	425,2	8,2	119,6	18,6	101,0	15,5
76/77	499,2	118,0	381,2	23,6	426,9	81,7	345,2	19,1	342,0	7,2	334,8	2,1	212,1	17,2	194,9	8,1
77/78	440,1	58,3	381,8	13,2	120,0	20,6	99,4	17,2	61,5	2,8	58,7	4,5	81,9	12,2	69,7	14,8
78/79	682,2	121,6	560,6	17,8	99,5	28,0	71,5	28,1	215,4	16,3	199,1	7,6	100,5	5,6	94,9	5,6
79/80	613,8	16,5	597,3	2,7	207,8	42,2	165,6	20,3	300,7	7,5	293,2	2,5	73,1	18,3	54,8	25,0
80/81	549,3	121,4	427,9	22,1	239,7	39,1	200,6	16,3	187,7	8,0	179,7	4,2	90,5	19,8	70,7	21,9
81/82	662,1	344,1	318,0	52,0	227,2	32,1	195,1	14,1	329,7	14,1	315,6	4,3	70,0	3,7	66,3	5,3
82/83	583,2	145,9	437,4	25,0	143,3	69,3	74,0	48,3	306,9	41,5	265,4	13,5	107,0	8,4	98,6	7,9
83/84	689,0	287,6	401,5	41,7	114,7	17,3	97,4	15,1	168,9	1,3	167,6	0,8	38,0	4,9	33,1	13,0
84/85	976,3	306,8	669,5	31,4	345,8	73,7	272,1	21,3	326,0	8,0	318,0	2,5	78,2	9,6	68,6	12,3
85/86	480,8	35,1	445,7	7,3	268,0	29,1	238,9	10,9	272,3	2,3	270,1	0,8	98,4	11,2	87,2	11,4
86/87	981,1	430,6	550,5	43,9	251,6	28,6	223,0	11,4	232,0	1,9	230,1	0,8	130,3	10,1	120,2	7,7
87/88	530,3	9,3	521,0	1,7	120,5	6,9	113,6	5,7	120,0	4,6	115,4	3,9	80,6	1,7	78,9	2,1
88/89	574,2	55,4	518,8	9,6	254,6	28,7	225,9	11,3	296,4	13,7	282,7	4,6	89,2	4,2	85,0	4,7
89/90	555,7	32,5	523,2	5,8	268,7	111,2	157,5	41,4	415,8	20,8	395,0	5,0	72,6	5,2	67,4	7,1
90/91	790,5	276,9	513,6	35,0	224,0	48,7	175,3	21,7	321,4	2,8	318,6	0,9	74,9	8,6	66,4	11,4
91/92	706,4	153,4	553,0	21,7	329,4	52,7	276,7	16,0	318,7	4,0	314,7	1,3	137,0	11,9	125,2	8,7
92/93	653,5	150,0	503,5	23,0	313,4	38,4	275,0	12,3	198,1	0,9	197,2	0,5	138,6	9,1	129,5	6,5
93/94	514,2	107,4	406,8	20,9	175,2	8,3	166,9	4,7	194,9	1,6	193,3	0,8	51,0	0,2	50,8	0,5
94/95	608,7	132,6	476,1	21,8	244,5	15,6	228,9	6,4	167,5	1,8	165,7	1,1	161,9	4,7	157,1	2,9
95/96	618,3	112,7	505,5	18,2	256,8	95,9	160,9	37,3	391,5	18,8	372,7	4,8	197,5	23,0	174,4	11,7
96/97	366,8	8,4	358,4	2,3	78,7	8,1	70,6	10,3	102,1	3,0	99,1	3,0	128,0	1,1	127,0	0,8
97/98	962,5	97,6	864,9	10,1	250,3	27,8	222,5	11,1	353,6	17,0	336,6	4,8	194,0	17,8	176,2	9,2
98/99	1021,7	127,0	894,7	12,4	261,0	11,8	249,2	4,5	158,8	6,5	152,3	4,1	70,1	4,7	65,4	6,7
99/00	541,1	33,2	507,9	6,1	298,6	80,4	218,2	26,9	269,7	8,9	260,8	3,3	/	/	/	/
00/01	764,7	30,9	733,8	4,0	135,6	15,4	120,2	11,4	146,6	8,4	138,2	5,7	/	/	/	/
01/02	620,0	11,2	608,8	1,8	179,9	60,2	119,7	33,5	216,3	24,8	191,5	11,5	/	/	/	/
02/03	1113,4	245,5	867,9	22,0	353,8	45,5	308,3	12,9	444,6	21,1	423,5	4,7	/	/	/	/
03/04	/	/	/	/	456,7	97,6	359,1	21,4	390,0	31,0	359,0	8,0	/	/	/	/
04/05	/	/	/	/	366,3	107,7	258,6	29,4	337,5	65,0	272,5	19,2	/	/	/	/
05/06	/	/	/	/	304,7	39,9	264,8	13,1	325,7	5,2	320,5	1,6	/	/	/	/

Tableau 39 (Suite) : Bilan hydrologique par station

Années	Station Ain Chachar				Station Reboa				Station Timgad				Station El Kantara			
	P (mm)	E (mm)	D,E (mm)	Ce (%)	P (mm)	E (mm)	D,E (mm)	Ce (%)	P (mm)	E (mm)	D,E (mm)	Ce (%)	P (mm)	E (mm)	D,E (mm)	Ce (%)
06/07	/	/	/	/	308,5	40,1	268,4	13,0	247,3	5,1	242,2	2,1	/	/	/	/
07/08	/	/	/	/	438,2	187,7	250,5	42,8	438,5	92,3	346,2	21,0	/	/	/	/
08/09	/	/	/	/	478,5	123,4	355,1	25,8	468,3	30,3	438,0	6,5	/	/	/	/
09/10	/	/	/	/	323,5	31,0	292,5	9,6	285,5	3,0	282,5	1,0	/	/	/	/
10/11	/	/	/	/	380,0	27,8	352,2	7,3	338,9	1,8	337,1	0,5	/	/	/	/
11/12	/	/	/	/	277,7	34,9	242,9	12,6	162,9	5,1	157,8	3,1	/	/	/	/
Moyenne	652,3	130,0	522,3	18,6	291,9	58,4	233,5	19,0	291,2	17,4	273,8	5,2	118,3	11,7	106,6	10,0
Ecartype	182,6	107,8	146,8	13,5	125,6	47,0	96,0	11,0	111,3	22,5	99,8	5,2	68,9	8,9	63,4	6,0
CV	0,3	0,8	0,3	0,7	0,4	0,8	0,4	0,6	0,4	1,3	0,4	1,0	0,6	0,8	0,6	0,6

4.4.7. Ajustement des modules moyens annuels

L'analyse statistique des débits moyens annuels des stations est réalisée par la méthode de maximum de vraisemblance, les propriétés théoriques de cette méthode sont bien connues (Bickel et Doksum, 1977). Elle est asymptotiquement optimale pour des échantillons de grande taille (non biaisée, variance minimale). L'estimation des paramètres des distributions a été obtenue d'une manière itérative à partir du logiciel Hyfran Plus. Ce dernier, nous a permis notamment de choisir rapidement l'ajustement le plus adéquat aux quantiles considérés, vérifier les hypothèses de base, en plus de produire la représentation graphique des ajustements à la loi correspondante. La vérification de l'adéquation de ces lois à l'échantillon des valeurs observées est réalisée par le test du χ^2 .

Afin de saisir visuellement l'ajustement, une présentation graphique des quantiles de la distribution (reliées en courbe d'ajustement) est réalisée. Sur les graphes l'axe des abscisses correspond à la variable réduite correspondante de la loi théorique et l'axe des ordonnées aux quantiles de la distribution observée.

Deux lois ont été retenues par Hyfran Plus, Les échantillons des débits moyens annuels des stations de *Ain Charchar*, *Timgad* et *El Kantara* s'ajustent mieux à la loi Gamma⁽²⁾, la station de *Reboa* à une loi Log-normale (Fig.67,68,69 et 70) au seuil de 0,05 (intervalle de confiance de 95%).

Les quantiles des débits moyens des périodes de récurrence 2, 10, 20, 50,100 et 1000 ans sont évalués en recourant aux équations correspondantes (tableau 40). A titre d'exemple, à la station de *Ain Charchar*, le débit de 3,36 m³/s est un débit de récurrence, qui chaque année a une chance sur deux de se produire. Le tableau 41 montre que pour des faibles périodes de récurrence, les différents bassins produisent les débits les plus faibles et vice versa. De plus, les

⁽²⁾ Loi de Gamma :

$$F(x) = \frac{\alpha^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \int_0^u u^{\gamma-1} e^{-u} du \quad u = \frac{x-x_0}{\delta}$$

quantiles à la station d'El Kantara sont plus faibles que ceux du bassin Kebir Hammam et Reboa vu le climat et la superficie du bassin versant qui est beaucoup plus grande.

Tableau 40 : Quantiles des débits par station

Période de retour	2	10	20	50	100	1000
Fréquence	0,5	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
Variable réduite	0,000	1,282	1,645	2,054	2,326	3,090
Ain Charchar	3,36	10,1	12,9	16,6	19,4	28,6
Reboa	0,40	1,18	1,60	2,26	2,84	5,42
Timgad	0,08	0,37	0,56	0,92	1,27	3,15
El Kantara	0,34	0,88	1,10	1,39	1,60	2,29

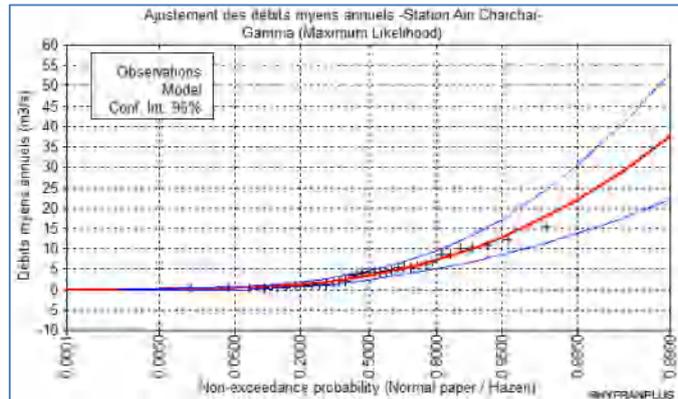


Fig. 67 : Ajustement des débits moyens annuels à loi Gamma –Station Ain Charchar-

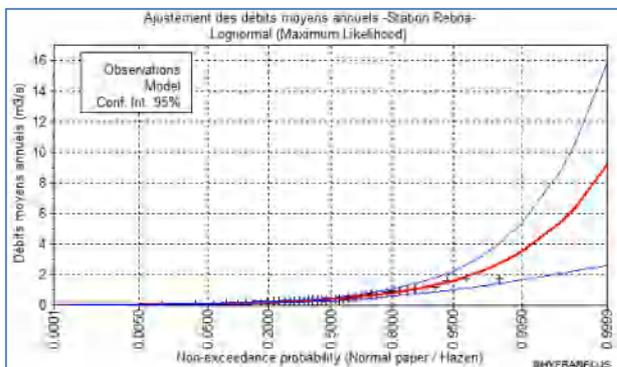


Fig. 68 : Ajustement des débits moyens annuels à loi Log-normale -Stations Reboa-

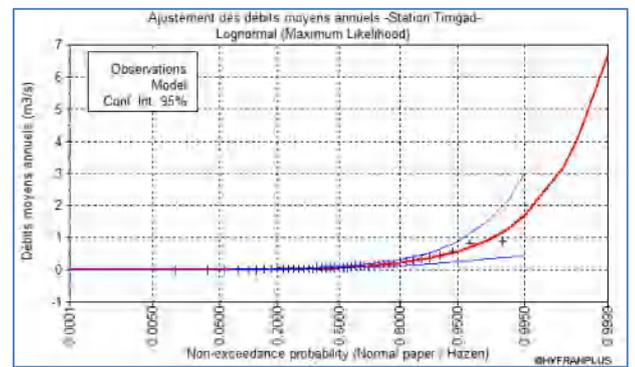


Fig. 69 : Ajustement des débits moyens annuels à loi Log-normale -Stations Timgad-

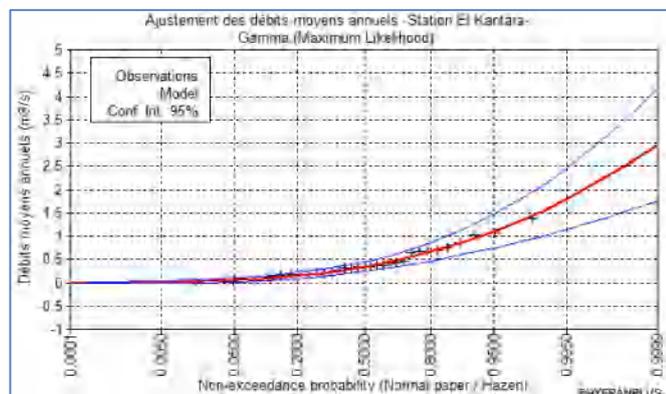


Fig. 70 : Ajustement des débits moyens annuels à loi Gamma –Station El Kantara-

4.5. Les modules moyens mensuels et saisonniers

4.5.1. Les modules moyens mensuels

Si les débits moyens annuels caractérisent l'abondance ordinaire des cours d'eau, la distribution des débits moyens mensuels donnent une idée de l'évolution saisonnière de la ressource en eau des cours d'eau. Elle permet aussi de définir la nature du régime auquel appartiennent les bassins et de mieux comprendre leur variabilité inter-saisonnière.

Il existe différents indices hydrologiques permettant de caractériser le régime mensuel des écoulements. Citons l'indice mensuel de débits « CMD », défini comme le rapport du débit mensuel moyen au module interannuel calculé sur un certain nombre d'années, pris pour l'unité. Son calcul (Tableau 41) permet de représenter la répartition, en pourcentage, des débits mensuels au cours de l'année. Les valeurs des mois inférieures à l'unité correspondent à la période de basses eaux et celles supérieures à l'unité correspondent à la période de hautes eaux.

Tableau 41 : Moyennes et coefficients mensuels des débits

Station		Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fevr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
<i>Ain Charchar</i>	Moyenne	0,14	1,22	3,54	7,17	11,83	12,80	8,83	6,58	2,33	0,25	0,08	0,02	4,57
	Ecart	0,28	2,62	7,29	10,53	13,14	16,52	10,50	9,66	5,65	0,27	0,20	0,03	3,87
	CV	1,94	2,15	2,06	1,47	1,11	1,29	1,19	1,47	2,43	1,11	2,54	1,63	0,85
	Max	1,40	11,45	30,24	36,42	41,88	<u>73,90</u>	40,80	33,30	32,23	1,12	0,88	0,11	15,43
	Min	0,00	0,00	0,02	0,18	0,22	0,38	0,02	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
	CMD	0,03	0,27	0,78	<u>1,57</u>	<u>2,59</u>	<u>2,80</u>	<u>1,93</u>	<u>1,44</u>	0,51	0,05	0,02	0,00	0,00
<i>Reboa</i>	Moyenne	0,63	0,44	0,37	0,37	0,45	0,59	1,02	0,91	1,12	0,37	0,12	0,19	0,55
	Ecartype	1,41	1,09	0,80	0,58	0,54	0,51	1,18	0,94	1,66	0,56	0,23	0,42	0,44
	CV	2,24	2,47	2,16	1,58	1,21	0,86	1,16	1,03	1,48	1,50	1,84	2,21	0,81
	Max	8,10	6,94	4,76	2,67	1,95	1,71	6,39	4,78	7,24	3,29	1,08	2,45	1,76
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
	CMD	1,15	0,80	0,67	0,67	0,82	<u>1,08</u>	<u>1,85</u>	<u>1,66</u>	<u>2,04</u>	0,68	0,22	0,35	0,35
<i>Timgad</i>	Moyenne	0,50	0,28	0,16	0,12	0,07	0,05	0,09	0,13	0,23	0,11	0,07	0,06	0,15
	Ecartype	1,17	0,78	0,59	0,52	0,16	0,10	0,18	0,22	0,43	0,23	0,17	0,12	0,20
	CV	2,33	2,77	3,57	4,46	2,34	2,21	2,06	1,66	1,90	2,02	2,60	2,12	1,29
	Max	6,40	4,86	3,67	3,45	0,82	0,60	1,06	0,90	1,92	1,21	0,86	0,49	0,89
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
	CMD	<u>3,24</u>	<u>1,81</u>	<u>1,06</u>	0,76	0,44	0,30	0,55	0,84	<u>1,47</u>	0,73	0,42	0,37	0,37
<i>El Kantara</i>	Moyenne	1,56	0,31	0,42	0,23	0,28	0,40	0,64	0,61	0,24	0,19	0,15	0,11	0,43
	Ecartype	2,05	0,36	0,61	0,39	0,64	0,49	0,69	0,70	0,27	0,26	0,28	0,18	0,33
	CV	1,31	1,15	1,46	1,70	2,30	1,24	1,08	1,16	1,11	1,38	1,84	1,59	0,76
	Max	7,58	1,33	2,27	2,16	3,49	2,04	2,32	2,40	0,87	1,35	1,42	0,93	1,37
	Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
	CMD	3,65	0,73	0,97	0,53	0,65	0,93	<u>1,49</u>	<u>1,42</u>	0,57	0,45	0,36	0,26	0,26

Les figures (71, 72, 73 et 74) donnent une idée sur la répartition mensuelle des débits. Majoritairement, ils montrent deux tendances saisonnières. Encore, la saisonnalité du régime des débits est conditionnée par les apports pluviométriques de sorte que le régime des cours d'eau est de type pluvial pur. Sur les hydrogrammes des débits mensuels, les périodes des hautes et basses eaux peuvent être clairement identifiées, seulement, elles restent divergentes entre bassins.

A la station *Ain Charchar*, les eaux commencent à monter à partir du mois de Décembre pour atteindre le maximum au mois de Février ($73,9 \text{ m}^3/\text{s}$), période la plus pluvieuse du bassin. A partir des mois de printemps (de Mars à Mai), les débits diminuent de façon graduelle, jusqu'à atteindre le minimum qui survient en été (Juin-septembre). La moyenne la plus basse du débit est observée au mois d'Août avec une valeur de $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tout au long de l'année, le rapport de la moyenne mensuelle du débit et le module moyen annuel (CMD) varie, il passe de 0,003 enregistré en Août et 2,8 enregistré en Février.

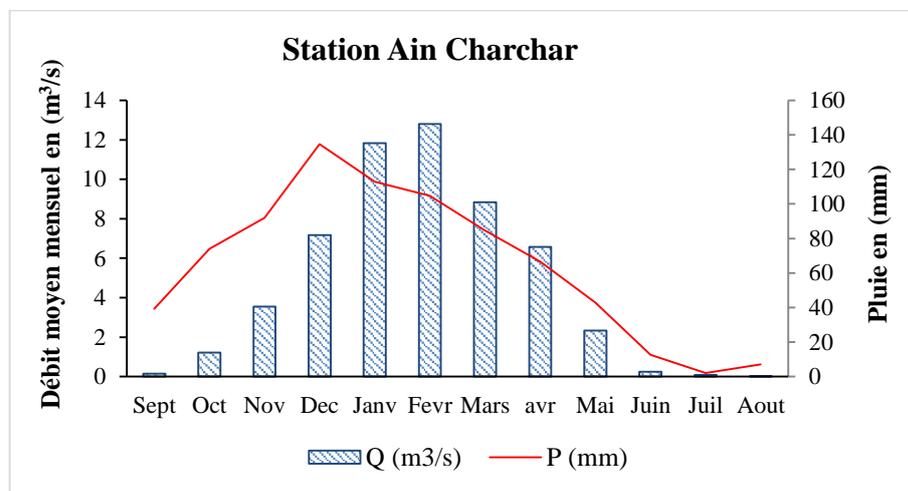


Fig. 71 : Variation mensuelle des débits et pluies –Station *Ain Charchar*–

Dans le bassin de *Reboa*, les débits moyens mensuels dans les deux stations varient naturellement au cours de l'année en fonction de la variation des pluies. La répartition mensuelle des débits récapitulée sur les deux figures 72 et 73 dégage deux maxima et deux minima. Le premier pic des débits est visible au mois de Septembre ($0,63 \text{ m}^3/\text{s}$ à *Reboa* et $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$ à *Timgad*). Le second est principal à la station *Reboa* avec une moyenne de $1,12 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ à *Timgad*.

L'analyse des coefficients mensuels des débits (Tableau 41) montre que malgré la présence des périodes des hautes et basses eaux bien déterminées, les débits mensuels présentent à la station *Reboa* de faibles variabilités en comparaison de ceux enregistrés à la station de *Timgad*. Ils varient de 0,22 à 2,04 alors qu'à la station de *Timgad* ils oscillent entre 0,30 à 3,24. En somme, à la station *Reboa*, quatre mois, de Février à Mai (période des hautes eaux) possèdent un rendement positif avec un apport en plus au mois de Septembre, Inversement, la période des hautes eaux à *Timgad* débute Septembre et s'achève en Novembre auquel s'ajoute un apport moins important au mois de Mai.

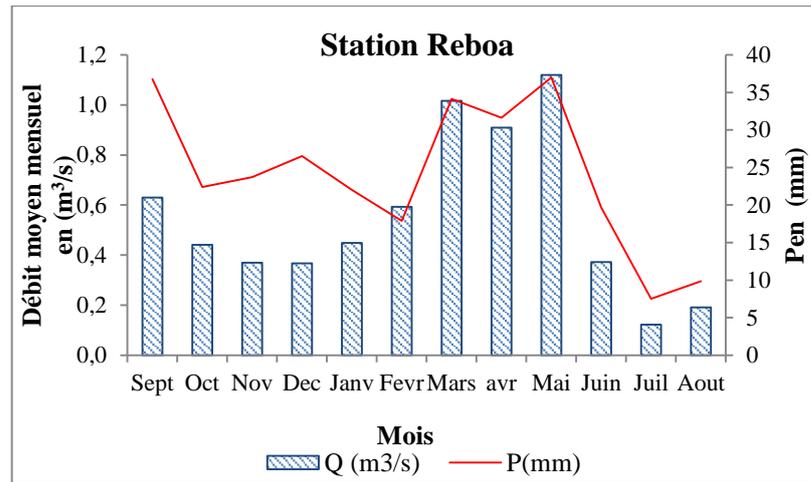


Fig. 72 : Variation mensuelle des débits et des pluies–Station Reboa-

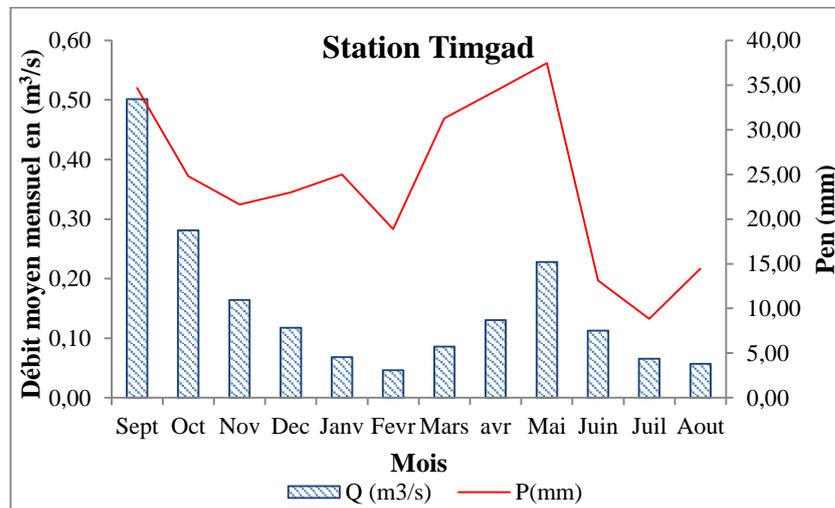


Fig. 73 : Variation mensuelle des débits et des pluies –Station Timgad-

Plus Sud, dans le bassin Oued El Hai, le pic de débits s’observe au mois de Septembre. Le débit enregistré est de 1,56 m³/s, lié aux précipitations importantes en ce mois (38,66 mm à Ouled Chelih et 17,31 mm à la station El Outaya). Un second pic, moins important est enregistré entre le mois de Mars et Avril lié aux averse qui surviennent au Printemps. En ces périodes, le bassin connaît de fortes pluies orageuses qui tombent en un laps de temps très réduit. Elles génèrent une montée rapide des eaux de Oued El Hai.

La période des hautes eaux pour Oued El Hai est toujours brève, elle débute avec les premières pluies de Septembre et s’achève avec elles, Après ce mois les coefficients mensuels de débits chutent rapidement au-dessous de l’unité d’Octobre jusqu’au mois de février pour augmenter à nouveau au mois de Mars et avril. Par ailleurs, la période de basses eaux est annoncée très tôt. Elle commence dès le mois de Mai du fait de l’importance relative des précipitations.

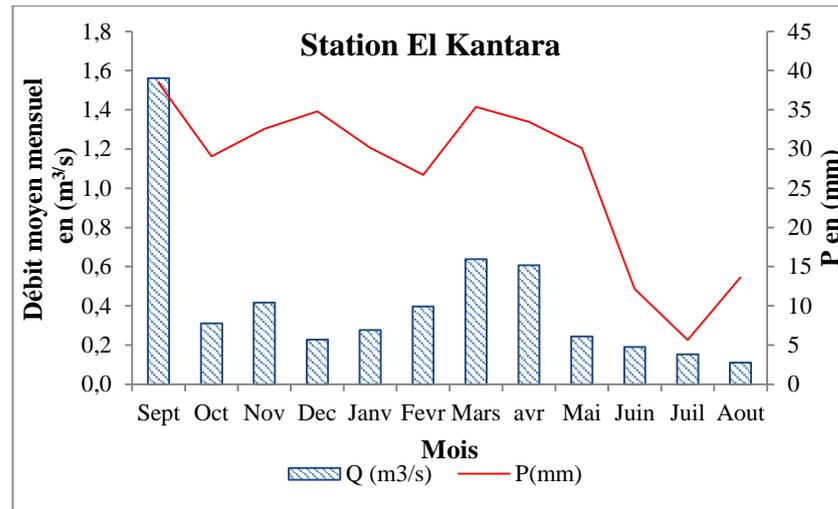


Fig. 74 : Variation mensuelle des débits et des pluies –Station El Kantara-

4.5.2. Les modules moyens saisonniers

La répartition saisonnière des débits ne se présente pas de façon uniforme tout le long de l'année dans toutes les stations. A *Ain Charchar*, les débits s'élèvent en Hiver et au Printemps (Fig. 75). Le débit total en ces deux saisons est respectivement de 10,6 m³/s et 5,91 m³/s. Ce qui correspond à une lame d'eau précipitée de 295,8 mm et 164,9 mm. En Eté le débit diminue de façon conséquente, mais ne tari pas complètement, bien que les précipitations soient presque nulles. Cette production de débit en cette saison est due probablement au soutien que procurent des eaux souterraines au cours d'eaux en cette saison.

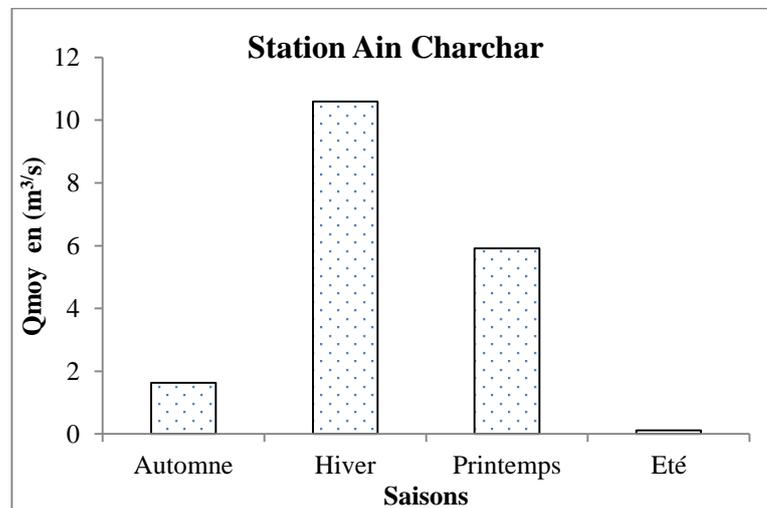


Fig. 75 : Distribution saisonnières des débits –Station Ain Charchar-

A *Reboa*, les saisons de grands apports d'eau diffèrent entre les deux stations. A la station *Reboa* (Fig. 76), la saison des débits importants s'observe au Printemps (1,02 m³/s). L'Hiver et l'Automne viennent avec des débits similaires en seconde position. Elles lui procurent un débit moyen saisonnier de 0,47 m³/s chacun.

A la station de *Timgad*, les débits importants sont beaucoup plus précoces en comparaison de ceux observés à la station *Reboa* (Fig. 77). La saison automnale assure un débit

moyen saisonnier très faible de l'ordre de $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$, suivie par l'hiver et l'été avec une moyenne égale de $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$.

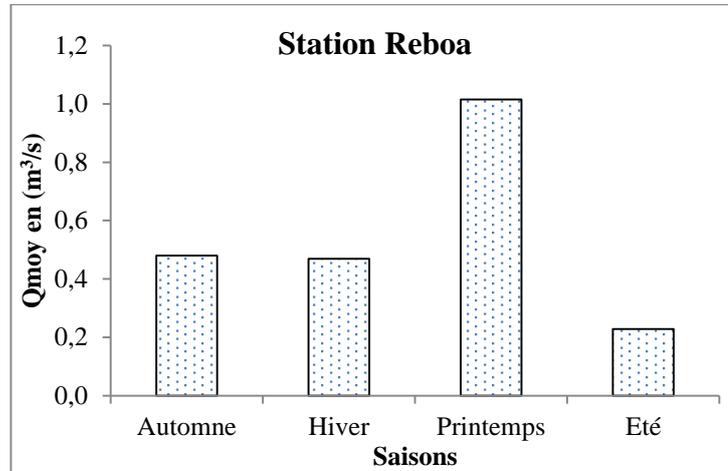


Fig. 76 : Distribution saisonnières des débits –Station *Reboa*-

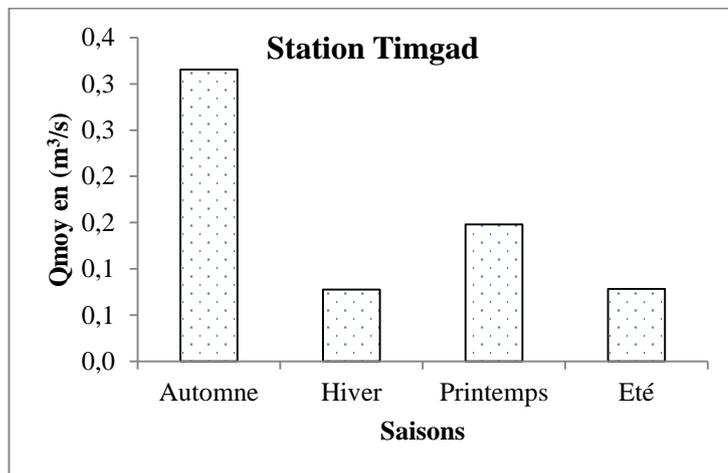


Fig. 77 : Distribution saisonnières des débits –Station *Timgad*-

La répartition saisonnière des débits à la station *El Kantara* est similaire à celle de *Timgad* (Automne-Printemps-Hiver-Eté). La figure (Fig. 78) montre qu'en Automne, le débit est maximal et enregistre une valeur de $0,76 \text{ m}^3/\text{s}$. Le Printemps lui succède avec un débit moyen saisonnier de $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le déficit voir l'absence d'écoulement pour certaines stations se fait remarquer en Eté. Le peu de pluies qui précipitent sous forme d'averses en cette saison rechargent en eau les sols asséchés. A ce phénomène s'ajoute des températures plus chaudes qui favorisent l'évaporation des sols, ce qui ne permet nullement de soutenir le débit des cours d'eau malgré des précipitations plus fortes au Printemps.

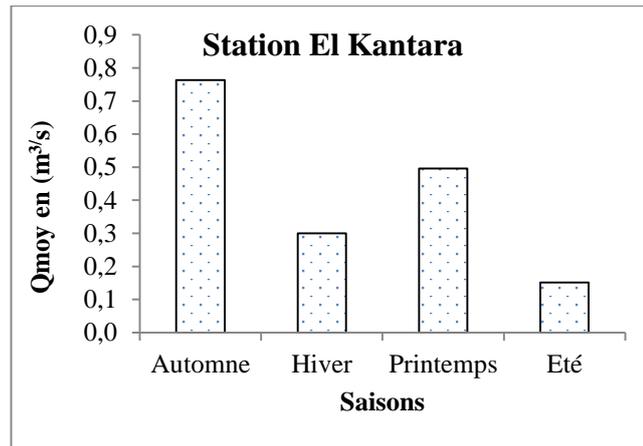


Fig. 78 : Distribution saisonnières des débits –Station El Kantara-

4.5.3. Coefficients de variation

L'analyse du coefficient de variation mensuel des débits traduit pleinement la variabilité mensuelle et saisonnière décrites précédemment (Tableau 42). Le coefficient de variation mensuel est entièrement supérieur à 1 dans toutes les stations. A *Timgad*, les dispersions sont les plus importantes. Le coefficient varie de 1,08 enregistré en Avril à 4,46, valeur enregistrée au mois de Décembre. Les plus forts coefficients dans le bassin Kebir Hammam concernent les mois secs de basses eaux. Ceci s'explique par l'importance et la fréquence élevée des crues en ces mois.

4.5.4. Relations entre débits moyens mensuels et pluies

La confrontation entre la tranche d'eau précipitée et la lame d'eau écoulee mensuelle (Fig. 79), montre qu'au niveau des quatre stations, les débits suivent pratiquement les hauteurs mensuelles pluviométriques. Ils varient de 0,57 à la station de *Timgad* à 0,83 à la station *Reboa*.

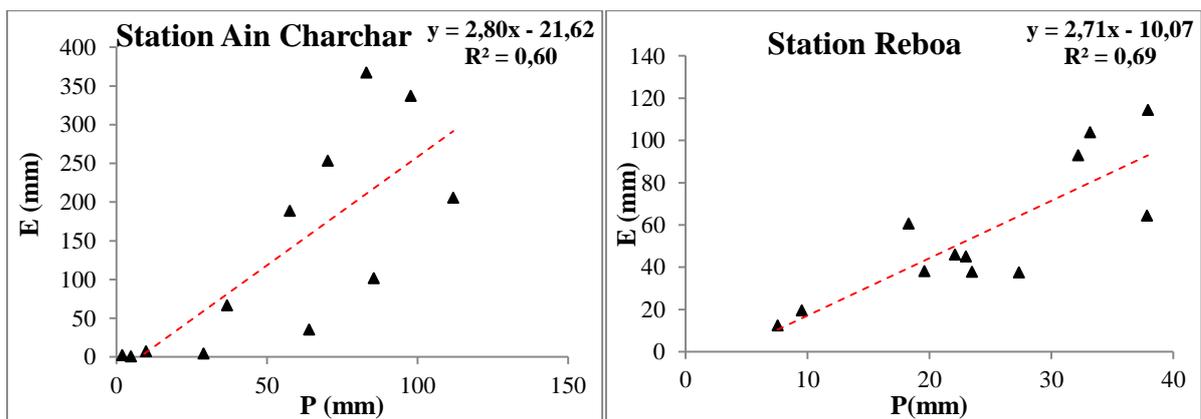


Fig. 79 : Relations entre débits et pluies mensuels par station.

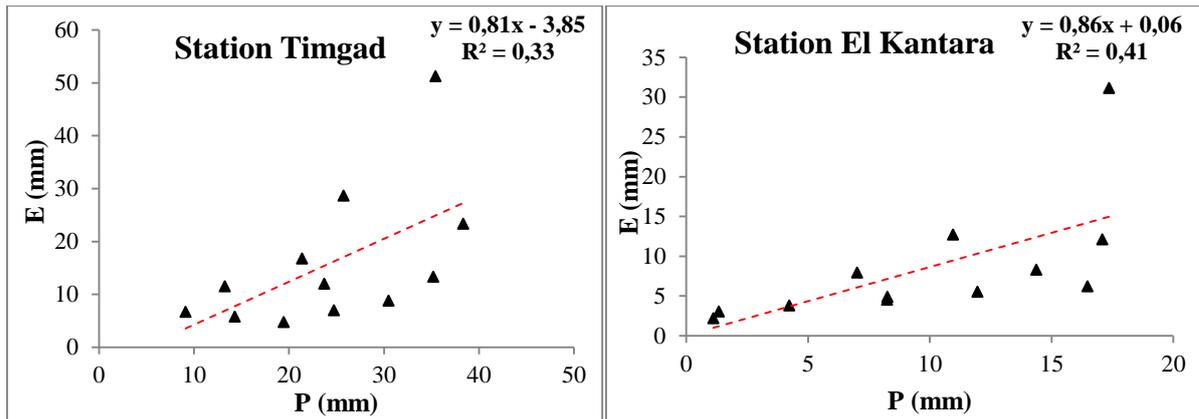


Fig. 79 : (Suite) Relations entre débits et pluies mensuels par station.

4.6. Les modules moyens journaliers dans l'année

Afin d'affiner d'avantage l'analyse des débits nous avons jugé utile d'étudier leur variabilité journalière dans l'année. Les débits moyens journaliers sont beaucoup plus représentatifs de l'écoulement.

Pour saisir au mieux ces variations de débits survenues, les débits journaliers ont été traités pour deux années extrêmes (humide et sèche) et une année moyenne dans toutes les stations.

Les chroniques de débits moyens journaliers enregistrés pour le bassin Kebir Hammam à la station d'Ain Charchar (Fig. 80) montrent que le débit moyen maximum culmine à 264,6 m³/s en année humide (1986/1987), il est seulement de 12,7 m³/s en année sèche (1996/1997). En année moyenne l'amplitude entre les débits maximums est moins grande.

La période des hautes eaux est bien distincte en année humide. Elle arrive entre la mi-Novembre et se prolonge jusqu'au début du mois d'Avril. Au sein de ces événements de hautes eaux, on observe également une grande variabilité des débits. La chronique moyennée permet de s'affranchir de cette variabilité. On observe cependant que les grandes variations de hautes et basses eaux à l'échelle de l'année sont conservées.

En année sèche (1996/1997), les débits sont moins importants, Ils ne dépassent pas les 13 m³/s. La période des grands débits est retardée, elle n'intervient qu'entre la mi-October et la mi-Janvier avec un retour marqué le 15 et le 20 mars.

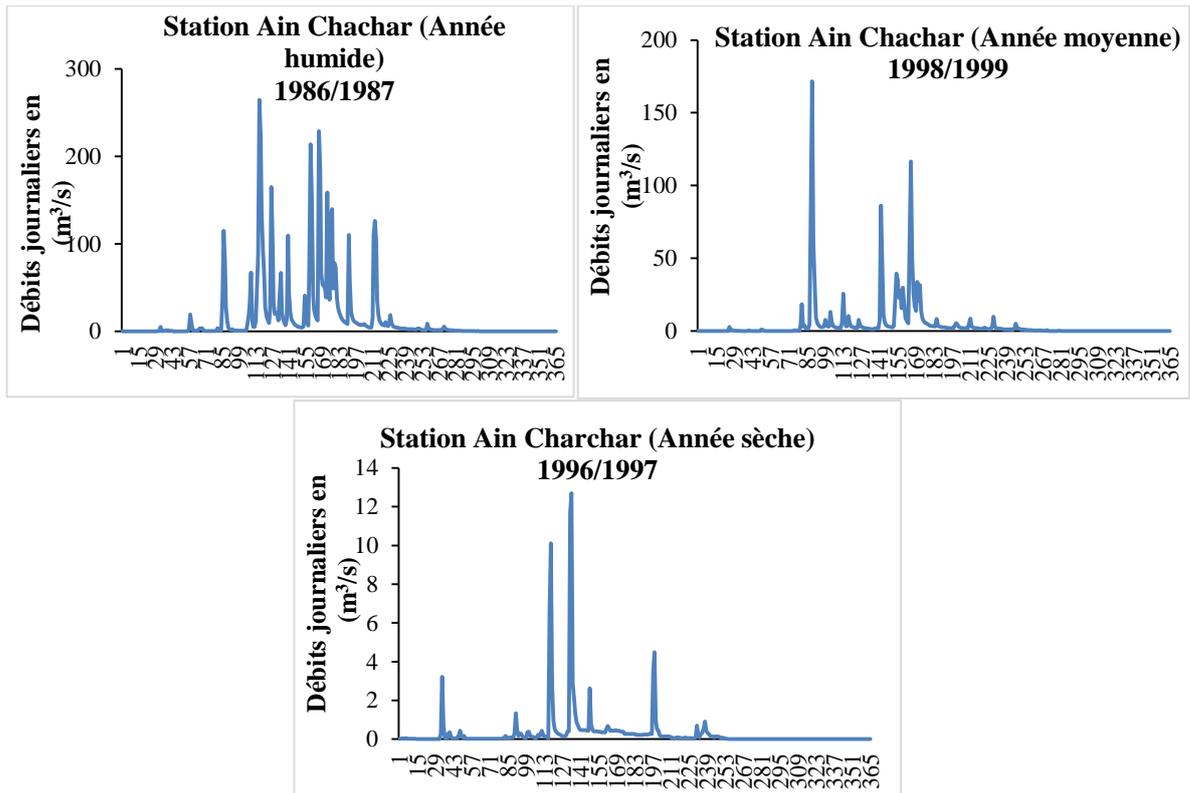


Fig. -80 : Variation journalière des débits à la station Ain Charchar.

En observant les chroniques de débits (Fig. 81 et 82) des deux stations *Reboa* et *Timgad*, on remarque que les variations sont rapides et peu fréquentes en année moyenne et sèche, une hausse et une diminution significatives s'effectuant seulement en quelques jours dans l'année. La variabilité globale est moins importante que dans les autres pas de temps. Contrairement, aux débits annuels et saisonniers, la plus faible variabilité est observée en régime journalier. Quant aux amplitudes journalières de fluctuation des débits, elles sont très fortes.

En année moyenne, les débits moyens journaliers à la station *Reboa* varient de 0,01 m³/s enregistré entre le 3 janvier et le 11 mars 2001 à 24,91 m³/s (le 4 septembre 2000). A partir de la mi-mars 2001, les débits diminuent brusquement et l'écoulement tarit. Cette situation s'étend jusqu'au 24 septembre et ce n'est qu'à partir de cette date que l'écoulement reprend de nouveau, mais reste très faible. En année humide, Le pic de débit est atteint le 27 septembre 1969 avec 61,78 m³/s, l'écoulement est présent toute l'année même durant les mois d'habitude, les plus secs (Juillet et Aout), La valeur minimale du débit est de 0,06 m³/s (le 28 et 29 juillet 1970). En année sèche les écoulements sont généralement nuls sur plus de la moitié des jours de l'année, ainsi l'année (1987/1988), le débit maximum observé a été de 7,30 m³/s enregistré en une journée isolée le 8 juin 1988. Cette valeur correspond à une crue inscrite à la même date. Après un étiage du cours d'eau, une crue débute le 8 juin 1988 à 06h00 du matin et enregistre un maximum instantané de 23 m³/s vers 10h30,

A *Timgad*, la situation est semblable à celle de *Reboa*. Les débits moyens journaliers sont de plus en plus faibles et se limitent à quelques jours dans l'année. En année humide, le débit maximal observé est de 53,59 m³/s (27 septembre 1969). Au mois de Septembre les débits sont les plus faibles, la valeur minimale du débit enregistrée étant de 0,0003 m³/s. En année moyenne

et sèche, les débits sont quasiment nuls sur plus de 60% des jours de l'année, ainsi à titre d'exemple, le débit maximal enregistré le 7 novembre 1992 en année moyenne est moins important que celui enregistré en année sèche (0,78 m³/s).

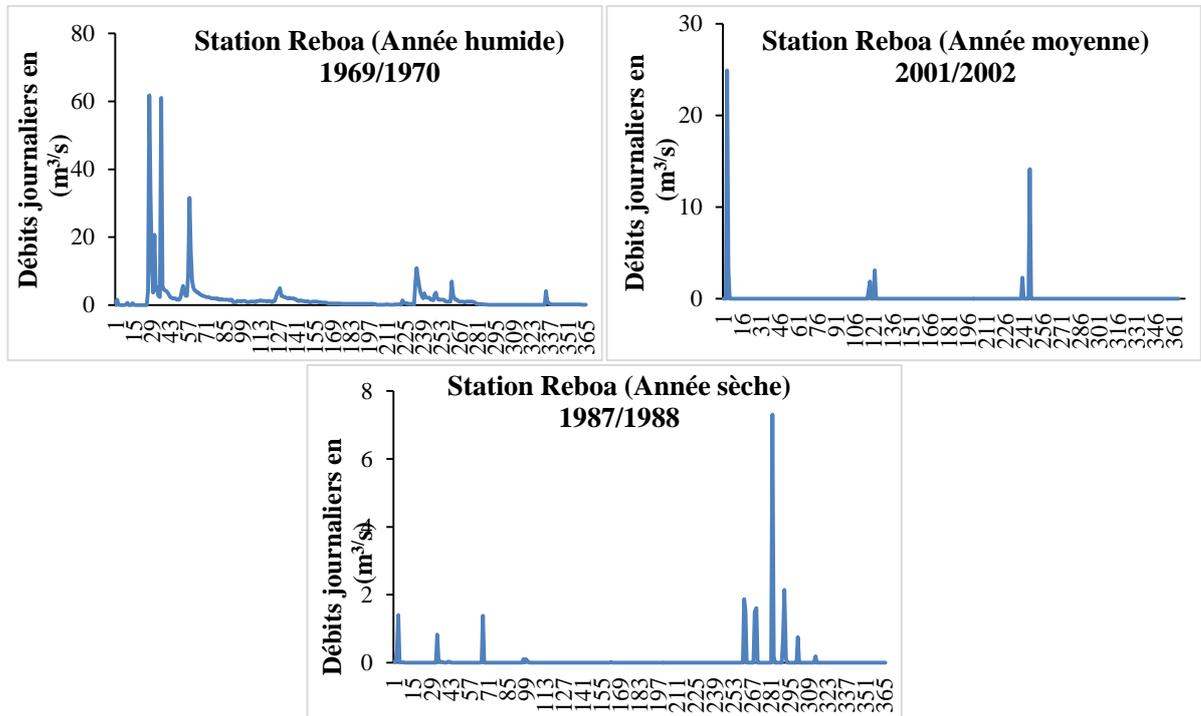


Fig. 81: Variation journalière des débits à la station Reboa

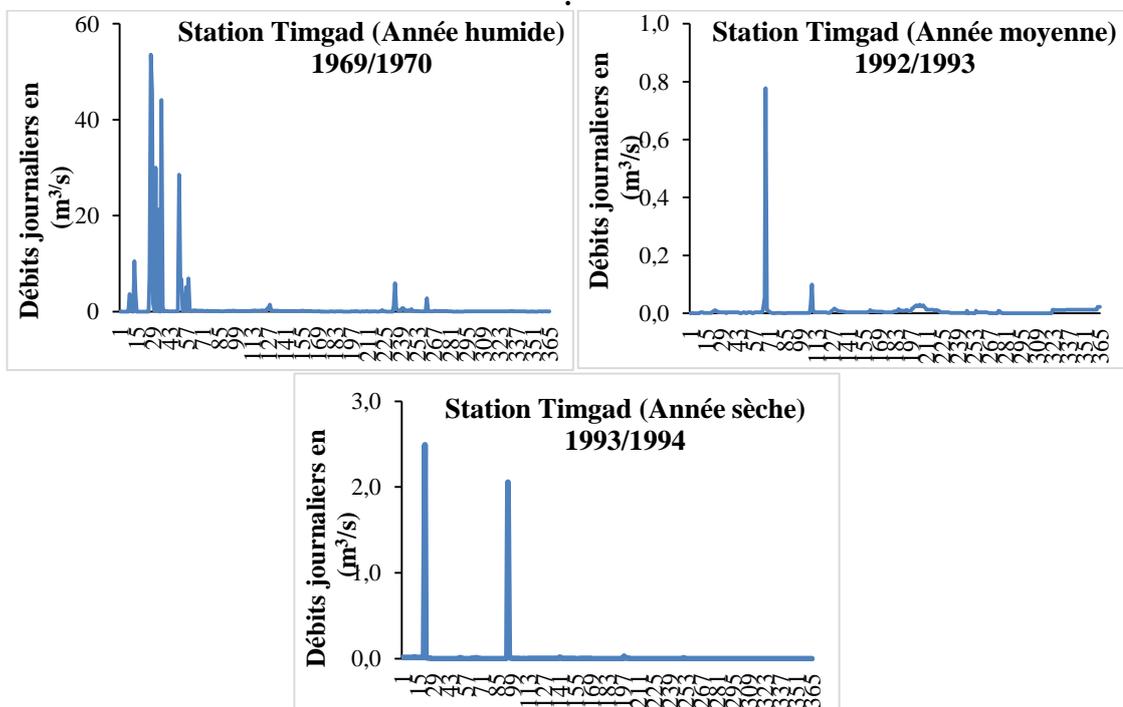


Fig. 82 : Variation journalière des débits à la station Timgad

Sur le réseau hydrographique du bassin de Oued El Hai, l'écoulement journalier moyen montre dans l'ensemble une évolution au tarissement, significative (Fig. 83). Les débits importants enregistrés durant les trois années caractéristiques se limitent à quelques jours

seulement dans l'année. De plus, certains événements observés sur les chroniques ont enregistré des sauts brutaux de débits. Ils peuvent être expliqués par leur liaison aux crues qui ont pour origine les averses parfois orageuses. La plus abondante est celle enregistrée en année humide (1972/1973). Cela se traduit par le débit maximal unique dans l'année enregistré le 4 septembre 1972, de $170 \text{ m}^3/\text{s}$.

En année moyenne, les crues enregistrées sont de plus en plus fréquentes mais moins importantes. Elles apparaissent particulièrement entre le mois de Septembre et Octobre. Le reste des jours, les débits varient peu et lentement. Les chroniques des débits moyens journaliers, en année sèche (de Septembre 1993 à Août 1994), donnent une idée sur l'ampleur du tarissement d'Oued El Hai. En cette année l'écoulement a connu un déficit sensible et important. Le 2 Novembre 1993, la station d'*El Kantara* a enregistré un débit maximal de $0,58 \text{ m}^3/\text{s}$. Une valeur jugée très faible mais permettant toutefois, le rétablissement du débit du cours d'eau.

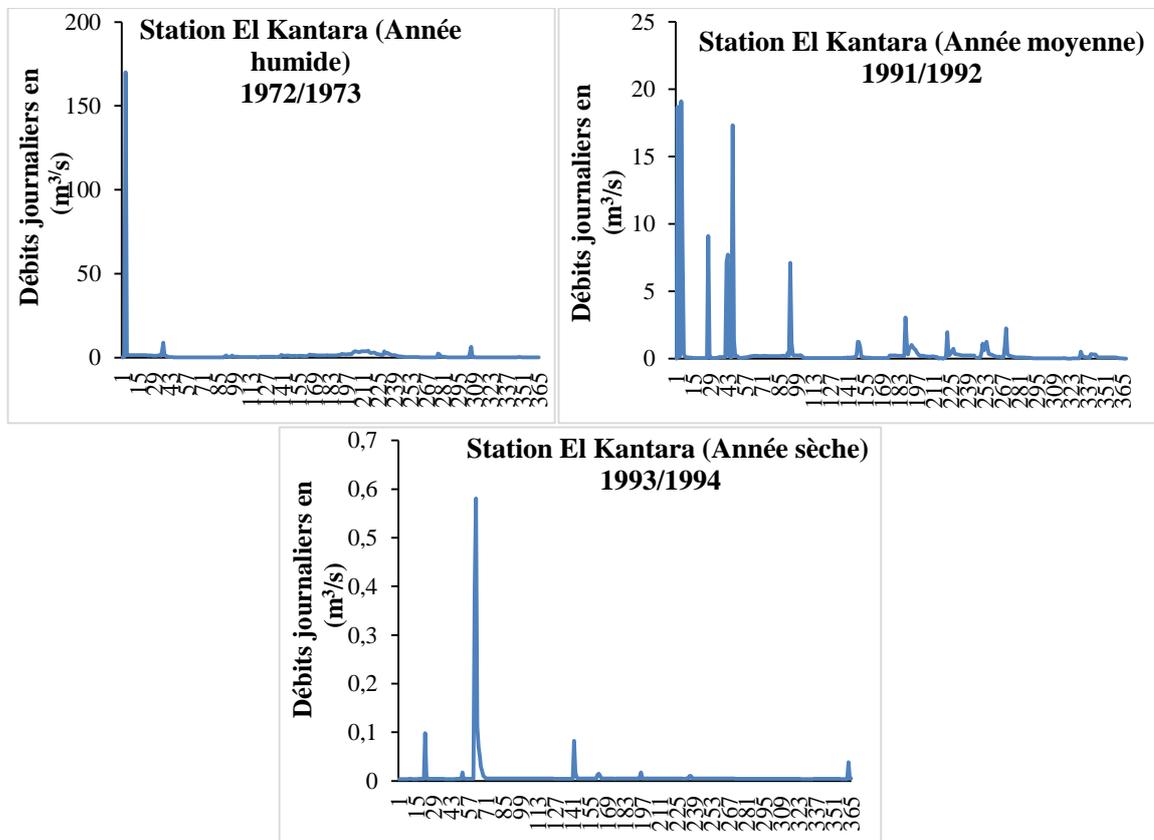


Fig. 83 : Variation journalière des débits à la station *El Kantara*.

L'usage également est de qualifier les questions de fréquence sur ce qu'on appelle la « courbe des débits classés ».

4.7. Courbes des débits classés

La courbe des débits classés ou courbe de régime indique le nombre de jours pendant lesquels il y a assurance, en moyenne, d'avoir un certain débit. Sa connaissance permet de fournir

les débits caractéristiques qui ont une grande importance dans l'étude des régimes des cours d'eau, tout particulièrement au point de vue de l'aménagement hydro-électrique.

Elle s'obtient en portant sur un graphique tous les débits journaliers observés se rapportant à une période donnée (saison, année) classés par ordre décroissant. Ainsi, lorsqu'il s'agit d'une année, cette courbe fournit la durée moyenne de dépassement d'un débit donné pendant un cycle annuel. Elle est souvent définie par quelques valeurs particulières appelées "débits caractéristiques". Le plus important est le débit caractéristique médian qui est celui dont on est assuré pendant 182,5 jours par an, soit pendant la moitié de l'année, ainsi que d'autres débits caractéristiques qui sont de même importance et sont indiqués ci-dessous:

1. Le débit Caractéristique Maximum (DCMax), débit dépassé 10 jours par an.
2. Le débit Caractéristique d'étiage (DCE) débit dépassé 355 jours par an.
3. Les débits Caractéristiques de n mois (DCn) : débits dépassés n mois par an (DC1 : débit dépassé en un mois « au 30 ème jour » ; DC3 : débit dépassé en trois mois « à 91,25 jour »). (Tableau 42)

Les courbes de débits classés pour les trois cas (Année humide, moyenne et sèche) dans les trois bassins ont une forme plus ou moins « creuse», elles donnent une indication sur la dynamique des bassins. Un bassin avec des crues exceptionnelles aura une courbe des débits classés creuse. C'est ce que l'on constate pour le bassin *Reboa* à la station *Timgad* et pour le bassin Oued El Hai, à la station *El Kantara*.

Tableau 42 : Débits caractéristiques en (m³/s) par station.

Bassin	Station	Année		Qmax	DCMax	DC1	DC3	DC6	DCE	Qmin
Kebir Hammam	Ain Charchar	H	1986/1987	264,60	134,80	57,28	9,57	1,50	0	0
		M	1998/1999	171,60	35,24	9,83	2,76	0,58	0	0
		S	1996/1997	12,70	2,62	0,49	0,26	0,04	0	0
Reboa	Reboa	H	1969/1970	61,78	8,11	3,63	1,62	0,85	0,02	0,01
		M	2001/2002	24,91	0,03	0,02	0,02	0,00	0,00	0
		S	1987/1988	7,309	0,7523	0,006	0,001	0,001	0,00	0
	Timgad	H	1972/1973	53,59	6,75	0,27	0,15	0,07	0	0
		M	1991/1992	0,78	0,03	0,01	0,01	0	0	0
		S	1993/1994	2,49	0,01	0	0	0	0	0
Oued El Hai	El Kantara	H	1972/1973	170,00	3,71	2,42	1,37	0,43	0,09	0,08
		M	1991/1992	19,11	2,25	0,61	0,22	0,10	0,01	0
		S	1993/1994	0,58	0,02	0,01	0	0	0	0

H : année humide ; M : année moyenne ; S : année sèche

De la courbe des débits classés du bassin Kebir Hammam (Fig. 84), il en ressort un débit caractéristique maximal (DCMax) très variable. Il fluctue entre 134,80 m³/s en 1986/87 (Année humide) et 12,70 m³/s (Année sèche). Il s'écarte considérablement des débits d'étiage (DCE) négatifs dans les trois années. Il faut noter toutefois ici, que les chroniques prises en considération sont antérieures à la date de la construction du barrage. Ces valeurs auraient pu

être plus élevées si elles n'avaient été affectées par les prélèvements le long des cours d'eau et le captage de nombreuses sources pour alimentation en eau potable des paysans (selon la Direction des Ressources en Eau).

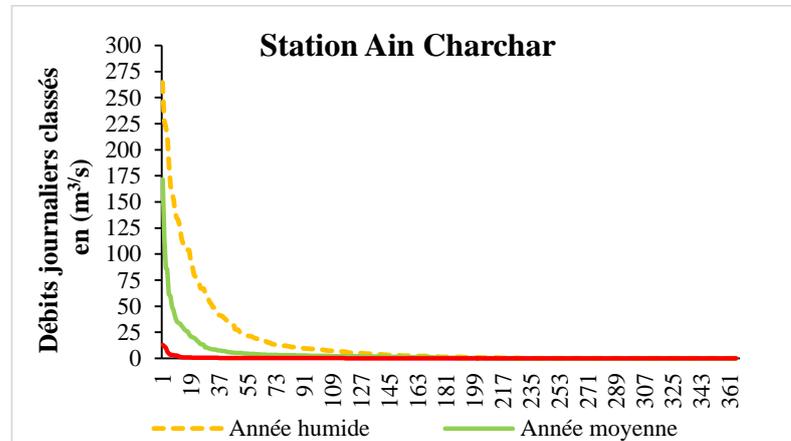


Fig. 84 : Courbe des débits classés –Station *Ain Charchar*-

Aux stations *Reboa* et *Timgad*, la baisse des débits caractéristiques est notable (Fig. 85 ET 86). Les débits caractéristiques maximums en année humide sont quatre fois moins importants que ceux enregistrés à la station de *Ain Charchar*. Ils le sont encore moins en année moyennée et sèche, Les débits caractéristiques d'étiage s'annulent juste après les premiers jours d'écoulement. Ce constat dans le régime des débits caractéristiques reflète parfaitement l'écoulement temporaire des oueds, leur importance est néanmoins certaine lors des crues.

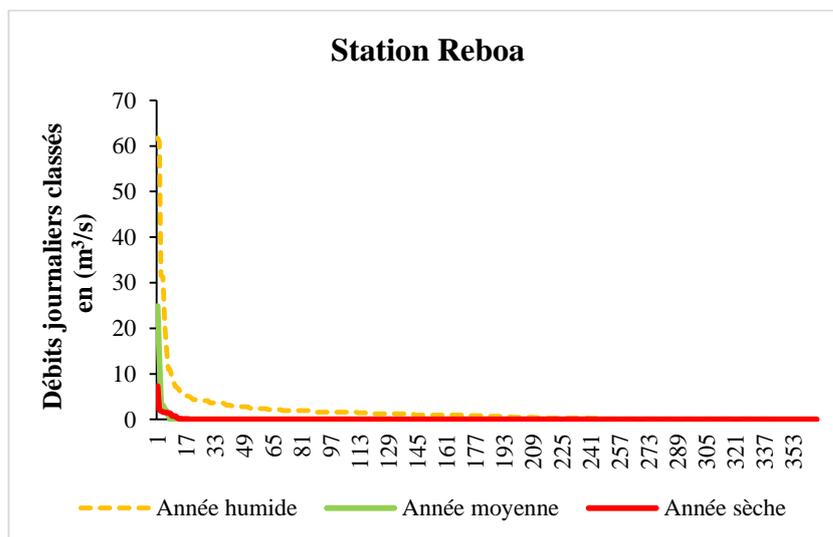


Fig. 85 : Courbe des débits classés –Station *Reboa*-

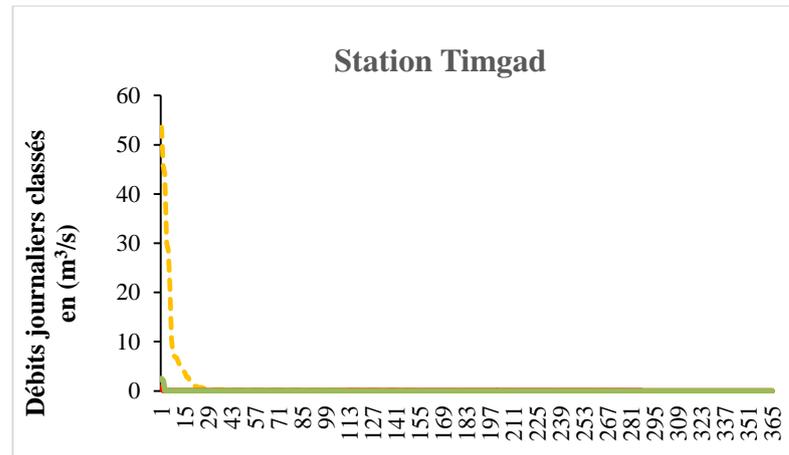


Fig. 86 : Courbe des débits classés –Station *Timgad*-

Pour la station de *Timgad*, le débit caractéristique maximum (DCMax) passe de $170 \text{ m}^3/\text{s}$, en année humide (1972/1973) à $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en année sèche (1993/1994), En année humide et moyenne, le débit est maintenu toute l'année grâce aux réserves souterraines (Fig. 87). Le débit caractéristique d'étiage dépasse rarement $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ entre ces deux années. Par contre, ils sont beaucoup plus chaotiques dès le 3ème mois en année sèche.

Par ces valeurs caractéristiques, nous pouvons confirmer que le régime des cours d'eau des trois bassins connaît non seulement une grande irrégularité interannuelle et saisonnière mais aussi une grande variabilité journalière.

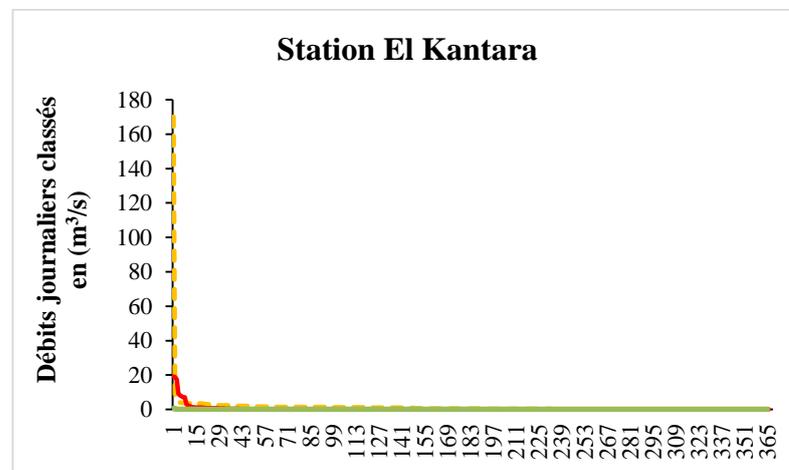


Fig. 87 : Courbe des débits classés –Station *El Kantara*-

4.8. Les modules extrêmes

Les modules extrêmes sont des événements hydro-climatiques reproduisant les contrastes de saison, de longueur relative. Autrement dit, ce sont des variations cycliques du régime hydrologique dans le temps. Les fluctuations de ces débits extrêmes peuvent être marquées par une hausse ou une baisse, voire une stabilité, selon l'évolution temporelle des séries (C.N. Guimalet, 2017). Ils intègrent les crues et les étiages, avec leurs degrés variés de sévérité.

La connaissance de ces modules extrêmes sert de base à l'évaluation des ressources en eau à l'échelle annuelle et saisonnière, voire pluriannuelle du bassin versant. Elle permet aussi d'estimer les ressources en eau de surface et de proposer des projets d'aménagement.

4.8.1. Les crues

Une crue est définie par une montée brusque et importante du débit d'un cours d'eau dépassant un certain multiple, deux à trois fois le débit moyen. Cette définition se détache des hautes eaux, soutenues habituellement ou surgissant au-dessus des débits normaux ou bas. Ordinairement, les crues sont dues aux conditions météorologiques qui se sont manifestées avec une intensité particulière (averses, fontes des neiges, ect.). Elles jouent un rôle important dans la vie du cours d'eau. Leur compréhension présente un intérêt scientifique particulier, notamment en ce qui concerne l'étude des transports solides en suspension dont le rôle dans l'envasement des retenues de barrages, n'est plus à démontrer. Pour cela, il importe de connaître les causes et les éléments caractéristiques de ces événements naturels afin d'y faire face, de les prévoir et particulièrement d'amortir leurs conséquences, souvent désastreuses.

L'élément caractéristique d'une crue est sans doute son débit de pointe instantané, de même que la durée durant laquelle le débit demeure supérieur au débit de débordement. Aussi, dimensionner un bassin de compensation, c'est connaître le volume de la crue qui est la caractéristique essentielle. Étudier l'amortissement de la crue à la traversée d'un barrage réservoir, c'est tout l'hydrogramme de la crue qu'il est nécessaire de connaître.

Notre étude porte sur 86 crues (Tableau 43 et 44). Les séries des crues étudiées diffèrent d'une station à l'autre. La totalité des crues sélectionnées est survenue durant une période allant de 20 ans (Station *El Kantara*) à 28 ans (Bassins *Reboa* et *Timgad*). La méthode de sélection a été simple, elle a consisté en le choix de deux à trois événements aux débits maximums importants sur une année hydrologique ou une saison. Toutefois, l'échantillon constitué peut contenir des événements non significatifs de moindre importance et occulter des événements importants si plusieurs se produisent au cours de la même année. En générale, Les crues concernées par ce travail ont un débit instantané maximal qui varie de 45 m³/s (crues moyennes) à plus de 200 m³/s (crues assez fortes). Le volume des crues est estimé sur la base de l'hydrogramme de crue par séparation du ruissellement direct de l'écoulement de base.

4.8.1.1. Fréquence des crues dans les bassins

Sur la période considérée (1975/2002), les crues sélectionnées les plus fréquentes (Tableau 43) à la station de *Ain Charchar* (bassin Kebir Hammam) ont un débit qui varie de 10 et 25 m³/s. Celles dont le débit est plus important, variant entre 100-200 m³/s ne représentent que 19,2 % de crues.

A *Reboa* et *Timgad*, les crues à débits importants sont moins fréquentes. En effet, près de 7% (*Reboa*) et 12 % (*Timgad*) des crues ont un débit qui dépasse les 100 m³/s. Les crues à débit inférieur à 10 m³/s sont les plus fréquentes dans les deux sous- bassins.

Sur une période de 23 ans, Oued El Hai n'a connu que quelques crues de débit supérieur (Au-delà de 200 m³/s) Par contre, plus de 82% des crues ont eu un débit inférieur à 25 m³/s parmi lesquelles 52% n'ont pas atteint pas les 10 m³/s.

Tableau 43 : Répartition en (%) Du nombre de crues Fréquence des crues par station

Classes de débits (m ³ /s)	<i>Ain Charchar</i>	<i>Reboa</i>	<i>Timgad</i>	<i>El Kantara</i>
Séries exploitées de crues	1975/2002	1983/2004	1976/2004	1973/996
400-500	/	/	/	0,69
300-400	3,2	/	/	/
200-300	15,2	2,21	2,40	2,07
100-200	19,2	4,41	11,20	4,83
50-100	16	10,29	22,40	10,34
25-50	14,4	11,03	8,80	13,79
10-25	21,6	21,32	16,80	15,86
<10	10,4	50,74	38,40	52,41

4.8.1.2. Historique et genèse des crues

a. Les crues au bassin Kebir Hammam

La plupart des crues enregistrées dans bassin Kebir Hammam sont intervenues entre le mois Septembre et le mois de Mars . Ces crues de hautes eaux dues essentiellement aux maximums pluviométriques enregistrés, sur de vastes étendues de sols déjà saturés provoquent des débordements rapides et importants dans le lit de Oued El Kebir.

Entre 1975 et 2002, deux crues importantes ont été enregistrées à la même année avec 23 jours d'écart. La première, celle du 12 janvier 1984, a enregistré un débit maximum de 367,2 m³/s, soit 323,8 l/s/km². Oued El Kebir avait coté les 11,12 mètres à 7 heures du matin. La deuxième crue est celle du 4 février de la même année. Elle a enregistré un fort débit maximum de 371.33 m³/s, soit 327,41 l/s /km². Lors de cette crue, Oued El Kebir avait débordé pour atteindre les 11,07 mètres à 2 heures du matin. Quelques jours après, deux autres crues ont été observées avec des débits maximums importants de 260 m³/s, soit 229,5 l/s/km² le 12 février et 150 m³/s, soit 132,2 l/s/km² le 17 février.

Ces quatre crues ont produit des volumes importants qui sont respectivement de 68,94 hm³ pour celle de janvier et 112,9 hm³ pour l'ensemble des crues de février, ce qui avait correspondu à 82,3% et 78,7% des apports mensuels. Elles étaient la conséquence des pluies maximales enregistrées au mois de janvier (Pjmax = 37,80 mm) et février (Pjmax = 64,50 mm).

Le reste des crues sélectionnées ne manque pas aussi d'intérêt ni d'importance. Elles ont dépassé largement les 8 mètres de hauteur et leurs forts volumes ont varié de 10,8 à 49,8 m³/s. A titre d'exemple, celles des années 80 et 90 ont causé beaucoup de dégâts. L'ensemble des retenues collinaires créées après 1985 ont totalement été envasées suite à ces événements.

La dernière crue des plus importantes enregistrées est celle du 22 février 2002. Elle a eu lieu une année après la mise en eau du barrage de Zit Emba (2001). Celle-ci provenait

essentiellement de Oued Emchekel. Son débit maximum (25,87 m³/s) et son volume (1,13 m³/s) faible a montré la faillibilité de l'endiguement de Oued El Hammam.

Les crues estivales dans le bassin sont rares et de moindre valeur. Elles sont généralement dues à des pluies orageuses courtes mais intenses, qui ne parviennent pas à se disperser par infiltration, ruissellement ou écoulement.

b. Les crues au bassin *Reboa*

Les crues du bassin de *Reboa* proviennent des deux cours d'eau *Reboa* et Oued Guergour. Elles sont surtout automnales (entre Septembre et Novembre) avec parfois un retour à la saison printanière –début de la saison estivale (de Mars à Juin).

Sur Oued *Reboa*, une seule crue, celle du 1 Septembre 1989, paraît avoir dépassé les 3 mètres de hauteur à 8 heures du matin. Elle a enregistré un débit maximum de 256 m³/s, soit 829,6 l/s /km² et un volume total de 4,7 hm³, ce qui correspond à 69 % de l'apport du mois et 14,4% de l'apport annuel. Or, le reste des années, Oued *Reboa* n'a pas franchi cette limite de hauteur (<3m). Les volumes de crues calculés entre 1984 et 2004 varient de 0,1 hm³ (crue du 27 mai 1989) et 2,9 hm³ (crue du 23 Janvier 1990).

Les crues estivales sont à leur tour importantes, elles sont fréquentes essentiellement le mois de Juin. Exceptionnellement, elles peuvent se produire au mois d'Août comme celle enregistrée le 12 Août 2002 avec un gros débit maximal de 119,2 m³/s, soit 386,3 l/s/km² et un volume total de 0,7 hm³, ce qui a représenté 65,5 % de l'apport mensuel et 3,9 % de l'apport annuel.

A la station de *Timgad*, les volumes sont moins importants. Ces derniers ne dépassent nullement les 3 hm³. Un seul fort débit maximum (139,6 m³/s) s'est formé le 11 Novembre 1982. L'Oued Guergour avait coté 3,1 mètres à 7 heures et demi du matin. Cette crue avait duré 35,5 heures entre le 10 et le 12 Novembre. Elle avait comme volume 9,39 hm³ et a représenté 98,7 % de l'apport mensuel d'Octobre.

Les valeurs des volumes produits par l'ensemble des crues sélectionnées dans cette étude et leurs proportions mensuelles montrent que les deux artères qui constituent le réseau hydrographique s'alimentent essentiellement lors des crues. A la station *Reboa*, la moitié des crues étudiées ont participé à plus de 40% aux apports mensuels. A la station de *Timgad*, 90,5 % des crues ont participé avec plus de 58% aux apports mensuels. Ce qui explique la périodicité de l'écoulement qui apparaît essentiellement lors des crues.

Tableau 44 : Volumes totaux écoulés lors des crues

N°	Date de la crue	Q instantané max		Apport de la crue (m ³)*10 ⁶	Q _{mesuel} (m ³)*10 ⁶	% de la crue mensuel	Q _{annuel} (m ³)*10 ⁶	% de la crue annuel
		Brut (m ³ /s)	Spécifique (l/s/Km ²)					
Bassin Kebir Hammam								
1	16/04/1979	259,56	228,86	49,86	72,08	69,17	134,66	37,03
2	20/12/1980	153,96	135,75	23,72	47,19	50,27	137,18	17,29
3	31/12/1980	202,82	178,83	18,43	47,19	39,06	143,49	12,85
4	22/02/1981	153,96	135,75	16,75	44,10	37,99	137,18	12,21
5	29/01/1982	153,72	135,54	10,87	31,58	34,41	388,84	2,79
6	12/01/1984	367,28	323,84	68,94	82,39	83,67	324,82	21,22
7	04/02/1984	371,33	327,41	58,81	74,42	79,02	324,82	18,10
8	12/02/1984	260,28	229,50	34,18	143,52	23,82	324,82	10,52
9	17/02/1984	150,00	132,26	19,98	143,52	13,92	324,82	6,15
10	10/03/1984	202,46	178,52	15,62	49,35	31,66	324,82	4,81
11	13/02/1985	202,55	178,60	18,22	31,50	57,82	346,58	5,26
12	06/03/1985	260,10	229,34	48,90	94,70	51,63	346,58	14,11
13	25/12/1986	260,28	229,50	61,03	97,55	62,57	486,60	12,54
14	04/01/1987	202,64	178,67	18,34	72,75	25,21	486,60	3,77
15	07/02/1987	258,48	227,91	33,85	178,78	18,93	486,60	6,96
16	14/02/1987	258,84	228,23	28,47	178,78	15,93	486,60	5,85
17	20/02/1987	153,96	135,75	11,42	178,78	6,39	486,60	2,35
18	24/02/1987	153,94	135,73	14,41	178,78	8,06	486,60	2,96
19	10/03/1987	153,80	135,61	12,38	50,38	24,57	486,60	2,54
20	24/12/1990	199,12	175,57	37,54	94,63	39,67	312,84	12,00
21	01/01/1993	192,20	169,47	31,07	43,58	71,29	169,49	18,33
22	08/02/1996	158,88	140,09	8,79	66,77	13,16	127,39	6,90
Bassin Reboa								
1	22/10/1984	53,88	174,62	0,47	1,74	26,94	21,76	2,16
2	30/09/1988	182,00	589,84	0,68	2,70	25,16	8,51	7,97
3	04/10/1988	166,00	537,98	2,11	2,96	71,38	8,51	24,81
4	27/05/1989	164,30	532,47	1,18	1,20	98,66	8,51	13,89
5	09/08/1989	26,78	86,79	0,17	0,72	23,51	8,51	2,00
6	01/09/1989	256,00	829,66	4,74	6,87	69,01	32,80	14,45
7	18/09/1989	72,66	235,48	0,26	6,87	3,79	32,80	0,79
8	23/01/1990	53,88	174,62	2,87	5,22	54,98	32,80	8,75
9	28/05/1990	77,98	252,72	0,95	8,32	11,41	32,80	2,89
10	12/03/1995	63,04	204,30	1,67	2,45	68,18	4,73	35,33
11	14/03/1996	63,04	204,30	4,82	17,11	28,14	28,38	16,97
12	22/08/1997	66,10	214,22	0,22	0,32	69,84	2,52	8,81
13	09/09/1997	73,48	238,14	0,49	2,98	16,45	8,20	5,98
14	15/09/1997	63,04	204,30	0,54	2,98	18,15	8,20	6,59
15	19/05/2000	65,075	210,90	0,35	12,69	2,75	23,65	1,47
16	04/09/2000	96,80	313,72	1,63	2,45	66,59	4,42	36,89
17	04/05/2001	87,50	283,58	1,13	1,22	92,28	4,42	25,55
18	21/08/2002	119,20	386,31	0,71	1,08	65,45	17,98	3,94
19	29/03/2004	55,77	180,74	1,12	2,55	43,97	28,89	3,87
20	26/05/2004	113,50	367,84	0,54	7,75	6,91	29,01	1,85
21	16/06/2004	58,10	188,29	1,00	3,62	27,74	29,01	3,46
22	28/08/2004	50,80	164,64	0,92	1,76	52,16	29,01	3,17

Tableau 44 : (Suite) Volumes totaux écoulés lors des crues

N°	Date de la crue	Q instantané max		Apport de la crue (m ³)*10 ⁶	Q _{mesuel} (m ³)*10 ⁶	% de la crue mensuel	Q _{annuel} (m ³)*10 ⁶	% de la crue annuel
		Brut (m ³ /s)	Spécifique (l/s/Km ²)					
Bassin Timgad								
1	18/08/1977	21,64	88,44	0,16	0,16	99,56	1,89	8,46
2	02/10/1978	242,00	989,05	1,91	2,01	94,99	4,42	43,22
3	10/04/1979	56,65	231,53	0,61	2,26	27,22	4,42	13,90
4	03/09/1979	136,00	555,83	1,27	1,71	74,09	2,21	57,41
5	19/09/1980	71,2	290,99	0,24	0,75	31,93	2,21	10,87
6	20/09/1981	84,5	345,35	0,53	1,11	47,55	4,10	12,93
7	21/05/1982	57,2	233,77	0,22	0,37	58,67	4,10	5,37
8	02/06/1982	145,00	592,61	1,24	1,56	79,80	4,10	30,27
9	13/09/1982	96,6	394,80	0,98	1,19	82,19	11,67	8,40
10	11/11/1982	139,60	570,54	9,39	9,51	98,75	11,67	80,51
11	10/10/1984	67	273,83	0,86	1,96	43,98	2,21	38,96
12	17/10/1984	99,00	404,61	1,05	1,96	53,45	2,21	47,34
13	30/09/1986	18,94	77,41	0,25	0,29	87,21	0,63	39,42
14	27/05/1989	291,40	1190,94	2,82	2,89	97,54	3,78	74,55
15	17/07/1990	103,00	420,96	2,29	2,30	99,42	5,68	40,34
16	15/10/1995	218,06	891,20	1,10	1,53	71,89	5,36	20,47
17	12/03/1995	60,5	247,26	0,45	0,48	93,29	0,63	71,31
18	07/10/1995	60,5	247,26	0,87	1,53	57,25	5,36	16,30
19	13/01/1996	64,4	263,20	1,17	1,55	75,46	5,36	21,87
20	28/05/2004	78,2	319,60	1,29	1,45	89,53	8,83	14,66
21	16/06/2004	112,60	460,19	1,25	1,35	92,37	8,83	14,10
Bassin Oued El Hai								
1	15/09/1974	82,6	52,23	0,51	0,93	54,79	10,88	4,70
2	23/09/1975	78,2	49,45	0,93	8,10	11,46	21,76	4,27
3	24/09/1975	91,3	57,73	1,53	8,10	18,96	21,76	7,05
4	28/06/1976	94,2	59,56	1,01	1,81	55,88	21,75	4,66
5	01/07/1976	294	185,90	1,85	1,90	97,47	21,76	8,52
6	07/09/1976	74,35	47,01	1,84	11,40	16,11	20,18	9,10
7	12/10/1976	58,29	36,86	0,73	0,40	181,15	20,18	3,61
8	17/05/1977	272,6	172,37	5,61	57,24	9,79	20,18	27,78
9	18/08/1978	178,5	112,87	0,50	2,49	20,18	14,19	3,54
10	20/10/1978	83,1	52,55	0,67	2,25	29,58	6,62	10,05
11	15/04/1979	38,5	24,34	0,55	1,87	29,49	6,62	8,31
12	02/09/1979	467	295,29	8,97	19,65	45,68	21,44	41,85
13	04/09/1979	256	161,87	5,58	19,65	28,43	21,44	26,04
14	25/09/1980	86,82	54,90	1,35	10,79	12,54	23,21	5,83
15	31/10/1982	182	115,08	2,32	3,57	64,92	9,78	23,71
16	29/09/1986	147	92,95	2,72	3,54	76,69	11,67	23,29
17	03/09/1995	218	137,85	2,04	8,19	24,92	26,81	7,62
18	05/09/1995	175	110,66	1,75	8,19	21,36	26,81	6,53
19	24/09/1995	134	84,73	3,14	8,19	38,36	26,81	11,73
20	17/06/1996	121	76,51	1,79	3,49	51,27	26,81	6,68
21	13/07/1996	274	173,26	3,48	3,81	91,27	26,81	12,99

c- Les crues du bassin Oued El Hai

Oued El Hai draine plus de 1581 Km² à sa station *El Kantara*. Les années 1976, 1979 et 1995, le cours d'eau Oued El Hai a connu des crues à répétition. Elles ont été surtout fréquentes les mois de Septembre et Octobre. La plus importante avait produit un volume de 8,9 hm³ le 2 Septembre 1979, suivie par celle du 4 Septembre qui avait produit un volume de 5,6 hm³. Ces deux crues avaient participé à 74,1% de l'écoulement du mois de Septembre et 67,8% de l'écoulement annuel. Les causes principales de ces crues sont les pluies diluviennes observées essentiellement en ces mois.

4.8.1.3. Caractéristiques des crues

a. Puissance des crues

L'intérêt du quotient de puissance de crues « A » défini par Myer, Coutagne et Pardé (1962) est d'établir des comparaisons de l'évolution de la puissance des crues.

Le tableau ci-dessus montre que sur la base des calculs de ce coefficient, la puissance des crues varie d'un bassin à un autre. Sur les 86 crues sélectionnées, huit seulement ont des valeurs de « A » au-dessus de 10. Elles concernent les événements les plus remarquables enregistrés dans les trois bassins. Au bassin Kebir Hammam, ces événements de plus grande importance sont enregistrés au mois de Janvier et Février. A *Reboa* au mois de Septembre, Octobre et Mai. A Oued El Hai, ils apparaissent essentiellement au mois de Septembre. Ce constat, confirme les forts coefficients mensuels de débits enregistrés aux mêmes mois en ces quatre stations.

Les autres crues étudiées, dont le coefficient de puissance « A » est inférieur à 10, s'échelonnent entre 4,45 (crue du 17/02/1984) et 7,74 (crue du 25/12/1986) au bassin Kebir Hammam, entre 1,55 (crue 09/08/1989) et 9,45 (crue de 04/10/1988) pour le sous bassin *Reboa* et entre 1,21 (crue 30/09/1986) et 9,27 (crue de 02/06/1982) pour le sous bassin de *Timgad*, peuvent être qualifiées de médiocres.

Selon la classification de Myer, Coutagne et Pardé (1962), les crues étudiées des trois bassins peuvent de façon générale, être qualifiées de médiocres à fortes, en comparaison de celles des grands cours d'eau européens et africains, tels que pour le Rhin à Cologne (30,2) et pour le Niger à Koulikoro (34,6) (K. Ketrouci and al, 2012).

b. Rapport débit de pointe / débit moyen journalier maximal

Le rapport Q_i/Q_{jmax} est calculé en utilisant les débits de pointes et les débits moyens sur 24 heures (Tableau 45). Les valeurs obtenues au bassin Kebir Hammam à la station hydrométrique d'*Ain Charchar* sont comprises entre 1,06 (crue du 20/12/1980) et 2,08 (crue du 07/02/1987). A *Reboa*, ce rapport a atteint des valeurs remarquables. Il varie de 2,08 (14/03/96) à 24,30 (crue du 22/08/1997) à la station *Reboa* et arrive à 29,5 (30/09/1986) à la station de *Timgad*. A Oued El Hai, les valeurs s'affaiblissent mais restent variables. Il est compris entre 3,45 (crue du 24/09/1975) et 18,68 (crue du 15/09/1974).

Tableau 45 : Caractéristiques des crues par bassin

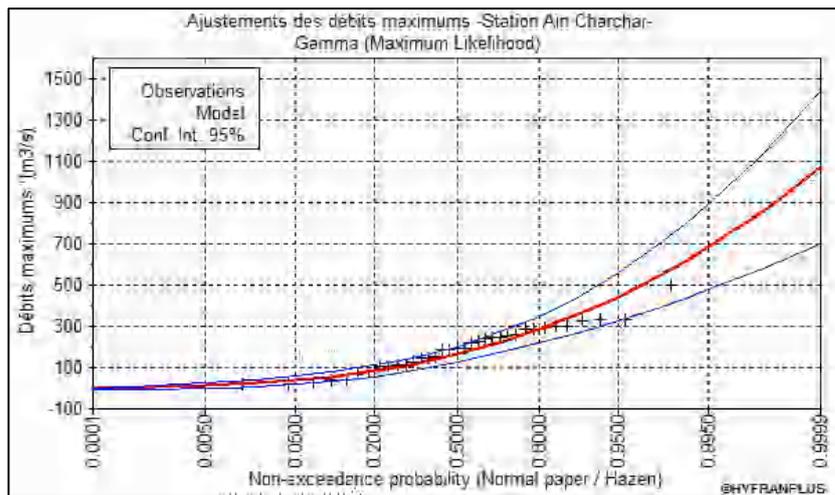
N°	Date de la crue	Temps de base (heures)	Qi _{max} (m ³ /s)	Qmj _{max} (m ³ /s)	Qmax/Qmj _{max}	A _{crue}
Bassin Kebir Hammam						
1	16/04/1979	124	259,56	197,49	1,31	7,71
2	20/12/1980	151,5	153,96	145,30	1,06	4,57
3	31/12/1980	67	202,82	138,01	1,47	6,02
4	22/02/1981	138	153,96	111,95	1,38	4,57
5	29/01/1982	72,5	153,72	105,50	1,46	4,56
6	12/01/1984	161	367,28	236,81	1,55	10,91
7	04/02/1984	156	371,33	237,64	1,56	11,03
8	12/02/1984	109	260,28	214,89	1,21	7,73
9	17/02/1984	146	150,00	137,43	1,09	4,45
10	10/03/1984	109	202,46	120,01	1,69	6,01
11	13/02/1985	177	202,55	142,42	1,42	6,01
12	06/03/1985	151	260,10	234,64	1,11	7,72
13	25/12/1986	78	260,28	222,65	1,18	7,74
14	04/01/1987	76	202,64	147,00	1,38	6,02
15	07/02/1987	149	258,48	124,38	2,08	7,68
16	14/02/1987	84	258,84	154,41	1,68	7,69
17	20/02/1987	61	153,96	138,27	1,11	4,57
18	24/02/1987	55	153,94	116,40	1,32	4,57
19	10/03/1987	107	153,80	96,89	1,59	4,57
20	24/12/1990	96	199,12	154,94	1,29	5,91
21	01/01/1993	103	192,20	112,06	1,72	5,71
22	08/02/1996	35	158,88	128,06	1,24	4,72
Bassin Reboa						
1	22/10/1984	22	53,88	7,62	7,07	3,07
2	30/09/1988	8	182,00	26,25	6,93	10,36
3	04/10/1988	12,5	166,00	25,14	6,60	9,45
4	27/05/1989	14	164,30	7,77	21,15	9,35
5	09/08/1989	6	26,78	3,39	7,90	1,55
6	01/09/1989	15,5	256,00	58,40	4,38	14,57
7	18/09/1989	2,5	72,66	3,31	21,95	4,14
8	23/01/1990	41	53,88	31,16	1,73	3,07
9	28/05/1990	20	77,98	11,93	6,54	4,44
10	12/03/1995	28	63,04	20,47	3,08	3,59
11	14/03/1996	75	63,04	30,27	2,08	3,59
12	22/08/1997	75	66,10	2,72	24,30	3,76
13	09/09/1997	21	73,48	5,00	14,70	4,18
14	15/09/1997	22	63,04	6,71	9,39	3,59
15	19/05/2000	13	65,075	4,54	14,33	3,70
16	04/09/2000	12	96,80	24,91	3,89	5,51
17	04/05/2001	9	87,50	14,15	6,18	4,98
18	21/08/2002	8	119,20	8,43	14,14	6,79
19	29/03/2004	39	55,77	13,80	4,04	3,17
20	26/05/2004	12	113,50	22,52	5,04	6,46
21	16/06/2004	27	58,10	11,51	5,05	3,31
22	28/08/2004	27	50,80	7,74	6,56	2,89
Bassin Tingad						
1	18/08/1977	5,5	21,64	1,37	15,80	1,38
2	02/10/1978	7,5	242,00	68,01	3,56	15,47
3	10/04/1979	10	56,65	9,87	5,74	3,62
4	03/09/1979	7	136,00	18,52	7,34	8,69
5	19/09/1980	5,5	71,2	4,96	14,35	4,55
6	20/09/1981	4,5	84,5	8,07	10,47	5,40

Tableau 45 (Suite) : Caractéristiques des crues par bassin

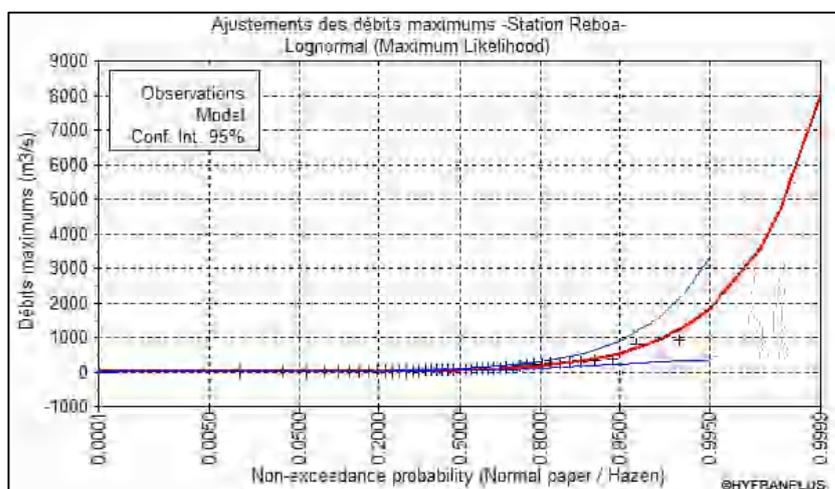
N°	Date de la crue	Temps de base (heures)	Qi _{max} (m ³ /s)	Qmj _{max} (m ³ /s)	Qmax/Qmj _{max}	A _{crue}
7	21/05/1982	3	57,2	3,07	18,63	3,66
8	02/06/1982	7	145,00	14,82	9,78	9,27
9	13/09/1982	6,5	96,6	4,85	19,92	6,18
10	11/11/1982	35,5	139,60	10,03	13,92	8,92
11	10/10/1984	7	67	11,03	6,07	4,28
12	17/10/1984	9	99,00	11,12	8,90	6,33
13	30/09/1986	9,5	18,94	3,94	29,56	1,21
14	27/05/1989	7,5	291,40	26,33	11,07	18,63
15	17/07/1990	16	103,00	29,56	3,48	6,58
16	15/10/1995	5,5	218,06	14,90	14,63	13,94
17	12/03/1995	8,5	60,5	14,70	4,12	3,87
18	07/10/1995	7	60,5	9,41	6,43	3,87
19	13/01/1996	13	64,4	14,70	4,38	4,12
20	28/05/2004	6	78,2	14,49	5,40	5,00
21	16/06/2004	10	112,60	14,39	7,82	7,20
Bassin Oued El Hai						
1	15/09/1974	13,00	82,6	4,42	18,69	2,08
2	23/09/1975	25,00	78,2	13,69	5,71	1,97
3	24/09/1975	12,00	91,3	26,46	3,45	2,30
4	28/06/1976	8,00	94,2	18,53	5,08	2,37
5	01/07/1976	10,00	294	36,25	8,11	7,39
6	07/09/1976	8,5	74,35	21,55	3,45	1,87
7	12/10/1976	9	58,29	9,12	6,39	1,47
8	17/05/1977	18,00	272,6	71,01	3,84	6,85
9	18/08/1978	3,50	178,5	11,89	15,01	4,49
10	20/10/1978	21,00	83,1	8,51	9,76	2,09
11	15/04/1979	13	38,5	8,40	4,58	0,97
12	02/09/1979	15,50	467	112,94	4,13	11,74
13	04/09/1979	16,50	256	61,12	4,19	6,44
14	25/09/1980	21,00	86,82	13,17	6,59	2,18
15	31/10/1982	8,50	182	37,32	4,88	4,58
16	29/09/1986	15,50	147	36,69	4,01	3,70
17	03/09/1995	7,00	218	24,59	8,87	5,48
18	05/09/1995	7,00	175	22,13	7,91	4,40
19	24/09/1995	21,00	134	37,91	3,53	3,37
20	17/06/1996	14,00	121	21,11	5,73	3,04
21	13/07/1996	12,00	274	36,26	7,56	6,89

4.8.2. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles

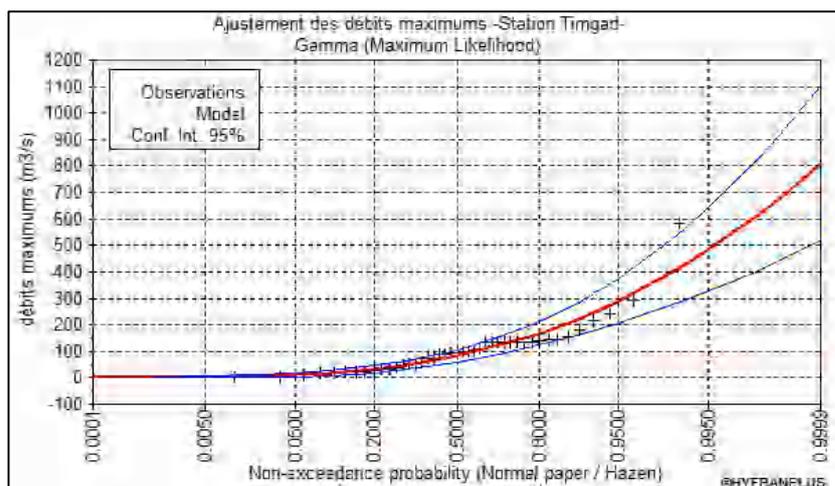
Les débits maximums annuels peuvent être eux aussi modélisés par une loi de probabilité. Les chroniques des débits maximums ont été testées via le logiciel Hyfran Plus. L'objectif étant de trouver également une loi qui s'ajuste de manière satisfaisante au plus grand nombre de stations. Dans la plupart des cas, les débits journaliers maximums s'ajustent bien, à la loi de Gamma, aux intervalles de confiance à 95% (Fig. 88, 89, 90 et 91).



**Fig. 88 : Ajustement de la série des débits maximums à loi Gamma
-Station Ain Chachar-**



**Fig. 89 : Ajustement de la série des débits maximums à loi Log-normale
-Station Reboa -**



**Fig. 90 : Ajustement de la série des débits maximums à loi Gamma
-Station Timgad-**

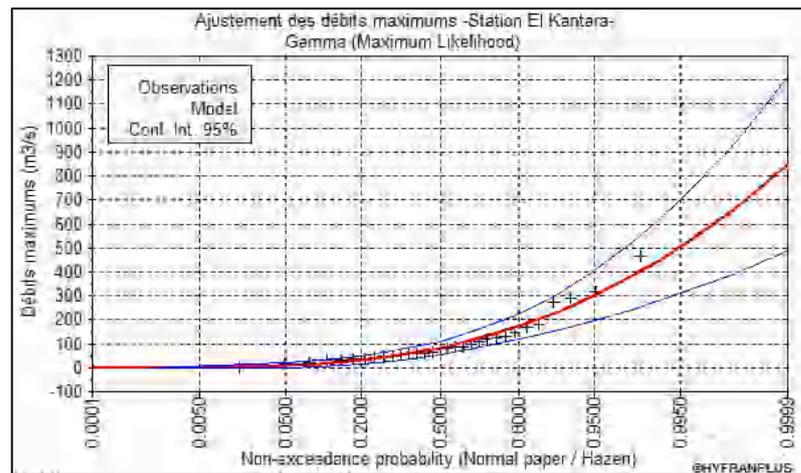


Fig. 91 : Ajustement de la série des débits maximums à loi Gamma -Station El Kantara-

Les quantiles des débits maximums sont représentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 46). A titre d'exemple, l'ajustement des débits maximums à la station de *Ain Charchar* par la loi de Gamma a donné un débit maximum de retour de 614 m³/s chaque 100 ans, ce qui correspond à une lame de 534 l/s/km².

Tableau 46 : Quantiles des maximums journaliers

Station	Loi d'ajustement	Période de retour Fréquence	2	10	20	50	100	1000
			0,5	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
<i>Ain Charchar</i>	Gamma	Q (m ³ /s)	163	366	443	541	614	846
		q (l/s/km ²)	144,25	323,89	392,04	478,76	543,36	748,67
<i>Reboa</i>	Log-Normale	Q (m ³ /s)	64,9	341	546	928	1320	3550
		q (l/s/km ²)	210,33	1105,13	1769,51	3007,52	4277,94	11505,06
<i>Timgad</i>	Gamma	Q (m ³ /s)	81,4	229	289	367	426	619
		q (l/s/km ²)	332,68	935,92	1181,13	1499,92	1741,05	2529,83
<i>El Kantara</i>	Gamma	Q (m ³ /s)	82,7	237	300	382	444	648
		q (l/s/km ²)	52,30	149,87	189,70	241,56	280,76	409,76

A la même station, le débit maximum de 501 mm enregistré en 1969/1970 (Tableau 47) est possible de retourner une fois tous les 34 ans.

Tableau 47 : périodes de retour des maximums journaliers de la série étudiée

Station	Année	Qjmax (m ³ /s)	Fréquence	Période de retour (ans)
<i>Ain Charchar</i>	69/70	501,4	0,97	34,2
<i>Reboa</i>	07/08	906,09	0,979	47,9
<i>Timgad</i>	07/08	582,60	0,977	42,7
<i>El Kantara</i>	79/80	467,00	0,955	22,0

4.8.3. Les étiages

Les étiages sont les débits les plus bas observés dans le cycle journalier, ils peuvent se produire à différentes époques de l'année, en fin de saison sèche et chaude, ou en hiver lorsque le régime est glacier. Ils ont pour cause un déficit d'alimentation pluvial lorsqu'ils se produisent. Pendant ces périodes les cours d'eau ne vivent plus que grâce aux réserves souterraines. Ils sont aussi très liés aux caractéristiques géologiques, lithologiques et pédologiques du bassin versant et difficiles à décrire de manière régionale. D'une part, ce sont des phénomènes forts irréguliers et d'autre part, leur mesure est souvent entachée de fortes incertitudes (difficulté de mesurer des débits très faibles).

La figure ci-dessous (Fig. 92, Tableau 48) montre les débits d'étiages mensuels du bassin Kebir Hammam de 1968 à 2003. Ils surviennent surtout en été et se prolongent jusqu'au mois de Novembre. À la station d'Ain Charchar les débits moyens minimums mensuels ne dépassent pas les 6 m³/s. Ils se caractérisent par une grande variabilité mensuelle et annuelle.

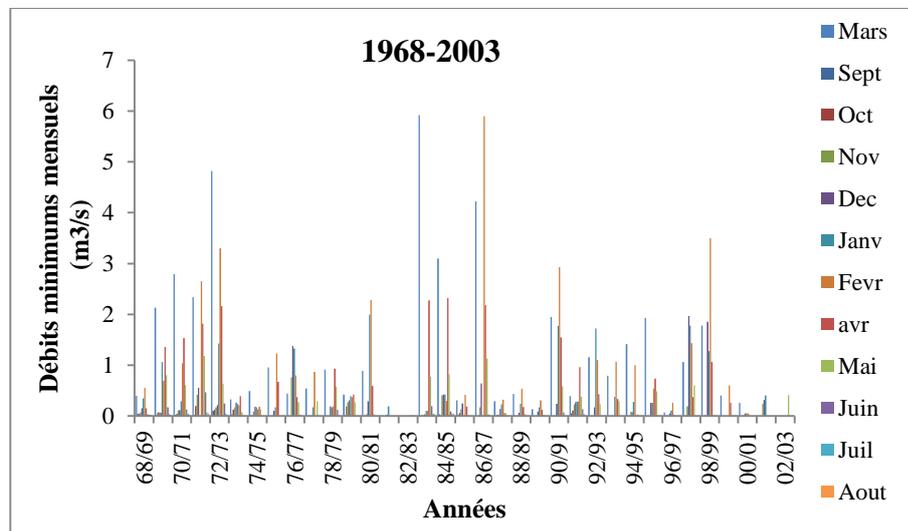


Fig. 92 : débits d'étiages mensuels –Station Aïn Charchar-

Tableau 48 : Débits moyens mensuels d'étiage aux différentes stations

Station	Aïn Charchar	Reboa	Timgad	Oued El Hai
Période	1968-2003	1969-2012	1969-2012	1968-1999
mois	juillet, Aout, Septembre	Septembre	Ensemble des mois sauf avril	Septembre
Qe mois (m ³ /s)	0,01	0,02	0,01	0,04
Qe mois (m ³ /s)	0,04	0,09	0,04	0,16
Qe annuel (m ³ /s)	0,37	0,17	0,01	0,10
qe (l/s/km ²)	1,51	0,69	0,04	0,41
Qmoy (m ³ /s)	4,54	0,55	0,15	0,43
Moy (l/s/km ²)	4,00	0,48	0,13	0,38
%	8,15	30,91	6,67	23,26

Les débits d'étiage au bassin *Reboa* sont par ailleurs plus sévères (Fig. 93, Tableau 48). Sur une durée observée de 43 ans, à la station *Reboa*, le débit d'étiage moyen est de 0,17 m³/s. Vingt-sept années, entre 1977 et 2004, ont été identifiées comme présentant un étiage remarquable, soit une valeur inférieure à 0,09 m³/s. Le mois de Décembre reste le mois qui a enregistré le débit minimum le plus sévère (0,02 m³/s).

À la station de *Timgad*, les étiages sont plus longs et plus généralisés. La figure 94 montre des étiages quasi-absolus. Sur la majorité des mois les débits d'étiage ne dépassent pas les 0,01 m³/s. Cette situation d'absence d'écoulement total est d'ailleurs la règle de nombreux affluents de ce bassin.

Actuellement, les étiages sévères du bassin *Reboa* sont soutenus par les apports du grand barrage Beni Haroun grâce à la ressource stockée dans le barrage de Oued Athmania.

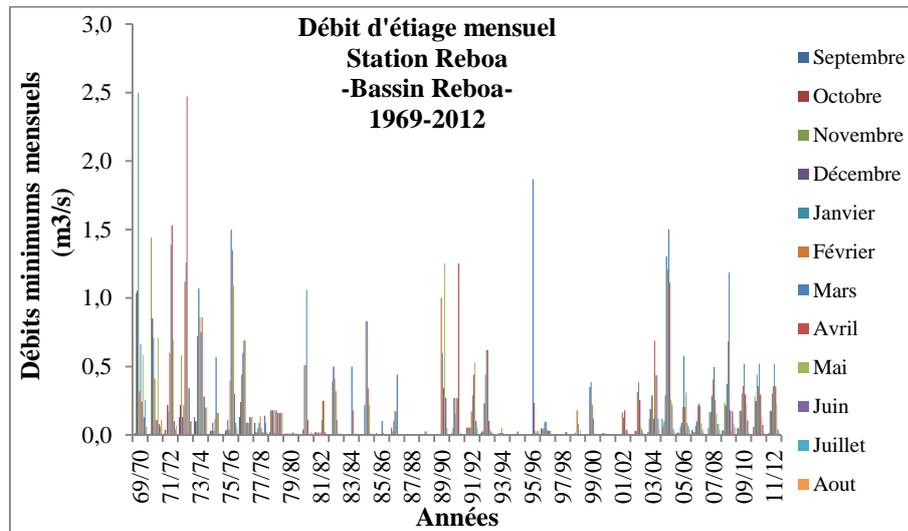


Fig. 93 : débits d'étiages mensuels –Station *Reboa* –

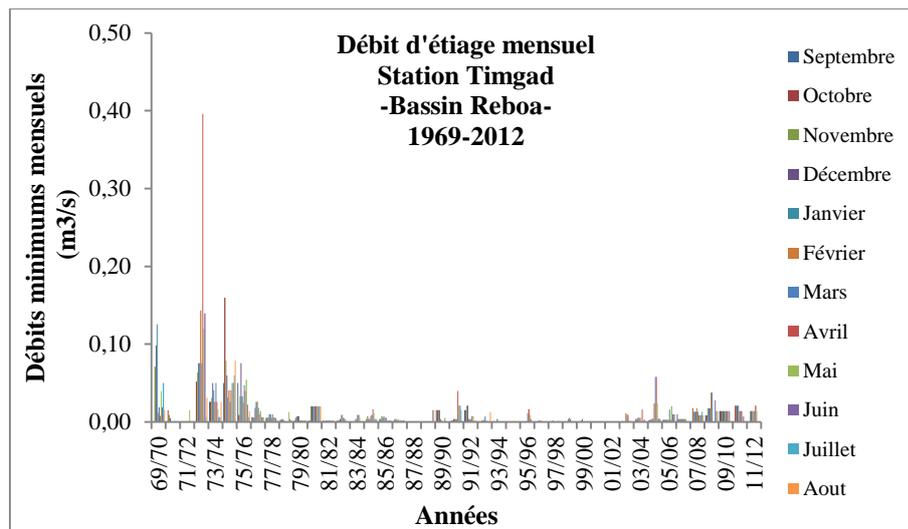


Fig. 94 : débits d'étiages mensuels –Station *Timgad*-

Le bassin de Oued El Hai draine une surface de 1581 km² à sa station de contrôle hydrométrique *El Kantara*. Oued El Hai reste un cours d'eau à régime endoréique avec des écoulements faibles mais pas rares malgré les changements qui affectent les précipitations, et

surtout l'intensification des phénomènes d'évapotranspiration en cette région. Son débit moyen d'étiage est de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig. 95). Ils varient de $0,04$ et $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le mois de Mai et le mois de Novembre. Entre 1969 et 1977, les débits d'étiages annuels étaient nettement supérieurs à la moyenne. A partir de 1977, les débits d'étiages mensuels franchissent rarement la valeur de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

De façon générale, l'observation de l'historique des débits d'étiages montre une raréfaction des ressources en eau sur laquelle il est possible d'opérer un prélèvement. Cette rareté trouve ses origines principales dans une diminution des pluies efficaces qui rechargent les nappes par infiltration ou qui ruissellent jusqu'aux cours d'eau. Aussi, les régimes moyens masquent des situations très diverses, avec des explications climatiques différentes. Il existe un étiage propre à chaque bassin. Il peut-être absolu ou partiel, donc souvent reste à définir la partie du bassin versant en étiage. Cet état de fait, nécessite l'installation de plusieurs stations de mesures notamment pour les bassins de grandes surfaces tels que le bassin d'Oued El Hai.

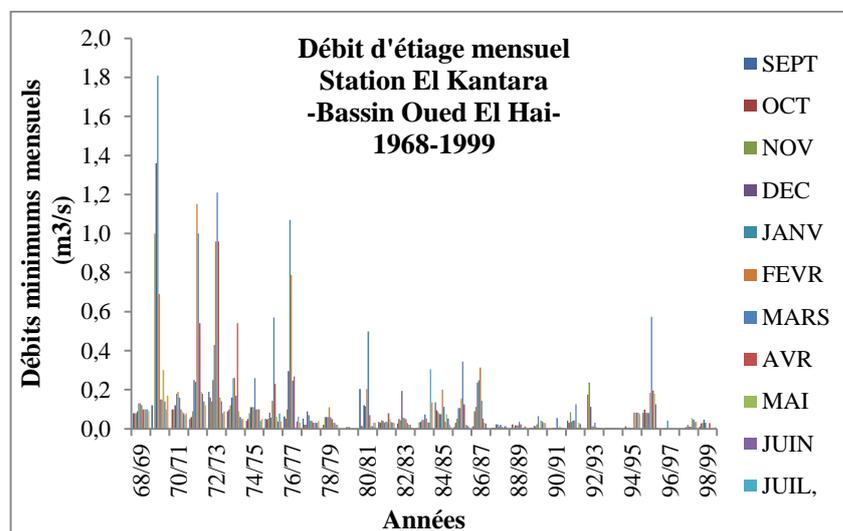


Fig. 95 : débits d'étiage mensuels –Station El Kantara-

4.9. Conclusion

Les écoulements à travers les trois bassins sont aussi variables que les précipitations. Ils varient en moyenne de $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (1968-2003) au bassin *Kebir Hammam*, de $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$ (1969-2012) à *Reboa* et $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$ (1968-1999) au bassin *Oued El Hai*.

L'importance des pluies sur une longue période de l'année (6/12 mois) et la présence de sols imperméables (calcaires) dans le bassin *Kebir Hammam* ont favorisé la création d'un important réseau de cours d'eau (1234 km). De type pérenne, Oued Hammam et Oued Emchekel tiennent une place majeure dans le système de drainage de ce bassin. Oued *Reboa* et Oued *Amizerguene* qui drainent le territoire de *Reboa* sont souvent à secs et fonctionnent lorsqu'il y a écoulement de pluies d'orages. Plus au sud, à Oued El Hai, l'aire de réception des précipitations y est pour beaucoup, les écoulements sont plus ou moins importants en comparaison avec ceux de *Reboa*. Le coefficient de torrentialité varie de $0,61$ et $0,70$ du *Kebir Hammam* à *Reboa* et traduit ainsi une perméabilité des substrats et par conséquent une infiltration importante.

Le temps de concentration des eaux reflète parfaitement la topographie et la forme des bassins. Il est estimé à 14 heures aux bassins Kebir Hammam et Oued El Hai, et à 7 heures au bassin *Reboa* dont la forme est visuellement proche du cercle.

Les coefficients et les modules moyens mensuels indiquent des périodes de hautes et basses eaux inégales à travers les bassins. Au bassin Kebir Hammam, les eaux augmentent sur une période unique et simple de décembre à Avril et diminuent en dehors de cette période. A *Reboa* et Oued El Hai, la période des hautes eaux suit l'irrégularité du régime des pluies, elle est courte et discontinue. Elle débute de Février à Mai à *Reboa* et s'étale de Février à Avril avec la participation du mois de septembre dans les deux bassins.

Les dates de ruptures détectées sur les chroniques de débits à la station d'*El Kantara* (bassin Oued El Hai) ont montré une baisse évidente à partir de 1980 à cause de l'effet cumulatif de déficits pluviométriques.

Les cours d'eau connaissent des étiages les plus bas en été. Ils sont de plus en plus longs et fréquents dans les cours d'eau qui drainent le bassin de *Reboa* et *Oued El Hai*.

Les bilans hydrologiques des bassins affichent des déficits d'écoulements importants mais peu variables en année. Ils augmentent du Nord au Sud, et représentent 522 mm au bassin *Kebir Hammam*, 253 mm à *Reboa* et 106 mm à Oued El Hai. Les lames d'eau écoulées ne représentent que de faibles taux (19 % au bassin *Kebir Hammam*, 13% à *Reboa* et 10% à *Oued El Hai*) par rapport aux lames d'eau précipitées.

Chapitre
LES RESSOURCES EN EAU
ET
LEUR MOBILISATION

5

5.1. Introduction

Pour accéder à l'eau, on mobilise les eaux d'un milieu souterrain (nappe souterraine;) ou superficiel (cours d'eau, barrage, retenue collinaire, etc.). Les nappes phréatiques sont des réservoirs aquifères alimentés par l'infiltration des eaux de ruissellement. Ils régularisent ainsi les écoulements de surface et offrent en même temps des ressources en eau de bonne qualité et directement mobilisables.

Les eaux superficielles sont des eaux collectées dans les cours d'eau. Leur disponibilité dépend des facteurs environnementaux présents sur le bassin versant. Dans tous les pays du monde, elles offrent un potentiel important en termes de mobilisation, vu qu'elles sont constamment renouvelées par le cycle de l'eau. Elles sont étroitement liées à la nature et aux volumes des pluies ; Une pluie forte peut engendrer une crue, qui peut se produire de quelques heures à quelques semaines plus tard, selon la taille du bassin versant. Leur mobilisation n'est donc toujours pas évidente et nécessite souvent le recours à des techniques telles que la construction des barrages. Ce dernier présente un avantage décisif par rapport aux techniques d'exhaure. Il autorise le stockage de l'eau et donc une indispensable régularisation de l'accès à la ressource.

Ce chapitre vise à établir un bilan sur les potentialités de la ressource en eau dans les trois bassins. Il portera un intérêt particulier à la gestion des eaux des barrages, à leur bilan de régularisation, ainsi qu'à leur taux d'alluvionnement mesuré par les premiers levés bathymétriques. Mais avant tout, une brève description de la situation de la ressource en eau, en Algérie s'avère utile.

5.2. Les ressources en eau en Algérie

Du Nord au Sud, la variabilité du relief et du climat a imprimé les grands traits de la répartition des ressources en eau. D'après le rapport établi par L'Institut de Prospective Economique du Monde Méditerranéen, IPEMED, en 2013 sur « l'état des lieux du secteur de l'eau en Algérie », Les potentialités en eau sont estimées à 18 milliards de m³/an. Parmi lesquels 12,5 milliards de m³/an concernent les régions du Nord (le Tell). L'apport principal estimé de 10 milliards provient des écoulements superficiels et 2,5 milliards des ressources souterraines renouvelables. Le reste des ressources, près de 5,5 milliards de m³/an concernent les régions sahariennes dont 0,5 milliard en écoulements superficiels et 5 milliards en ressources souterraines (fossiles).

Ces statistiques situent l'Algérie parmi les pays les plus pauvres en matière de ressources en eau. Elle se trouve loin de la consommation théorique fixée par habitant et par an par la Banque Mondiale qui est de 1000 m³. La disponibilité théorique est de 540 m³/hab/an, ce qui correspond à une dotation moyenne réelle de 383 m³/hab/an, seuil critique (S. Maliki, 2006) qui entrave le développement du pays.

Dès les années 2000, cette situation a poussé les autorités à multiplier les efforts afin d'échapper à cette fatalité. Le nombre des barrages construits a triplé voire même quadruplé. Aujourd'hui, le nombre de barrages construits au niveau national est de 80. Rien que pour l'Est algérien, du littoral au bassin Chott Melghir, on dénombre 36 grands barrages. Parmi, 29 sont en exploitation totalisant une capacité de 3253,09 hm³ et un volume régularisé de 1356,8 hm³, (04) petits barrages d'une capacité de 12,86 hm³ et un volume régularisé de 7,83 hm³, Tiffech (Souk

Ahras), Berla (Constantine), Mjez El Bgar (Guelma), Battoum (Souk Ahras) et (02) barrages en construction, celui de Djedra situé à Souk Ahras et celui de Boukhroufa à El Taref d'une capacité totale de 160 hm³ et un volume régularisé de 66,5 hm³ (ABHCSM, 2012).

Actuellement, la dynamique érosive, très présente dans la majorité des bassins versant, participe à réduire la capacité utile de ces barrages. Leur envasement pose d'énormes problèmes, il est estimé annuellement à près de 70 millions de m³, ce qui leur accorde une durée de vie approximativement estimée à une trentaine d'année (Rémini, 2002).

5.3. Les ressources en eau des bassins

5.3.1. Les ressources en eau superficielles

Les ressources en eau superficielles sont constituées par le ruissellement qui peut être mobilisé par les ouvrages de stockage. Celles-ci ont fait l'objet d'une étude détaillée au chapitre 3.

5.3.2. Les eaux souterraines

En Algérie, les ressources en eau souterraines et la capacité réelle des nappes phréatiques ainsi que les volumes réellement prélevés restent mal connus. Jusqu'à présent, aucune étude n'a fourni de valeurs exactes vues les difficultés et les moyens d'investigations importants exigés. L'absence de systèmes de comptages (débitmètres) au niveau des points de prélèvement fait que toute quantification des volumes prélevés est qualifiée d'imprécise d'où l'impossibilité de parler dans ce cas, de nappes surexploitées ou sous-exploitées.

Les valeurs figurant dans le tableau 49 relatives aux potentialités par bassin étudié sont issues et estimées dans le cadre du Plan National de l'Eau PNE (2005 et 2010).

Tableau 49 : Les potentialités en eau souterraines par bassin.

Code bassin	Nom bassin	Nom de l'aquifère	Potentialité (Hm ³ /an)
0311	Kebir Hammam		14
0704	Reboa		6
0612	Oued El Hai		19,5

Source : PNE, 2010

5.3.2.1. Les grands aquifères au bassin Kebir Hammam

Dans le bassin Kebir Hammam (Fig. 96), les aquifères principaux à potentiel important sont :

a) La plaine d'Azzaba

L'aquifère de la plaine d'Azzaba est situé entre Skikda, à 20 km au Sud-Est et Annaba (bassin Kebir Hammam) à 67 km au Sud-Ouest. Elle occupe une dépression qui fait le lien entre la plaine d'El Harrouch et celle du Lac Fetzara. Il renferme deux horizons d'aquifères constitués par les grès numidiens d'âge oligocène qui affleurent largement dans la plaine. Ces dépôts gréseux constituent une nappe libre surélevée reposant sur des formations sous-jacentes d'argiles numidiennes imperméables (Boubahziz et Siab, 1994, in PNE, 2010), ainsi que, par les dépôts d'âge quaternaire constitués de limons, de graviers, de sables, et de cailloux, d'une épaisseur maximale de 20 m (PNE, 2010). Le substratum de cet horizon est constitué par les argiles numidiennes.

Les ressources exploitables de cette nappe en période moyenne sont de l'ordre de 16.4 hm³/an (PNE, 2010). Sa superficie est de 129 km².

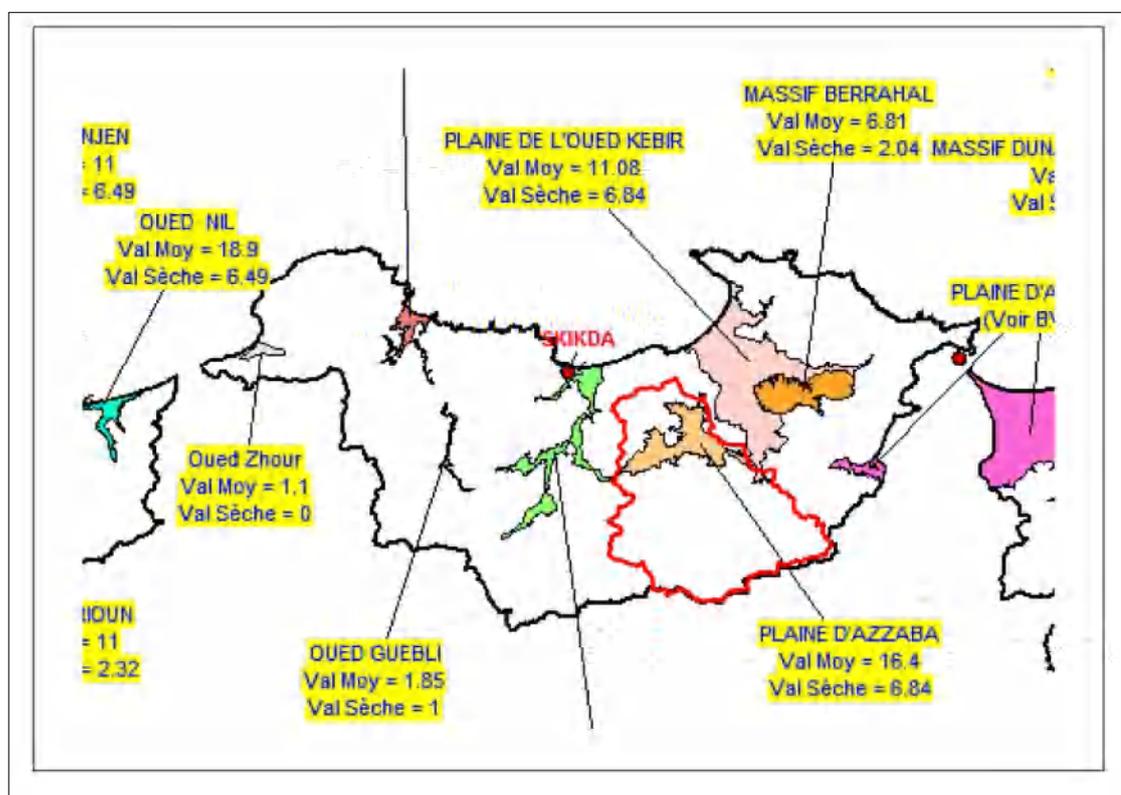


Fig. 96 : Les nappes phréatiques –Bassin Zit Emba- (source : PNE, 2010)

b) La nappe alluviale de l'Oued Kebir et le massif de Guerbes

La plaine de l'Oued Kebir, est située à 40 km à l'Ouest de la ville d'Annaba, et s'étend entre la confluence des Oueds El Hammam et Emchekel, et l'embouchure de l'Oued Kebir. Sa superficie est de 757 km². La vallée de l'Oued Kebir renferme trois aquifères relativement importants : La plaine alluviale, le massif dunaire et Les calcaires jurassiques du Djebel Safia.

b1) La plaine alluviale

La nappe est constituée par les alluvions en forme de terrasses anciennes ou récentes, formées de limons, de galets, de sables et de graviers au débouché de l'Oued, et par des alluvions fines argilo-limoneuses à l'aval. La nappe est partout captive. Son alimentation s'effectue essentiellement par infiltration directe des pluies. Toutefois, il semble que les grès Numidiens et les calcaires du Secondaire, et notamment les calcaires Jurassique du Djebel Safia, participent également à l'alimentation de la nappe.

b2) Le massif dunaire

Le massif dunaire s'est mis en place durant le Quaternaire. Il est formé par d'anciennes dunes consolidées par un ciment calcaire, formant ainsi ce qu'on appelle les grès. Ces derniers s'étendent sur environ 2 km à l'intérieur des terres, et probablement en mer, ainsi que de sables rubéfiés argileux qui s'étendent sur toute la plaine, jusqu'à 30 km de la côte, et de dunes récentes qui forment une bande de sable blanc à une altitude inférieure à 100 m. Les dunes constituent un bassin fermé, alimenté uniquement par les pluies.

b3) Les calcaires jurassiques du Djebel Safia

Ce sont des calcaires Liasiques, situés en altitude dans le Djebel Safia. Ils forment le cœur de deux anticlinaux Crétacé et sont très fracturés. L'alimentation se fait par les pluies, et l'exutoire est constitué par la nappe alluviale.

Les ressources exploitables de la plaine de l'Oued Kebir et Guerbes s'estiment à 11 hm³/an en année moyenne (ANRH/ENERGOPROJECT, 2009 ; PNE, 2010).

5.3.2.2. Les grands aquifères des bassins Reboa et Oued El Hai

A l'exception des aquifères de la plaine de Khenchela-Remila et Boulhilet, le reste des aquifères cités ci-dessous chevauche entre les deux bassins Reboa et Oued El Hai (Fig.97 et 98).

a) La nappe de Remila-Khenchela

La plaine de Remila est située au pied du massif des Aurès, entre les villes de Khenchla et Batna. D'une superficie de 2 000 km² environ, elle s'étend d'Est en Ouest du Djebel Tafrent (à Ain Touila, Khenchela) jusqu'à Djebel Amrane (à l'Ouled Fadhel, Batna). Au Nord elle est limitée par Djebels Bouarif et Fedjoudj (Batna) au Sud par les piedmonts Sud des Aurès.

L'aquifère de la plaine de Remila est constitué par les galets et les graviers du remplissage Mio-plio-quatenaire. Ces horizons d'épaisseur variable plongent vers le centre de la plaine, où ils sont recouverts par des limons peu perméables, d'où la mise en charge de l'aquifère sous-jacent.

Son alimentation s'effectue d'une part, par infiltration directe des pluies, d'autre part par les cônes de déjection des piedmonts Sud situés entre Khenchela et Kais ainsi que des cours d'eau Oued Boulefreis et à un degré moindre Oued Chemora.

Les ressources exploitables de cette nappe sont de 34,5 hm³ en année moyenne (Progress 2005, in PNE, 2010).

b) La plaine de Boulhilet

La plaine de Boulhilet, ainsi que le village du même nom, sont situés entre Ain Kercha au Nord, et le sous bassin de Timgad au Sud. Elle est entourée par les Djebels Hanout, et Oum Kechrid, ainsi que par Garaet Ank El Djemel au Nord, le Djebel Azem à l'Ouest, les Djebels Arif et Fedjoudj au Sud et les Djebels Guelif et Tarf à l'Est. Sa superficie est de 1075 km² dont la moitié est occupée par quatre chotts (Garaet Djendel, Garaet Ank Djemel, Garaet Guellif, Garaet El Marshel).

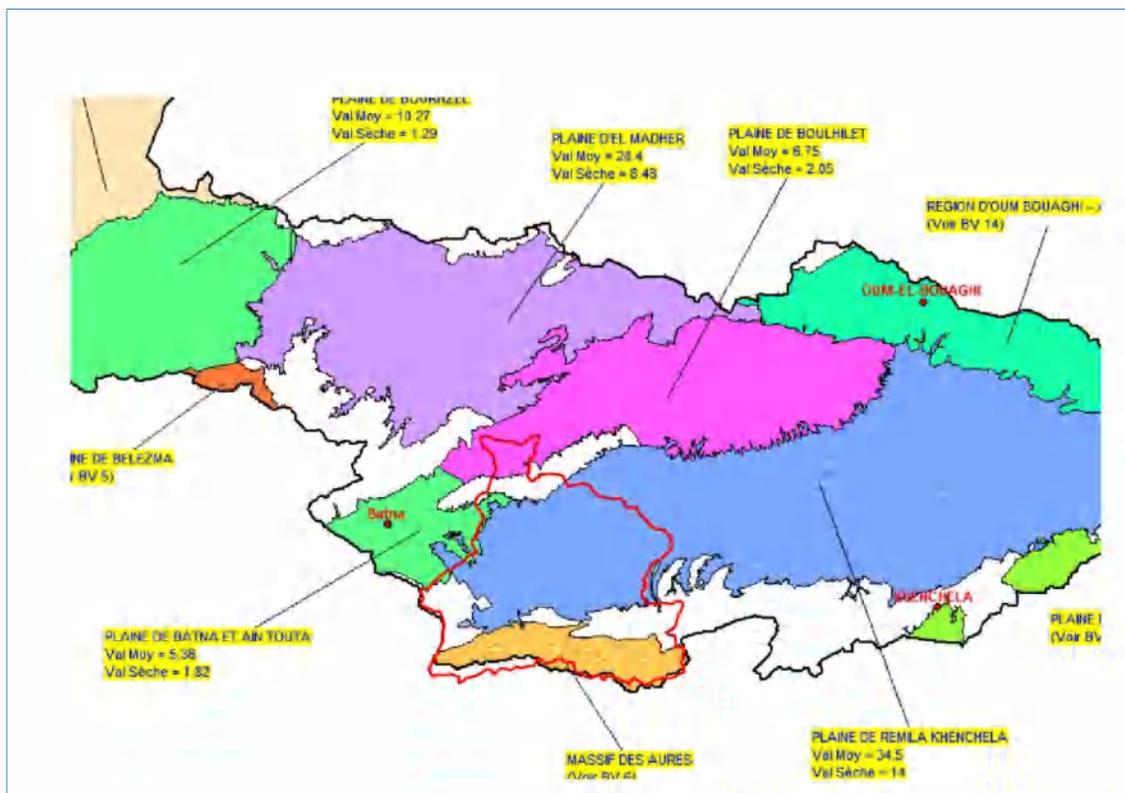


Fig. 97 : Les nappes phréatiques –Bassin Reboa- (source : PNE, 2010)

L'aquifère est constitué par des dépôts Mio-pliocène et Quaternaire capté par des puits d'une dizaine de mètres de profondeur. Au centre de la plaine existe un niveau graveleux d'une épaisseur d'environ 100 m, surmontée par un niveau argileux de 30 m d'épaisseur. Les calcaires d'âge Aptien situés au Sud sont également aquifères.

L'évaluation des ressources exploitables de la plaine de Boulhilet par le plan National de l'Eau de 2010 sont de l'ordre de 6.8 hm³/an.

c) Le massif des Aurès

L'aquifère du massif des Aurès s'étend au Sud des deux bassins Reboa et Oued El Hai. Il est limité au Nord par les plaines de Ain Touta et de Remila -Khenchla, à l'Ouest par le bassin du Hodna et la plaine d'El Outaya, au Sud par la plate-forme saharienne, et à l'Est par le massif de Babar. Sa superficie est de 2 762.7 km².

L'hydrogéologie des Aurès, est assez complexe, il existe de nombreuses formations susceptibles d'emmagasiner de l'eau. Les principales structures hydrogéologiques sont constituées par les structures synclinales de Bouzina et Rhassira (Kh. Achi, 1995).

Ces synclinaux renferment plusieurs niveaux aquifères représentés par :

- Le complexe Oligo-Eocène, formé par des grès, avec de fréquents changements de faciès, passant des grès aux marnes, et aux calcaires gypseux. A cause de cette hétérogénéité, les débits sont variables (entre 10 l/s et 50 l/s à Bouzina, et entre 0 et 20 l/s à Rhassira).

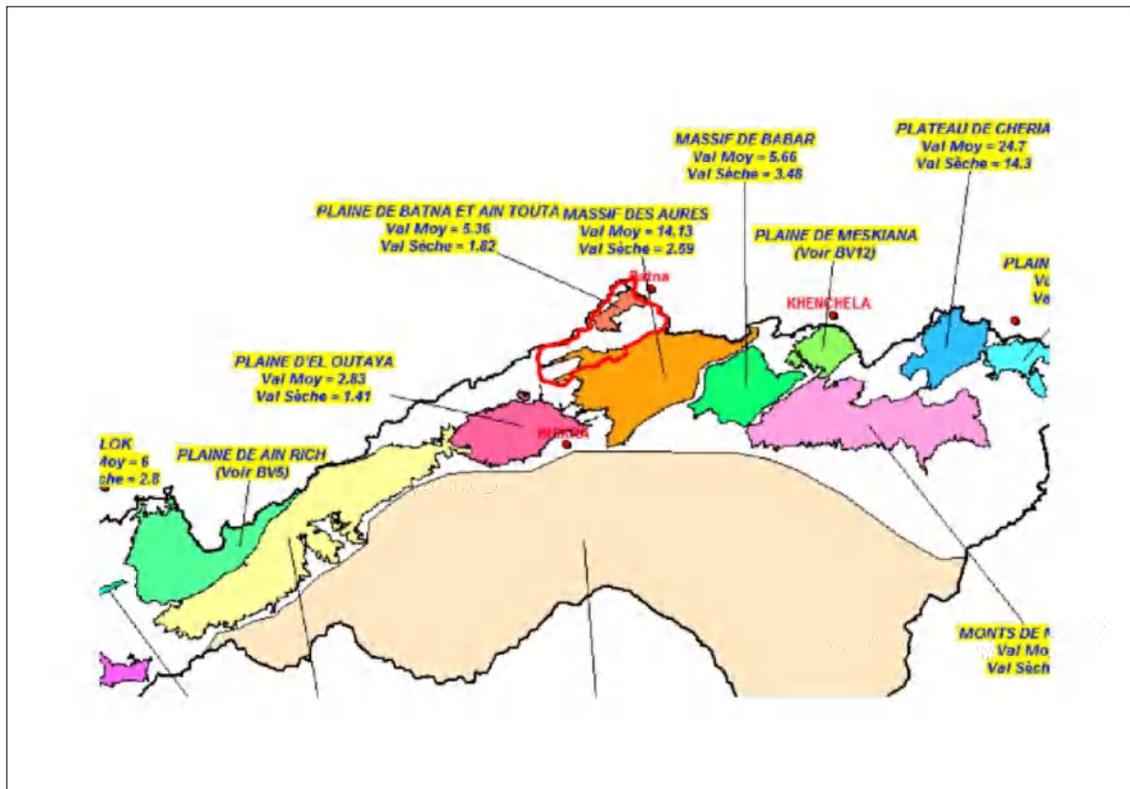


Fig. 98 : Les nappes phréatiques –Bassin Oued El Hai- (source : PNE, 2010)

- Les calcaires du Maestrichtien, très fissurés, mais difficiles d'accès ont été captés dans la vallée de Bouzina, mais les niveaux statiques sont assez profonds. Dans la vallée Rhassira, les calcaires n'affleurent pas sur les flancs, et ils n'ont jamais été captés dans la vallée,
- Les alluvions du Quaternaire de l'Oued Abdi, qui occupent une vallée étroite et encaissée.

La nappe, de faible épaisseur, est exploitée uniquement par des puits. L'étude ANRH/ENERGOPROJEKT (2009) a estimé les ressources en eau du massif des Aurès à 14,1 hm³/an.

d) La plaine de Batna -Ain Touta

La plaine de Batna-Ain Touta est d'une superficie de 475 km². Elle s'étend sur environ 40 km, entre Batna et Ain Touta et à cheval sur deux bassins hydrographiques : le bassin des Hauts

Plateaux Constantinois et le bassin du Chott Melghir (Nord du bassin Oued El Hai). Elle est limitée au Nord par les Mont de Belezma (Nord de Batna), à l'Ouest par le Djebel Ketef Deba et la plaine de Barika, au Sud par le Djebel Chentouf (au Sud de la commune de Oued Chaaba, Batna).

La nappe est principalement constituée par un remplissage alluvionnaire. Elle comprend des niveaux de galets et de graviers, répartis sur toute la plaine, et des alluvions récentes, limitées aux abords de l'oued Ain Ras El Ma. Ces dépôts ont une faible épaisseur (16 m). Les pluies sont la principale source d'alimentation, mais il y a probablement une contribution des oueds. Le drainage se fait vers l'Oued El Ksour.

Les estimations faites dans le cadre de l'étude ANRH/ENERGOPROJEKT (2009), par la méthode du bilan hydrologique ont donné pour la plaine Ain Touta la valeur de 5,3 hm³/an.

5.4. Mobilisation des ressources souterraines

Les ressources en eau mobilisées depuis les aquifères donnent également lieu à une estimation au niveau des forages et des puits pour chaque aquifère identifié. La superposition informatique via le SIG des bassins étudiés et des cartes d'aquifères établies par le Plan National de l'Eau en 2010 et des cartes de localisation des puits et forages dans les trois bassins permet d'établir ce qui suit :

Les dernières enquêtes menées par les Agences de bassins hydrographiques en 2012 dans le but d'actualiser le cadastre hydraulique révèlent que les ouvrages de mobilisation des eaux souterraines sur la zone des trois bassins sont majoritairement de deux types : forages et puits.

Le total des prélèvements souterrains dans le bassin Kebir Hammam est de 4,2 hm³/an. Les forages exploités au nombre de 18 (Fig. 99) sont localisés au Nord du bassin sur la nappe de la plaine de Azzaba. Sur l'ensemble de ces forages deux seulement sont destinés à l'irrigation. Le reste alimente en eau potable quelques localités appartenant à Bekkouche Lakhder et Es sebt.

Dans les bassins de Reboa et Oued El Hai, les eaux mobilisées proviennent essentiellement de trois nappes souterraines (Fig. 100 et 101), celle de la plaine de Remila-Khenchela, celle du massif des Aurès et celle de la plaine de Batna-Ain Touta. Sur le territoire du bassin Reboa, 43 forages sont exploités dont 9 sont situés en aval du barrage Koudiet M'daouar. Ils produisent annuellement un volume de 12,8 hm³. Les forages localisés dans les communes de Ouyoune Assafir, Oued Taga et Timgad appartiennent aux particuliers et sont essentiellement destinés à l'irrigation. Ils produisent 6,3 hm³/an.

Sur le territoire du bassin de Oued El Hai et sur les mêmes nappes précitées se localisent 5 forages situés dans la commune de Oued Chaaba (wilaya de Batna). Ils produisent annuellement un débit de 0,7 hm³. Ils sont essentiellement destinés à l'irrigation au profit des particuliers.

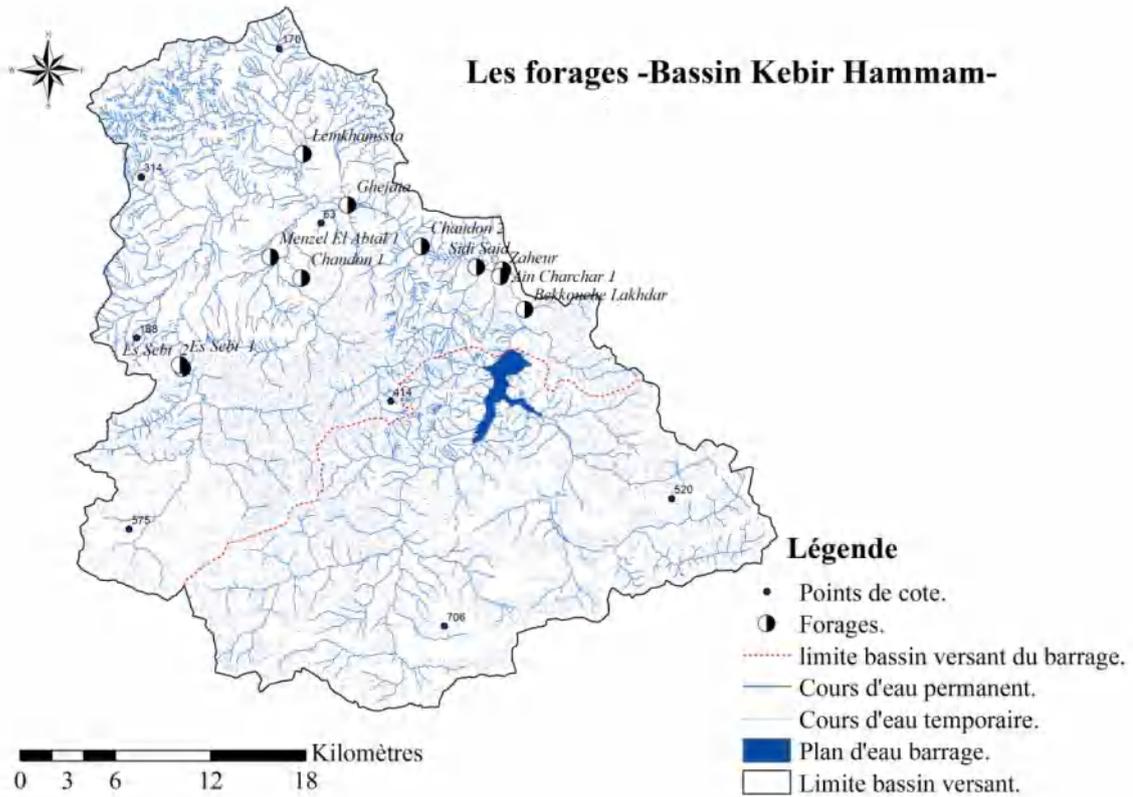


Fig. 99 : Localisation des forages en exploitation au bassin Kebir Hammam (ABHCSM, 2012)

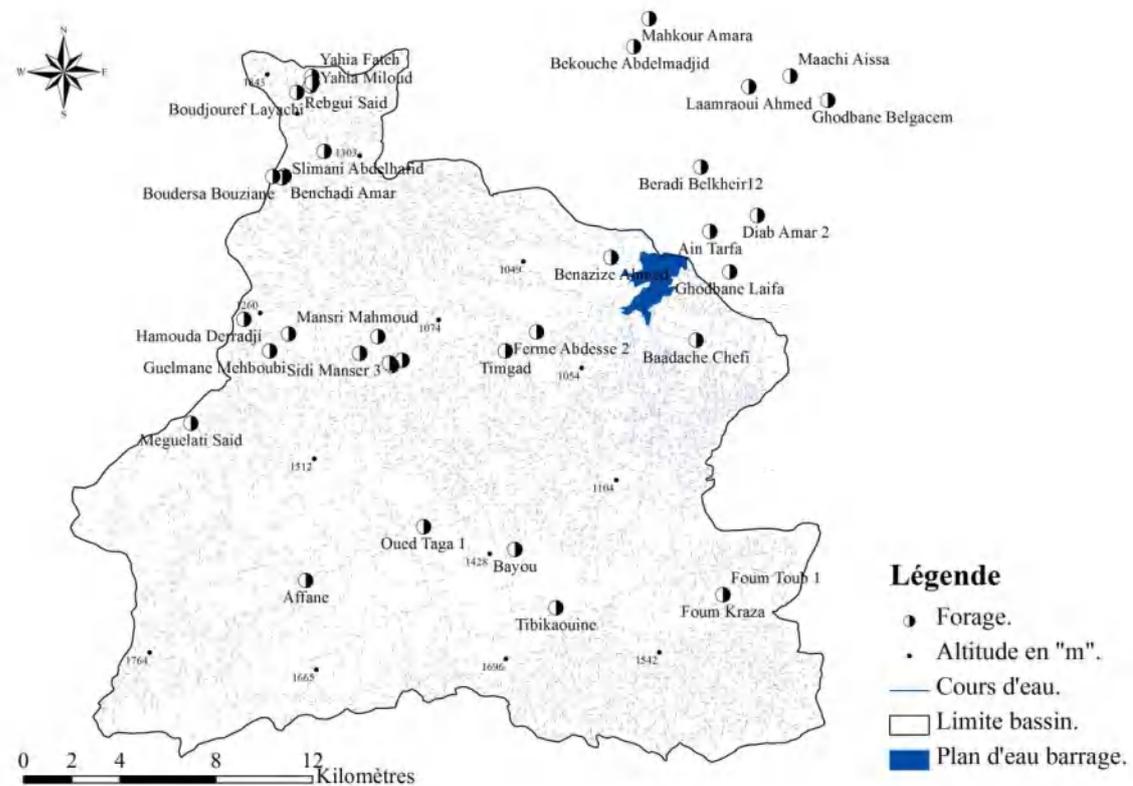


Fig. 100 : Localisation des forages en exploitation au bassin Reboa (ABHCSM, 2012)

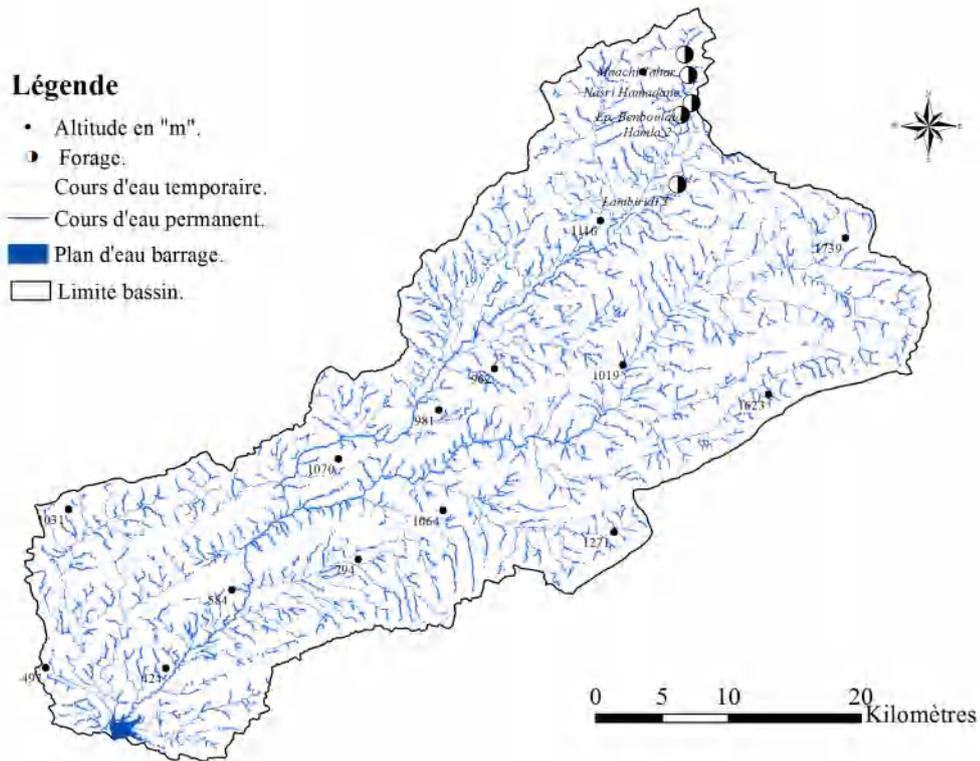


Fig. 101 : Localisation des forages en exploitation au bassin Oued El Hai (ABHCSM, 2012)

5.5. La mobilisation des ressources superficielles

Les ressources en eau superficielles prises en compte dans le cadre de la réalisation de ce volet sont les barrages et les retenues collinaires.⁹³³

5.5.1. A partir des retenues collinaires

Les retenues collinaires sont de petits ouvrages en terre destinés à emmagasiner des quantités d'eau peu importantes variant de 10.000 à 100.000 m³ (Bensaloula, 2008). Ils sont de faible profondeur avec des digues en terre, faciles à réaliser et à mettre en œuvre. Ils ne demandent pas de gros investissements et les délais de réalisation sont assez courts.

Les retenues collinaires se sont développées dans tout le territoire Nord Algérien vers les années quatre-vingt au profit des petites exploitations agricoles et des zones situées aux piedmonts du Nord du pays. En 2014, ils existaient environ 524 petites retenues collinaires sur le territoire national avec une capacité de stockage d'environ 70 millions m³/an (FAO, 2015). Ces petites retenues, principalement alimentées par les eaux pluviales et les petits cours d'eau sont exploitées par les agriculteurs pour l'irrigation des cultures et l'abreuvement du Cheptel.

Cependant, les stocks d'eau constitués par ces ouvrages sont souvent trop incertains et de courte durée. Ils ont tendance à diminuer en capacité suite soit à un envasement rapide,

conséquence d'une crue ou deux, soit à la destruction de la digue à l'arrivée d'une crue suite à l'ignorance du niveau maximal du plan d'eau (Cote de danger) (B. Remini, 2010).

Seul le bassin Kebir Hammam dispose de tels ouvrages. Dans les années quatre-vingt, le bassin a bénéficié de la réalisation de 5 retenues collinaires. Puis, le nombre est passé à 8 retenues dans les années quatre-vingt-dix. La capacité totale de ces retenues était estimée de 0,48 hm³ (Tableau 50). La plupart d'entre elles (6 retenues collinaires) étaient implantées en amont de la station de mesure hydrométrique de Ain Charchar (en aval du barrage Zit Emba) (Fig. 102). Mais depuis quelques années la majorité de ces retenues sont complètement envasées et leurs sites mêmes ont été anéantis suite aux grandes crues qui en eu lieu en hiver 2008.

L'état de fait a montré que ces petites infrastructures sont souvent négligées par les gestionnaires du secteur, au profit de la gestion des grands ouvrages hydrauliques présents sur le territoire du bassin. De ce fait, trois retenues seulement sont toujours en exploitation. Les plus anciennes sont celles de Zaidi 1 et Zaidi 2 situées sur la commune de Ain Charchar et celle de Oum El Ward réalisée en 2008 pour compenser les volumes d'eau emmagasinés perdus. Elles servent annuellement à l'irrigation de plus 27 ha appartenant à quelques exploitations agricoles individuelles et collectives (EAI et EAC)

Les levés bathymétriques, étant absents, l'envasement annuel de ces retenues est estimé sur la base des taux d'envasement (Tableau 51) communiqués par la Direction des Ressources en Eau de la wilaya de la wilaya de Skikda (DRE). Ces taux ont été obtenus lors des deux campagnes d'enquêtes réalisées par l'Agence de Bassin Hydrographique Constantinois-Seybousse-Mellegue en 2004 et à laquelle nous avons participé dans le cadre de l'établissement du Cadastre Hydraulique, et 2012.

Tableau 50 : Les retenues collinaires par bassin

Bassin	Dénomination	Commune	Coordonnées Lambert			Capacité m ³	Année de mise en eau	Etat 2004	Etat 2012
			X (m)	Y (m)	Z (m)				
Kebir Hammam	Kheroufi (DAS)	Djendel	903,5	384,8	60	40000	1985	Envasée	Envasée
	Djenan Randa	Djendel	902,3	401,8	164	200000	1989	Bon	Envasée
	Ghribissa	Djendel	905,7	395,2	/	47000	1995	Bon	Envasée
	Oum El Ward	Djendel	/	/	/	160000	2008		Bon
	Litim 1	Ain Charchar	902,7	389,4	75	45000	1985	Bon	Envasée
	Litim 2	Ain Charchar	904,2	387,7	87	60000	1985	Bon	Envasée
	Zaidi 1	Ain Charchar	906,5	392,6	67	50000	1985	Moyen	Moyen
	Zaidi 2	Ain Charchar	905,1	393,9	63	45000	1985	Bon	Moyen
	Zaidi 3	Ain Charchar	904,7	394,3	68	40000	1985	Bon	Envasée
Reboa	Néant								
Oued El Hai	Néant								

Source : ABHCSM, 2012

En 2004, les taux d'envasement varient de 20% à 100%. La vase de l'ensemble des retenues représente un volume de 147400 m³, soit une perte totale de plus 27 % de la capacité totale initiale des retenues. Pour une densité de 1,6, le volume de vase est de 235814 tonnes, ce qui correspond à un apport moyen annuel en sédiments de l'ordre de 14190 tonnes. En 2012, le taux de vase a beaucoup augmenté. Il représente un volume total de 511500 m³, ce qui correspond à un taux d'envasement de plus de 74%, et un volume de vase moyen annuel de 45912 tonnes.

Cependant, il faut signaler que cette vase quantifiée reste approximative puisque son estimation s'appuie sur des observations non mesurées.

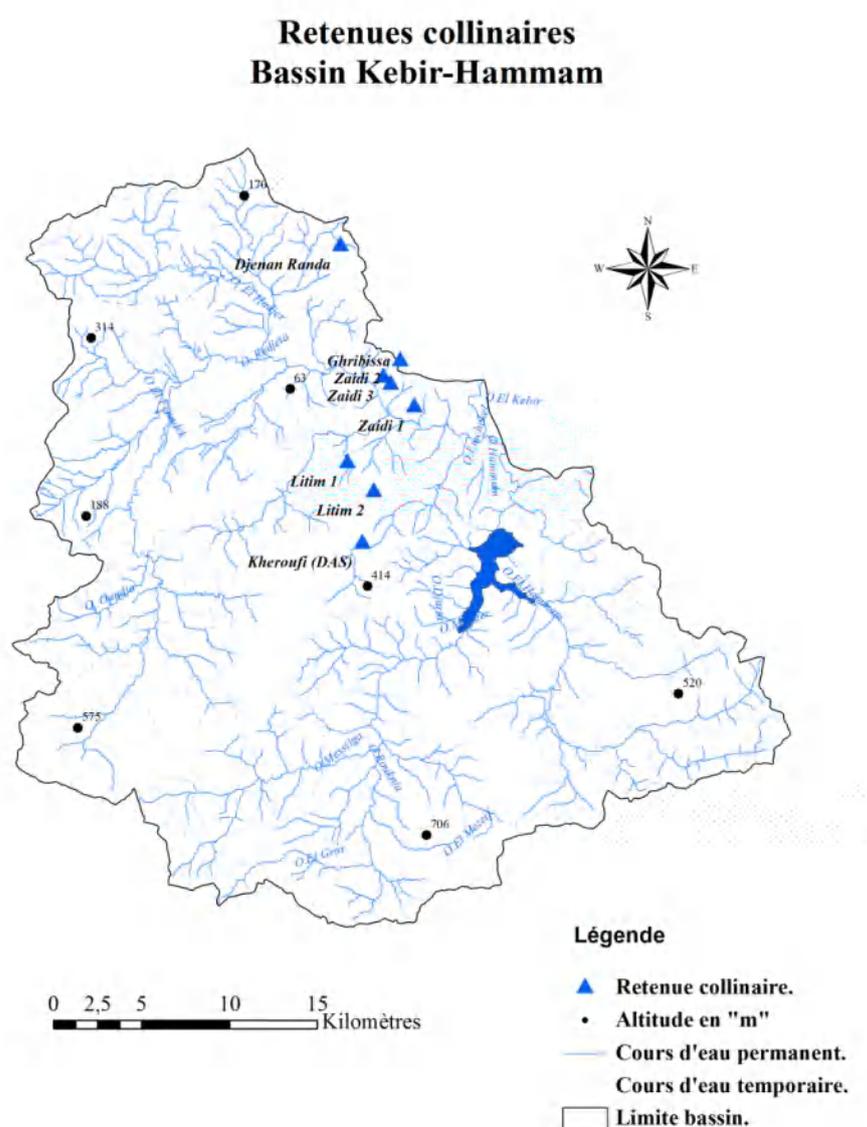


Fig. 102 : Localisation des retenues collinaires -Bassin Kebir Hammam-

Tableau 51 : Volumes de vases dans les retenues collinaires –Bassin Kebir Hammam

Nom de la retenue collinaire	Capacité m ³	Année de mise en service	Etat 2004					Etat 2012				
			Nombres d'année de service	Taux d'envasement	Volume de la vase	Volume de la vase (densité de vase =1,6) ⁽¹⁾	Volume annuelle de la vase	Nombres d'année de service	Taux d'envasement	Volume de la vase	Volume de la vase (densité de vase =1,6)	Volume annuelle de la vase
Kheroufi (DAS)	40000	1985	19	100%	40000	64000	3368	/	100%	40000	64000	3368
Djenan Randa	200000	1989	15	20%	40000	64000	4267	23	100%	200000	320000	13913
Ghribissa	47000	1995	9	20%	9400	15040	1671	17	100%	47000	75200	4424
Oum El Ward	160000	2008	/	/	/	/	/	4	20%	32000	51200	12800
Litim 1	45000	1985	19	20%	9000	14400	758	27	100%	45000	72000	2000
Litim 2	60000	1985	19	20%	12000	19200	1011	27	100%	60000	96000	2667
Zaidi 1	50000	1985	19	40%	20000	32000	1684	27	50%	25000	40000	1111
Zaidi 2	45000	1985	19	20%	9000	14400	758	27	50%	22500	36000	1000
Zaidi 3	40000	1985	19	20%	8000	12800	674	27	100%	40000	64000	1778
Total	687000				147400	235814	14190			511500	818400	45912

(1) En considérant une densité sèche (poids sec des matériaux par unité de volume) égale à 1,6 tonnes/m³

Pour plus de détails sur les ressources en eau, l'analyse de la mobilisation des eaux par les barrages qui régulent les eaux des trois bassins s'avère indispensable. Mais au préalable, il semble important de faire un petit aperçu historique sur l'ensemble des barrages existant dans la partie Est Algérienne.

5.5.2. A partir des barrages

Depuis plusieurs décennies, la construction de barrages a été une solution très largement utilisée pour résoudre les délicats problèmes de mobilisation des ressources en eau. En Algérie, elle a commencé très tôt vers les années trente. En 1962, il n'existait que treize barrages permettant de stocker 450 millions de m³ d'eau destinées essentiellement à l'irrigation des plaines agricoles de l'Ouest du pays nettement moins arrosées que celles de l'Est. Actuellement, on en dénombre 80 pour une capacité globale de 7,3 milliards de m³ d'eau.

A l'Est du pays, les premiers barrages construits sont ceux de : *Foum El Gueiss* à Khenchela, *Foum El Gherza* à Biskra et *Ighil Emda* à Bejaia (Fig. 103, Tableau 52). Le plus ancien est celui de *Foum El Gueiss* qui date de 1938. Ce barrage a été construit entre la wilaya de Batna et Khenchela. Ses eaux étaient destinées à l'alimentation en eau potable de la commune de Kais et essentiellement à l'irrigation des terrains agricoles. Au milieu des années 2000, le barrage a été mis à l'arrêt suite à son envasement total. Un grand sentiment de frustration a pris la collectivité des agriculteurs des plaines de Kais et Remila dont les récoltes dépendent étroitement de ce barrage. Ce n'est que vers 2015 que leurs parcelles agricoles sont prises en charge par le barrage de *Koudiet Medaouar*.

Après 1962, l'Algérie orientale indépendante réalise son premier barrage hydroélectrique d'*Erraguène* en 1963, destiné pour l'alimentation de la centrale électrique de Ziama Mansouria. Puis en 1965, le barrage de *Cheffia* pour l'irrigation du périmètre de Bounamoussa et approvisionnement du pôle urbano-indusriel d'Annaba. Il faudra attendre pratiquement deux décennies, pour voir la mise en exploitation de treize barrages :

- 1984, le Barrage de *Guenitra*, sur l'Oued Fessa, affluent de l'Oued Guebli. Il a été réalisé dans le but de renforcer le barrage des *Zardézas*, envasé quelques années seulement après sa surélévation.
- 1987, le barrage de *Hammam Grouz*, réalisé avec peine dans les gorges calcaires karstiques du Rhumel, à proximité de l'agglomération de Oued Athménia, pour soulager un peu la ville de Constantine, confrontée à d'insoutenables problèmes d'eau.
- 1987, le barrage de *Hammam Debagh* sur l'Oued Bouhamdane, est destiné principalement à l'irrigation (périmètre de Guelma-Bouchegouf) et à l'alimentation en eau potable et industrielle de la région de Guelma.
- 1987, le barrage d'*Ain Dalia* sur l'Oued Medjerda dont le but était de renforcer l'alimentation en eau de la ville de Souk Ahras, et plus tard approvisionner d'autres villes situées plus au Sud (El Aouinet, Sedrata, Ain Beida, Ain Babouche, Oum El Bouaghi).

- 1993, le petit barrage de *Beni Zid* dans les monts de Collo est mis en eau surtout pour l'irrigation de la plaine côtière de l'Oued Guebli où est prévu l'équipement d'un périmètre moderne. Les eaux du barrage sont aujourd'hui acheminées jusqu'à Collo et d'autres petites agglomérations voisines pour le renforcement de leur alimentation en eau potable.
- 1995, le barrage de *Foum El Khanga*, à une vingtaine de kilomètres de la ville de Sedrata, est réalisé pour l'irrigation de la plaine de Ksar Sebihi-Sedrata.
- 1999, le barrage de *Mexa* sur l'Oued Kébir-Est a été mis en eau avec une capacité réduite de 51 hm^3 en raison d'impératifs sociopolitiques. En 2010 pour compenser le manque à gagner le barrage de Bougous d'une capacité de 80 hm^3 a été réalisé. L'eau régularisée par ces deux ouvrages (*Mexa* et *Bougous*) est destinée à l'irrigation des terres de la vallée du Kébir-Est mais aussi à l'alimentation en eau potable du couloir El Kala - Annaba.
- 2001, est réceptionné le barrage de *Zit Emba* sur l'Oued Hammam, affluent du Kébir Ouest. L'eau du barrage est destinée au périmètre d'irrigation de la plaine alluviale de Zit Emba mais le projet hydro-agricole a accusé plusieurs années de retard (étude et réalisation). Actuellement, grâce à son taux important de remplissage le barrage dispose d'une interconnexion avec celui des *Zardezas*, en mesure de satisfaire les demandes en AEP des régions de Skikda, de Ben Azzouz et de l'ensemble des agglomérations implantées dans la plaine de Azzaba.
- En 2002, le barrage d'*El Agrem*, dans les Côtiers Ouest dans la wilaya de Jijel, est mis en eau dans le but d'irriguer la plaine de Jijel-Taher et également de combler le déficit d'alimentation en potable de l'agglomération Jijelienne et de certains chefs-lieux des communes voisines.
- 2003, Le barrage de *Koudiet Medaouar*, construit sur l'Oued Chemora, est réceptionné. En plus de l'apport propre de son bassin versant ($18\text{-}20 \text{ hm}^3/\text{an}$), ce réservoir « tampon » reçoit les eaux de Beni Haroun ($191 \text{ Mm}^3/\text{an}$) pour alimenter en eau des deux wilayas (Batna et Khenchela) de la région de l'Aurès et l'irrigation du périmètre de Chemora-Batna-Ain Touta et Touffana.
- En 2003, au mois d'août plus précisément, est réceptionné le plus grand barrage d'Algérie de par sa capacité (960 hm^3), *Beni Haroun* édifié sur l'Oued Kébir-Rhumel, au Nord de la ville de Grarem Gouga. Il est le pivot d'un vaste schéma de transfert hydraulique allant de la Petite Kabylie d'El Milia aux confins de l'Aurès.

Tableau 52 : Les barrages de l'Est Algérien en exploitation, réalisés et en cours de réalisation.

Nom	Wilaya	Superficie BV (km ²)	Capacité initiale (hm ³)	Vol_Reg (hm ³)	Année MES	Destination
Petits Barrages en exploitation						
Medjez El Bgare	Guelma	1063	2,86	1,43	1994	IRR
Berla	Constantine	6417	2,2	1,5	1999	AEP
Tiffech	Souk Ahras	1763	5,8	2,9	1994	IRR
Batoum	Souk Ahras	178	5,8	2	1993	IRR
Total	4		16,66	7,83		
Barrages en exploitation						
Ourkiss	Oum El Bouaghi	108	65,4	45,2	2017	AEP/IRR
Koudiet M'daouar	Batna	578	62	15,6	2003	AEP+IRR
Ighil Emda	Bejaia	652	75,6	90	1954	AEP+IRR
Ouldjet Mellegue	Tébessa	2774	98	23,5	2017	AEP/IRR
Boussiaba	Jijel	390	190	82,5	2015	AEP
El Agrem	Jijel	40	33,9	18	2002	AEP/IRR/AEI
Erraguene	Jijel	134	200	76,5	1963	Hydroélectrique /AEP/IRR
Kissir	Jijel	106	72	51	2015	AEP/IRR
Tabellout	Jijel	270	214	115	2018	AEP
Beni Zid	Skikda	62	40	12,5	1993	AEP/IRR
Guenitra	Skikda	202	125	27,5	1984	AEP/IRR/AEI
Zerdezas	Skikda	345	31	20,5	1973	AEP/IRR/AEI
Zit Emba	Skikda	488	117,39	55	2001	AEP/IRR
Hammam Debagh	Guelma	1056	200	71	1987	AEP/IRR
Bougous	El Tarf	235	67	49	2010	AEP
Cheffia	El Tarf	579	171	126	1965	AEP/IRR/AEI
Mexa	El Tarf	158	47	30	1998	AEP/IRR
Foum El Gueiss	Khenchela	154	3	1	1938	AEP/IRR
Tagharist	Khenchela	80	9	4	2018	AEP/IRR
Ain Dalia	Souk Ahras	175	82	31	1987	AEP
Oued cherf (ex-Foum El khenga)	Souk Ahras	1767	157	33	1995	IRR
Beni Haroun	Mila	7548	960	332	2003	AEP/IRR
Hammam Grouz	Mila	1132	45	22,5	1987	AEP/IRR
Oued Athmania (ex-Sidi Khelifa)	Mila	16	33	31	2005	AEP/IRR
Babar	Khenchela	567	41	12	1995	AEP/IRR
Foum El Gherza	Biskra	1300	47	10,8	1950	IRR
Fontaines des Gazelles	Biskra	1660	55,5	14	2000	IRR
Total	27		3241,97	1400,1		
Barrages réalisés mais hors service.						
Draa Diss	Sétif	22	137,3	/	2017	AEP+IRR
Total	2		137,7	/		
Barrages en cours de réalisation.						
Boukhroufa	El Tarf	176	120	43	2020	IRR
Djedra	Souk Ahras	79	40	23,5	2020	AEP
Total	2		160	66,5		

Source : ABHCSM+ANBT

AEP : Alimentation en Eau Potable ; AEI : Alimentation en Eau industrielle ; IRR : Irrigation ; MES : Année de mise en service.

5.5.3.1. Le barrage Zit Emba

Le barrage de *Zit Emba* est situé entre la wilaya de Skikda et Guelma. Il est implanté sur le territoire de la commune de Bekkouche Lakhdar dans la daïra de Ben Azzouz. Tandis que, la partie amont de la cuvette fait partie de la wilaya de Guelma. L'ouvrage a été construit par l'entreprise « SELKHOZPROMEXPORT » en 1993 et mis en service en mars 2004. Il est destiné essentiellement pour l'irrigation des 6500 ha des terres situées dans le périmètre de Zit Emba et l'alimentation en eau potable de la commune de Azzaba.

Il contrôle une superficie de 485 km² (Photo 2). Sa digue en terre est composée essentiellement d'argiles, de galets, de graviers et de masses rocheuses, de 47,5 m de hauteur et de 640 m de long (Photo 3). Il reçoit les apports de l'Oued Hammam et Oued Mouguer (Tableau 53). Lors des crues exceptionnelles le débit entrant excédentaire est libéré grâce à un déversoir à seuil libre de 867 m³/s. Son volume utile est de 117,4 hm³. Cet ouvrage régularise un apport annuel de 55 hm³.

La sécheresse qui a sévi dans les années 2002 a incité les autorités à procéder à une adduction et la pose d'une canalisation sur une distance de 56 km pour doter le barrage des Zerdezas d'un volume de 8 hm³ pour l'alimentation en potable de la ville de Skikda.

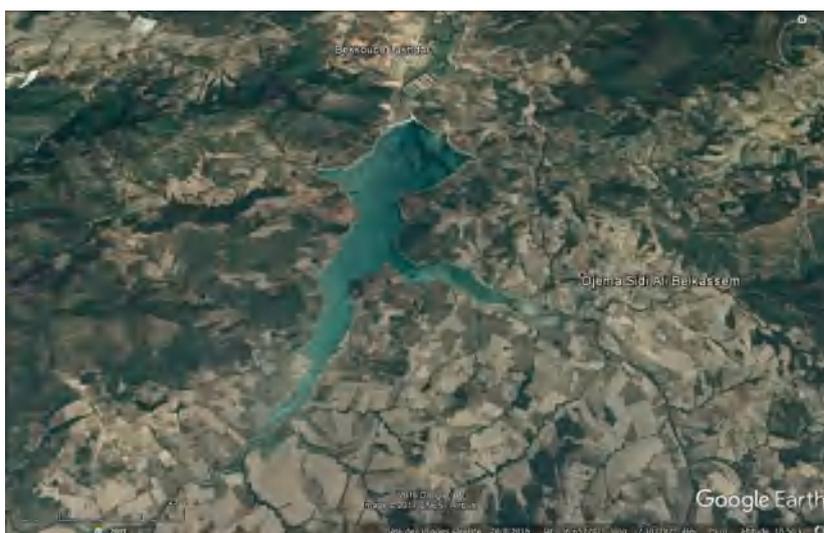


Photo 2 : Lac de retenue du barrage de Zit Emba (Google Earth, 2016)



Photo 3 : la digue du barrage de Zit Emba

Tableau 53 : Quelques caractéristiques technique du barrage Zit Emba.

Année de construction	1989
Année de Mise en eau	2001
Type	Terre
Capacité	117,4 hm ³
Apport moyen annuel	50 hm ³
Surface du bassin versant	485 km ²
Hauteur	47,5 m
Longueur	640 m
Largeur	10 m
Côte retenue Normale (R.N)	86 m
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	91 m
Déversoir à seuil libre	867 m ³ /s
Vidange de Fond	2 x 102 m ³ /s

5.5.3.2. Le barrage Koudiet M'daouar

L'aménagement de *Koudiet M'daouar* est réalisé par l'entreprise nationale COSIDER. Il est situé à une trentaine de kilomètres du chef-lieu de Batna sur l'Oued Chemora. Il fait partie du grand système du complexe de Béni Haroun. La capacité utile de cet ouvrage est de 56 Mm³. Sa réalisation a débuté vers 1993 et fût arrêtée pendant 3 ans pour des raisons financières. Puis, les travaux de construction ont été relancés vers septembre 1996. Il est dimensionné en vue de stocker et régulariser les transferts en provenance de Beni Haroun via le réservoir de Oued Athmania. Le taux des apports de l'Oued Chemora régularisé par cet ouvrage est de 83 %, soit 16 Mm³/an. Ce volume additionné aux apports transférés depuis Beni Haroun (191 Mm³/an) est destiné à l'alimentation en eau potable des deux wilayas : Batna (Batna ville, Tazoult, Ain Touta, Barika et Arris) ; Khenchela (Kenchela ville, Fais, Kais, El Hamma, El Mahmel et Ouled Rechache) et l'irrigation des terres agricoles dans les plaines de Chemora et Touffana.

La digue du barrage est de type terre (Tableau 54). Elle est constituée d'argile et d'un remblai en alluvions compactées. Sa longueur est de 2270 m et sa hauteur de 48 m. La cuvette du barrage se situe à l'exutoire du bassin versant d'une superficie de 578 km² (Photo 4). Le déversoir est à seuil libre. Il est destiné à évacuer une crue de 2500 m³/s. Une vidange est située à la base de la rive droite. Sa capacité d'évacuation de 2 fois 80 m³/s. Elle est constituée d'une large galerie en béton armée qui traverse le barrage et la chambre des vannes (Photo 5).



Photo 4 : Lac de retenue du barrage Koudiet M'daouar (Google Earth, 2017)



Photo 5 : la digue du barrage de Koudiet Medaouar

Tableau 54 : Quelques caractéristiques technique du barrage Koudiet M'daouar.

Année de construction	1993
Année de Mise en eau	Septembre 2005
Type	Terre
Capacité	62,0 hm ³
Apport moyen annuel	16 hm ³
Surface du bassin versant	578 km ²
Hauteur	48 m
Longueur	2270 m
Largeur	10 m
Côte retenue Normale (R.N)	992,50 m
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	997,00m
Déversoir à seuil libre	2500 m ³ /s
Vidange de Fond	2 x 80 m ³ /s

Le grand système de transfert de Beni Haroun et le barrage Koudiet M'daouar et son tracé d'ensemble

Le barrage de Béni Haroun est situé à l'aval de la confluence des Oueds Rummel et Endja, à une quarantaine de kilomètres au Nord de Constantine, et à une distance équivalente par rapport à l'embouchure de l'Oued Kébir (mer Méditerranée). Par sa capacité et son impact régional, cet ouvrage constitue actuellement le plus imposant aménagement hydraulique à travers le pays. Son système de transfert s'appuie principalement sur une gigantesque station de pompage (180MW), trois barrages de régulation, trois stations de traitement et plus de 600 km de conduite (transfert et adduction). Cette infrastructure est destinée à satisfaire les besoins d'alimentation en eau potable des agglomérations situées dans les wilayas de : Mila, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna et Khenchela, totalisant 3,3 à 4 Millions d'habitants. Actuellement, près de la moitié du total régularisé est affecté à l'irrigation des hautes terres sèches (périmètres de Teleghma, Chemora, Batna-Ain Touta et Touffana-Remila) couvrant ensemble près de 40 000 ha.

Les principales composantes hydrauliques du transfert sont illustrées par la figure 104. Le transfert des eaux de Beni Haroun vers la retenue de Oued Athménia s'effectue par le biais d'une station de pompage. Cette gigantesque station, d'une puissance de 180 Mégawatts, refoule, sur une hauteur de 702 m, un débit de 23 m³/s. Son installation par le groupement franco-espagnol ALSTOM-DRAGADOS a nécessité l'aménagement d'un puits cylindrique semi-enterré de 85 m de profondeur et de 30 m de diamètre. En direction des centres urbains du Nord de la wilaya de Mila (couloir 1). Les eaux pompées arrivent à la station de traitement de Ain Tinn. Celle-ci produit en phase finale un volume de 90 000 m³ par jour (près de 33 hm³ par an), vers le barrage tampon de Oued Athménia. Ce réservoir formé par une digue de 35 m sur l'Oued Kaim, a une capacité totale de 33,6 hm³ et un volume utile de 25 hm³. Les conduites qui partent de cette station

acheminement l'eau traitée, par pompage vers les agglomérations du Sud de la wilaya de Mila (couloir 2), et par gravité vers Constantine et ses environs (couloir 3).



Fig. 104 : Schéma du transfert du barrage Beni Haroun.

Le tracé du transfert vers les Hautes Plaines, au Sud, est le même jusqu'aux environs de Ain Kercha. Partant du réservoir de Oued Athménia et sur une longueur de 19,6 km, l'eau est acheminée de façon gravitaire vers la station de pompage de Oued Seguen, située à la cote 724,6 m. Le prélèvement d'eau au profit du périmètre d'irrigation de Teleghma (7078 ha) s'effectue à l'extrémité du tronçon, à partir d'un réservoir tampon. En direction du Sud-Est, le pompage d'eau brute à destination du barrage de Ourkiss dans la wilaya de Oum El Bouaghi (à environ 14 km au Sud de la ville de Ain Fakroun). Ce réservoir est d'une capacité de 65,4 hm³ et régularise un apport d'eau de 45,2 hm³. Ses eaux sont destinées à l'irrigation du périmètre de Chemora (15 000 ha), Touffana-Remila (11 000 ha répartis entre 2 000 ha dans la zone de Touffana et 9 000 ha dans la plaine de Remila) et au profit de plus de 577000 habitants de cinq communes (Ain Fakroun, Ain Kercha, Ain M'lila, Oum El Bouaghi et Ain El Beida).

En direction du Sud-Ouest, le pompage d'eau brute se fait sur une distance de 49,4 km à destination du barrage de *Koudiet M'daouar*. Ce dernier fournit un volume utile de 62 hm³. Le système de distribution prend naissance à partir des 2 stations de pompage disposées en série au pied de la station de traitement du barrage. Cette dernière comporte 4 lignes de traitement pour la production de 178 000 m³/j d'eau. Le pompage de l'eau traitée chemine vers un réservoir de mise en charge, ensuite vers le couloir 1 composé des villes de Batna, Tazoult, Ain Touta et Barika.

Quatre autres stations de pompage sont disposées en série pour assurer le refoulement de l'eau traitée vers le couloir 2 comportant les centres urbains de Khenchela, Kais, El Mahmel et Ouled Rechache. Continuellement à partir de la station de traitement de *Koudiet M'daour*, un couloir 3 (adduction de 36 km et 5 stations de pompage) est réalisé en vue d'alimenter la ville d'Arris, au cœur du massif de l'Aurès. Ce réservoir assurera également dans l'avenir un complément d'eau à une partie du périmètre d'irrigation de Chemora (secteur 1 et 4). En revanche, l'irrigation nécessaire au périmètre de Batna-Ain Touta (6 000 ha) est annulée, en raison de l'urbanisation du tracé de la conduite projetée.

5.5.3.3. Le barrage des fontaines des gazelles

Le barrage des *Fontaines des gazelles* est situé à environ 30 km au Nord-Ouest du chef-lieu de la Wilaya de Biskra. Sa construction a créé un réservoir de 55,5 hm³ dont l'objectif était de réguler les eaux d'Oued El Hai et l'irrigation de la Palmeraie d' El Outaya (Tableau 55, Photo 6).

L'ouvrage est réalisé par trois entreprises. Les premiers travaux ont été entamés en 1986 par l'entreprise étrangère ENERGOPROJEKT pour s'arrêter en 1990. Puis, les travaux ont de nouveau été repris par l'entreprise Algérienne HYDROTECHNIQUE Algérie. Il fut mis en eau en année 2000 et n'a été exploité qu'à partir de janvier 2006.

Le barrage est construit en matériaux locaux, constitués de remblai en alluvions compactés avec un noyau d'argile. Sa digue est de 52 m de hauteur totale au-dessus de sa fondation et de 370 m de longueur (Photo 7).

Les ouvrages auxiliaires dont le barrage est équipé sont constitués par une vidange de fond évacuant un débit maximal de 21 m³/s et un déversoir à seuil libre capable d'évacuer un débit de 3000 m³/s.



Photo 6 : Lac de retenue du barrage des Fontaines des Gazelles.



Photo 7 : La digue du barrage des Fontaines des Gazelles.

Tableau 55 : Quelques caractéristiques technique du barrage des Fontaines des Gazelles.

Année de construction	1986
Année de Mise en eau	2001
Type	Terre
Capacité	55,50 hm ³
Apport moyen annuel	20,6 hm ³
Surface du bassin versant	1660 km ²
Hauteur	42,5 m
Longueur	370,0 m
Largeur	8,5 m
Côte retenue Normale (R.N)	384,00 m
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	388,00 m
Déversoir à seuil libre	3000 m ³ /s
Vidange de fond	21 m ³ /s

5.5.4. Bilans de régularisation des barrages

La détermination du bilan hydrique d'un barrage (Fig. 105) est basée sur l'application de l'équation du bilan qui découle du principe de conservation des volumes d'eau (Albergel et al, 1997) soit :

$$\Delta V = (V_p + V_r + V_{ecs} + V_f) - (V_i + V_{ev} + V_d + V_{vi} + V_u) \quad (42)$$

Où :

ΔV : Variation du stock de la retenue; V_p : volume d'apport de la pluie tombant directement sur la retenue; V_r : Apport d'eau ruisselé provenant des versants; V_{ecs} : volume d'apports souterrains; V_f : volume de fonte des neiges; V_i : volume infiltré; V_{ev} : volume d'évaporation; V_d : volume déversé; V_{vi} : volume vidangé; V_u : volume utilisé.

La variation du stock de la retenue est reconnue directement à partir de l'enregistrement limnigraphique et la courbe de remplissage de la retenue par mesure des profondeurs d'eau.

Les volumes d'apport d'eau précipités directement sur la retenue (V_p), le volume ruisselé provenant des versants (V_r) ainsi que le volume d'apports souterrains (V_{ecs}) représentent *les entrées* dans la cuvette du barrage. Ils sont connus à partir des enregistrements pluviographiques et de la courbe hauteurs-surfaces de la retenue. Les volumes de fonte de neige (V_f) sont nuls pour les retenues étudiées. Il existe en hiver mais représentent à l'échelle annuelle une quantité insignifiante.

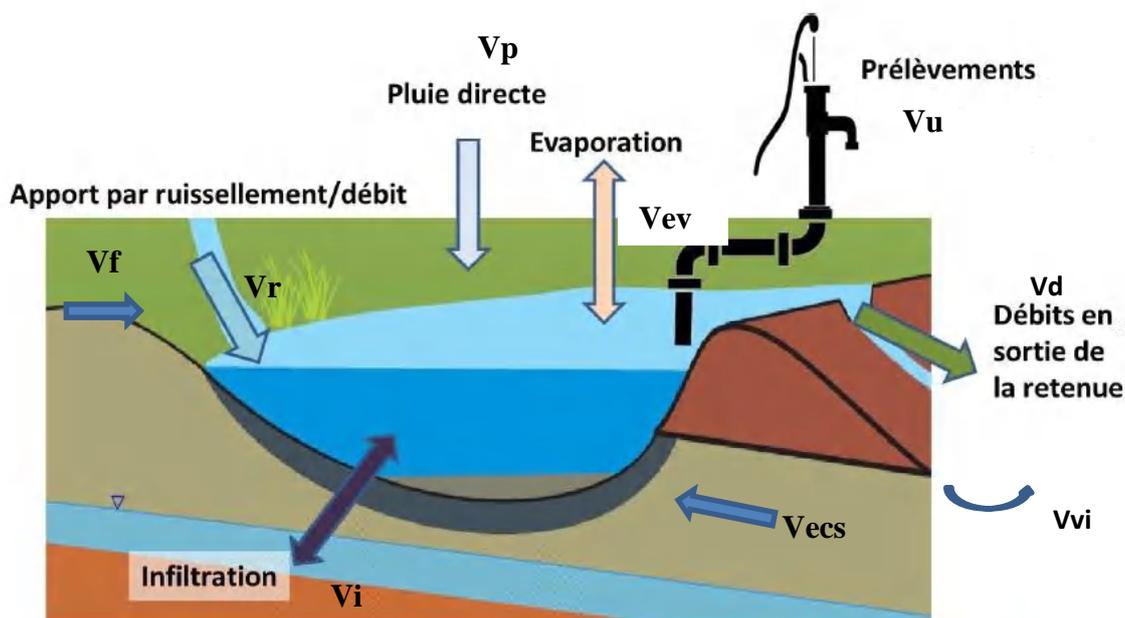


Fig. 105 : Schématisation du bilan hydrologique d'une retenue d'eau

Les sorties des barrages sont sous forme d'évaporation ou d'infiltration. Elles regroupent également les volumes vidangés, déversés et utilisés.

Les volumes d'évaporation (V_{ev}) sont calculés en multipliant l'évaporation journalière par la surface moyenne de la retenue le jour même.

Les volumes d'eau sortant de la retenue par déversement ou par vidange sont connus avec une bonne précision lorsque le déversoir est étalonné et par la vanne de vidange par l'intermédiaire des observateurs qui notent les cotes et heures de début et de fin de vidange. Les infiltrations à travers la digue sont estimées à partir de mesures ponctuelles des débits. Celles qui vont vers les nappes sont connues par bouclage du bilan en l'absence d'apports superficiels.

L'étude des bilans hydrologiques au niveau des trois barrages étudiés est basée uniquement sur les données acquises auprès des services de l'ANBT (Agence Nationale des barrages et des Transferts).

5.5.4.1. Les entrées : Les apports, pluies et remplissages interannuels, annuels et mensuels des barrages

Cette partie du bilan permet le remplissage de la retenue du barrage. Elle représente sans aucun doute à la fois le terme le plus important et le plus incertain vu sa variabilité dans l'espace et dans le temps.

Les apports sont généralement déterminés au préalable lors de la phase d'étude des barrages. Le but est d'éviter un surdimensionnement inutile et coûteux lors de leur construction (adapté le réservoir aux conditions hydrologiques du bassin versant). Après la construction du barrage, les apports à la retenue sont déterminés à partir de la variation de la cote de la retenue.

La mesure des volumes pluviométriques tombant directement dans la retenue est déterminée en traduisant les volumes obtenus par le pluviographe à l'échelle de la surface inondée de la retenue. Cette surface est déterminée à travers la cote enregistrée, rapportée à la courbe hauteur/surface propre à chaque barrage.

Les apports arrivant aux barrages fluctuent considérablement à travers les années. Pour le barrage de *Zit Emba*, au cours de sa période d'exploitation allant de 2000 à 2017, les apports ont fluctué entre 1,2 hm³ (2016/2017) et 214,5 hm³ (2004/2005). L'apport moyen annuel enregistré a été de plus de 68 hm³ (Fig. 106). Lors des deux années hydrologiques 2002/2003 et 2004/2005, les apports ont dépassés la capacité initiale du barrage qui est de 117.3 hm³ avec des valeurs respectives de 166.4 (avec un volume de remplissage de de 107.4 hm³ en fin d'année) et 214,5 hm³ (avec un volume de remplissage de de 105,6 hm³ en fin d'année). Ces apports sont directement déversés par l'évacuateur de crues.

Il convient de noter que ces fluctuations importantes sont directement liées aux variations pluviométriques. En 2004/2005, la station de Bekkouche Lakhder la plus proche du lac du barrage a enregistré le maximum de pluies (989,4 mm), en 2002/2003, une valeur de 799,4 mm (Fig. 108).

Mensuellement, les apports les plus importants alimentant le barrage arrivent entre le mois de Décembre et le mois d'Avril. (Fig. 107) La somme des apports moyens totaux de ces mois (5 mois) varient d'une année à une autre. Ils varient entre 71% (2010/2011) et 97% (2014/2015).

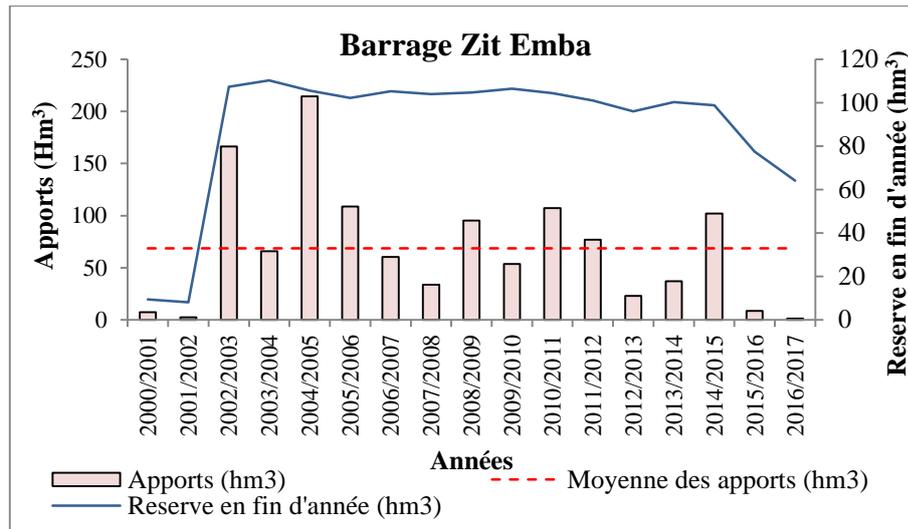


Fig. 106 : Les apports annuels du barrage Zit Emba.

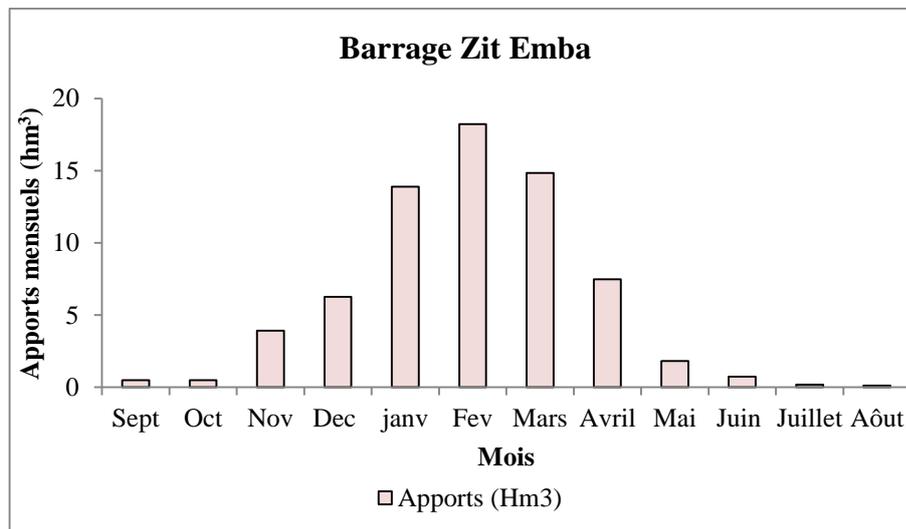


Fig. 107 : Les apports mensuels du barrage Zit Emba.

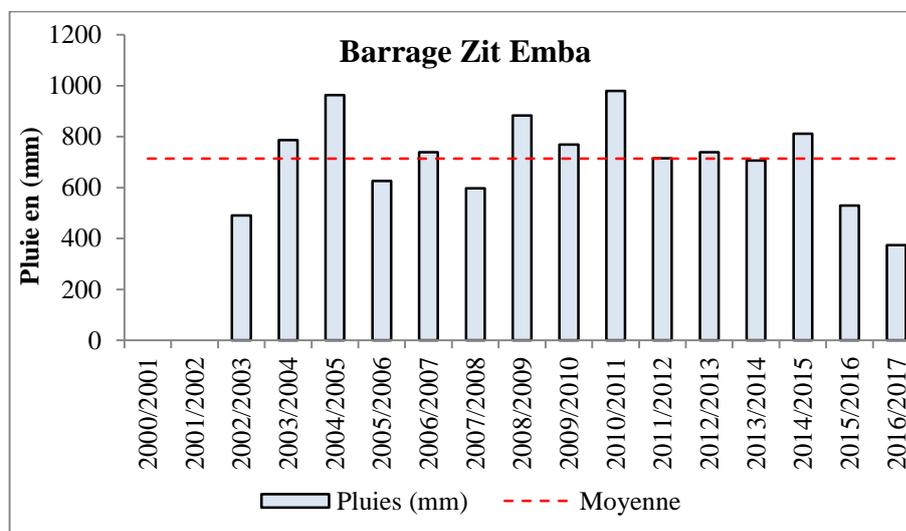


Fig. 108 : Les pluies au site du barrage Zit Emba.

Pour le barrage de **Koudiet M'daouar**, depuis sa mise en eau, les apports ont varié de 5,7 hm³ (2012/2013) à 66,8 hm³ (2008/2009) (Fig.109). Durant la période de son exploitation (2004-2016), ces apports n'ont augmenté qu'une seule année (2008/2009) pour dépasser sa capacité initiale qui est de 62 hm³. Cette augmentation est liée aux pluies maximales enregistrées à la station Reboa (478,5 mm), sinon pour le reste de la période, les apports sont inférieurs à la moyenne. Le plus faible apport enregistré est de 5,7 hm³ en 2012/2013.

Mensuellement, les mois qui participent au remplissage du barrage sont discontinus (Fig.110). Les premiers apports arrivent en septembre (3,4 hm³), puis en janvier (2,03 hm³) et enfin entre le mois de mars et mai avec un apport moyen important de 11,6 hm³ engendré par les pluies (215 mm lors de ces trois mois soit 45 % des pluies de l'année) (Fig. 111).

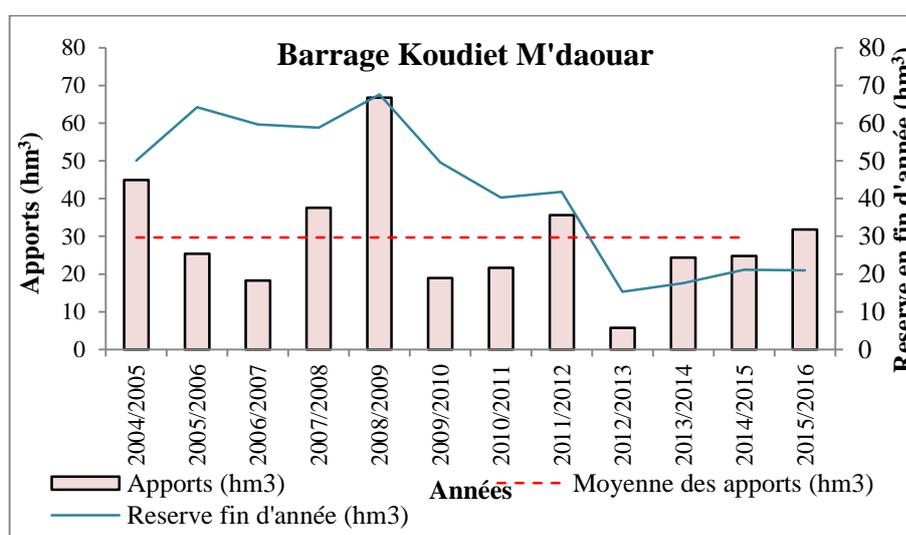


Fig. 109 : Les apports du barrage Koudiet M'daouar.

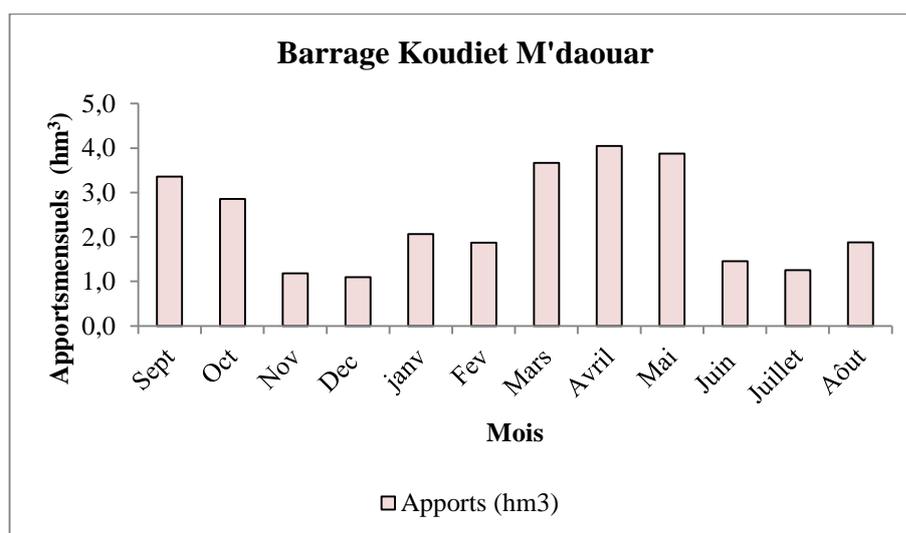


Fig. 110 : Les apports mensuels du barrage Koudiet M'daouar.

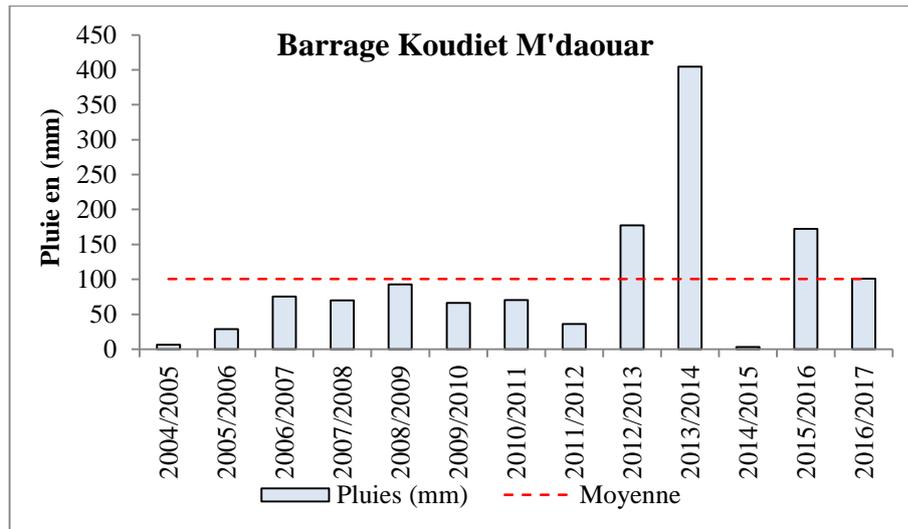


Fig. 111 : Les pluies à la station du barrage Koudiet M'daouar.

Pour le barrage Fontaines des Gazelles, les apports pour obéir à la règle générale, sont également fluctuants (Fig.112). Ils sont autant marqués par leur variabilité que leur faiblesse. Ce n'est que lors de l'année hydrologique 2008/2009 que le barrage a franchi sa capacité initiale (90,5 hm³), en réponse à un maximum pluviométrique enregistré au site du barrage (283 mm) et aux stations contrôlant le site du bassin à savoir : Ouled Chelih (510,5 mm), Biskra (310 mm), Bouzina (564,6 mm), Menaâ (383,5 mm) et Djemorah (305,9 mm) (Fig. 114). Le reste des années, le barrage n'a jamais atteint le volume normal de sa retenue. Entre 2009- 2016, les apports n'ont nullement dépassé la moyenne interannuelle qui est de 25,7 hm³.

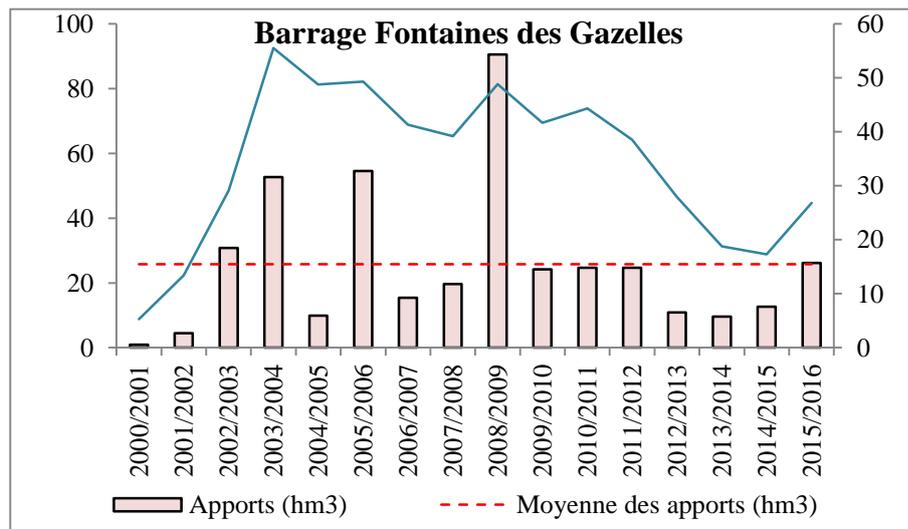


Fig. 112 : Les apports du barrage Fontaines des Gazelles.

Mensuellement, le remplissage du barrage s'effectue sur deux périodes distinctes (Fig. 113). La première entre le mois de sept et le mois d'octobre avec une valeur moyenne des apports de 6,7 hm³, la deuxième entre mars et mai avec un apport moyen de 14,9 hm³. Le mois d'Avril participe à lui seul avec un apport important de 7,2 hm³, ce qui correspond à 28 % des apports annuels.

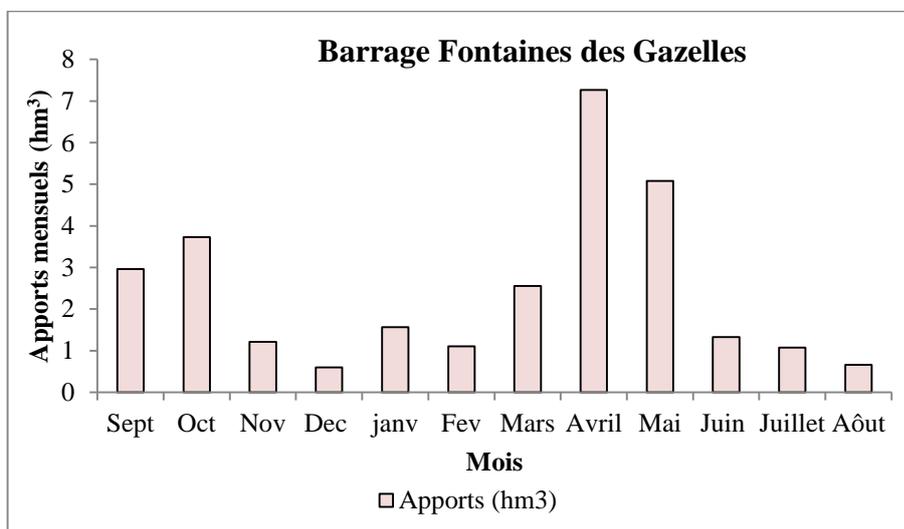


Fig. 113 : Les apports mensuels au barrage Fontaines des Gazelles.

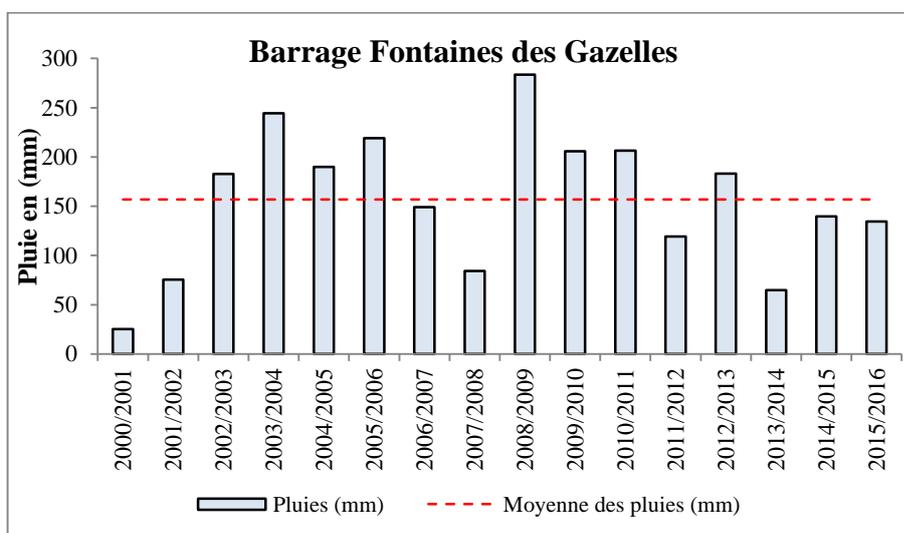


Fig. 114 : Les pluies à la station du barrage Fontaines des Gazelles.

Globalement, les courbes de remplissage des trois barrages varient d'une année à l'autre. Elles suivent la variabilité des apports.

Les réserves en fin d'année varient elles aussi. Elles basculent de 6,8% (2001/2002) à 94,3% (2003/2004) au barrage Zit Emba. Au barrage Koudiet M'daouar, de 24% (2012/2013) à 109% (2008/2009) et de 9,5% (2000/2001) à 99,9% en (2003/2004) dans le barrage des Fontaines des Gazelles.

5.5.4.2. Les sorties

L'eau stockée dans les barrages se trouve menacée par trois problèmes hydrauliques majeurs qui sont l'évaporation intense, l'envasement accéléré et les fuites d'eau surtout à travers les appuis (Toumi et Remini 2002). Le calcul du bilan hydrique nécessite la prise en compte de cette partie d'eau perdue.

a. L'Évaporation

En Algérie, les bacs d'évaporation ont été et sont largement utilisés dans les lacs des barrages pour estimer l'évaporation. La quantité d'eau perdue est généralement importante. Elle est tributaire de nombreux facteurs, la situation géographique, dont dépend le climat, la surface et la profondeur de la retenue. Plus grande est la surface du lac du réservoir, plus grandes sont les pertes d'eau par évaporation ; moins profonds sont les réservoirs, plus importantes sont aussi les pertes par évaporation, au point de compromettre son exploitation.

Au barrage Zit Emba, la moyenne d'eau évaporée sur la période 2000/2017 a été estimée à $7,5 \text{ hm}^3$. La figure 115, montre de façon générale une modeste variabilité annuelle, notamment durant la période 2003/2016, où le coefficient de variation n'a pas dépassé 10%. Le maximum des évaporations annuelles se situe l'année 2005/2006, avec un volume de $11,3 \text{ hm}^3$. La valeur minimale est de $3,8 \text{ hm}^3$ observée durant l'année 2016/2017.

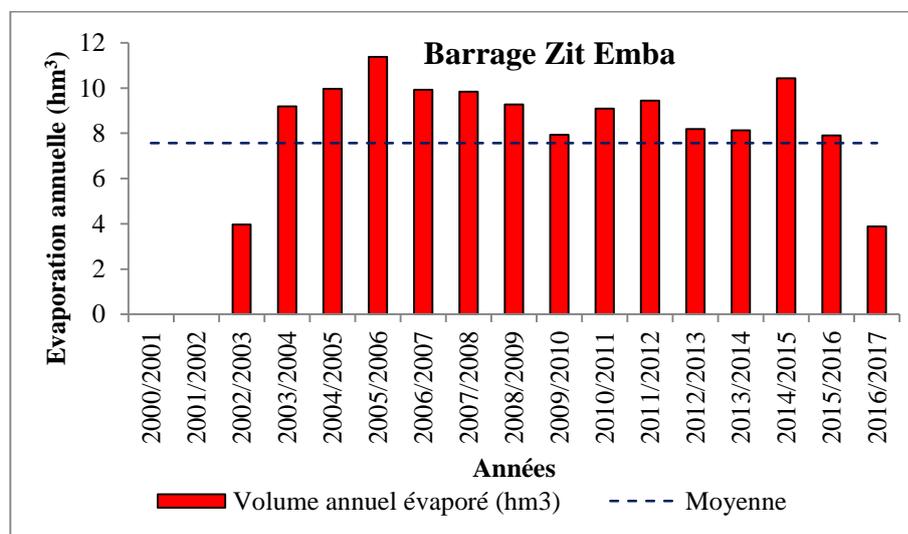


Fig. 115 : Les volumes annuels d'eau évaporés au niveau du barrage Zit Emba.

Mensuellement, l'évaporation suit un rythme saisonnier (Fig. 116). Les fortes valeurs s'observent en juin, juillet et le mois d'Aout (Saison estivale). Par contre, elles diminuent à partir de septembre pour atteindre une valeur minimale de $22,5 \text{ hm}^3$ au mois de Février (saison printanière et hivernale).

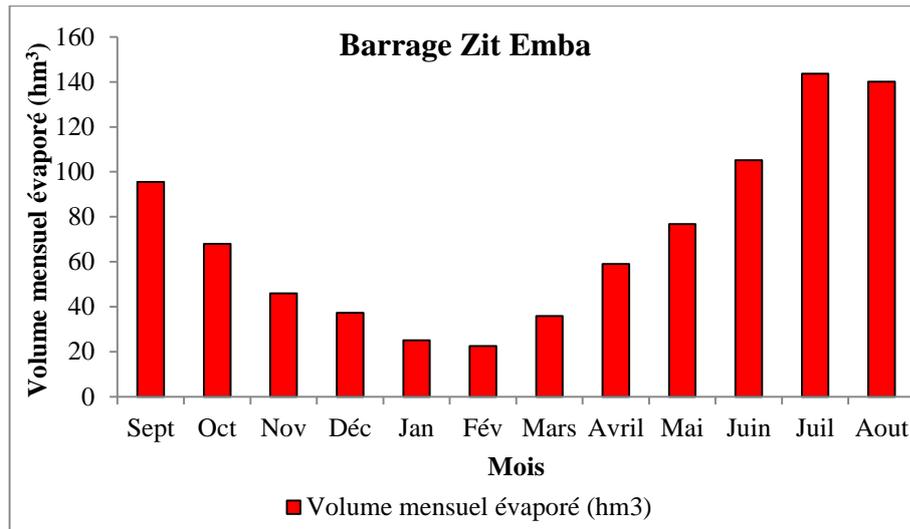


Fig. 116 : Les volumes mensuels d'eau évaporés au niveau du barrage Zit Emba.

Le lac du barrage *Koudiet M'daouar* perd annuellement par évaporation en moyenne 6,5 hm³ (2005-2017). D'une année à l'autre, les volumes évaporés fluctuent dans une fourchette de plus de 5 hm³ (2012/2013) à près de 67 hm³ (2008/2009). Entre 2005/2006 et 2010/2011, les évaporations sont importantes, elles dépassent la moyenne interannuelle. Au-delà, les volumes évaporés diminuent, conséquence du taux de remplissage faible du plan d'eau du barrage qui influe également sur la diminution des surfaces inondées et de la profondeur des eaux du lac d'eau (Fig. 117).

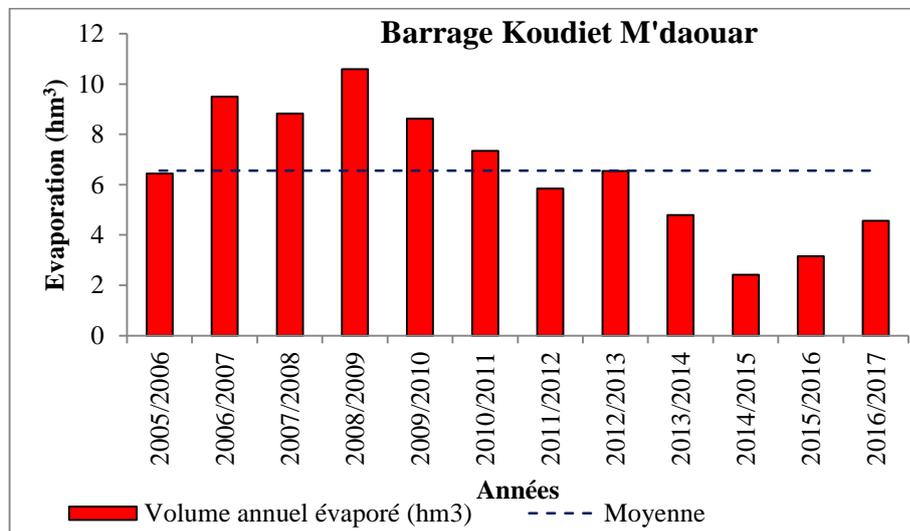


Fig. 117 : Les volumes annuels d'eau évaporés au niveau du barrage Koudiet M'daouar.

Mensuellement, les fortes évaporations dans le barrage s'observent tôt à partir du mois de Mai avec un maximum au mois de juillet (1,1 hm³). Par contre, ce n'est qu'entre le mois de Novembre et le mois de Février qu'elles diminuent considérablement (Fig. 118). Le volume évaporé minimal est enregistré au mois de décembre (0,1 hm³). Cette valeur reste moins importante que celle enregistrée au même mois au barrage de Zit Emba (37,2 hm³).

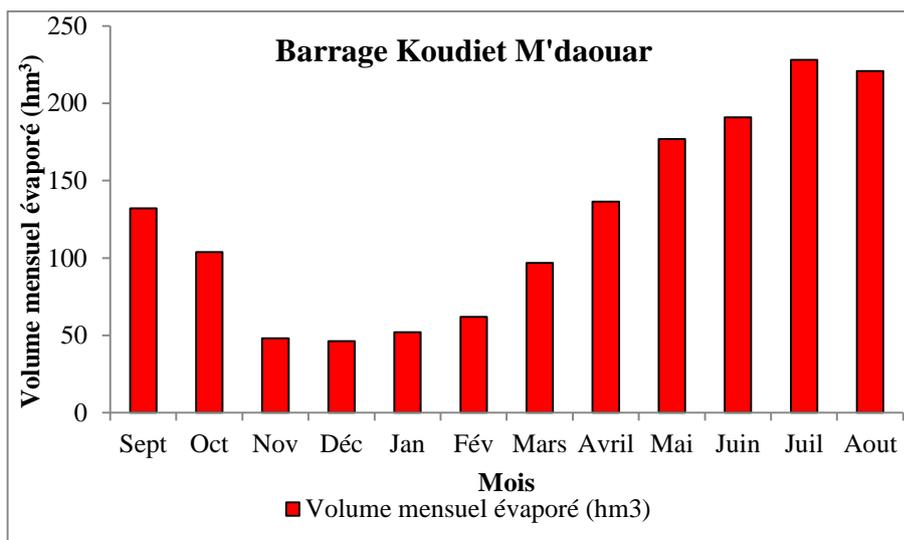


Fig. 118 : Les volumes mensuels d'eau évaporés au niveau du Koudiet M'daouar.

L'évaporation des eaux du lac du barrage des *Fontaines des Gazelles* fluctuent annuellement entre un volume minimal de 1,8 hm³ (2000/2001) à un volume maximal de 11,8 hm³ (2005/2006). Depuis son exploitation (2000/2016), la moyenne du volume enregistrée est de 8 hm³.

Mensuellement, les évaporations les plus importantes ont lieu de Mai à Août, avec un maximum au mois de juillet de 1,2 hm³.

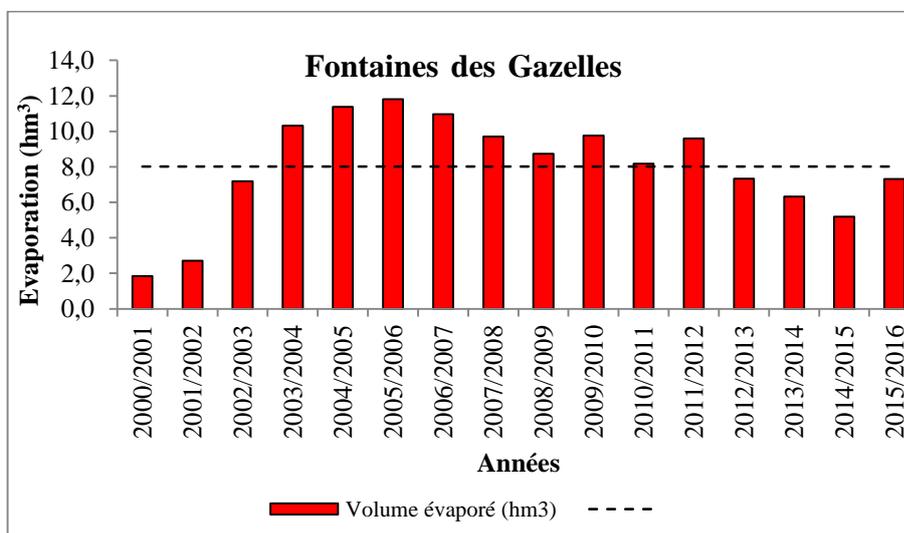


Fig. 119 : L'évaporation au niveau du Fontaines des Gazelles.

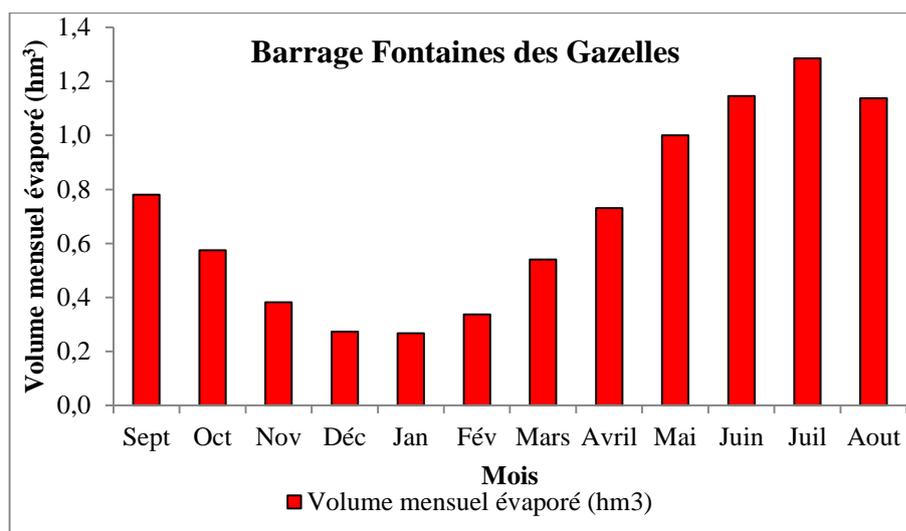


Fig. 120 : Les volumes mensuels d'eau évaporés au niveau du barrage Fontaines des Gazelles.

b. Les déversements et les vidanges des barrages

Les vidanges et les déversements des barrages ont pour objectif d'assurer la sécurité et la durée de vie des ouvrages. La vidange consiste à retirer une partie de l'eau stockée par ouverture des vannes de fond du barrage. Cette opération remet en suspension dans l'eau une partie des couches superficielles des sédiments déposés dans le lac depuis sa mise en eau. Le déversement permet l'évacuation de débits importants lors des crues et lorsque le niveau de la retenue est élevée.

La majorité des ouvrages hydrauliques sont équipés d'un système de vidange et de seuil "évacuateur de crues" ou "déversoirs". Le dimensionnement de ces seuils est indispensable pour la sécurité des ouvrages, car ils permettent d'éviter son envasement rapide et que le niveau n'atteigne des cotes pour lesquelles la sécurité de l'ouvrage ne serait plus assurée.

Les déversements dans le barrage de *Zit Emba* sont récurrents (Fig. 121). Sur une période de 17 ans, le déversoir a fonctionné 12 fois entre 2002 et 2015 avec des volumes déversés variables. Le premier déversement a eu lieu deux années après sa mise en service. Le volume maximal déversé en 2004/2005 a dépassé la capacité initiale du barrage. Il correspond à un volume de 166,4 hm³. Mensuellement, les déversements se produisent en général entre le mois de Novembre et de Juin (périodes des grandes crues). Au mois de février 2004/2005, le volume déversé a atteint un maximum de 46,5 hm³.

Les déversements dans le barrage *Zit Emba* sont souvent accompagnés de vidanges. Leurs volumes sont bien inférieurs aux déversements et ne dépassent pas les 38 hm³. Exclusivement, en 2014/2015, les eaux vidangées ont dominé sur les déversements avec un volume de 37,7 hm³. Cela préjuge l'apport important des matières solides charriées par les crues en cette année et l'utilité de la vidange permet au barrage de ralentir son envasement.

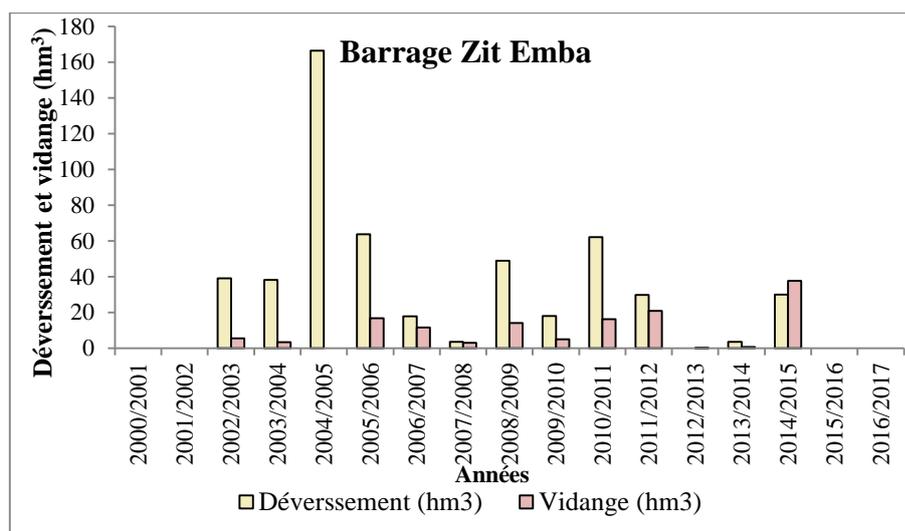


Fig. 121 : Déversements et vidanges du barrage Zit Emba.

Depuis l'entrée en fonction du barrage de *Koudiet M'daouar*, on a pu observer de rares déversements. Le seul déversement produit revient aux mois de juillet et aout de l'année 2008/2009 (Fig. 122). En revanche, les vidanges sont fréquentes entre janvier 2005 et 2012. La plus importante est celle effectuée aux premiers mois de sa mise en service entre Mars et Juin 2005. Son volume est de 41,8 hm³.

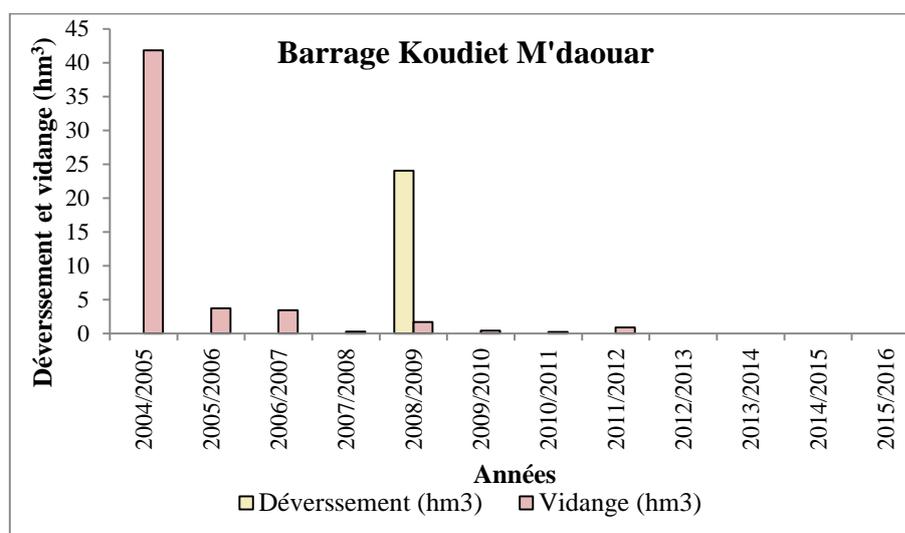


Fig. 122 : Déversements et vidanges du barrage Koudiet M'daouar.

Les débordements des eaux au barrage des *Fontaines des Gazelles* sont peu fréquents (Fig. 123). Durant 16 années d'exploitation, le déversoir du barrage a fonctionné 4 années. En 2008/2009, les volumes des crues sont très importants, plus de 58 hm³ ont été déversés en aval du barrage. Les vidanges qui s'effectuent chaque année en vue de protéger le barrage contre l'envasement, ne suivent obligatoirement pas les déversements. Leur volume a varié entre 0,04 hm³ (2007/2008) et 8,7 hm³ (2003/2004).

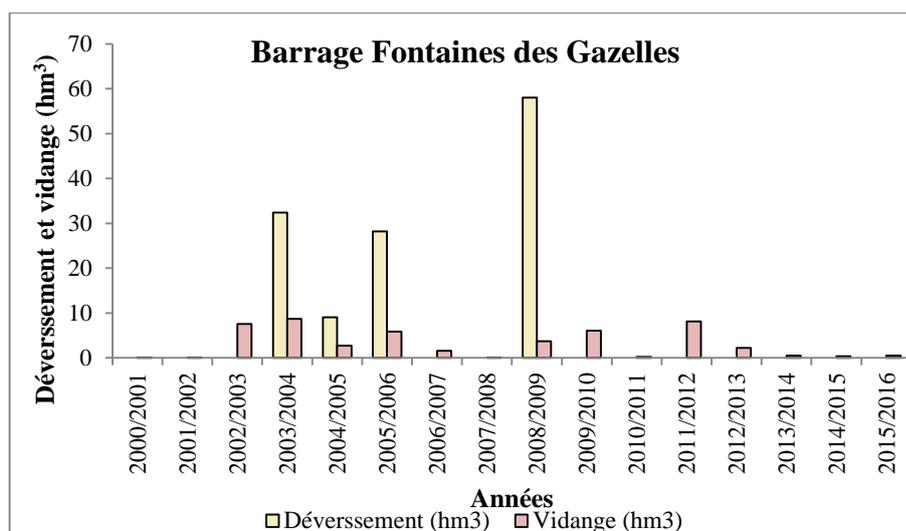


Fig. 123 : Déversements et vidanges du barrage Fontaines des Gazelles.

Il est à noter que sur le plan économique, les eaux déversées représentent une production perdue à jamais. Tandis que, la pratique des vidanges nécessite d'effectuer des visites en aval des barrages et de constater les conséquences.

c. Les fuites

Les fuites ou les pertes par infiltration sont de deux types : les pertes dans le barrage dues à un défaut d'étanchéité, les pertes dans le lac d'eau liées à la nature des sols et du sous-sol qui sont plus ou moins sporadiquement submergés. Ordinairement, Les barrages bien construits sont suffisamment étanches pour que les fuites souterraines puissent être négligées. Certains sont équipés de drains dans lesquels des mesures de débit peuvent, en cas de nécessité, être effectués.

Les pertes par infiltration dans la retenue, en fonction de la hauteur d'eau stockée, sont difficiles à apprécier. Leur mesure nécessiterait une infrastructure qui ôterait tout intérêt à la méthode proposée d'évaluation des écoulements. Fort heureusement, les apports de matières fines piégées dans le plan d'eau colmatent le fond du réservoir, le rendant quasiment imperméable après quelques années. Seules les zones périphériques, épisodiquement submergées, peuvent présenter une perméabilité non négligeable, tel est le cas du barrage Hammam Grouz à Oued El Athmania. Si ces pertes sont conséquentes (plusieurs millimètres ou centimètres par jour) et si les prélèvements effectués à diverses fins sont infimes ou sont mesurés correctement, et que le taux d'évaporation puisse être déterminé avec précision, leur évaluation pourra être faite par limnimétrie.

D'après B. Remini (2018), un barrage de stockage (2012/2013) des eaux n'est jamais à l'abri des fuites d'eau. Plus la hauteur du lac d'eau est grande, plus la pression est grande sur toutes les parties qui forment le réservoir : le fond, les rives, la digue et les vannes de fond.

Les deux barrages Zit Emba et Koudiet M'daouar (Fig. 124 et 125) sont des exemples concrets où le problème de fuites à travers les appuis est sérieux. Chaque année, le barrage de Zit Emba perd annuellement, selon Agence National des barrages et des transferts (ANBT) 0,3 hm³.

Au barrage Koudiet M'daouar les fuites sont encore plus importantes. Elles sont évaluées au double (0,6 hm³).

Le problème de fuites revêt une grande importance, surtout pour notre pays où le stress hydrique est chronique et où le développement économique est fortement tributaire des quantités d'eau emmagasinées dans les barrages.

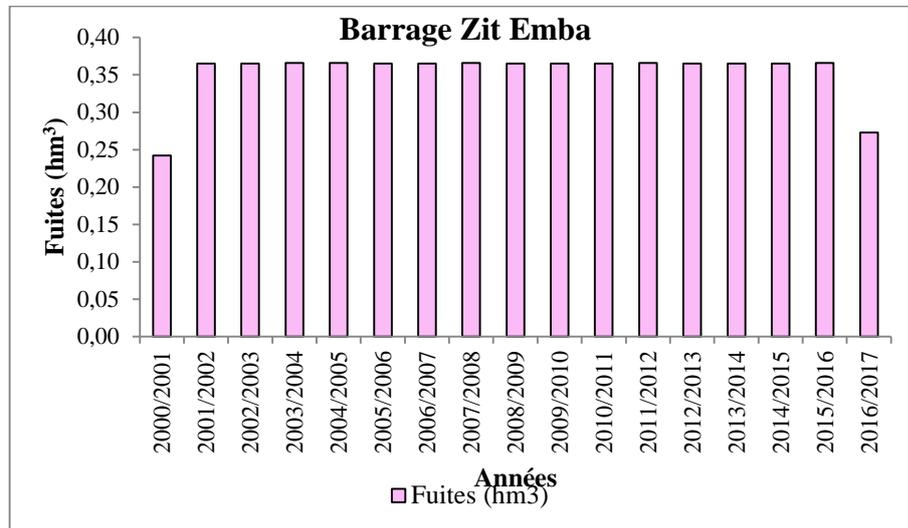


Fig. 124 : Les Fuites du barrage Zit Emba.

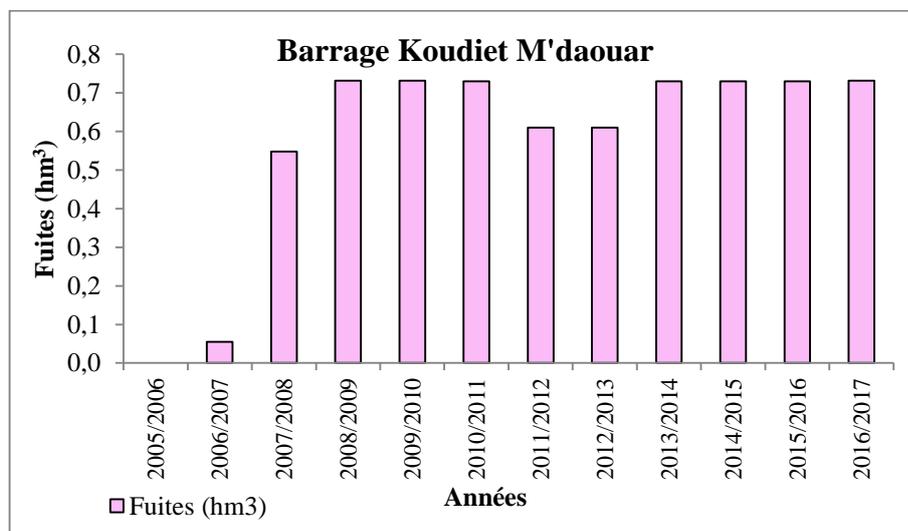


Fig. 125 : Les Fuites du barrage Koudiet M'daouar.

d. Destination des eaux des barrages

Les volumes d'eau prélevés au niveau des barrages sont destinés à diverses fins : irrigation ou alimentation en eau des populations .Ils ont toujours fait objet d'un suivi très rigoureux par l'Agence Nationale des Barrages et des Transferts (ANBT), compte tenu des conditions locales. L'estimation de ces volumes repose sur la mesure de deux grandeurs : le débit de pompage et sa durée.

En pratique, cette opération détient une comptabilité quotidienne en faisant noter, par un agent d'exploitation résidant sur le site la lecture sur le limnimètre qui permet de calculer le débit ainsi que les heures de début et de fin du prélèvement.

Sur les trois barrages les destinations des eaux diffèrent. Pour le barrage des Fontaines des Gazelles, son territoire étant moins peuplé, il assure l'alimentation en eau d'irrigation du périmètre d'El Outaya. En revanche, pour les deux barrages *Zit Emba* et *Koudiet M'daouar* la destination de leurs eaux est polyvalente. Ils soutiennent en eau potable trois grandes villes (les communes de Skikda, Benazzouz et Azzaba pour Zit Emba, Batna et Timgad pour Koudiet M'daouar) et l'irrigation de deux grands périmètres de Zit Emba et Chemora

Le barrage *Zit Emba* procure à la ville de Skikda un volume annuel de 8,3 hm³ (2000-2017) et un volume moyen annuel de 5,6 hm³ pour l'irrigation des terrains cultivés situés en aval du barrage (Fig. 126). Les prélèvements les plus importants pour l'irrigation se font de juin (0,9 hm³) à septembre (0,8 hm³), période durant laquelle les déficits hydriques des sols sont manifestes.

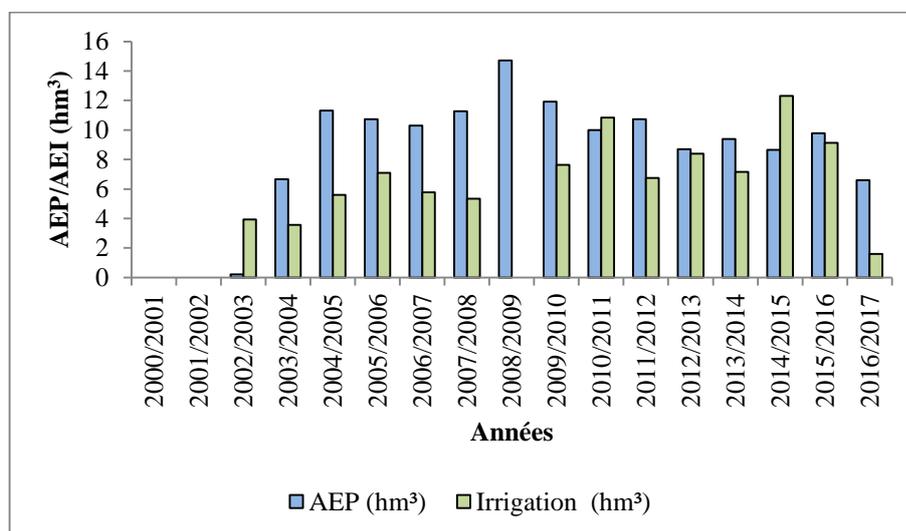


Fig. 126 : Destination des eaux du barrage Zit Emba.

Au barrage *Koudiet M'daouar*, les eaux sont destinées principalement pour l'alimentation en eau potable. Ils représentent une moyenne de 13,7 hm³/ an. Les conduites destinées pour alimenter le secteur 1 et 4 du périmètre de Chemora situé en aval du barrage ou encore celui de Touffana situé en Amont sont inachevés. Les volumes annuels pour l'irrigation illustrés dans la figure 127 sont assurés par les vidanges de fond du barrage effectués pour augmenter les apports dans le cours d'eau de Oued Chemora à la demande des agriculteurs. Ils correspondent aux années marquées par de faibles pluies. Ces volumes sont énormes et constituent des pertes importantes dans la capacité du barrage. Elles représentent annuellement une moyenne de 3,6 hm³ (2005-2017). En année hydrologique moyenne 2013/2014, les vidanges de fond pour l'irrigation ont atteint une valeur maximale de 9,5 hm³/an. Entre 2007 à 2010, Ils sont de plus de 8 hm³/an. Le reste des années, ils sont inférieurs voire nuls à partir de 2014 en raison du retour des pluies.

Les secteurs 2 et 3 qui restent du périmètre Chemora s'alimentent à partir de deux piquages (1,2 et 3,9 m³/s) sur la conduite de transfert des barrages Oued Athmania- Koudiet M'daouar.

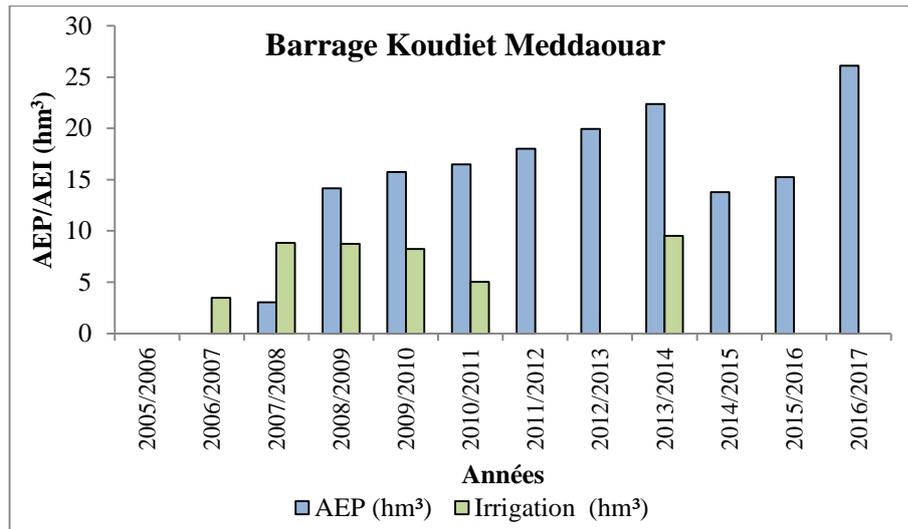


Fig. 127 : Destination des eaux du barrage Koudiet M'daouar.

Les eaux du barrage Fontaines des Gazelles sont destinées essentiellement à l'irrigation du périmètre d'El Outaya. Entre 2000 et 2004, les eaux du barrage étaient inexploitable. Ce n'est qu'à partir de septembre 2004 que le barrage a été mis en exploitation (Fig. 128). Les volumes d'eau prélevés diffèrent d'une année à l'autre. L'année 2009/2010, fut celle où le volume prélevé pour l'irrigation a atteint une valeur maximale de près de 14 hm³.

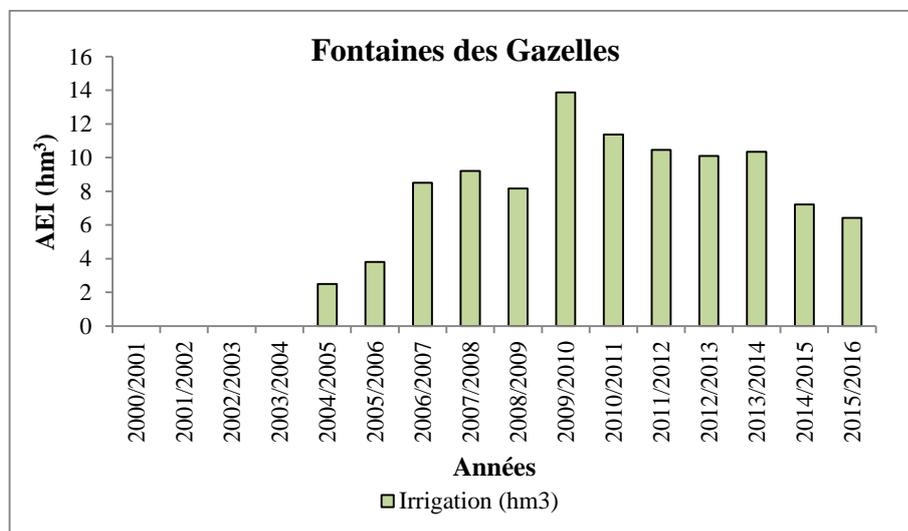


Fig. 128 : Destination des eaux du barrage Fontaines des Gazelles.

5.6. L'envasement des barrages

La construction d'un barrage génère des transformations du milieu naturel environnant, de façon directe ou indirecte, sur les plans environnementaux, sociaux ou économiques. La propagation et l'amplitude des impacts dépendent de plusieurs facteurs physiques, biologiques liés

aux caractéristiques de l'ouvrage. Le système d'écoulement des eaux dans les cours d'eau est touché en amont et en aval de la retenue, et les impacts s'étendent de façon graduelle dans le temps et dans l'espace.

En amont de la retenue, l'eau de ruissellement s'écoule et entraîne avec elle, des matériaux solides. Ces derniers sont l'impact le plus invisible de l'érosion hydrique. La montée des eaux recouvre les rives des cours d'eau et charrie en s'écoulant les terres fertiles qui vont se déposer dans les retenues des barrages. Ces dépôts réguliers mènent à travers le temps à leur envasement et par conséquent à la diminution de leur durée de vie.

Afin de déterminer réellement les volumes et les taux d'envasement des barrages, les mesures bathymétriques sont indispensables. Il s'agit de mesures fines qui nécessitent un matériel spécifique. Elles sont réalisées par le couplage d'un sondeur hydrographique et d'un GPS différentiel à bord d'un bateau. Grâce à une interface SIG (Système d'Information Géographique), Les données provenant des deux appareils sont relevées et spatialisées en temps réel. Les résultats conduisent à l'estimation de la vase retenue derrière les digues avec précision.

À partir des années 2000, l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) a lancé plusieurs campagnes de mesures bathymétriques. Ces mesures ont été réalisées par le Laboratoire d'Études Maritimes (LEM) afin de quantifier les volumes de vases annuelles déposées dans les cuvettes de ces ouvrages et par conséquent avoir une vision future sur leur durée d'existence. Ces données s'illustrent sous la forme d'une carte où des courbes de niveau relient les points de même profondeur (courbes de niveaux bathymétriques ou courbes isobathes).

Les premières campagnes de mesures bathymétriques organisées ont eu lieu en mars 2004 pour les deux barrages de *Zit Emba* et *Fontaines des Gazelles* et en mai 2005 pour le barrage *Koudiet M'daouar*. La lecture de la courbe surface, capacité et hauteur propre à chaque barrage fait ressortir les résultats représentés dans le tableau 56.

Tableau 56 : Envasement des barrages d'après les levés bathymétriques.

Barrage	Superficie au barrage (Km ²)	Volume initial (hm ³)	Volume dernier levé bathymétrique (hm ³)	Volume de la vase (hm ³)	Perte en capacité (%)	Perte annuelle en hm ³ (1)	Tonnage moyen annuel de sédiments (2)	Dégradation spécifique (tonnes/km ² /an)	Taux de comblement (3)
Zit Emba	485	117,39	116,59	0,80	0,68	0,27	320000	659,8	0,002
Koudiet M'daouar	578	62	61,32	0,68	1,10	0,27	326400	588,2	0,003
Les Fontaines des Gazelles	1660	55,5	54,74	0,76	1,37	0,22	260571	150,6	0,003

(1) : Envasement tel qu'estimé par l'ANBT en 2004, A noter que l'apport solide total entre deux mesures bathymétriques est calculé en ajoutant au

(2) Le volume de vase retenu dans le barrage et multiplié par sa densité sèche égale à 1,2 tonnes/m³.

(3) le taux de comblement annuel ou vitesse de comblement (B.Remini, 2002). Il s'exprime en % de capacité par année (%/an). Il est égal à :

$$\eta = \left(\frac{w_v}{w_0}\right)/T$$

Avec :

w_v : Volume de vase (millions de m³).

w_0 : Volume initial du barrage (millions de m³).

T : Durée d'exploitation du barrage (an).

Quand :

- $\eta > 1$: Barrage fortement menacé par l'envasement.
- $0,5 > \eta > 1$: Barrage moyennement menacé par l'envasement.
- $\eta < 0,5$: Barrage faiblement menacé par l'envasement.

(4) La durée de vie des barrages est le rapport entre la capacité initiale du barrage et l'envasement annuel dans le barrage.

En 2004, la superficie du barrage *Zit Emba* à la cote de la retenue normale (RN=86 m) est de l'ordre de 825 hectares (Figure 129) et celle à la cote des plus hautes eaux (PHE= 91 m) est de 1000 hectares. La capacité de stockage à la cote normale est passée de 117,3 hm³ à 116,6 hm³. Le volume entre la capacité initiale et celle du levé bathymétrique représente le volume de la vase. En trois années, le barrage a perdu un volume de 0,8 hm³ de sa capacité soit 0,7%. Le taux annuel de vase correspondant est de 0,32 x 10⁶ tonnes.

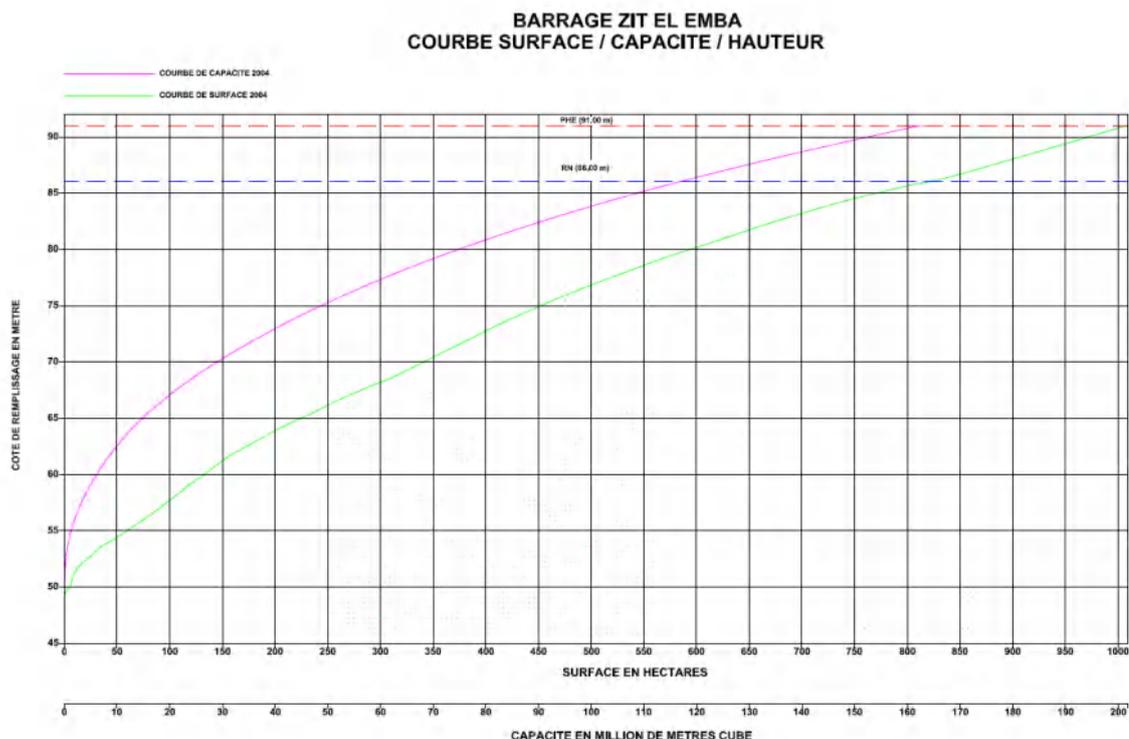


Fig. 129 : Courbe surface/capacité/hauteur du barrage Zit Emba.

L'envasement de la retenue du barrage *Koudiet M'daouar* réalisé en mai 2005 a réduit sa capacité utile de 62 à 61,32 hm³ soit un volume d'envasement de 0,68 hm³ (1,1 %). A la cote de la retenue normale de 992,5 mètres la superficie du barrage est de 700 hectares et celle à la cote des hautes eaux (PHE=996,65 m) est de 930 hectares. En trois ans et demi, le barrage a stocké annuellement 0,33 x 10⁶ tonnes de sédiments.

Le barrage des *Fontaines des Gazelles* (Figure 130) a perdu un volume de 0,76 hm³, soit en 1,4 % de sa capacité utile. Le volume de sédiments piégés durant 3 années et demi est de 0,91 x 10⁶ tonnes, ce qui correspond à un tonnage annuel de 0,26 x 10⁶ tonnes.

Il faut noter que les pertes dans la capacité des barrages par les volumes de vases sont annuellement presque similaires dans les trois barrages. Etant nouvellement construits, et à des dates presque proches des dates des levés bathymétriques, cela ne signifie pas obligatoirement que les trois barrages suivent le même rythme de sédimentation. En effet, les prochaines mesures bathymétriques permettant de montrer probablement des différences.

Le taux de comblement η inférieur à 0,5, les qualifie à des barrages faiblement menacés par l'envasement. Un bon nombre de travaux ont montré que le taux d'envasement est compris entre 43 et 84%, ce qui révèle que la majorité des retenues de barrages algériennes ont une durée de vie d'une trentaine d'années.

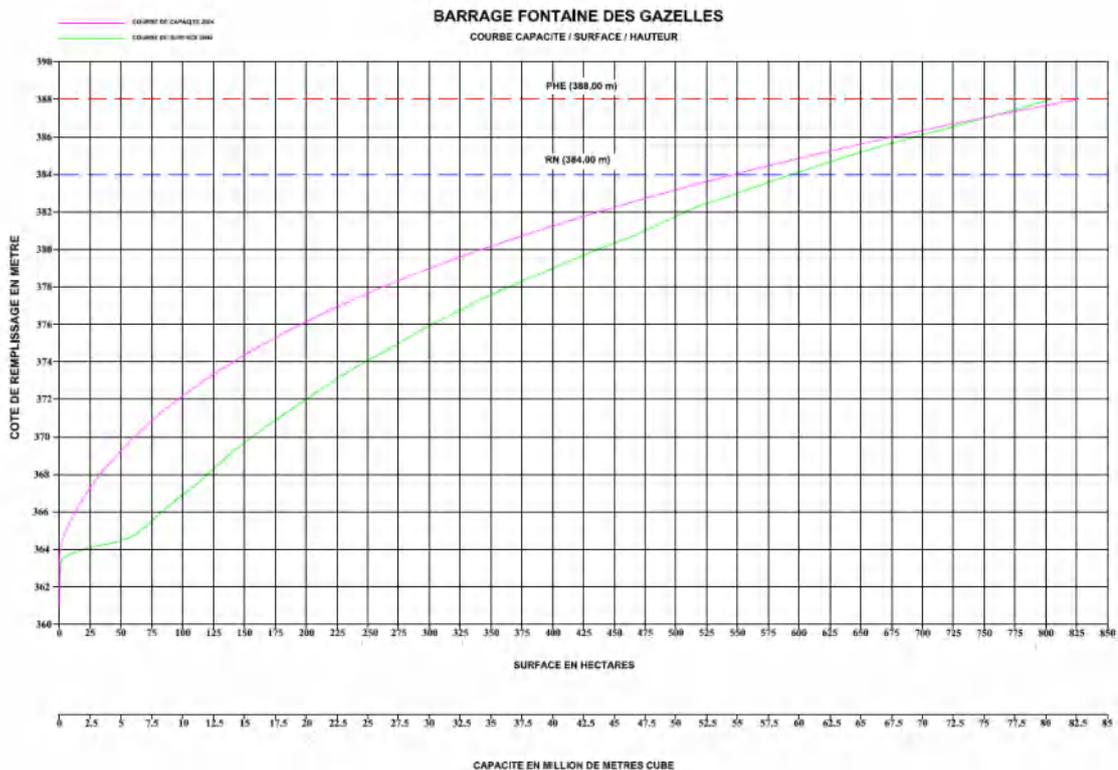


Fig. 130 : Courbe surface/capacité/hauteur du barrage Fontaine des Gazelles.

5.7. Conclusion

La ressource en eau à l'Est Algérien est plus ou moins disponible en relation avec les cumuls précipités. Son stockage à travers les ouvrages hydrauliques a constitué une réserve d'eau qui a pu satisfaire les besoins en irrigation, des populations, des industries et même touristiques, le cas du barrage de *Zit Emba* alimentant la ville touristique de Skikda. En amont de cette étude, il reste à décrire les taux de satisfaction. Ces derniers doivent être évalués avec soin, sachant que les paramètres utilisés ne sont pas toujours aisés à obtenir.

Les ressources en eau souterraine dans les trois bassins sont surtout destinées à l'alimentation en eau potable à une échelle locale (agglomérations de proximité). Elles sont estimées d'après le PNE (2010) à une moyenne annuelle de 14 hm³ pour le bassin *Kebir Hammam*, 6 hm³ à *Reboa* et 19,5 hm³ Elles à *Oued El Hai*. sont loin d'être bien connues et quantifiées. Leur exploitation intensive durant de longues durées a généré un stress hydrique permanent d'où la nécessité au recours de la mobilisation de la ressource en eau superficielle.

Depuis les années 2000, la région Est a bénéficié d'un bon nombre de barrages (13 barrages) équivalent de deux barrages construits toutes les deux années. Leur construction a sollicité des efforts notables d'ordre surtout financiers par l'état Algérien. Cette mobilisation est perceptible à travers l'étude d'exemple des trois barrages. Leur création a comblé largement les déficits sur une échelle plus large (régionale). Ces ouvrages ne sont pas forcément édifiés pour résoudre le problème de l'alimentation en eau pour l'irrigation (secteur demandeur d'eau), mais, progressivement, ces aménagement ont vu leur vocation évoluer de l'irrigation vers l'alimentation en potable. Ils ont pu satisfaire les besoins en eau des régions aux déficits annuels marqués à travers la réalisation de longs transferts d'un bassin versant excédentaire tels que le bassin *Kebir Rhumel* à travers le barrage de Beni Haroun vers le barrage *Koudiet M'daouar* au bassin *Reboa*, bassin pauvre en ressources suffisantes, ou encore, l'interconnexion réalisée entre le bassin *Kebir Hammam* (barrage de *Zit Emba*) et la bassin de (des *Zardezas*) pour satisfaire l'alimentation en eau de la ville de Skikda. Seulement, ils restent vulnérables à plusieurs niveaux. Pour concevoir et gérer convenablement ces réserves, Il faut prendre également en considération les diverses pertes importantes d'eau par évaporations, infiltrations et les pertes de capacité à la suite des dépôts solides.

L'objet des levés réalisés aux niveaux des barrages est d'actualiser la capacité de stockage de ces retenues et de contrôler l'envasement des barrages. Les levés bathymétriques effectués au niveau des barrages ont montrés des taux d'envasement presque semblable : $0,32 \times 10^6$ tonnes (barrage *Zit Emba*), $0,33 \times 10^6$ tonnes (barrage *Koudiet M'daouar*) et (barrage *Zit Emba*).

Chapitre
**MODELISATION STATISTIQUE ET
QUANTIFICATION DES
TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION**

6

6.1. Introduction

Ce chapitre analyse la *problématique* de cette recherche. Trois objectifs spécifiques sont poursuivis :

- Le premier vise à modéliser les débits liquides et solides dans le temps et dans l'espace. Des courbes qui définissent des relations entre les deux paramètres en mode prévisionnel si les coefficients de corrélations entre les deux paramètres s'avèrent positifs et relativement forts. Les modèles améliorés et validés (par des facteurs correctifs) pour se rapprocher davantage de la réalité donneront une vision globale de la circulation des flux sédimentaires dans les bassins.

- Le deuxième concerne la quantification des flux sédimentaires par les modèles retenues. Les modèles des cours d'eau une fois validés serviront à combler les lacunes des séries de données non mesurées. Pour une finale validation des modèles, celles-ci conduisent à leur comparaison avec les mesures bathymétriques effectuées au niveau de chaque barrage. De la sorte, seules les particules fines en suspension nous intéressent. Ce sont les éléments qui causent le plus de problèmes puisqu'elles circulent avec le courant entraînant des dépôts sur le lit des cours d'eau ou à la sédimentation des barrages.

- Enfin et afin d'affiner notre travail, la relation fondamentale entre la concentration des sédiments en suspension C , d'un cours d'eau et son débit liquide Q_l , durant les crues est étudiée de manière qualitative en s'appuyant sur une analyse des graphiques temporels et des courbes d'hystérésis (C-Q).

6.2. Le réseau de mesures et qualité des données

En amont de toute étude, il est important de définir les données qui ont servi d'entrées aux modèles. Autant, il convient de préciser les périodes, les variables qu'on souhaite reproduire, ainsi que les outils qui nous ont permis d'évaluer et de comparer la qualité des modélisations. Deux types de données sont exploités dans ce chapitre, celles mesurées aux stations hydrométriques et celles de la bathymétrie.

6.2.1. Les mesures aux stations hydrométriques

En Algérie, le programme de suivi du transport solide a débuté vers les années soixante-dix. Il est assuré par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Ces mesures effectuées dans les cours d'eau avaient pour but d'estimer la concentration de matière solide en suspension ainsi que son débit solide et liquide correspondant. La mesure de la concentration exprimée en (g/l), est réalisée au moyen d'un échantillonnage d'eau prélevé sur les bords des cours d'eau au moyen d'un conteneur de 50 cl et estimé après filtrage et séchage de l'échantillon à l'étuve à 105°C. Concernant les débits liquides (Q_l), ils sont déduits suite à une transformation de lectures de hauteur faites sur une échelle limnométrique au moyen de courbes d'étalonnage établies par la même agence.

Bien que ces mesures soient souvent lacunaires pour la majorité des bassins versant algériens et réalisées par des moyens rudimentaires, elles restent le seul support pour leur étude. Les concentrations mesurées ainsi que les débits leur correspondant sont utilisés pour l'estimation des charges solides. Actuellement, ils représentent les éléments indispensables de contrôle de l'efficacité des ouvrages de stockage, et la base de la législation concernant la protection des eaux et de l'environnement.

Les données exploitées dans les trois bassins étudiés sont de deux types : (1) un couple de concentrations et débits solides journaliers pour les deux bassins Kebir Hammam et Oued El Hai ; (2) un couple de mesures instantanées au bassin Reboa. Ces données ont servi à ajuster les paramètres des modèles, afin qu'ils reproduisent au mieux les apports ou débits solides mesurés. A l'exception de la station d'El Kantara qui présente des séries de données complètes, allant de 1970 à 1992 (Fig. 134, tableau 58), les données des stations contrôlant les bassins Kebir Hammam et Reboa restent incomplètes et présentent plusieurs années manquantes. Les données à la station de Ain Charchar, située en aval du barrage Zit Emba vont de 1970/1971 à 1999/2000 avec une lacune signifiante de 13 années (1981/1982 à 1994-1995). Pour mener convenablement l'estimation de la charge solide, nous avons utilisé les données enregistrées pour la période 1970 à 1980, jugées plus complète et sans lacunes (Fig. 131). En conséquence, sur l'ensemble de couple des valeurs de débit solides et concentrations, nous avons retenu 1635 valeurs.

Pour le bassin de Reboa, les données exploitées dépendent des deux stations hydrométriques Reboa et Timgad (Fig. 132 et 133 et Tableau 57). Ces dernières sont situées en amont du barrage Koudiet M'daouar. Ces stations offrent seize années d'enregistrements. Les plus anciennes remontent à 1985 et vont jusqu'en 2006, avec toutefois des périodes lacunaires pouvant aller jusqu'à 7 années. La période commune retenue pour les deux stations va de 1985 à 1996. Environ 589 valeurs enregistrées et retenues à la station et 400 à la station de Timgad.

L'analyse des données dans les 4 stations a montré qu'il n'existe aucune règle générale pour la fréquence d'échantillonnage. Dans le cas de nos bassins, en moyenne elle est d'une fois tous les deux jours, lorsque l'écoulement est caractérisé par des concentrations relativement faibles ou ne variant que très lentement. Exceptionnellement, le nombre de campagnes de mesures du transport solide en suspension augmente lors des grandes crues, l'intervalle varie de quelques minutes à quelques demi-heures.

Tableau 57 : Périodes d'observations et sélectionnées pour l'étude

<i>Bassin</i>	<i>Nom de la Station</i>	<i>Code ANRH</i>	<i>Période d'observation</i>	<i>Période sélectionnée</i>
<i>Kebir Hammam</i>	Ain Charchar	031101	1970/1999	1970/1980
<i>Reboa</i>	Reboa	070403	1985/1996	1985/1996
	Timgad	070401	1985/1996	1985/1996
<i>Oued El Hai</i>	El Kantara	061201	1970/1992	1970/1992

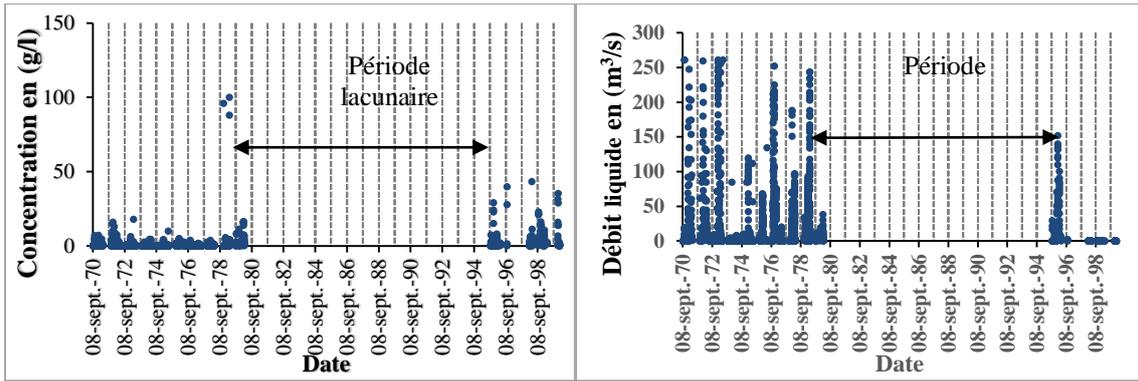


Fig. 131 : Distribution dans l'année des mesures de concentrations et des débits liquides à la station de Ain Charchar (Bassin Kebir Hammam) (1970-2000).

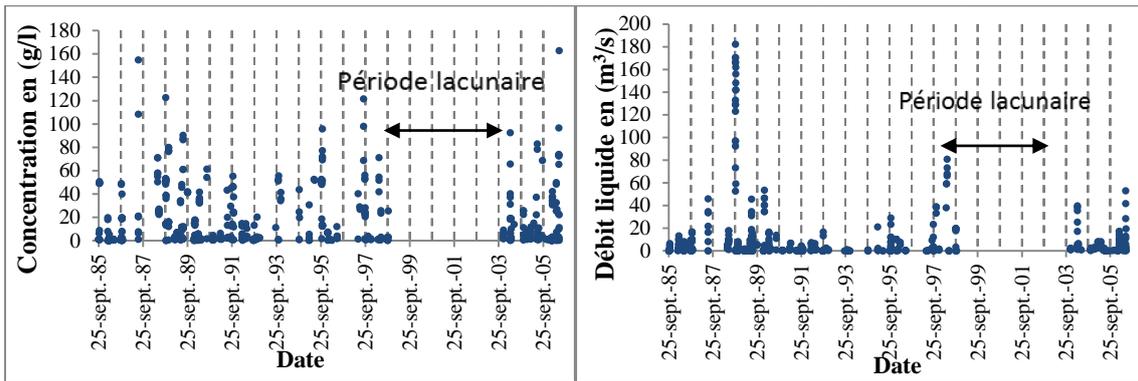


Fig. 132 : Distribution dans l'année des mesures de concentrations et des débits liquides à la station de Reboa (Bassin Reboa) (1985-2006).

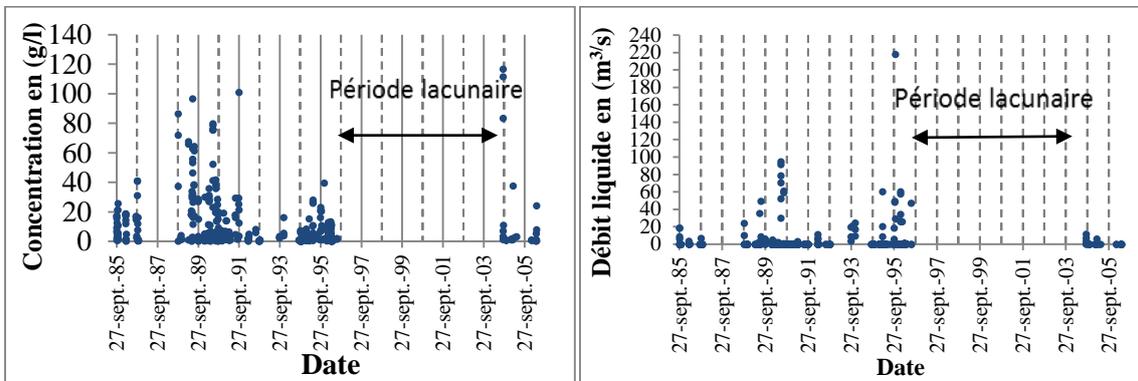


Fig. 133 : Distribution dans l'année des mesures de concentrations et des débits liquides à la station de Timgad (Bassin Reboa) (1985-2006).

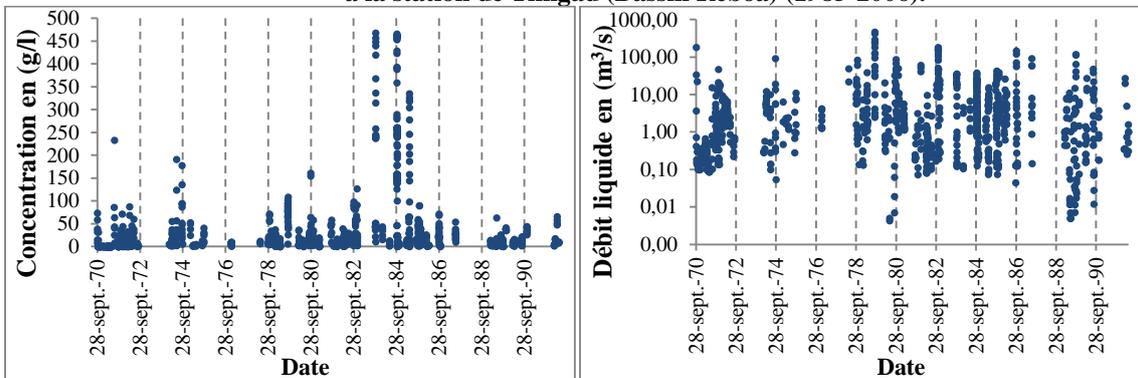


Fig. 134 : Distribution dans l'année des mesures de concentrations et des débits liquides à la station d'El Kantara (Bassin Oued El Hai) (1970-1992).

6.2.2. Les mesures bathymétriques

Les mesures bathymétriques constituent des mesures complémentaires aux mesures opérationnelles des transports solides effectuées au niveau des stations hydrométriques. Nonobstant la divergence des méthodes de mesures, l'association des mesures bathymétriques réalisées au niveau des barrages et celle des valeurs mesurées et modélisées au niveau des stations hydrométriques permettent d'analyser les incertitudes concernant les valeurs générées par les modèles et d'estimer les erreurs avec précision, entre les valeurs mesurées aux stations et celles perçues aux niveaux des trois barrages.

6.3. Méthodologie de travail

6.3.1 Les apports solides mesurés

L'estimation des débits et des apports solides en suspension au travers d'une section d'un cours d'eau nécessite la connaissance de deux grandeurs : la concentration et le débit liquide correspondant.

Communément, le long d'une section d'un cours d'eau, la concentration connaît une variabilité spatiale et temporelle. Elle varie du fond du cours d'eau vers la surface et d'un instant à l'autre. La principale difficulté de mesure des concentrations réside donc dans le prélèvement d'un échantillon qui représente fidèlement l'écoulement ; d'où le caractère approché de cette méthode (Bouanani, 2004).

L'estimation des apports solides en suspension totaux, exportés par les cours d'eau est basée sur le concept, qui suppose que les sédiments sont uniformément distribués dans la section du cours d'eau. Ainsi, le calcul le plus simple implique de multiplier la concentration moyenne pour un pas de temps choisi par le débit moyen de la même période considérée. L'équation de calcul s'exprime aisément (eq.43) :

$$Q_s = Q_l \cdot C \quad (43)$$

Où :

Q_s : Débit solide en suspension (kg/s) ; Q_l : Débit liquide (m³/s); C : Concentration (g/l).

Les apports solides en tonnes ou en millions de tonnes, A_s (10⁶t ou MT) et les dégradations solides spécifiques en tonnes par kilomètre carré par an (eq.44 et 45), D_{ss} (t/km²/an) sont données par les équations suivantes :

$$A_s = Q_s \cdot T \cdot 10^9 \quad (44)$$

$$D_{ss} = \frac{A_s \cdot 10^6}{A} \quad (45)$$

Où :

A_s : Apport solide annuel, mensuel ou saisonnier (MT); Q_s : Débit solide annuel, mensuel ou saisonnier (Kg/s); T : Temps en secondes (s); D_{ss} : Dégradation solide spécifique (t/km²/an); A : Superficie du bassin versant (km²).

6.3.2. La courbe d'évaluation des sédiments « la courbe rating curve »

Le recours à la modélisation mathématique des transports solides en suspension devient de plus en plus incontournable eu égard aux avantages qu'elle procure pour la rapidité des calculs. Elle est définie par la construction d'un ensemble de processus d'ajustement des variables d'entrée et des paramètres du modèle, dans l'objectif de reproduire certains aspects de la réalité, en comparant les variables de sortie à des données observées et de prédire les modifications du phénomène par la modification des variables de départ.

Actuellement, le suivi des transports des sédiments en suspension, constitue un centre d'intérêt vers lequel convergent les modélisations mathématiques ou physiques et prédiction. Elle se présente sous un modèle numérique qui se prête au calcul par ordinateur dont le comportement morphologique du lit d'un cours d'eau peut être facilement simulé.

Dans le temps, de nombreux modèles ont été développés. Ils ont tous pour objectif de fournir des modèles opérationnels qui permettent de quantifier et de déterminer de façon plus ou moins satisfaisante, les processus hydrodynamiques des écoulements ainsi que les propriétés des sédiments.

La courbe d'évaluation des sédiments « Rating curve » ou « Courbe en puissance » est définie comme étant la relation entre la concentration des matières en suspension (C) appelée aussi charge sédimentaire (Q_s) et débit du cours d'eau (Q_l). Ces deux paramètres évoluent en général suivant un modèle de puissance (J. Campenhout and al, 2013 ; Etchanchu et al, 1986 ; Walling et al, 1981 ; Wood, 1977 ; Benkhaled, 2003) (eq.46). La relation prend généralement la forme classique suivante :

$$C = a Q_l^b \quad \text{eq.1} \quad (46)$$

Une relation empirique, communément appelée courbe du transport solide (Campbell et al, 1940 ; Crawford, 1991 ; in Benkhaled, 2003). Elle lie le débit liquide au débit solide (eq.47) :

$$Q_s = a Q_l^b \quad \text{eq.2} \quad (47)$$

Où :

Q_s : est le débit solide en suspension (kg/s) ; Q_l est le débit liquide (m^3/s) ; a et b représentent des coefficients empiriques de la régression du bassin considéré.

Les paramètres a et b sont déterminés par la régression selon la méthode des moindres carrés et sa re-transformation logarithmique selon l'équation suivante (eq.48) :

$$\text{Log } Q_s = \text{Log } a + b \text{ log } Q \quad \text{eq.3} \quad (48)$$

Bien que le modèle soit purement statistique, une analyse globale a soutenu que « a » et « b » sont liés aux caractéristiques physiques du bassin. Le paramètre « a » pourrait traduire la sensibilité à l'érosion du bassin versant (Asselman, 2000). Habituellement, ses valeurs élevées se produisent dans des zones caractérisées par matériaux érodés et transportés (G. Yang et al, 2007). Le paramètre d'évaluation « b » pourrait être lié à la capacité d'érosion du cours d'eau, ainsi qu'à l'augmentation de la disponibilité en sédiment en fonction du débit (V. Mano, 2009). De nombreux chercheurs ont tenté d'identifier surtout la valeur de l'exposant « b ». Pour les rivières situées l'Ouest des Etats Unis d'Amérique, Leopold et al. (1953) proposent dans leurs travaux des valeurs variant entre 2 et 3. Walling et Webb (1981,1982), Meybeck (1984) et Probst et Bazerabachi (1986) les limitent entre 1 et 2, en fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants, ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau (A. Bouanani et al, 2013).

Les relations (41) et (42) sont également utilisées en projection pour estimer les concentrations et les débits solides à partir des seules mesures de débits liquides à des intervalles de temps, sans échantillons (Asselman; 2000). Elles ont été testées sur beaucoup de bassins versants mondiaux : (Walling et Webb , 1981) ; (Ferguson, 1987); (Katlan et al, 1987); (Probst et al, 1992); (Ludwig et Probst, 1998); (Walling et Fang, 2003); (Hudson, 2003) et algériens : (Demmak, 1982) ; (Terfous et al, 2001); (Benkhaled, 2003); (Bouanani et al, 2004); (Achite et al, 2005 et 2007) ; (Megueni et al, 2008) ; (Touaibia et al, 2011); (Bouchelkia et al, 2011), dont la Medjerda M. Bourouba, (1998), le Chéllif (H. Bouchelkia,) etc. Elles ont donné des résultats satisfaisants notamment en ce qui concerne la relation débit solide/débit liquide.

6.3.3. Construction et choix des modèles

En générale, pour savoir s'il existe une relation entre deux caractères à savoir les concentrations-débits liquides ou encore débits liquides-Débits solides, on établit un diagramme de corrélation, c'est à dire un diagramme croisant les modalités des débits liquides (Q_{li}) et des Concentrations (C_i) ou bien encore des débits liquides Q_{li} et des débits solides Q_{si} . Chaque élément i est représenté par le point de coordonnées (Q_{li}, C_i). L'ensemble des points forme un nuage de points dont la forme permet de caractériser l'intensité et le sens de la relation :

L'intensité de la relation est forte si les unités ayant des valeurs des deux paramètres sont voisines et le nuage de point prend une forme d'une ligne ou d'une courbe dont les points s'écartent peu. Inversement, la relation est considérée faible si les unités ayant des valeurs voisines sur Q_{li} peuvent avoir des valeurs éloignées sur C_i ou Q_{si} et le nuage de point n'a pas la forme d'une ligne ou d'une courbe, ou seulement de façon très grossière.

Le sens de la relation est défini par une corrélation positive ou négative. Quand Les deux caractères étudiés varient dans le même sens, c'est à dire les valeurs de Q_l augmentent avec les valeurs de C ou Q_s , on parle d'une relation positive. D'autre part, elle est qualifiée de négative quand Q_l et C ou Q_s varient dans le sens contraire.

Afin d'identifier les conditions hydro-sédimentaires les plus pertinentes permettant d'obtenir les meilleurs modèles en puissance, les modélisations ont été subdivisées en quatre grandes échelles temporelles :

- Journalières ou instantanées ;
- Période des hautes eaux et basses eaux (déterminées par le coefficient mensuel des débits CMD) ;
- Saisonnière : Automne (septembre à novembre), Hiver (décembre à février), Printemps (mars à mai), Eté (juin à juillet) ;
- Mensuelle (par mois, certains mois tels que le mois de Juillet et Aout ont été regroupés, le nombre de valeurs n'étant pas représentatif, ce qui apporte un préjudice à la détermination d'un modèle adéquat).

6.3.4. Correction des modèles

L'emploi du modèle en puissance engendre le plus souvent un biais inhérent dû à la transformation de l'échelle logarithmique à l'échelle arithmétique (D.E. Walling et al, 1988), ce qui sous-estime les apports solides. Cette sous-estimation peut varier de 10% à 50% (Asselman, 2000) ; (Jansson, 1985) ; (Fergusson, 1986,1987).

Pour ramener la modélisation au fait idéal, ce biais peut être éliminé en appliquant un simple facteur de correction basé sur la norme erreur de l'estimation de la régression logarithmique. De nombreuses corrections sont suggérées, la plupart d'entre elles sont très pertinentes mais difficiles à réaliser. Dans ce travail, nous allons tester deux facteurs correctifs des plus utilisés, le premier de Jansson (eq.49) et Fergusson CF1 et le deuxième de Duan CF2 (eq.50 et 51).

La correction de Ferguson (1984, 1986a, 1987) a mis en évidence le biais de sous-estimation. Il a suggéré que ce biais représente un facteur majeur, cause de l'erreur associée aux estimations de la courbe d'évaluation, et qu'il peut être largement éliminé par un simple calcul statistique d'un facteur de correction adapté à la transformation au logarithme décimal (D.E. Walling et al, 1988) ; (Janson, 1985, 1996), tiré d'après le coefficient de correction de Miller (1994) pour le logarithme naturel. Il est dérivé de :

$$CF1 = 10^{1,1513\delta^2} \quad (49)$$

δ correspond à l'écart type de l'estimation des concentrations entre les concentrations mesurées, C_i et les concentrations estimées, C_i'

Duan (1983) propose un autre facteur de correction qui ne dépend d'aucune supposition sur la distribution d'erreur. Ce facteur est calculé comme suit :

$$CF2 = \frac{1}{N} \sum 10^{e_i} \quad (50)$$

$$e_i = \log (C_i) - \log (C_i') \quad (51)$$

Où :

$\log(C_i)$: est le log de l'observation de la concentration i ; $\log(C_i')$: est la valeur de log estimée de la concentration pour la même observation dérivée de la régression utilisant la valeur appropriée de décharge ; N : est le nombre d'observations.

Ces deux facteurs de correction rapprochent les points dispersés sur la ligne du meilleur ajustement. Ils diminuent les erreurs de l'estimation et augmentent les valeurs des coefficients de corrélation. En outre, ces deux facteurs seront les mêmes si les valeurs sont normalement distribuées sur la meilleure ligne ajustement. Dans chaque cas, l'apport solide réel est obtenu en multipliant l'estimation initiale des apports solides de la courbe d'évaluation par le facteur de correction.

$$Q_S = a * Q_l^b * CF \quad (52)$$

Ferguson avait testé l'application du coefficient CF1 (D.E. Walling et Webb, 1988), il trouva une amélioration de la sous-estimation de moins 10%. Une même valeur de sous-estimation est rapportée par Hansen et Bray en 1987 suite à l'emploi du coefficient de correction CF2 (Walling et Webb, 1988).

6.3.5. Critères de validation des modèles

La validation d'un modèle cherche à établir un accord entre les valeurs modélisées et les mesures. En effet, le modèle fournissant une représentation abstraite, et simplifiée de la réalité observée, il convient de s'assurer que cette représentation est suffisamment satisfaisante au vu de l'utilisation souhaitée du modèle.

Cependant, dans la pratique, lorsque les données mesurées sont disponibles pour le système modélisé, la validation est souvent associée à la vérification. La comparaison des mesures et des résultats du modèle suggère que les prévisions du modèle soient proches des mesures, alors le modèle de mise en œuvre est supposé être validé par les hypothèses et la représentation valide le système modélisé.

Indépendamment de la précision du modèle, l'étalonnage du modèle doit exprimer (a) le degré de concordance obtenu ; (b) exprimer à quel point la représentation des processus est réaliste, et (c) définir les critères sur la base desquels elle a été jugée adaptée, L'évaluation quantitative de l'erreur de données, de la précision et de l'incertitude dans les modèles définit ensuite les mesures permettant de juger de la performance du modèle,

Ainsi, il est important de détailler les critères qui ont permis de valider et d'évaluer la qualité des modélisations. Ils sont les plus classiques utilisés en hydrologie : le coefficient de corrélation et l'erreur sur le bilan.

6.3.5.1. Le coefficient de corrélation R^2

Le coefficient de corrélation (eq.53) permet de définir l'intensité de la relation entre les deux caractères étudiés (Débits solides et liquides). Il vérifie la qualité de la relation linéaire entre les valeurs des deux variables, ainsi que la qualité de la modélisation. En général, un bon modèle est validé lorsque le coefficient de corrélation est élevé. Seulement, ceci n'est pas toujours valable, l'examen de la linéarité du nuage des points y est pour beaucoup (ajustement des points beaucoup plus près de la droite). On peut concevoir le coefficient de corrélation comme un indice de validation du modèle et de vérification de sa qualité.

Pour calculer le coefficient de corrélation, il faut premièrement pouvoir calculer la covariance entre deux caractères. **Celle-ci** est la moyenne du produit des écarts à la moyenne.

$$Cov(x, y) = \frac{1}{N} \sum_1^N (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y}) \quad (53)$$

X_i : valeurs des débits liquides Q_l instantanés ou journaliers ; Y_i : valeurs des débits solides Q_s instantanés ou journaliers ; \bar{X} : Moyenne arithmétique de la série X_i ; \bar{Y} : Moyenne arithmétique de la série y_i ; N : Taille de la série.

Le coefficient de corrélation linéaire (eq.54) de deux caractères X et Y est égal à la covariance de X et Y divisée par le produit des écarts-types de X et Y.

$$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (54)$$

On peut démontrer que ce coefficient varie entre -1 et +1. Son interprétation est la suivante :

- si r est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre X et Y.
- si r est proche de -1, il existe une forte relation linéaire négative entre X et Y.
- si r est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive entre X et Y.

6.3.5.2 . L'erreur sur le bilan

Le critère communément utilisé en statistiques pour évaluer la qualité de l'estimation est l'erreur quadratique moyenne de l'estimation (MSEP : Mean Squared Error of Prediction) (eq.55). Ce critère, exprimé en pourcentage, est utilisé pour calculer l'écart entre les valeurs modélisées et celles observées, il s'exprime par la formule suivante :

$$E(\%) = \frac{Asmod - Asmes}{Asmes} * 100 \quad (55)$$

Où :

Asmod : Apport solide modélisé en tonnes/Km²/an ; **Asmes**: Apport solide mesuré en tonnes/Km²/an.

Il donne une idée globale sur la dispersion entre les valeurs observées et modélisées, et plus le critère de l'erreur sur le bilan sera faible plus l'écart entre les valeurs sera limité.

Les modèles retenus pour la quantification des flux de sédiments est celui qui minimise l'erreur.

6.4. Variations des concentrations

Le Tableau 58 et l'ensemble des figures 135 synthétisent les valeurs caractéristiques de concentration et débits liquides pour chaque bassin versant par période.

Durant la période 1970-1980, les concentrations à la station de Ain Charchar varient de 0,01 mg/l, valeur minimale enregistrée à 96 mg/l, valeur maximale enregistrée le 29 novembre 1978. La concentration moyenne est de 0,57 mg/l. Au cours des 10 années relevées, les concentrations des matières en suspension ont rarement dépassé les 10 g/l (pour 99 % des valeurs).

Aux deux principaux affluents qui constituent le bassin de Reboa, les concentrations des matières en suspension les plus fréquentes (plus de 66% des valeurs) sont inférieures à 16 mg/l. La concentration moyenne est de 17 mg/l à la station Reboa et 10,7 mg/l à la station de Timgad.

A Oued El Hai, entre 1970 et 1992, près de 74 % des concentrations mesurées sont inférieures à la moyenne (12,6 mg/l). Elles varient de 0,01 mg/l à 366,6 mg/l, valeur maximale enregistrée le 9 octobre 1983.

Les cours d'eau du bassin Reboa et Oued El Hai présentent une dynamique de concentration assez similaire sans doute liée à leur proximité géographique. Ils partagent également les mêmes structures lithologiques et pédologiques qui se différencient nettement du bassin Kebir Hammam.

Tableau 58 : Quelques caractéristiques des concentrations par stations

Nom de la Station	Code ANRH	Nbres de valeurs	Concentration C_{max}				C_{min}	C_{moy}	Ecartype	
			C_{max} (g/l)	Date	H (cm)	Heure				Q_1 (m^3/s)
<i>Ain Charchar</i>	031101	1635	96.00	29 Nov 78	410	18 :00	32.83	0.01	0.57	2.61
<i>Reboa</i>	070403	445	154.92	5 Juillet 87	100	17 :15	34.50	0.15	17.03	23.30
<i>Timgad</i>	070401	394	100.99	24 Sept 91	2	12 :00	0.02	0.16	10.71	16.51
<i>El Kantara</i>	061201	559	336.61	9 Oct 83	50	00 :00	3.92	0.01	12.57	28.71

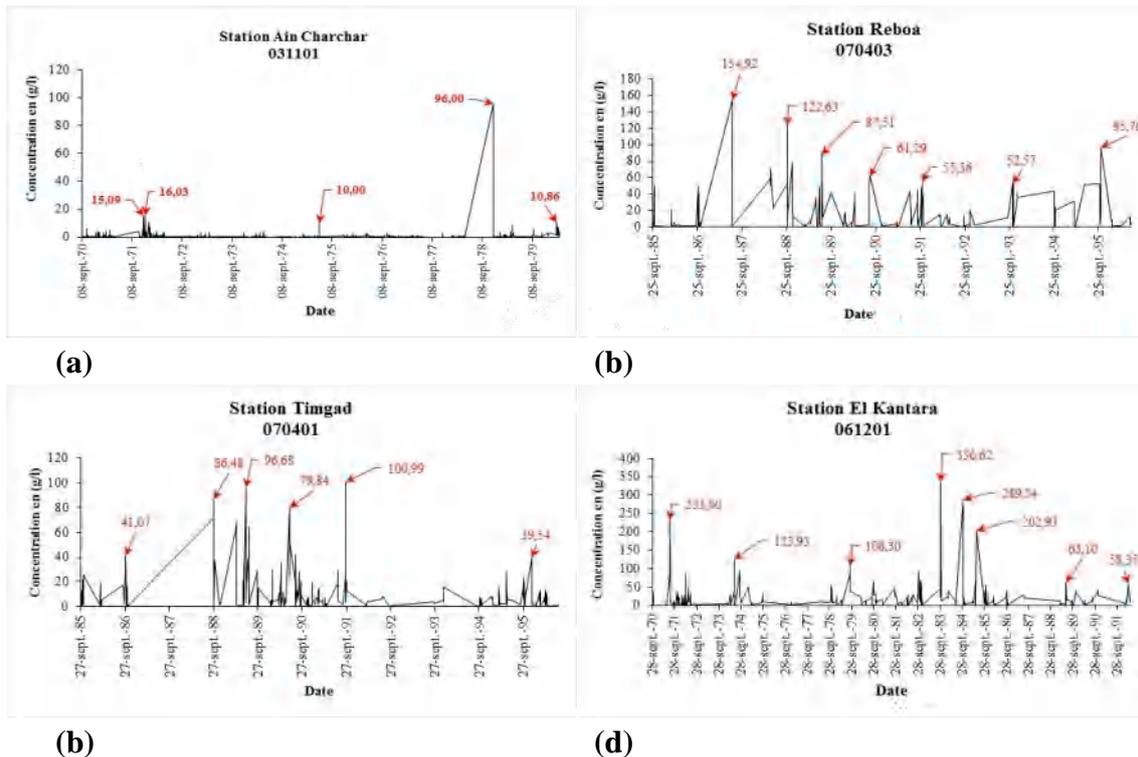


Fig. 135 : Variation des valeurs de concentrations par station (a) Ain Charchar; (b) Reboa; (c) Timgad; (d) El Kantara.

6.5. Modélisations des débits liquides-Concentrations

Au départ, l'objectif de ce travail était de chercher des relations pratiques reliant les concentrations aux débits liquides mesurés au niveau des quatre stations. Les courbes de puissance tracées ont entièrement montré une grande dispersion des points (Annexe 6). Les coefficients de corrélation sont faibles sur toutes les échelles temporelles étudiées. A la station de *Ain Charchar* (Bassin Kebir Hammam), il varie de 0,1 (Saison hivernale) à 0,5 (période des hautes eaux). A la station *Timgad*, 0,03 (hiver) 0,5 (été) ; à *Reboa*, entre 0,1 (basses eaux) et 0,3 (hautes eaux). Enfin, à la station *El Kantara* (bassin Oued El Hai), il est de 0,4 (été) et 0,6 (hiver). Cette dispersion est due, d'une part aux conditions hydro-climatiques qui diffèrent à travers les trois bassins : Kebir Hammam, Reboa et Oued El Hai (les concentrations élevées correspondent à des débits faibles et inversement) et d'autre part aux paramètres purement techniques (l'échantillonnage n'ayant pas été réalisé correctement). Cette méthode reste archaïque et limitée et ne permet pas à une mesure intégrale de la concentration en tout point de la section mouillée. L'échantillonnage s'effectue classiquement en bordure du cours d'eau et à une seule profondeur (O. Elahcene and al, 2009).

Le recours à l'ajustement des débits solides aux débits liquides par contre a montré une grande amélioration de ces relations. Ainsi, l'estimation et la projection du transport solide en suspension à partir de ces relations est justifiée.

6.6. Modélisations des débits liquides-débits solides

6.6.1. Examen des relations en puissance sur une série complète

Les relations dans les figures et le tableau (Fig. 136 et Tableau 59) appliquées à la série complète des données sur une échelle journalière à la station de *Ain Charchar* et *El Kantara* ou encore sur des débits instantanés à la Station *Reboa* et *Timgad*, montrent d'excellentes tendances de la courbe en puissance liant le débit solide en kg/s au débit liquide en m³/s. les coefficients de corrélation dépassent largement les 80% dans les trois bassins. Les points sur les figures des quatre stations sont bien alignés autour des droites de régression.

Les valeurs de l'exposant « *b* » varient peu d'un bassin à l'autre. Il est de 1,25 à la station d'Ain Charchar, autour de 1,13 aux deux stations contrôlant le bassin de Reboa et 1,54 à la station d'El Kantara au bassin d'Oued El hai. Par contre, le paramètre « *a* » varie beaucoup. Il est compris entre 0,19 (Station Ain Charchar) et 5 (Stations Reboa et Timgad).

Ces valeurs sont proches de celles trouvées par : R. Battala et al (1992) sur la rivière Arbucies dans le Nord-Est de la péninsule Ibérique, A. Benkhaled et al (2003) sur Oued Wahrane, A. Bouanani (2004) sur les bassins de Sebdou, Mouilah, Isser et Sikkak; H. Bouchlekia (2010) sur le bassin Chellif ; A. Touaibia (2011) sur Oued K'sob; A. El Mahi (2012) sur le bassin Oued El Hammam; A. Ghenim (2012) sur Oued Sebdou; A. Louameri 2013 sur Oued Bouhamdane F. Hallouz sur Oued Mina Touaibia et A. Tadrict (2016) sur Oued El Hachem

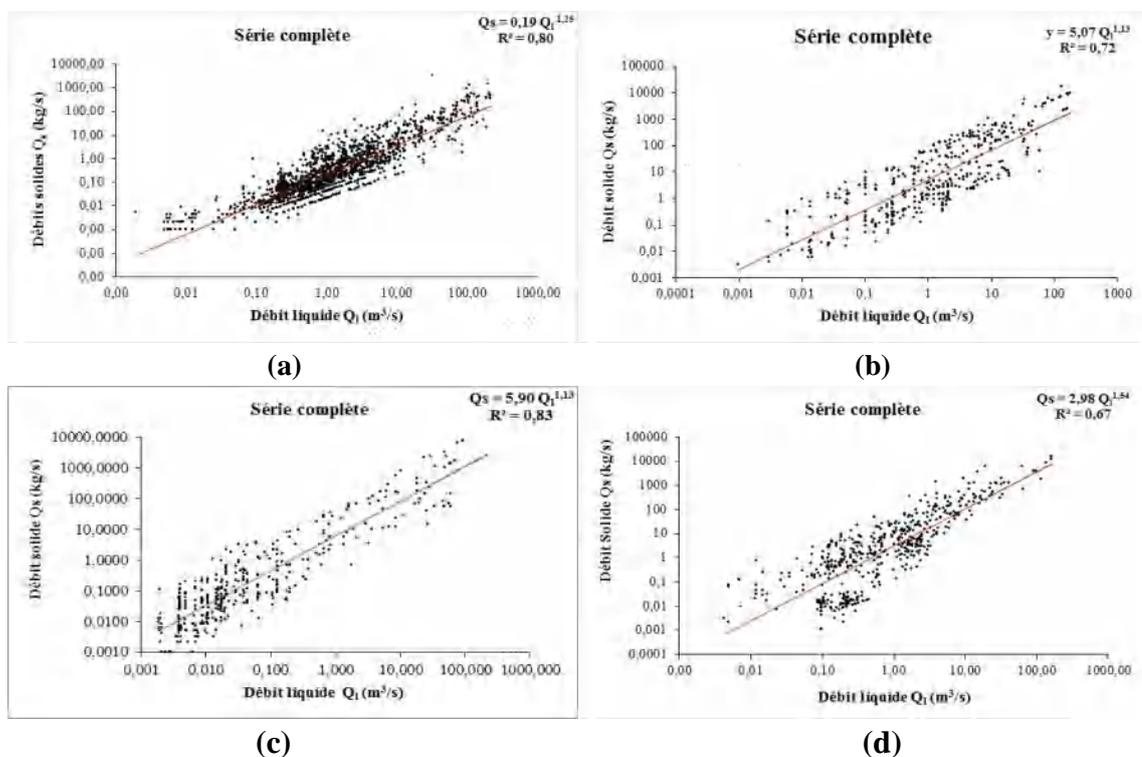


Fig. 136 : Relations entre les débits liquides et les débits solides instantanées
a) Station Ain Charchar; b) Station Reboa; c) Station Timgad; d) Station El Kantara.

Tableau 59 : Les différentes périodes et leurs coefficients de corrélation bassin Kebir Hammam (1970-1980)

Station	Echelle	Nombres de valeurs	Coefficient a	Coefficient b	R ²	R	Relation $Q_s = a Q_l^b$
Ain charchar	Série complète	1635	0,19	1,25	0,80	0,89	$0,19 Q_l^{1,25}$
Reboa		445	5,07	1,13	0,72	0,85	$5,07 Q_l^{1,13}$
Timgad		394	5,90	1,13	0,83	0,91	$5,90 Q_l^{1,13}$
El Kantara		559	2,98	1,54	0,67	0,82	$2,98 Q_l^{1,54}$

6.6.2. Examen des relations en puissance sur une échelle mensuelle

L'analyse graphique effectuée à l'échelle mensuelle (Tableau 60, Annexe 7) des relations entre les débits solides et les débits liquides montre des coefficients de corrélation, compris entre 70 et 94% pour la station de Ain Charchar, de 55 à 97 % pour les stations Reboa et Timgad et de 74 à 97 % pour la station El Kantara, ce qui corrobore la bonne relation entre les deux paramètres dans les trois bassins.

Tableau 60 : Les différentes périodes et leurs coefficients de corrélation mensuels par bassin

Station /Mois	Nombres	Coefficient	Coefficient	R ²	R	Relation	
Ain Charchar (031101)	Septembre	90	0,28	1,14	0,84	0,92	$0,28 Q_l^{1,14}$
	Octobre	123	0,21	1,35	0,86	0,93	$0,21 Q_l^{1,35}$
	Novembre	119	0,21	1,25	0,77	0,88	$0,21 Q_l^{1,25}$
	Décembre	163	0,23	1,48	0,67	0,82	$0,23 Q_l^{1,48}$
	Janvier	197	0,13	1,50	0,88	0,94	$0,13 Q_l^{1,50}$
	Février	196	0,21	1,27	0,79	0,89	$0,21 Q_l^{1,27}$
	Mars	235	0,13	1,44	0,77	0,88	$0,13 Q_l^{1,44}$
	Avril	221	0,17	1,29	0,69	0,83	$0,17 Q_l^{1,29}$
	Mai	178	0,18	1,39	0,94	0,80	$0,18 Q_l^{1,39}$
	Juin	89	0,13	0,84	0,66	0,81	$0,13 Q_l^{0,84}$
Juillet et Aout	24	0,05	0,72	0,47	0,69	$0,05 Q_l^{0,72}$	
Reboa (070403)	Septembre	56	6,41	1,37	0,92	0,96	$6,41 Q_l^{1,37}$
	Octobre	84	9,25	1,01	0,68	0,82	$9,25 Q_l^{1,01}$
	Novembre	23	7,89	1,47	0,70	0,84	$7,89 Q_l^{1,47}$
	Décembre	5	2,12	0,26	0,34	0,58	$2,12 Q_l^{0,26}$
	Janvier	30	3,02	1,22	0,89	0,94	$3,02 Q_l^{1,22}$
	Février	23	1,54	1,12	0,57	0,75	$1,54 Q_l^{1,12}$
	Mars	63	1,49	0,82	0,30	0,55	$1,49 Q_l^{0,82}$
	Avril	20	5,46	1,10	0,77	0,88	$5,46 Q_l^{1,10}$
	Mai	28	4,35	1,41	0,65	0,81	$4,35 Q_l^{1,41}$
	Juin	34	9,21	1,17	0,86	0,93	$9,21 Q_l^{1,17}$
Juillet et Aout	32	10,85	1,12	0,78	0,88	$10,85 Q_l^{1,12}$	
Timgad (070401)	Septembre	60	9,66	1,2	0,84	0,92	$9,66 Q_l^{1,20}$
	Octobre	53	4,19	1,13	0,82	0,91	$4,19 Q_l^{1,13}$
	Novembre	20	3,81	1,11	0,67	0,82	$3,81 Q_l^{1,11}$
	Décembre	12	5,47	1,09	0,93	0,96	$5,47 Q_l^{1,09}$
	Janvier	42	1,93	0,95	0,90	0,95	$1,93 Q_l^{0,95}$
	Février	15	8,29	1,09	0,90	0,95	$8,29 Q_l^{1,09}$
	Mars	68	3,27	1,03	0,84	0,92	$3,27 Q_l^{1,03}$

Tableau 60 (Suite) : Les différentes périodes et leurs coefficients de corrélation mensuels par bassin

Station /Mois	Nombres	Coefficient	Coefficient	R ²	R	Relation	
Timgad (070401)	Avril	46	3,82	1,13	0,45	0,67	3,82 $Q_1^{1,13}$
	Mai	28	4,27	1,01	0,65	0,81	4,27 $Q_1^{1,01}$
	Juin	24	34,22	1,05	0,94	0,97	34,22 $Q_1^{1,05}$
	Juillet	16	13,57	1,14	0,91	0,95	13,57 $Q_1^{1,14}$
	Aout	10	16,92	1,20	0,92	0,96	16,92 $Q_1^{1,20}$
El Kantara (061201)	Septembre	51	7,94	1,32	0,86	0,93	7,94 $Q_1^{1,32}$
	Octobre	74	5,95	1,65	0,78	0,88	5,95 $Q_1^{1,65}$
	Novembre	65	6,22	1,64	0,64	0,80	6,22 $Q_1^{1,64}$
	Décembre	13	1,76	2,40	0,79	0,89	1,76 $Q_1^{2,40}$
	Janvier	30	1,12	2,35	0,78	0,88	1,12 $Q_1^{2,35}$
	Février	45	1,83	2,00	0,55	0,74	1,83 $Q_1^{2,00}$
	Mars	96	1,41	1,89	0,65	0,81	1,41 $Q_1^{1,89}$
	Avril	75	1,29	1,89	0,71	0,84	1,29 $Q_1^{1,89}$
	Mai	50	3,00	1,90	0,81	0,90	3,00 $Q_1^{1,90}$
	Juin	32	12,49	1,18	0,85	0,92	12,49 $Q_1^{1,18}$
	Juillet	8	23,73	1,37	0,88	0,94	23,73 $Q_1^{1,37}$
	Aout	20	7,86	1,06	0,95	0,97	7,86 $Q_1^{1,06}$

Le paramètre « a » et l'exposant « b » à la station Ain Charchar varient peu entre le mois de Septembre et le mois de Mai. Le paramètre « a » varie de 0,13 (Mars) à 0,28 (Septembre) et l'exposant « b » de 1,27 (Septembre) et 1,5 (Janvier). Les pluies importantes qui tombent en ces mois assurent la concentration des écoulements (écoulements pérennes) sur une longue période de l'année et engendrent une activité hydro-sédimentaire importante et régulière. Les premières pluies arrivent au mois de Septembre et Octobre. Elles succèdent à une période sèche trouvant des sols secs, disséqués et difficilement érodables. La réponse du bassin en matière en suspension démarre progressivement, ce n'est qu'à partir du mois de Novembre que les pluies torrentielles surviennent et arrachent de grandes quantités de matières solides, qui seront par la suite véhiculées en suspension par les cours d'eau.

De plus, les zones cultivées du bassin pour la céréaliculture sont souvent semées tardivement (en Septembre et Novembre). Elles constituent les principales cultures à risques en période hivernale. En effet, une couverture végétale protectrice ne s'établit qu'en Mars-Avril, après l'installation d'une croûte de battance dès la fin de Novembre, et il n'y a guère de remède efficace pour empêcher la production du ruissellement et de sédiments en suspension dans les cours d'eau.

Les faibles valeurs du paramètre « a » et de l'exposant « b » caractérisent la période estivale particulièrement en Juin. En effet, même les faibles écoulements formés lors des orages d'Été soutiennent les écoulements dans le lit des cours d'eau et engendrent de faibles volumes de transport solide en suspension.

A la station *Reboa* et *Timgad* (Bassin *Reboa*) et à la station d'*El Kantara* (bassin Oued El Hai), les valeurs mensuelles du paramètre « a » grandissent beaucoup et varient en comparaison des valeurs du bassin *Kebir Hammam*. Le coefficient de variation est respectivement de 0,60 et 1,00. Il est de 1,5 (Mars) à 10,8 (Juillet et Aout) à la Station *Reboa*, de 1,9 (Janvier) à 34,2 (Juin) à la station de *Timgad* et de 1,1 (Janvier) à 23 (Juillet) à la station *El Kantara*.

L'écart entre les valeurs de l'exposant « b » qui est moins changeant entre les mois et le paramètre « a » sont importants. Le coefficient de variation entre les deux éléments est de 0,38 à la station *Reboa* et de 0,18 à la station de *Timgad* (Fig. 137). La variation de « a » est plus marquée en Décembre et Juin. Les transports solides en suspension sont plus importants en cette période en liaison avec la nature du sol et son degré de saturation.

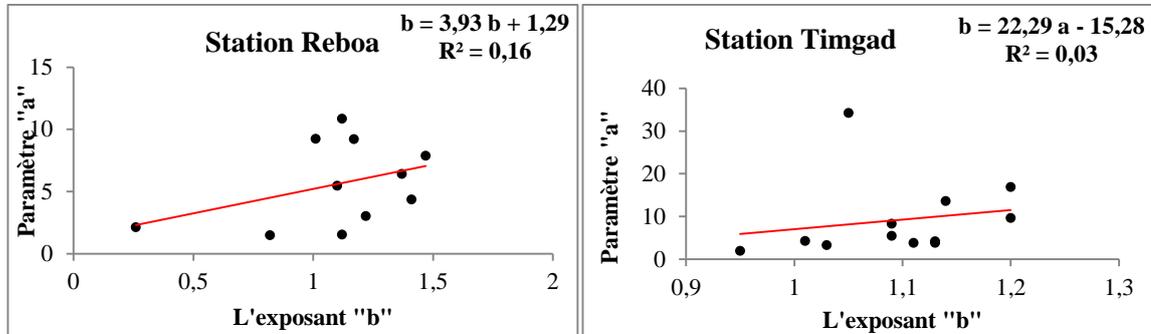


Fig. 137 : Relations mensuelles entre le paramètre « a » et l'exposant « b » aux stations *Reboa* et *Timgad*

6.6.3. Examen des relations en puissance sur une échelle saisonnière

Saisonnement, les coefficients de corrélation entre les débits solides et les débits liquides sont nettement meilleurs. Ils varient de 0,77 (printemps, station *Reboa*) à 0,96 (été, station *El Kantara*).

En comparant les équations (Tableau 61) on peut distinguer que la vitesse à laquelle le paramètre « a » change en termes de b est beaucoup plus rapide. Il varie en fonction des saisons et à travers les différents bassins (Fig. 139, 140, 141 et 142). Ces valeurs sont particulièrement plus élevées en Automne et en Été aux deux bassins *Reboa* et *Oued El Hai*. Ceci confirme les résultats expliqués plus haut. Les conditions physiques (état du sol) et climatiques (périodes sèches) différentes des bassins influencent beaucoup la valeur et en particulier celle de ce paramètre.

Les valeurs de l'exposant « b » se situent dans l'intervalle 0,88 (été, station *Ain Charchar*) et 2,2 (hiver, station *El Kantara*). Pour toutes les stations, les exposants (b) des saisons des pluies sont supérieurs aux valeurs correspondantes des saisons sèches. La figure 138 montre qu'il existe d'excellentes relations linéaires ($R = 0,97$) entre ce paramètre et sa valeur qui est de 0,88 en Été. En cette saison les pluies sont rares, ce qui affaiblit les écoulements et les pluies moyennes saisonnières dans le bassin méditerranéen *Kebir Hammam*.

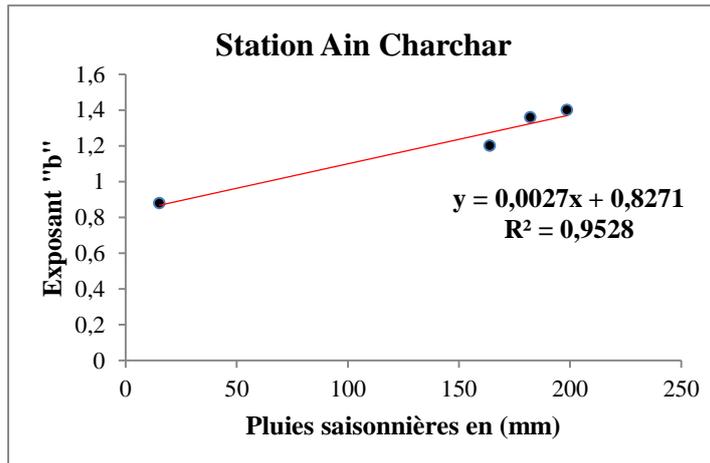


Fig. 138 : relation entre les moyennes des pluies saisonnières et l'exposant « b »

L'écart-type entre les valeurs est de 0,23 et le coefficient de variation est de 19% en cette station, avec la charge sédimentaire qui est presque nulle. D'après les valeurs des deux paramètres « a » et des exposants « b », le bassin est donc plus sensible en Hiver et au Printemps.

Vers le Sud, les équations reliant les débits liquides aux débits solides des deux bassins Reboa et Oued El Hai, montrent des situations beaucoup plus complexes. Le paramètre « a » est très variable et augmente sensiblement en Automne et en Été et pareillement l'exposant « b ». Ce dernier dépasse la valeur de 1, toutes les saisons. Le régime climatique compliqué est lié aux caractères des précipitations qui se manifestent sous forme de crues fortement concentrées notamment en Automne et en Été. Explicitement, les moindres débits qui se forment sur les terrains essentiellement marneux lors des fortes pluies sont la principale cause des rendements élevés en sédiments.

Tableau 61 : Les différentes périodes et leurs coefficients de corrélation bassin Oued El Hai (1970-1992)

Station /Saison	Nombres de valeurs	Coefficient a	Coefficient b	R ²	R	Relation	
Ain Charchar (031101)	Automne	332	0,23	1,20	0,84	0,92	0,23 Q _t ^{1,20}
	Hiver	556	0,17	1,40	0,82	0,91	0,17 Q _t ^{1,40}
	Printemps	634	0,16	1,36	0,72	0,85	0,16 Q _t ^{1,36}
	Été	113	0,13	0,88	0,72	0,85	0,13 Q _t ^{0,88}
Reboa (070403)	Automne	190	7,28	1,16	0,78	0,88	7,28 Q _t ^{1,16}
	Hiver	60	2,67	1,02	0,77	0,88	2,67 Q _t ^{1,11}
	Printemps	120	2,43	1,11	0,59	0,77	2,43 Q _t ^{1,11}
	Été	75	11,25	1,13	0,81	0,90	11,25
Timgad (070401)	Automne	133	7,31	1,20	0,85	0,92	7,31 Q _t ^{1,20}
	Hiver	69	2,82	0,98	0,89	0,94	2,82 Q _t ^{0,98}
	Printemps	142	3,33	1,02	0,72	0,85	3,33 Q _t ^{1,02}
	Été	50	22,17	1,13	0,92	0,96	22,17 Q _t ^{1,13}
El Kantara (061201)	Automne	190	6,04	1,52	0,75	0,87	6,04 Q _t ^{1,52}
	Hiver	88	1,49	2,22	0,68	0,82	1,49 Q _t ^{2,22}
	Printemps	221	1,57	1,83	0,72	0,85	1,57 Q _t ^{1,83}
	Été	60	11,98	1,17	0,88	0,94	11,98

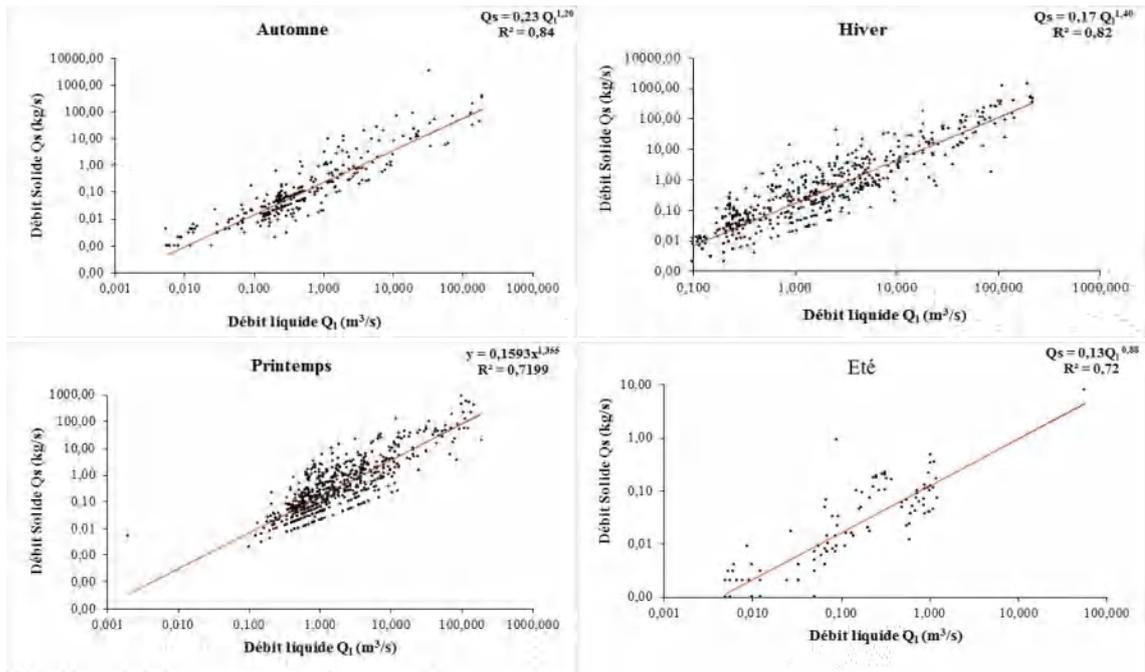


Fig. 139 : Relations entre les débits liquides et les débits solides
à l'échelle des saisons
-Station Ain Chachar-

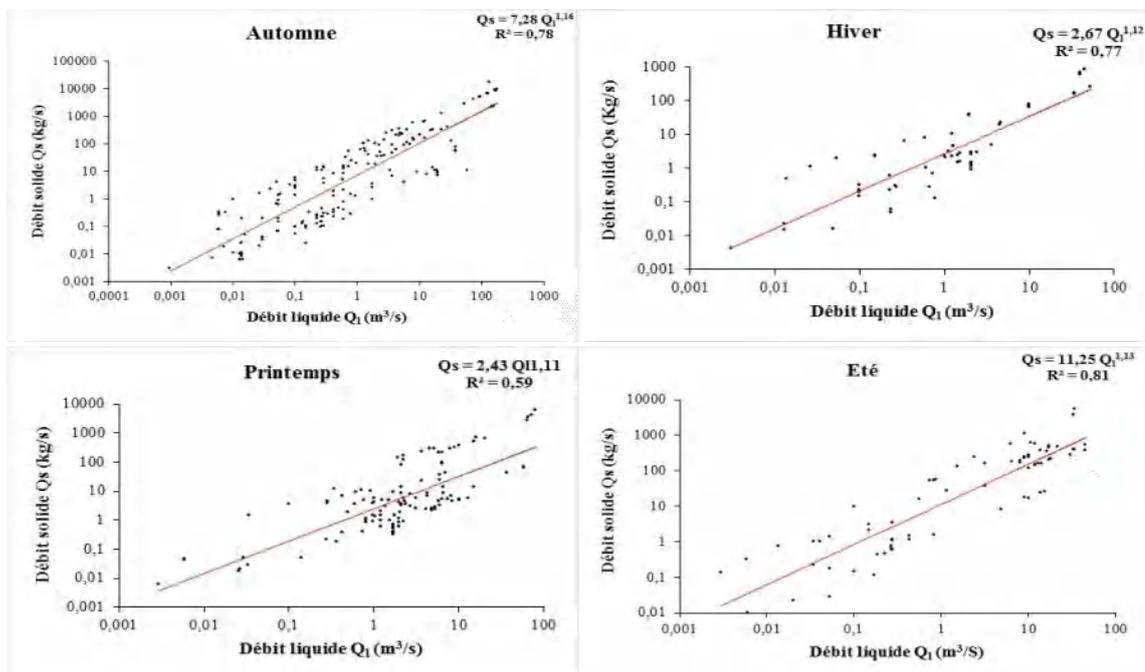


Fig. 140 : Relations entre les débits liquides et les débits solides
à l'échelle des saisons
-Station Reboa-

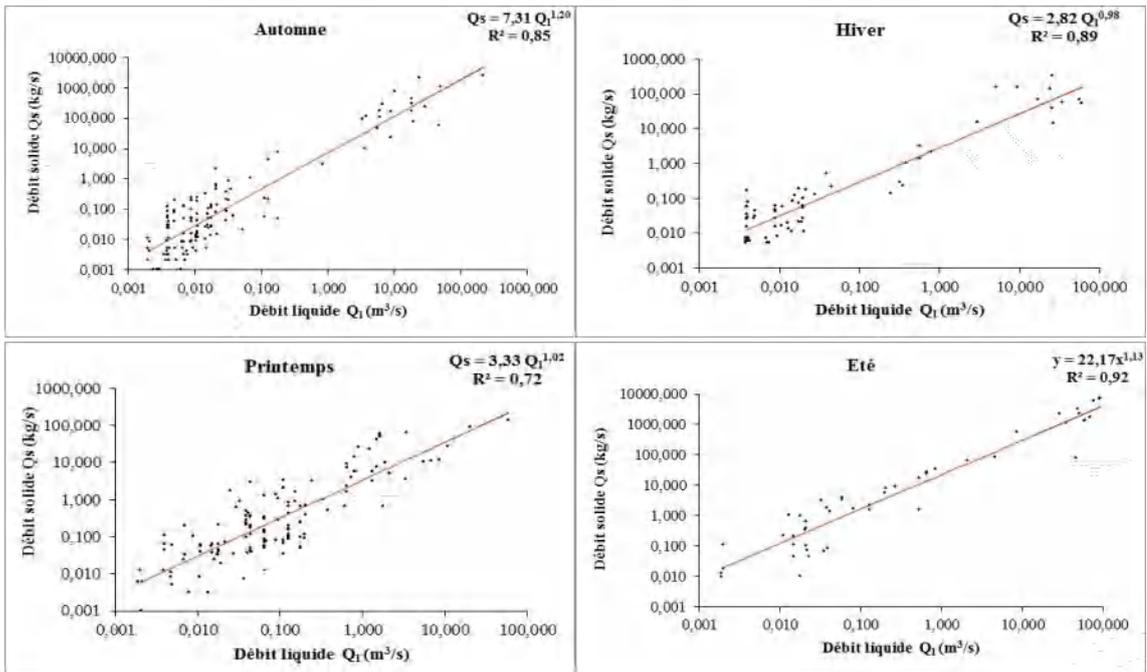


Fig. 141: Relations entre les débits liquides et les débits solides
à l'échelle des saisons
-Station Timgad-

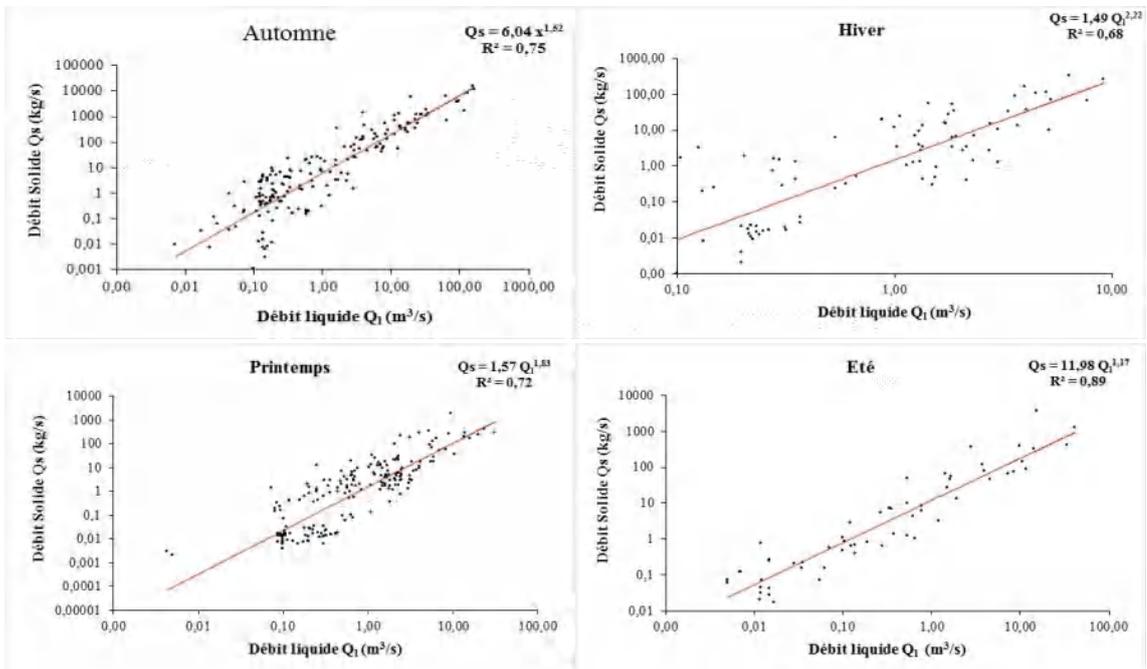


Fig. 142 : Relations entre les débits liquides et les débits solides
à l'échelle des saisons
-Station El Kantara-

6.6.4. Examen des relations en puissance sur une échelle hautes et basses eaux

Le tableau 62 et les figures 143, 144, 145 et 146 résument les relations entre les débits solides et les débits liquides regroupés en deux périodes, l'une correspondant à la période des hautes eaux et l'autre à la période des basses eaux. Celles-ci sont, déterminées à partir du coefficient mensuel des débits (CMD).

D'après l'étude des pluies et des débits étudiés dans le chapitre 3 et 4, la première période est caractérisée par des précipitations intenses et un ruissellement important, tandis que la seconde est caractérisée par des précipitations et un ruissellement considérablement plus faibles et des taux d'évapotranspiration élevés. En général, les deux variables se sont avérées bien corrélées par la fonction en puissance. Les coefficients de corrélation sont importants. Ils dépassent les 82% sur l'ensemble des stations.

A la station de *Timgad*, les points tracés sont fortement alignés autour de la droite de régression. Le coefficient de corrélation est important (91%).

L'écart du paramètre « *a* » diffère significativement entre les stations. Ces valeurs sont beaucoup plus prononcées en période des basses eaux dans les bassins de Reboa et Oued El Hai qu'en période des hautes eaux dans toutes les stations. Il l'est 19 fois à Oued El Hai, voir 38 fois à Reboa, en comparaison avec ceux de la Station d'*Ain Charchar*. Il varie de 0,16 (Station *Ain Charchar*) à 7,1 (Station *Timgad*) en périodes des hautes eaux et de 1,19 (Station *Ain Charchar*) à 8,13 (Station *Reboa*).

La valeur de l'exposant « *b* » varie peu. Elle est comprise entre 1,07 (station *Reboa*, basses eaux) à 1,68 (station *El Kantara*, Hautes eaux). Pour les Périodes de basses eaux lorsque les écoulements diminuent, le coefficient mensuel des débits fléchit, le paramètre « *a* » augmente de façon très nette dans les bassins situés en zone semi-aride et aride (Reboa et Oued El Hai) et *b* varie très peu. Ce dernier étant lié directement à la superficie de drainage en période de crues. De même, le paramètre « *a* » explique l'état du sol des bassins d'une manière générale et son degré de saturation en particulier, notion très influente sur l'écoulement (A. Benkhaled, B. Remini; 2003).

Tableau 62 : Les différentes périodes et leurs coefficients de corrélation bassin Oued El Hai (1970-1992)

Station/Echelle		Nombres de valeurs	Coefficient <i>a</i>	Coefficient <i>b</i>	R ²	R	Relation
<i>Ain Charchar</i> (031101)	Hautes eaux	1012	0,16	1,39	0,78	0,88	0,16 $Q_l^{1,39}$
	Basses eaux	623	0,21	1,15	0,79	0,89	0,21 $Q_l^{1,15}$
Reboa (070403)	Hautes eaux	219	3,00	1,22	0,75	0,87	3,00 $Q_l^{1,22}$
	Basses eaux	226	8,13	1,07	0,74	0,86	8,13 $Q_l^{1,07}$
<i>Timgad</i> (070401)	Hautes eaux	161	7,10	1,19	0,83	0,91	7,10 $Q_l^{1,19}$
	Basses eaux	233	5,49	1,10	0,82	0,91	5,49 $Q_l^{1,10}$
<i>El Kantara</i> (061201)	Hautes eaux	222	1,85	1,68	0,72	0,85	1,85 $Q_l^{1,68}$
	Basses eaux	337	4,03	1,52	0,67	0,82	4,03 $Q_l^{1,52}$

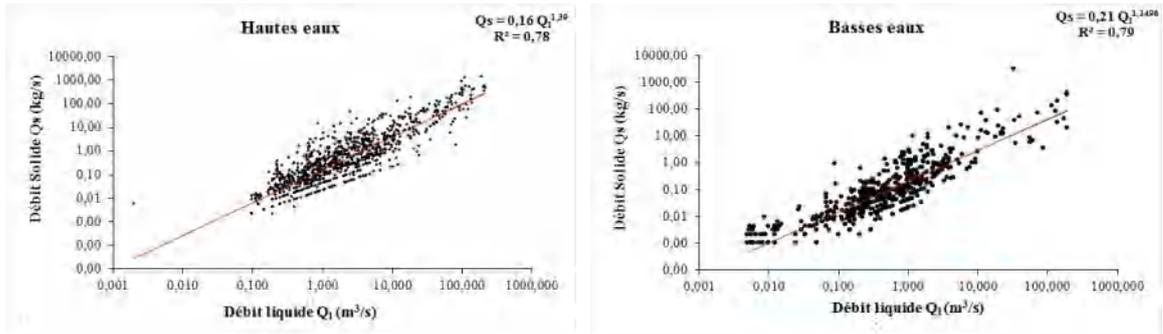


Fig. 143 : Relations entre les débits liquides et les débits solides
à l'échelle des hautes et basses eaux
- station de Ain Charchar-

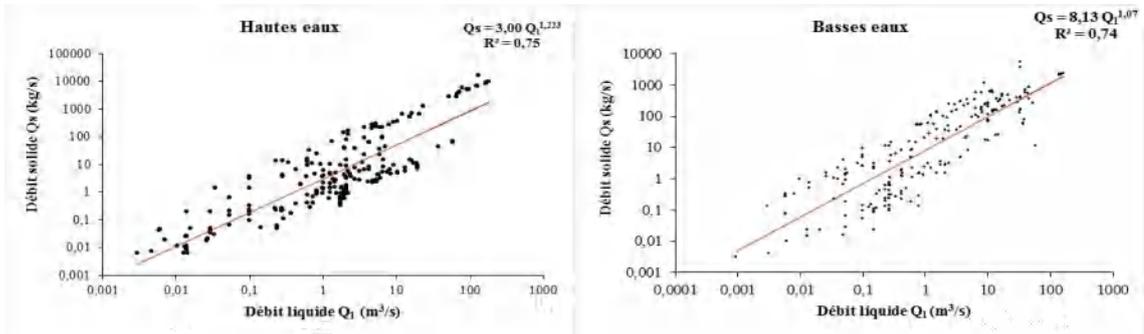


Fig. 144 : Relations entre les débits liquides et les débits solides
à l'échelle des hautes et basses eaux
-Station Reboa-

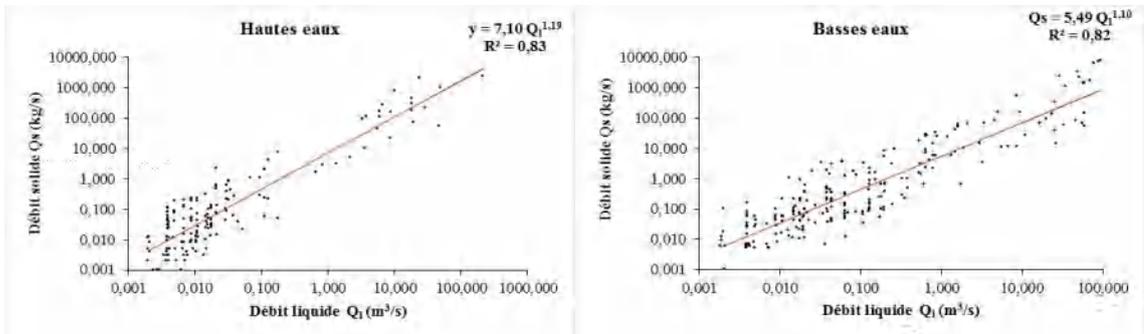


Fig. 145 : Relations entre les débits liquides et les débits solides
à l'échelle des hautes et basses eaux
-Station Timgad-

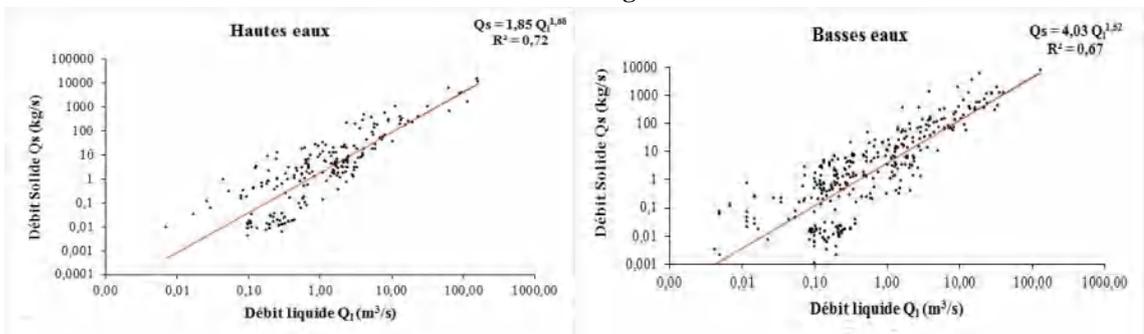


Fig. 146 : Relations entre les débits liquides et les débits solides
à l'échelle des hautes et basses eaux
-Station El Kantara-

6.7. Résultats de la modélisation

Les modèles d'estimation ont montré des sous-estimations des apports solides en suspension sur toutes les échelles étudiées et à travers toutes les stations de mesures. L'écart entre les erreurs calculées est variable. Cette sous-estimation est due d'une part à la représentation graphique du modèle en puissance qui présente un biais lié à la re-transformation du modèle de l'échelle logarithmique à une échelle arithmétique. D'autre part au nombre de valeurs échantillonnées et à l'écart entre les valeurs faibles et fortes des débits.

A la station de *Ain Charchar* (Bassin Kebir Hammam), l'estimation de l'erreur sur le modèle « Série complète » des apports solides modélisés par rapport aux apports solides en suspension mesurés est de -22% (Tableau 63). Elle varie mensuellement, de -4% (Juillet et Août) à -62% au mois Novembre. Saisonnièrement, l'erreur varie de -15% (Printemps) à -54% (Eté).

Le partage de valeurs mesurées en période de basses et hautes eaux montre des erreurs à -15% pour la première et -49% pour la deuxième.

Tableau 63 : Résultats des apports solides en suspension–Station Ain Charchar-

<i>Echelle</i>	<i>ASmesuré</i>	<i>ASmodélisé</i>	<i>Erreur</i>	<i>CF1</i>	<i>ASmod*CF1</i>	<i>Erreur</i>	<i>CF2</i>	<i>As*CF2</i>	<i>Erreur</i>
<i>Série complète</i>	64352,36	49906,19	-22,45	1,64	81846,15	27,18	2,37	112208,45	74,37
<i>Par mois</i>									
Septembre	166,70	113,82	-31,72	1,24	141,13	-15,34	1,60	182,11	9,24
Octobre	2458,92	2184,56	-11,16	1,63	3517,15	43,04	1,87	4085,14	66,14
Novembre	10961,68	4134,61	-62,28	1,54	6367,30	-41,91	3,44	14223,06	29,75
Décembre	2193,40	839,04	-61,75	1,94	1627,73	-25,79	2,93	2458,37	12,08
Janvier	16075,83	18045,92	12,25	2,43	43851,59	172,78	1,95	35189,55	118,90
Février	10596,75	8534,65	-19,46	1,49	12716,63	20,00	1,62	13826,14	30,48
Mars	14352,10	12883,76	-10,23	1,76	22675,42	57,99	2,53	32595,92	127,12
Avril	8904,68	6269,61	-29,59	1,64	10282,16	15,47	2,45	15360,55	72,50
Mai	1111,42	582,99	-47,55	1,61	938,61	-15,55	2,12	1235,94	11,20
Juin	265,84	112,63	-57,63	1,36	153,17	-42,38	3,99	449,39	69,05
Juillet et aout	21,43	20,51	-4,29	2,28	46,16	115,38	2,54	52,10	143,12
Total	67108,75	53722,11	-19,95		102317,06	52,46		119658,25	78,30
<i>Par saison</i>									
Automne	10456,99	5583,30	-46,61	1,45	8095,78	-22,58	2,48	13742,96	31,42
Hiver	50066,55	28212,79	-43,65	1,86	52475,79	4,81	2,94	82945,60	65,67
Printemps	22813,06	19346,76	-15,19	1,67	32309,09	41,63	2,45	47399,56	107,77
Eté	305,23	140,34	-54,02	1,33	186,65	-38,85	3,42	479,96	57,24
Total	83641,84	53283,19	-36,30		93067,31	11,27		144568,09	72,84
<i>Hautes eaux-basses eaux</i>									
Hautes eaux	54330,43	46125,64	-15,10	1,81	83606,74	53,89	2,44	112546,55	107,15
Basses eaux	10270,97	5235,11	-49,03	1,44	7538,55	-26,60	2,46	12878,36	25,39
Total	64601,40	51360,74	-20,50		91145,29	41,09		125424,91	94,15

Globalement, les erreurs les plus marquées s'observent en deux périodes : la première en Novembre et Décembre, avec une erreur estimée respectivement à -62% et -61%. La deuxième période en Eté (période des basses eaux), estimée à -47% pour le mois de Mai et à -57% pour le mois de Juin. Ces dernières valeurs expliquent ainsi qu'en ces deux mois le transport solide en suspension est aussi important qu'aux mois de Janvier, Février, Mars et Avril (période des hautes eaux). Les sols dénudés ou peu couverts (48 %) dans ce bassin sont généralement soumis à une sécheresse estivale qui les fragilise et les rend aptes à toute forme d'érosion. Ils sont prêts à être

transportés lors des moindres pluies automnales ou encore des pluies diluviennes de la fin de la saison printanière.

Ceci laisse conclure au préalable que la période des hautes eaux où les flux sédimentaires sont les plus importants est beaucoup plus longue dans ce bassin tellien. Elle suit surtout la variabilité des écoulements qui dépendent d'une alimentation pluviale. Elle débute au mois de Novembre et se prolonge jusqu'au mois de Mai.

Dans le bassin Reboa (Tableau 64 et 65), les apports solides en suspension modélisés sont également sous-estimés par le modèle « série complète ». l'erreur est à -64% à la station *Reboa* et à -32% à la station de *Timgad*. Les modèles de régression sur les douze mois ont générés des erreurs dans le bilan des deux stations de -86% au mois de Septembre à -28% aux mois de Juillet et Aout à la station *Reboa*, et à -66% au mois d'Aout à -8% au mois de février à la station de *Timgad*. Les erreurs générées par les deux modèles saisonnier et hautes eaux/basses eaux semblent assez conséquents et en particulier celles d'Automne (-73%) et de Printemps (-55%).

A la station *El Kantara* (bassin Oued El Hai), les courbes d'estimation montrent des sous-estimations (Tableau 66) sur toutes les échelles. Les apports solides en suspension modélisés et calculés ont générés des erreurs à -16% par le modèle « série complète ». Par les autres modèles, les erreurs augmentent dans leur totalité.

Les régressions saisonnières montrent des erreurs à -88% pour l'Hiver. Elles sont boostées par le modèle « mois » particulièrement le mois de Décembre où les apports solides en suspension sont beaucoup plus importants avec une erreur estimée à -90%. L'erreur dans la division des données en deux périodes hautes et basses eaux est approximativement identique. L'erreur dans les apports solides modélisés est à -71% à la période des hautes eaux et à -84% à la période des basses eaux.

L'application des deux facteurs correctifs du biais CF1 de Fergusson et CF2 de Duan ont minimisé les erreurs particulièrement aux stations des deux bassins *Reboa* et Oued El Hai. Certaines stations ont répondu positivement avec le premier facteur et d'autres par le second soit par une sous ou surestimation. Hansen & Bray (1987) ont rapportés des résultats similaires. Ils observent que les deux facteurs de correction approchent les mesures et que la dispersion autour de la ligne d'ajustement diminue ,et l'erreur de l'estimation s'approche de zéro (D.E.Walling & B. W. Webb, 1988).

Toutefois, les résultats de la sommation des apports solides modélisés et corrigés à partir des régressions individuelles dans ces deux bassins sont qualifiées d'impressionnantes.

Dans le bassin de *Reboa*, les apports solides modélisés et corrigés par le CF2 de Duan, correspondant à la période (1985-1996), ont produit dans les deux stations *Reboa* et *Timgad* des erreurs analogues de +2% à partir de la sommation des estimations mensuelles « par mois ». Cette bonne précision pourrait être partiellement liée à l'effet de compensation des erreurs entre les mois.

Encore, à la station d'*El Kantara*, le même facteur correctif du biais a apporté une grande amélioration aux apports solides modélisés. Il a nettement réduit les sous-estimations notamment dans les trois modèles (mois, saison et hautes/basses eaux). Les résultats obtenus par la sommation des apports solides en suspension ont ramené la précision à presque +3% dans les trois modèles.

Tableau 64 : Résultats des apports solides en suspension–Station bassin Reboa-

Echelle		<i>As_{mes}</i>	<i>As_{mod}</i>	<i>Er</i>	<i>As_{mod}*CF1</i>	<i>Er</i>	<i>As_{mod}*CF2</i>	<i>Er</i>
Série complète		221130,43	78074,51	-64,69	176448,39	-20,21	256863,06	16,16
<i>Par mois</i>	<i>Septembre</i>	5241,80	685,81	-86,92	2660,95	-49,24	1625,37	-68,99
	<i>Octobre</i>	16566,98	6347,93	-61,68	14282,84	-13,79	17012,45	2,69
	<i>Novembre</i>	6480,78	1147,71	-82,29	3018,47	-53,42	4567,87	-29,52
	<i>Décembre</i>	8126,80	2755,45	-66,09	6475,31	-20,32	3526,98	-56,60
	<i>Janvier</i>	6674,84	3119,00	-53,27	5052,77	-24,30	5583,00	-16,36
	<i>Février</i>	3472,76	1615,45	-53,48	2326,25	-33,01	3327,83	-4,17
	<i>Mars</i>	12132,62	4923,17	-59,42	7581,68	-37,51	10683,27	-11,95
	<i>Avril</i>	26952,65	9580,19	-64,46	19064,59	-29,27	31997,85	18,72
	<i>Mai</i>	32072,23	9354,15	-70,83	24694,97	-23,00	30962,25	-3,46
	<i>Juin</i>	10486,45	4593,32	-56,20	6660,31	-36,49	7762,71	-25,97
	<i>Juillet et</i>	14805,66	10605,20	-28,37	20149,88	36,10	28952,20	95,55
	Total	143013,57	54727,38	-61,73	111968,02	-21,71	146001,79	2,09
<i>Par saison</i>	<i>Automne</i>	27349,36	7311,74	-73,27	16788,91	-38,61	22430,53	-17,99
	<i>Hiver</i>	16398,03	6305,78	-61,55	10404,55	-36,55	16773,39	2,29
	<i>Printemps</i>	67415,36	18876,87	-72,00	32711,55	-51,48	63292,01	-6,12
	<i>Été</i>	38074,75	16855,17	-55,73	26057,75	-31,56	31936,63	-16,12
	Total	149237,50	49349,56	-66,93	85962,75	-42,40	134432,56	-9,92
<i>Hautes eaux-basses eaux</i>	<i>Hautes eaux</i>	84551,77	20234,98	-76,07	47147,49	-44,24	61919,025	-26,77
	<i>Basses eaux</i>	121660,19	43087,60	-64,58	84882,58	-30,23	115043,90	-5,44
	Total	206211,95	63322,58	-69,29	132030,07	-35,97	176962,93	-14,18

Tableau 65 : Résultats des apports solides en suspension–Station Timgad-

Echelle		<i>As_{mes}</i>	<i>As_{mod}</i>	<i>Er</i>	<i>As_{mod}*CF1</i>	<i>Er</i>	<i>As_{mod}*CF2</i>	<i>Er</i>
Série complète		20265,03	13710,40	-32,34	23856,09	17,72	33314,26	64,39
<i>Par mois</i>	<i>Septembre</i>	2380,23	926,78	-61,06	2075,99	-12,78	2381,83	0,07
	<i>Octobre</i>	1168,03	747,64	-35,99	1211,18	3,69	1712,10	46,58
	<i>Novembre</i>	66,85	53,47	-20,01	62,56	-6,41	71,11	6,38
	<i>Décembre</i>	338,70	164,98	-51,29	235,92	-30,35	349,76	3,26
	<i>Janvier</i>	779,26	443,12	-43,14	562,77	-27,78	735,58	-5,60
	<i>Février</i>	330,98	303,44	-8,32	355,02	7,26	379,29	14,60
	<i>Mars</i>	1180,28	743,58	-37,00	988,96	-16,21	1197,17	1,43
	<i>Avril</i>	544,07	149,33	-72,55	277,75	-48,95	485,31	-10,80
	<i>Mai</i>	4527,85	2372,79	-47,60	3606,65	-20,35	4769,31	5,33
	<i>Juin</i>	2383,62	1613,89	-32,29	2017,36	-15,37	2146,47	-9,95
	<i>Juillet</i>	5550,35	3474,54	-37,40	5524,51	-0,47	5628,75	1,41
	<i>Aout</i>	190,70	64,76	-66,04	110,09	-42,27	99,73	-47,70
Total	19440,909	11058,316	-43,12	17028,76	-12,41	19956,42	2,65	
<i>Par saison</i>	<i>Automne</i>	3805,40	1684,12	-55,74	3216,66	-15,47	4126,09	8,43
	<i>Hiver</i>	1659,71	885,31	-46,66	1159,76	-30,12	1522,74	-8,25
	<i>Printemps</i>	6129,32	2720,74	-55,61	4135,53	-32,53	6040,04	-1,46
	<i>Été</i>	10031,39	5864,74	-41,54	9090,35	-9,38	9618,18	-4,12
	Total	21625,82	11154,91	-48,42	17602,30	-18,61	21307,04	-1,47
<i>Hautes eaux-basses eaux</i>	<i>Hautes eaux</i>	8927,0035	5854,33	-34,42	8691,65	-2,64	11258,21	26,11
	<i>Basses eaux</i>	9758,569	2764,48	-71,67	4728,55	-51,54	5747,73	-41,10
	Total	18685,57	8618,81	-53,87	13420,20	-28,18	17005,93	-8,99

Tableau 66 : Résultats des apports solides en suspension–Station El Kantara-

Echelle		<i>AS_{mes}</i>	<i>AS_{mod}</i>	<i>Er</i>	<i>AS_{mod}*CF1</i>	<i>Er</i>	<i>AS_{mod}*CF2</i>	<i>Er</i>
Série complète		<u>174419,31</u>	<u>146364,09</u>	<u>-16,08</u>	<u>∟</u>	<u>∟</u>	<u>∟</u>	<u>∟</u>
<i>Par mois</i>	<i>Septembre</i>	101156,43	53381,40	-47,23	118506,72	17,15	106762,81	5,54
	<i>Octobre</i>	21739,23	4624,79	-78,73	20857,82	-4,05	13781,88	-36,60
	<i>Novembre</i>	15779,06	6403,31	-59,42	45015,25	185,28	26957,92	70,85
	<i>Décembre</i>	1942,91	175,83	-90,95	2150,44	10,68	601,35	-69,05
	<i>Janvier</i>	1984,69	243,29	-87,74	1430,56	-27,92	1055,89	-46,80
	<i>Février</i>	9765,10	1973,72	-79,79	10737,04	9,95	14072,63	44,11
	<i>Mars</i>	7868,07	3651,58	-53,59	11721,58	48,98	10808,68	37,37
	<i>Avril</i>	12841,29	3231,13	-74,84	18126,65	41,16	18029,72	40,40
	<i>Mai</i>	4685,33	816,07	-82,58	5100,41	8,86	3345,87	-28,59
	<i>Juin</i>	7763,56	4719,72	-39,21	7079,58	-8,81	8637,09	11,25
	<i>Juillet</i>	18153,12	4857,08	-73,24	8159,89	-55,05	7674,19	-57,73
	<i>Aout</i>	2689,92	2217,17	-17,57	2483,23	-7,68	2682,78	-0,27
Total		<u>206368,71</u>	<u>86295,10</u>	<u>-58,18</u>	<u>251369,18</u>	<u>21,81</u>	<u>214410,81</u>	<u>3,90</u>
<i>Par saison</i>	<i>Automne</i>	130515,84	45633,87	-65,04	202614,38	55,24	141465,00	8,39
	<i>Hiver</i>	13667,88	1582,13	-88,42	10521,18	-23,02	11786,88	-13,76
	<i>Printemps</i>	26140,42	6534,71	-75,00	29144,80	11,49	26923,00	2,99
	<i>Eté</i>	21644,58	10087,60	-53,39	16139,55	-25,43	18056,81	-16,58
	Total	<u>191968,72</u>	<u>63838,31</u>	<u>-66,75</u>	<u>258419,91</u>	<u>34,62</u>	<u>198231,68</u>	<u>3,26</u>
<i>Hautes eaux-basses eaux</i>	<i>Hautes eaux</i>	77095,55	22023,76	-71,43	102652,75	33,15	101089,06	31,12
	<i>Basses eaux</i>	82781,84	12926,95	-84,38	62507,45	-24,49	62890,94	-24,03
	Total	<u>159877,39</u>	<u>47833,80</u>	<u>-70,08</u>	<u>165160,21</u>	<u>3,30</u>	<u>163980,00</u>	<u>2,57</u>

Inopportunément, les modèles corrigés au bassin Kebir Hammam, à la station de *Ain Charchar* par les deux facteurs sont moins convaincants. Ils sont moins crédibles pour fournir des valeurs fiables. Ils ont considérablement surestimé les apports solides en suspension. Ils indiquent des erreurs dans les estimations dans la fourchette de +72% (modèle saisonnier) à +94% (modèle hautes/basses eaux) par le CF2 de Duan et de +11% (modèle saisonnier) à +52% (modèle par mois) par le CF1 de Fergusson.

D'une façon générale, l'utilisation de la sommation dans les modèles retenus des régressions individuelles permet de reproduire avec une meilleure précision les apports solides totaux pour les périodes considérées. L'inconvénient réside dans l'invalidité d'élaborer une courbe de régression moyennée pouvant s'adapter à l'estimation des apports solides en suspension pour des situations hydrologiques particulières (F.Hallouz, 2013). Ce résultat a été déjà déduit par d'autres auteurs tel que : Horowitz, 2003; Coynel, 2005 et F.Hallouz, 2013.

De plus, les modèles tirés ne peuvent pas être considérés comme fournisseurs de valeurs fiables, normes par rapport à laquelle on peut évaluer avec exactitude des apports solides en suspension si celles-ci ne sont pas validées par des mesures effectuées avec précision tel que la bathymétrie.

Au final, les meilleurs modèles retenus pour chaque bassin pour une estimation projetée sont : le modèle saisonnier pour le bassin *Kebir Hammam* avec le facteur correctif CF1 de Fergusson, les deux modèles « mensuel » et « hautes et basses eaux » respectivement pour le bassin *Reboa* et le bassin de *Oued El Hai* en tenant compte de la correction des valeurs par le CF2 de Duan.

6.8. La dynamique érosive dans les bassins

6.8.1 Variabilité interannuelle des apports solides

Une grande variabilité interannuelle des apports solides en suspension existe dans les trois bassins. Les évolutions des sédiments qui transitent dans les cours d'eau fluctuent d'une année à l'autre et sont donc très difficilement prévisibles en raison de la variabilité des pluies et débits des cours d'eau.

Néanmoins, au bassin Kebir Hammam la moyenne des dix années (1970/1971–1979/1980) donne un volume transité annuel de 9,3 hm³, correspondant à un apport solide moyen de 93 067 tonnes, soit une dégradation spécifique moyenne de 82 tonnes/km²/an (Fig. 147, Tableau 67).

Entre l'année la plus forte et celle la plus faible, le rapport entre les valeurs des apports est supérieur à 68. L'année 1972/1973 a été celle qui a produit le plus grand apport solide soit plus 31 % du flux solide de sédiments des 10 ans. Durant cette année hydrologique, la crue survenue le 03 octobre 1987 a été la plus exceptionnelle avec une concentration maximale de 175 g/l, correspondant à un débit de pointe spécifique atteignant 0,38 m³/s/km². L'apport solide engendré lors de cet événement est de 225 000 tonnes, soit une contribution de 95 % du flux total annuel en sédiments.

Tableau 67 : Les apports annuels solides en suspension -bassin Kebir Hammam-

Années	Al (hm ³)	As (tonnes)	As (MT)	Dss (tonnes/km ² /an)
70/71	13,90	141992	0,142	125,66
71/72	18,07	206188	0,206	182,47
72/73	23,10	295859	0,296	261,82
73/74	1,13	3650	0,004	3,23
74/75	2,66	14697	0,015	13,01
75/76	5,37	37655	0,038	33,32
76/77	11,07	77815	0,078	68,86
77/78	5,24	44817	0,045	39,66
78/79	11,23	102456	0,102	90,67
79/80	1,55	5540	0,006	4,90
Moyenne	9,33	93067,31	0,093	82,36

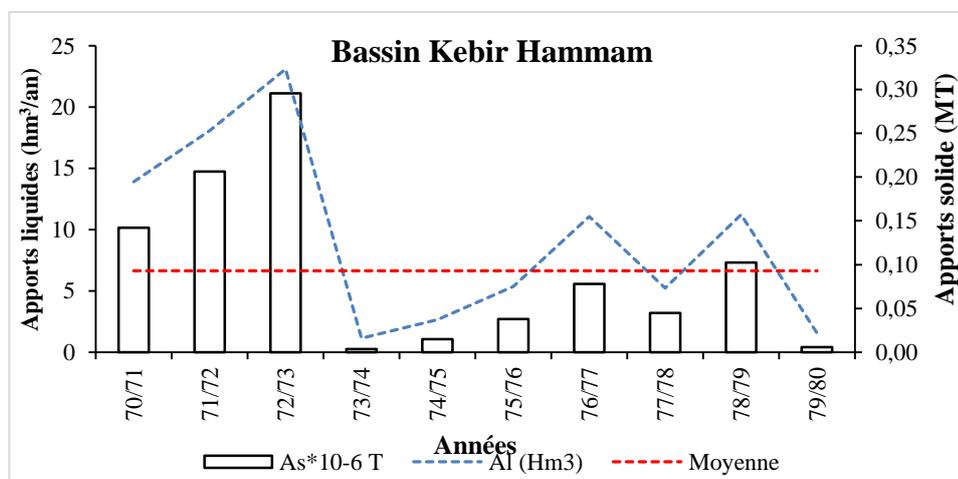


Fig. 147 : Variation annuelles des apports solides et liquides -bassin Kebir Hammam-

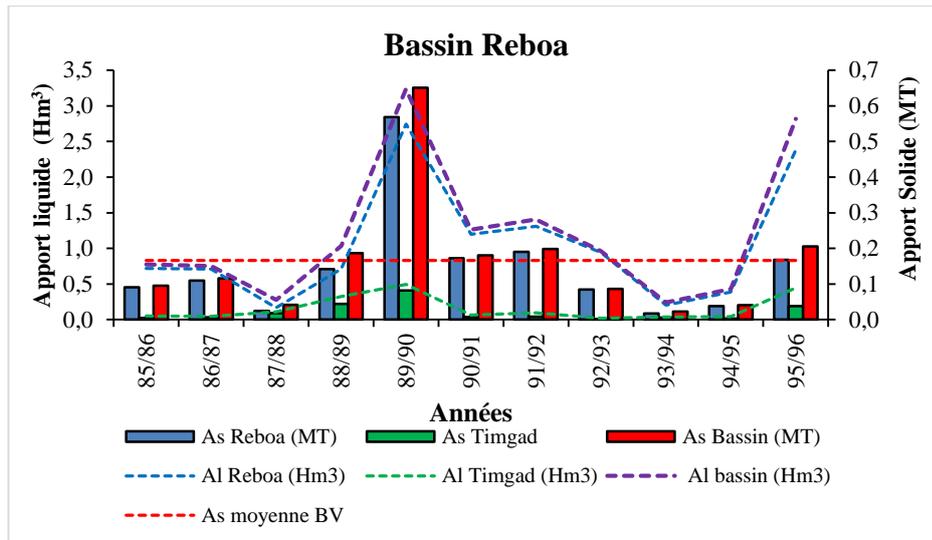
Toutefois, il est à noter qu'à travers les années les apports transportés semblent intimement liés aux écoulements du bassin. Plus les débits sont importants plus les apports solides sont importants. Cela est dû au régime des pluies. Elles tombent sur un bon nombre de mois, ce qui assure un ruissellement permanent et un transport en sédiments en même temps.

Les variations annuelles des apports solides dans les deux stations *Reboa* et *Timgad* (bassin *Reboa*) pour la période 1985-1996 sont représentées par la figure 148 (Tableau 68). Elles traduisent une variabilité identique des apports à celle du bassin Kebir Hammam. Les apports les plus importants proviennent du sous bassin Reboa, avec une moyenne annuelle de 146 002 tonnes. Ils sont sept fois supérieurs à ceux produits par le bassin de Timgad (19 956 tonnes/an). L'effet conjugué des facteurs naturels et anthropiques sont à l'origine de cette dégradation importante : des pentes dépassant 12 % dominantes, une exposition de la plupart des versants à lithologie marneuses aux flux humides du Nord et Nord-Est, et une exploitation céréalière des sols laissant une bonne partie du bassin nu et exposé aux phénomènes érosifs.

La moyenne des apports solides est de 0,17 millions de tonnes, ce qui correspond à une dégradation spécifique annuel de 300 tonnes/Km². Les apports solides les plus importants sur l'ensemble du bassin ont été enregistrés entre Septembre 1989 et Aout 1990 avec un flux sédimentaire annuel de 650 621 tonnes. Cette valeur est quatre fois supérieure à celle de la moyenne annuelle des onze années étudiées (165 956 tonnes/an). Cette année est marquée par une succession de crues hivernales, dont la plus importante est celle du 23 janvier 1990. Elle a produit 11 987 tonnes de sédiments, ce qui correspond à 36% du total mensuel et 2 % de l'apport en sédiments de l'année. La concentration maximale étant de 17,62 g/l correspondant à un débit liquide de 46,3 m³/s. le reste des années les apports sont inférieures, l'apport minimal annuel enregistré en 1993/1994 est de 17 002 tonnes.

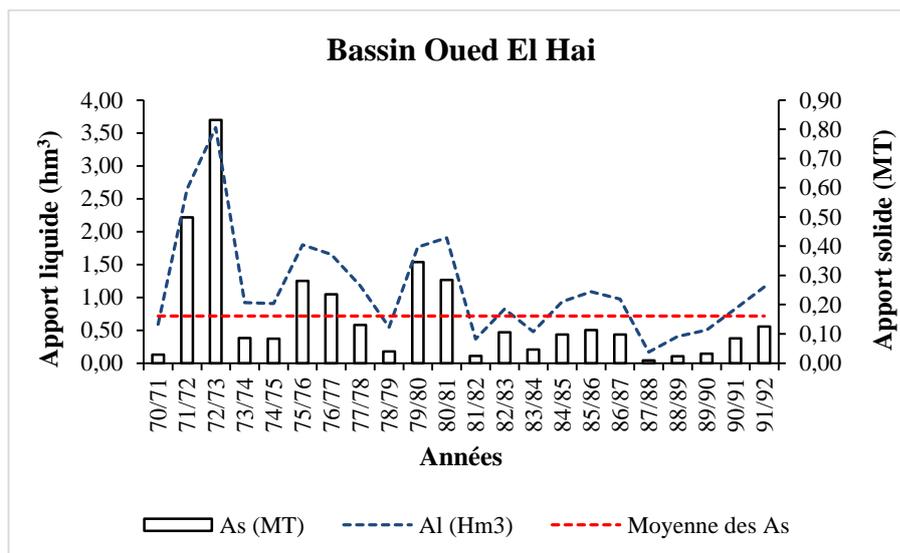
Tableau 68 : Les apports annuels solides en suspension –bassin Reboa-

Années	Al bassin (hm ³)	As station Timgad (tonnes)	As station Reboa (tonnes)	As Total (tonnes)	As total (MT)	Dss (tonnes/Km ² /an)
85/86	0,77	4822	90603	95425	0,10	172,5
86/87	0,75	6416	109773	116189	0,12	210,0
87/88	0,28	17887	24130	42017	0,04	76,0
88/89	1,03	44374	142054	186428	0,19	337,0
89/90	3,24	81875	568746	650621	0,65	1176,2
90/91	1,26	7832	172822	180654	0,18	326,6
91/92	1,40	8183	190360	198543	0,20	358,9
92/93	0,96	1566	84954	86520	0,09	156,4
93/94	0,24	5627	17002	22629	0,02	40,9
94/95	0,43	2804	38006	40810	0,04	73,8
95/96	2,82	38133	167570	205703	0,21	371,9
Moyenne	1,20	19956	146002	165958	0,17	300,0



**Fig. 148 : Variation annuelles des apports solides et liquides
-bassin Reboa**

L'apport solide moyen annuel à la station d'El Kantara (bassin de *Oued El Hai*) pour la période de 1970 à 1992 est de 163 980 tonnes, ce qui correspond à une dégradation spécifique de 140 tonnes /Km²/an (Fig. 149, Tableau 69). Sur la période étudiée (22 ans), 16 années représentent des totaux d'apports inférieurs à la moyenne. En 1987/1988, le tonnage des apports annuels est beaucoup plus faible (9 713 tonnes), conséquence d'un débit moyen annuel faible (0,17 m³/s) et d'une pluviométrie très maigre (80 mm) qui caractérise ce bassin et toutes ces zones subsahariennes. Au cours de deux années successives 1971/1972 et 1972/1973, les apports solides ont été importants. La moyenne annuelle des flux de sédiments entre ces deux années est de 665 143 tonnes. La dégradation spécifique en suspension entre septembre 1972 et le mois d'Août 1973 est de 526 tonnes/ Km²/an.



**Fig. 149 : Variation annuelles des apports solides et liquides
-bassin Oued El Hai-**

Tableau 69 : Les apports annuels solides en suspension –bassin Oued El Hai-

Années	Al (Hm ³)	As (tonnes)	As (MT)	Dss (tonnes/Km ² /an)
70/71	0,59	29259	0,03	25,01
71/72	2,65	498457	0,50	426,03
72/73	3,58	831829	0,83	710,96
73/74	0,92	85813	0,09	73,34
74/75	0,91	83342	0,08	71,23
75/76	1,80	281337	0,28	240,46
76/77	1,65	234994	0,23	200,85
77/78	1,18	130610	0,13	111,63
78/79	0,55	40341	0,04	34,48
79/80	1,76	345889	0,35	295,63
80/81	1,90	284649	0,28	243,29
81/82	0,37	24298	0,02	20,77
82/83	0,82	105598	0,11	90,25
83/84	0,48	46565	0,05	39,80
84/85	0,93	98247	0,10	83,97
85/86	1,09	112647	0,11	96,28
86/87	0,97	98326	0,10	84,04
87/88	0,17	9713	0,01	8,30
88/89	0,41	23374	0,02	19,98
89/90	0,50	32353	0,03	27,65
90/91	0,83	84801	0,08	72,48
91/92	1,16	125119	0,13	106,94
Moyenne	1,15	163980,00	0,16	140,15

6.8.2. Variabilité saisonnière et mensuelle des apports solides

Dans le bassin du Kebir Hammam (Fig. 150 et 151), l'hiver et le printemps enregistrent de forts écoulements qui engendrent les plus forts flux en suspension. Ils totalisent ensemble plus de 91 % des apports transportés totaux moyens. Bien que leurs apports liquides soient presque identiques (environ 16 m³/s), le Printemps avec 32 309 tonnes, ne ramène un apport solide que de 35% du total soit sensiblement 2 fois inférieur à celui de l'hiver qui demeure la saison la plus productrice en matières solides, soit 52 475 tonnes.

En automne, les taux transportés s'affaiblissent de 6 fois par rapport à ceux de l'hiver. L'été reste une saison sèche avec un transport solide quasi nul (0,2%).

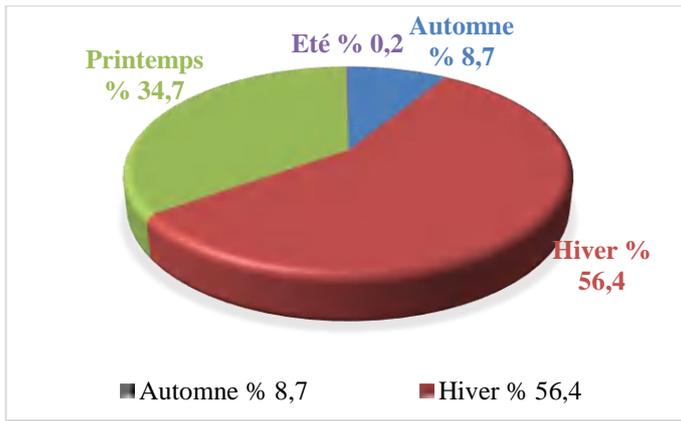


Fig. 150: Variation saisonnières des apports solides et liquides -bassin Kebir Hammam-

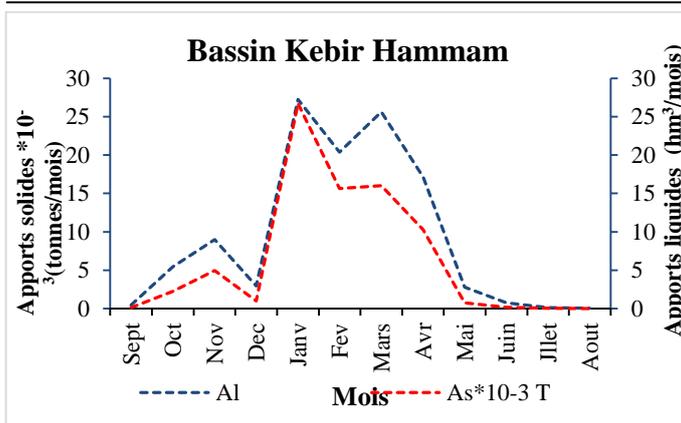


Fig. 151 : Variation mensuelles des apports solides et liquides -bassin Kebir Hammam-

Deux périodes distinctes caractérisent la dynamique érosive du bassin Reboa. La première va de Septembre à Novembre, elle est causée par les premières pluies de la période froide après une longue période sèche, et la deuxième, va de Février et peut se prolonger jusqu'à Juin (Fig.152 et 153). Ses apports solides représentent 56 % du total moyen avec un maximum relevé au mois de Mai de 35 731 tonnes

Ainsi, la répartition saisonnière des apports affiche que les plus importants surviennent au printemps. Le taux de sédiments transportés représente 48% soit 80 095 tonnes des apports solides moyens, suivi par la saison estivale. En hiver, le taux de sédiments baisse considérablement pour atteindre un taux de 17% seulement par rapport à la valeur moyenne des sédiments.

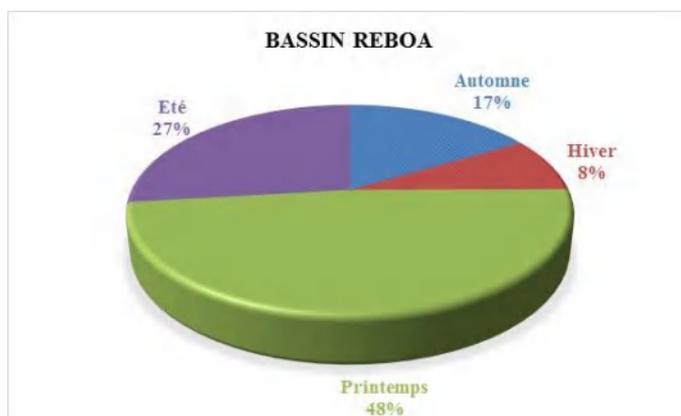


Fig. 152 : Variation saisonnières des apports solides et liquides -bassin Reboa-

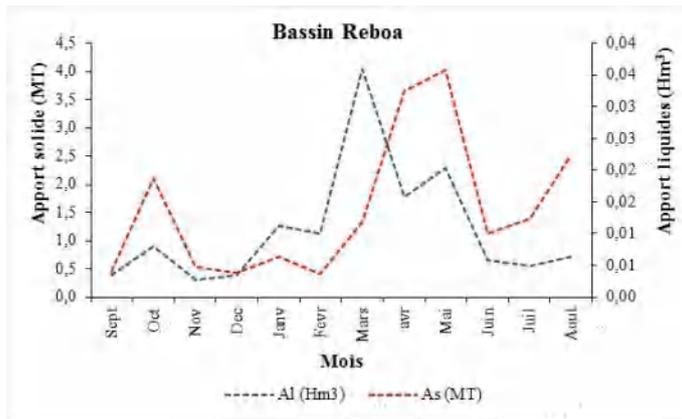


Fig. 153 : Variation mensuelles des apports solides et liquides -bassin Reboa-

Sur *Oued El Hai* et ses affluents, Les résultats du bilan saisonnier (Fig. 154) des flux sédimentaires à la station *El Kantara* aboutissent à des résultats très différents des deux premiers bassins, tant sur le bilan mensuel que les variations saisonnières. Les apports solides minimums s’observent en été (5% du total des sédiments). Le maximum saisonnier est atteint en Automne avec un taux de sédiments de 57 %, ce qui correspond à apport solide moyen saisonnier de 93 072 tonnes. Le printemps et l’hiver apportent des taux de sédiments presque proches. Ils représentent respectivement 23% et 15% du taux de sédiment global.

L’analyse des apports transportés par mois (Fig. 155), fait ressortir une très grande variabilité mensuelle qui peut atteindre un maximum de 32 782 tonnes/mois (Janvier) ou chuter vers 12 tonnes (en Août).

La figure 153 retrace les variations mensuelles des apports solides obtenues durant la période 1970-1992. L’analyse des volumes est très complexe, vu que l’on ne dispose pas d’une période d’observations suffisamment longue afin de bien évaluer la dynamique érosive, et par conséquent les apports solides dans le bassin. Entre Février et Mai, les apports solides sont de 53 360 tonnes soit 32 % des sédiments moyens totaux, alors que pour le seul mois de Septembre, ils sont de 68 700 tonnes, soit plus de 41% des flux moyens totaux des sédiments.

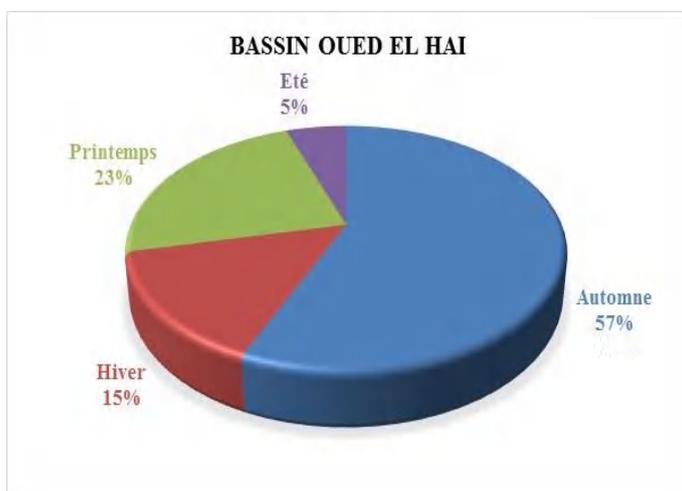


Fig. 154 : Variation saisonnières des apports solides et liquides -bassin Oued El Hai-

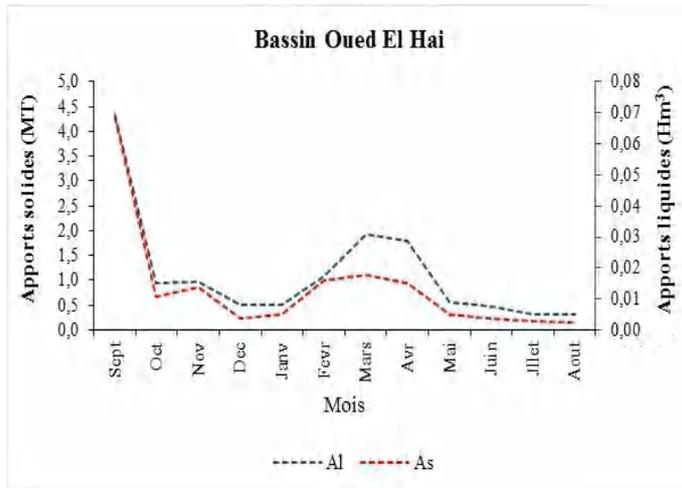


Fig. 155 : Variation mensuelles des apports solides et liquides -bassin Reboa-

6.9. Projection des modèles et bathymétrie

L'usage est de disposer sur un bassin de périodes d'observations de débits liquides plus longues que pour les débits solides. Les modèles établis et validés précédemment permettent dans une certaine mesure d'étendre la quantification des flux sédimentaires dans chaque bassin. On échappe ainsi à l'écueil des séries lacunaires gênantes. Pour valider ces données modélisées, l'utile était de les comparer avec les données de sédimentation mesurées avec précision au niveau des barrages (par bathymétrie), situés en aval des stations de mesures notamment pour le bassin *Reboa* et *Oued El Hai*. Les apports de sédiments en suspension modélisés pour le bassin *Kebir Hammam* seront extrapolés afin de déduire des flux de sédiments piégés dans la cuvette du barrage, la station étant située à son aval.

Pour tester la fonctionnalité des modèles, l'ensemble des régressions sont prises en considération, le but étant de déterminer quel est le modèle le plus opérant sur une série longue contenant une période non mesurée. Les valeurs des apports modélisés vont de la sorte être de nouveau comparées et validées avec celles des barrages. Par ailleurs, si les modèles choisis sont corrects, ils doivent pouvoir reproduire des valeurs fiables proches de celles mesurées avec des erreurs négligeables.

Les résultats de la projection sont résumés dans les tableaux 70, 71 et 72 par bassin. Ils confirment le premier choix des modèles ou l'erreur des valeurs modélisées et projetées ne fluctuent pas beaucoup. Cependant, elles peuvent basculer de faibles surestimations à des sous-estimations minimales particulièrement dans le bassin *Reboa* et *Oued El Hai* où ils reproduisent assez fidèlement les apports solides en suspension.

La projection du modèle « mois » corrigé par le facteur CF2 de Duan dans les deux stations *Reboa* et *Timgad* a donné un apport moyen annuel de sédiments total de 316 417 tonnes, un total proche de la mesure fine du levé bathymétrique dans la cuvette du barrage *Koudiet M'daouar* (326 400 tonnes/an). L'erreur entre les deux valeurs est à -3%, largement acceptable. Plus encore, le modèle des hautes et basses eaux a généré une erreur négligeable à -2%.

A *Oued El Hai*, seul le modèle choisi (des hautes et basses eaux) est fonctionnel à long terme. La moyenne des apports solides en suspension annuellement modélisés est de 240 685 tonnes. L'erreur est à -7% par rapport aux mesures bathymétriques (260 571 tonnes/an). Elle est largement tolérable.

Au vu de la mesure bathymétrique aucun modèle régressif n'a pu être généralisé dans le cas du bassin *Kebir Hammam*. Les erreurs affichent des sous-estimations importantes sur de tous les modèles produits. Ceci montre que les apports de sédiments en suspension sont plus importants. Cette situation porte deux explications majeures :

- La première réside dans l'emplacement de la mesure par rapport au site du barrage. La station de mesure de *Ain Charchar* est située en aval du barrage, elle contrôle le site de deux sous bassins versants *Oued Emchekel* et *Oued Hammam* ou se localise le barrage, ce qui influence en partie la comparaison des deux quantifications (modélisée et bathymétrique).

- La deuxième suppose qu'une grande partie des sédiments est restée piégée (processus de dépôt/reprise) sur les zones alluviales à des pentes basses (inférieures à 7%) situées à l'amont de la station hydrométrique de *Ain Charchar* dans la partie Nord du bassin sur *Oued Emchekel*.

6.10 Caractérisation du modèle statistique en puissance à l'échelle des crues (hystérésis)

Dans tous les ruissellements, au sein d'un cours d'eau conditionné par ses caractéristiques hydrologiques liés à l'écoulement, ou sur un versant (suite aux ruptures de pentes ou même aux variations des lames d'eau ruisselées) est perçu le principe *de dépôts et de reprise*. Ces derniers existent également à l'échelle d'une crue. Elles expliquent en partie les boucles d'*hystérésis* entre les concentrations et les débits liquides.

La réalisation de telles liaisons entre ces deux variables mesurées à pas de temps fins, permet d'analyser grâce à leur mise en graphe, l'allure qu'elle donne (asymétrie et aplatissement). Le but est d'élaborer une classification de cette relation, et d'en tirer les modèles de boucles d'hystérésis dominants. Celles-ci étant la synthèse de la dynamique de ces phénomènes, donnent des indices de l'origine des sédiments ainsi que de l'état du bassin versant (Williams, 1989).

En général, les débits solides et liquides ne sont pas toujours correspondants mais suivent plusieurs cas de figures.

6.10.1. Les classes d'hystérésis les plus prépondérants

Les plus fréquents, ayant été identifiées à travers les différents travaux (Fig. 156) effectués dans monde sont les suivants :

Tableau 70 : Bilan moyen annuel des Apports solides dans le bassin Kebir Hammam au niveau du barrage Zit Emba par les différents modèles régressifs

Echelle	ASbarrage (1) (tonnes/an)	As retenues collinaires (tonnes/an)	Sans facteur correctif						Avec CF1 de Fergusson					Avec CF2 de Duan				
			ASmodélisé bassin (tonnes/an)	Char riage (2) (tonnes/an)	AS _{tot} (3) (tonnes/an)	Sb/Sst (4)	ASmodélisé au Barrage (tonnes/an)	E (%) (5)	ASmodélisé bassin (tonnes/an)	Char riage (tonnes/an)	AS _{tot} (tonnes/an)	ASmodélisé au Barrage (tonnes/an)	E (%)	ASmodélisé bassin (tonnes/an)	Char riage (tonnes/an)	AS _{tot} (tonnes/an)	ASmodélisé au Barrage (tonnes/an)	E (%)
Série complète	320000	1419	59394	12163	72975	2,34	31186	-90,25	96812	19646	117878	50375	-84,26	140169	28318	169906	72609	-77,31
Par mois		1419	80908	16465	98793	2,34	42219	-86,81	8888	2061	12368	5285	-98,35	177143	35712	214275	91570	-71,38
par saison		1419	78017	15887	95323	2,34	40736	-87,27	152574	30799	184791	78971	-75,32	185185	37321	223925	95694	-70,10
HE_BE		1419	72551	14794	88764	2,34	37933	-88,15	139645	28213	169277	72341	-77,39	217735	43831	262985	112387	-64,88

Tableau 71 : Bilan moyen annuel des Apports solides dans le bassin de Reboa au niveau du barrage Koudiet M'daouar par les différents modèles régressifs

Echelle	ASbarrage (1) (tonnes/an)	Sans facteur correctif						Avec CF1 de Fergusson					Avec CF2 de Duan				
		ASmodélisé bassin (tonnes/an)	Char riage (2) (tonnes/an)	AS _{tot} (3) (tonnes/an)	Sb/Sst (4)	ASmodélisé au Barrage (tonnes/an)	E (%) (5)	ASmodélisé bassin (tonnes/an)	Char riage (tonnes/an)	AS _{tot} (tonnes/an)	ASmodélisé au Barrage (tonnes/an)	E (%)	ASmodélisé bassin (tonnes/an)	Char riage (tonnes/an)	AS _{tot} (tonnes/an)	ASmodélisé au Barrage (tonnes/an)	E (%)
Série Complète	326400	89993	17998	107991	0,82	131691	-59,65	262706	52541	315248	384449	17,78	207485	41497	248982	303636	-6,97
Mois		88017	17603	105621	0,82	128806	-60,54	175541	35108	210649	256889	-21,3	216218	43243	259462	316417	-3,06
saisons		65697	13139	78837	0,82	96143	-70,54	134174	26834	161008	196352	-39,84	186953	37390	224343	273589	-16,18
HE-BE		82349	16469	98819	0,82	120512	-63,08	165961	33192	199154	242871	-25,59	218224	43644	261869	319353	-2,16

Tableau 72 : Bilan moyen annuel des Apports solides dans le bassin de Oued El Hai au niveau du barrage des Fontaines des Gazelles par les différents modèles régressifs

Echelle	AS _{barrage} (1) (tonnes/an)	Sans facteur correctif						Avec CF1					Avec CF2				
		AS _{modélisé} Bassin (tonnes/an)	Charriage (2) (tonnes/an)	AS _{tot} (3) (tonnes/an)	Sb/Sst (4)	AS _{modélisé} au barrage (tonnes/an)	E (%) (5)	AS _{modélisé} Bassin (tonnes/an)	Charriage (tonnes/an)	AS _{tot} (tonnes/an)	AS _{modélisé} au barrage (tonnes/an)	E (%)	AS _{modélisé} Bassin (tonnes/an)	Charriage (tonnes/an)	AS _{tot} (tonnes/an)	AS _{modélisé} au barrage (tonnes/an)	E (%)
Régression unique	260571	142990	28598	171588	0,75	228 784	-12,2	633603	126721	760324	1013765	289,05	658455	131691	790146	1053528	304,31
Mois		84792	16958	101751	0,75	135 668	-47,93	243642	48728	292370	389827	49,6	206638	41328	247966	330621	26,88
saisons		61781	12356	74137	0,75	98 850	-62,06	243325	48665	291990	389320	49,41	187829	37566	225394	300526	15,33
Total HE-BE		32021	6404	38425	0,75	51 234	-80,34	89580	17916	107496	143328	-44,99	150428	30086	180513	240685	-7,63

(1) : AS_{barrage} : Envasement annuel estimé par entre deux mesures bathymétriques par l'ANBT. L'apport solide total est calculé en ajoutant au volume de vase exprimé en m³ retenu dans le barrage et multiplié par sa densité sèche (poids sec des matériaux par unité de volume) égale à 1,2 t/m³ ;

(2) : Le taux de charriage a été estimé à environ 20 % du transport solide en suspension;

(3) : AS_{tot} : Apport solide en suspension modélisé + le charriage ;

(4) : Sb : Superficie du bassin à la station hydrométrique ; S_b : superficie du bassin au site du barrage ;

(5) : E : L'erreur exprimée (%).

a) Classe I : Hystérésis courbe simple

La relation C- Q_1 dans est la plus simple et de type linéaire. Les rapports C/ Q_1 sont égaux pour les valeurs de Q, que ce soit en montée de crue ou en décrue. Ce cas est associé à un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Wood, 1977). Il indique aussi que les concentrations des sédiments en suspension doivent augmenter ou diminuer en parfaite synchronisation avec le débit liquide. Cette classe englobe trois sous-groupes :

- Une ligne droite d'où le rapport (C/Q) de la montée est égal au (C/Q) de la décrue et les pentes des deux sections, montée et décrue, sont égales, $(C/Q)_{\text{montée}} \approx (C/Q)_{\text{décrue}}$.
- Une ligne à concavité vers le haut dont les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales.
- une ligne à concavité vers le bas. Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales.

b) Classe II : Hystérésis horaire :

Dans ce modèle d'hystérésis, le maximal de concentration est observé avant le maximal de débit. Il est souvent expliqué par une production rapide de sédiments. Ce phénomène peut être lié à la remise en suspension des sédiments déposés lors des basses eaux ou lors de la décrue d'un événement précédent. Mais il peut également être expliqué en terme d'érosion : une pluie érosive va produire rapidement des sédiments (splash et rigoles d'érosion), qui vont rapidement arriver à l'exutoire. Il est également possible que cette arrivée rapide de sédiments soit liée à une source de production proche de l'exutoire (Lenzi et al. 2003; Brasington et Richards 2000; Sutter et al. 2001; Asselman 1999, in V. Mano, 2009).

c) Classe III : (Counterclockwise loop)

Ce type de boucle est en général expliqué par une production de sédiments répartie sur le haut du bassin versant (Lenzi et Marchi 2000 ; Brasington et Richards 2000 ; Sutter et al. 2001 ; Chikita et al. 2005, in V. Mano, 2009). Ces derniers mettent alors plus de temps à arriver à l'exutoire.

La disposition chronologique des données se présente comme une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Heidel, 1956). La concentration maximale est postérieure au débit maximum. Au moment de la montée de crue, les concentrations C sont inférieures à celle de la décrue pour des valeurs de Q_1 données alors $(C/Q_1)_r < (C/Q_1)$.

Les boucles dans le sens contraire des aiguilles d'une montre sont apparemment bien connues, à partir des travaux publiés (Hudson 2003 ; Yeshaneh et al. 2014 ; Pietron et al. 2015 in S. Malutta et al, 2020), cependant, peu d'exemples semble avoir été édités pour des événements simples. Cette classe de boucle résulte de l'une des trois causes suivantes :

- Le temps de parcours relatif de l'onde de crue et du flux sédimentaire compte-tenu de la distance en aval entre la source de la crue et la station de jaugeage (Heidel, 1956). Le flux de sédiments est transporté avec le retard relativement à l'onde de crue, tandis que le temps de retard augmente avec la distance en aval. Le retard des pics de sédiments se produit

normalement dans les cours d'eau avec des irrégularités qui empêchent le mouvement des sédiments par rapport à l'eau.

- Capacité élevée d'érosion des sols combinée à une érosion durable pendant les inondations.
- Variabilité saisonnière de la distribution des précipitations et de la production de sédiments dans le bassin.

d) Classe IV : modèle rectiligne plus boucle : (Single line plus a loop)

L'hystérésis de type « single line plus loop » signifie que les apports solides à l'exutoire se font de façon plus ou moins uniforme au cours de la crue. Cela est probablement provoqué par deux ensembles de facteurs :

Tout d'abord, en fin de saison les matériaux facilement et rapidement disponibles sont plus rares et l'érosion de versant est plus uniforme au cours de l'évènement pluvieux. Ensuite, contrairement aux crues de début de saison, les écoulements profonds, peu chargés en matières en suspension, contribuent au débit du cours d'eau, diluant la concentration des matières en suspension.

b) Classe V : Le modèle en forme de huit (figure eight) :

L'hystérésis en forme de huit combine des parties de la classe II (Clockwise loop) et III (counterclockwise loop). Il indique d'abord un maximum des concentrations en premier, on a souvent la formation d'une boucle dans le sens des aiguilles d'une montre. Toutefois, dans certaines conditions, se développe une boucle en forme de huit indépendamment des pics des variables. Les deux parties du huit sont dirigées séquentiellement dans des directions opposées. Le rapport C/Q_1 pour différentes valeurs de Q explique l'orientation des courbes en fonction du temps sous une forme en huit pour les relations $C-Q_1$. En effet, bien que les maximums des concentrations et des débits arrivent au même moment, l'augmentation de C est plus rapide que celle de Q_1 et le pic de la concentration vient avant celui du débit. Ceci donnera une boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre, pendant la montée de la crue. Après, le pic la concentration diminue doucement en fonction du temps, relativement aux débits liquides, pendant la décrue et on obtient une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (A.Bouanani, 2003).

Le tableau 73 présente une description détaillée de tous les modèles graphiques. Pour chaque classe on trouve le type de modèle, les critères de liaison les concentrations et les débits liquides utilisés, ainsi que leurs références.

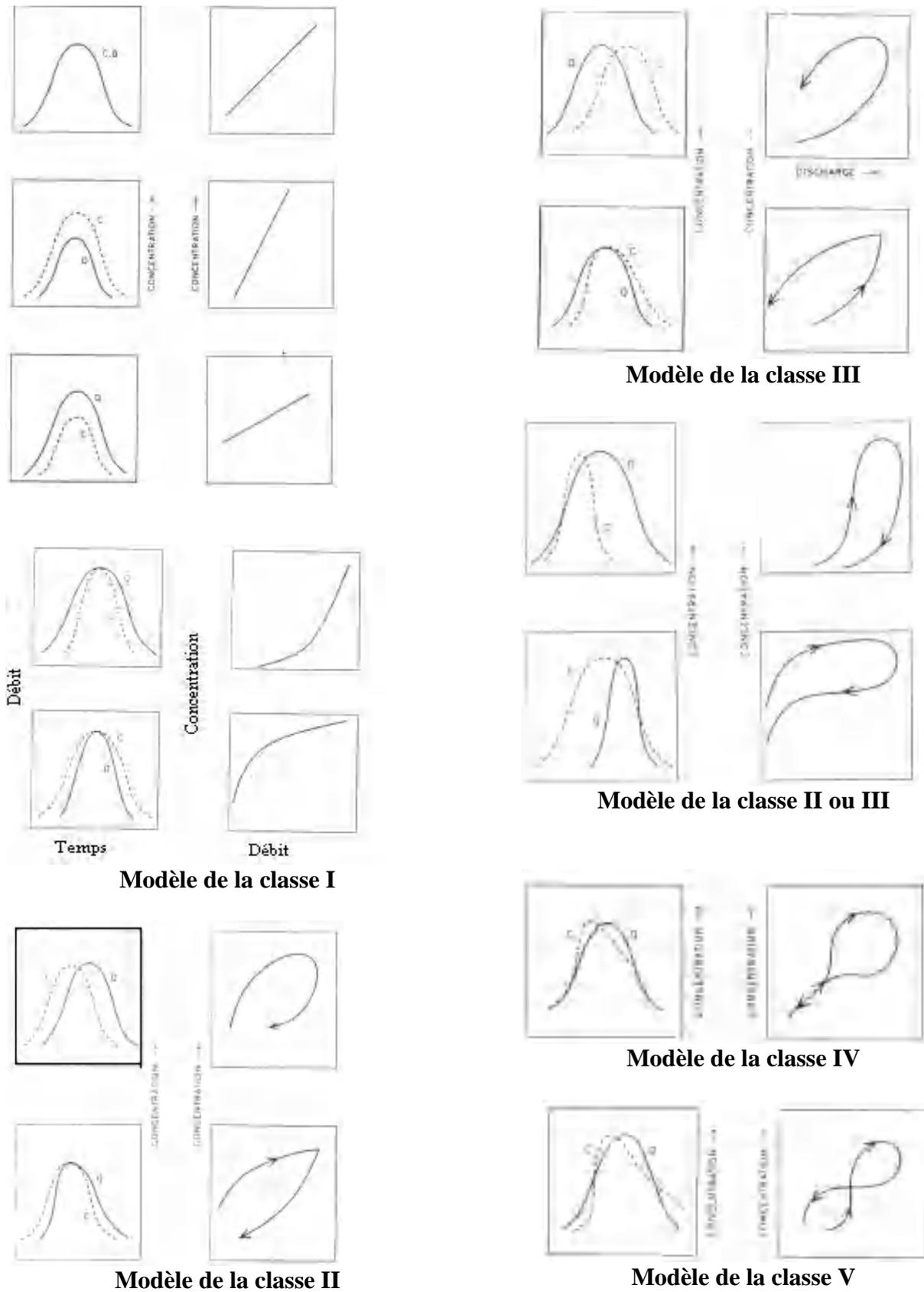


Fig. 156 : Modèles des relations C/Q (G.P.Williams 1989)

Tableau 73 : Types de boucles d'hystérésis (d'après Williams, 1989).

Classe	Modèle	Critère C/Q	Référence
I	-Courbe simple (single line), ligne droite	$-(C/Q)_{\text{montée}} \approx (C/Q)_{\text{décrue}}$, les pentes des deux sections montée et décrue sont égales.	Wood (1977)
	-Courbe, la pente croit quand Q_1 augmente	-Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales.	
	-Courbe, la pente décroît quand Q_1 augmente	-Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales.	
II	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop)	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$ pour toutes les valeurs de Q.	Williams (1989)
III	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop)	$C/Q_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$ pour toutes les valeurs de Q.	Axelson (1967)
IV	Linéaire simple plus une boucle (single line plus a loop)	$-(C/Q)_{\text{montée}} \approx (C/Q)_{\text{décrue}}$ pour une partie des valeurs de Q. $(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$ pour une autre partie des valeurs de Q.	/
V	Forme en huit (figure eight)	$-(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$ pour une partie des valeurs de Q. $(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$ pour l'autre partie des valeurs de Q.	Amborg et al. (1967)

6.10.2. La sélection des crues et méthodologie

Le manque de mesures continues sur une échelle temporelle a rendu le choix des crues les plus représentatives difficile. Ceci est dû aux limitations des techniques utilisées où à cause des coûts opérationnels dans la réalisation des mesures extensifs sur le terrain.

Les crues sélectionnées pour l'analyse de la concentration de sédiments en suspension pendant les crues sont au nombre de 40 crues, dont 11 crues au bassin Kebir Hammam, 18 au bassin Reboa et 11 crues au bassin de Oued El Hai. Elles ont été choisies sur la base des critères suivants:

- la réalisation d'un hydrogramme complet et non complexe;
- la prise en compte de l'ensemble des facettes des crues (fortes, faibles et modérées);
- la fréquence d'échantillonnage;
- le temps de montée;
- la côte maximale atteinte.

L'approche adoptée pour l'analyse des processus d'hystérésis est la suivante:

a) Dans un premier temps on analyse graphiquement l'évolution temporelle de la concentration des matières en suspension (C) et du débit (Q_1), puis la relation C en fonction de Q (Figure 43).

b) Dans un second temps, on classe chaque hystérésis selon les critères de Williams (1989) décrits plus haut.

Le flux des matières solides en suspension exportées par le cours d'eau durant la période des crues est calculé par la relation suivante (eq.56):

$$As = \sum_{i=0}^n \frac{(C_i * Q_{li}) + (C_{i+1} * Q_{li+1})}{2} (t_i - t_{i+1}) \quad (56)$$

Où :

C_i est la concentration des sédiments en suspension en (g/l) mesurée à l'instant t_i correspondant au débit liquide Q_{li}, t_{i+1} - t_i le pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs.

Le Tableau 74 synthétise les caractéristiques statistiques des crues choisies tels que : La valeur maximale, La médiane, La moyenne, le coefficient de variation l'asymétrie et l'aplatissement des deux variable.

6.10.3. Résultats et interprétations

La figure 157, représente les tracés de quelques courbes ainsi que l'hystérésis dominantes trouvées entre les concentrations et des débits liquides. Pour plus de détails, le reste des représentations graphiques des crues est fourni en annexe 9.

L'évolution des concentrations lors des crues dans les quatre réseaux d'observation a montré une forte variabilité liée à la distribution hydro-climatologique. A l'exception des crues du bassin Kebir Hammam où les valeurs de concentrations varient peu, en comparaison avec les débits liquides, les concentrations dans les deux bassins Reboa et Oued El Hai changent considérablement d'une crue à une autre. Les plus fortes valeurs de concentrations ne correspondent pas obligatoirement à de fortes valeurs de débits liquides. A travers les trois bassins, les plus fortes concentrations sont enregistrées à Oued El Hai. La maximale étant de 468 g/l est enregistrée lors de la crue du 9 Octobre 1983, correspondant à un débit liquide de presque 36 m³/s. Majoritairement, elles correspondent aux saisons de pluies et des hautes eaux.

Tableau 74 : Les paramètres statistiques des crues sélectionnées par bassin.

N°	Date	Variables	Nb. d'obs	Valeur Max	Médiane	Moyenne	Ecart -type	CV	Asymétrie	Aplatissement
Bassin Kebir Hammam										
1	Crue du 5 et 6 janvier 1971	Q	6	69,06	7	16,84	25,9	1,4	2,32	5,5
		C		3	0,75	1,07	1,01	0,87	1,83	3,53
2	Crue du 16 et 17 janvier 1971	Q	9	164,35	59	64,4	51,51	0,75	0,83	0,46
		C		7,3	1,7	2,86	2,44	0,81	0,97	-0,66
3	Crue du 29 et 30 mars 1971	Q	6	174,4	116,75	112,63	52,29	0,46	-0,85	1,11
		C		4,6	1,55	2,02	1,38	0,68	1,65	3,03
4	Crue du 19 et 20 janvier 1972	Q	7	222,6	64,34	100,41	94,06	0,94	0,32	-2,38
		C		9,08	3,05	4,04	3,09	0,77	0,62	-0,93
5	Crue du 10 à 11 mars 1972	Q	6	133	59,5	62,5	46,58	0,68	0,43	-0,59
		C		7,78	2,35	3,14	3,08	0,9	0,63	-1,36
6	Crue du 17 et 19 février 1975	Q	30	118,2	62,2	55,03	39,77	0,71	-0,12	-1,79
		C		4,3	2,43	2,08	1,43	0,67	-0,07	-1,43

Tableau 74 (Suite) : Les paramètres statistiques des crues sélectionnées par bassin.

N°	Date	Variables	Nb. d'obs	Valeur Max	Médiane	Moyenne	Ecart -type	CV	Asymétrie	Aplatissement
7	Crue du 8 février 1976	Q	14	64,82	41,25	41,98	14,83	0,35	-0,33	0,27
		C		4,42	2,64	2,66	1,42	0,54	-0,3	-1,15
8	Crue du 3 et 4 avril 1978	Q	29	82,5	53,95	48,98	27,83	0,56	-0,23	-1,2
		C		1,62	0,58	0,72	0,46	0,63	0,51	-0,78
9	Crue du 14 janvier 1979	Q	13	23,46	17,64	14,33	6,73	0,45	-0,75	-0,36
		C		5,66	4,16	3,03	1,99	0,63	-0,11	-2,1
10	Crue du 6 et 7 mars 1980	Q	13	34,09	11,92	14,27	8,13	0,57	1,43	1,76
		C		16,48	2,94	6,6	6,73	1,02	0,77	-1,43
11	Crue du 11 et 12 janvier 1996	Q	6	85,78	32,18	38,88	27,96	0,66	0,96	0,41
		C		5,5	3,57	3,51	1,29	0,34	0,41	-0,35
Bassin Reboa										
1	6 mars 1986	Q	9	13,300	6,190	7,740	3,045	0,393	0,782	-0,710
		C		0,510	0,490	0,477	0,030	0,063	-0,980	0,063
2	9 octobre 1986	Q	7	16,48	10,46	9,75	6,94	0,66	-0,49	-1,67
		C		19,86	19,48	19,34	0,4	0,02	-0,5	-0,43
3	8 juin 1988	Q	11	17,68	10,2	10,39	4,75	0,44	-0,04	0,61
		C		27,21	25	24,99	1,33	0,05	-0,3	-0,12
4	30 septembre 1988	Q	14	182	129	127,16	40,48	0,31	-0,31	-0,97
		C		122,63	52,08	56,7	19,02	0,32	3,71	13,83
5	13 novembre 1988	Q	9	8,240	3,016	3,696	2,534	0,686	0,787	-0,706
		C		79,980	76,340	50,492	32,733	0,648	-0,267	-2,565
6	20 juin 1989	Q	11	45,500	17,600	20,047	14,210	0,709	0,411	-0,83
		C		48,090	11,200	16,715	15,205	0,910	1,753	1,79
7	23 janvier 1990	Q	8	53,560	40,200	37,020	16,059	0,434	-1,939	4,64
		C		17,620	13,740	11,603	5,891	0,508	-0,426	-2,14
8	8 avril 1990	Q	9	16,480	10,460	10,381	5,501	0,530	-0,283	-1,74
		C		41,700	34,040	27,864	15,608	0,560	-1,492	0,57
9	15 et 16 Octobre 1995	Q	9	12,060	3,700	4,349	4,118	0,947	0,738	-0,23
		C		77,220	51,610	43,636	29,909	0,685	-0,105	-2,41
10	29 mars 2004	Q	13	39,600	4,200	14,041	15,127	1,077	0,910	-1,03
		C		92,610	18,840	27,906	26,274	0,941	1,496	2,08
11	2 novembre 2004	Q	6	2,500	0,805	1,146	0,901	0,787	0,820	-1,13
		C		25,670	16,990	15,195	10,919	0,719	-0,335	-2,23
Bassin Timgad										
1	6 mars 1986	Q	5	3,5	0,81	1,16	1,39	1,08	1,62	2,78
		C		18,64	17,32	13,62	7,16	0,47	-1,64	2,36
2	5 juin 1989	Q	5	2,15	0,53	0,71	0,82	1,03	1,93	4
		C		33,97	29,59	23,6	12,68	0,48	-1,46	1,71
3	14 juillet 1989	Q	4	49,5	6,79	15,78	22,77	1,25	1,85	3,52
		C		64,47	39,46	36,31	31,51	0,75	-0,2	-4,79
4	23 janvier 1990	Q	5	5,1	3,05	2,52	1,87	0,66	0,34	-1,05
		C		30,06	4,73	8,91	11,88	1,19	2,18	4,8
5	31 mars 1991	Q	6	3,35	1,1	1,41	1,11	0,72	1,22	1,18
		C		6,59	3,49	3,44	2,22	0,59	0,2	-1,31
6	9 mars 1992	Q	5	11,21	5,66	5,17	4,36	0,75	0,33	-0,79
		C		2,36	1,8	1,59	0,74	0,42	-1,4	2,86
7	12 mars 1995	Q	5	60,5	8,85	17,99	25,22	1,25	1,68	2,76
		C		4,38	2,27	2,61	1,13	0,39	0,96	1,76

Tableau 74 (Suite) : Les paramètres statistiques des crues sélectionnées par bassin.

N°	Date	Variables	Nb. d'obs	Valeur Max	Médiane	Moyenne	Ecart -type	CV	Asymétrie	Aplatissement
Bassin Oued El Hai										
1	30 mars 1974	Q	6	12,3	7,94	7,67	3,06	0,4	0,18	0,07
		C		55,6	19,25	23,73	20,3	0,86	0,7	-0,64
2	15 septembre 1974	Q	4	91,3	10	27,92	43,13	1,34	1,77	3,11
		C		177,88	55	76,44	74,58	0,85	1,11	0,06
3	20 octobre 1978	Q	4	83,1	39,12	40,46	38,27	0,95	0,12	-3,64
		C		71,6	63,35	55,18	22,64	0,41	-1,62	2,52
4	29 janvier 1979	Q	7	7,38	2,80	3,31	1,92	0,54	1,96	4,47
		C		37,00	27,60	24,57	11,31	0,43	-1,89	4,70
5	31 octobre 1982	Q	12	182	113,56	103,71	62,28	0,57	-0,36	-1,34
		C		91,8	51,4	54,35	27,02	0,48	0,14	-1,52
6	30 novembre 1982	Q	5	23,6	2,18	9,04	11,17	1,11	0,7	-2,66
		C		26,1	15,6	15,04	9,05	0,54	-0,36	-0,13
7	9 octobre 1983	Q	15	35,70	0,79	5,93	10,08	1,64	2,21	5,01
		C		468,00	258,00	298,21	136,17	0,44	-0,49	-0,43
8	13 mai 1985	Q	16	15,42	7,5	7,59	3,67	0,48	0,57	0,78
		C		335	203	191,98	117,54	0,61	-0,27	-1,49
9	7 octobre 1985	Q	7	42,6	24	19,67	16,98	0,8	0,03	-1,99
		C		59,6	46,5	41,56	19,67	0,44	-1,71	3,3
10	30 septembre 1986	Q	11	147	38,18	54,52	55,29	1,01	0,8	-1,07
		C		71,7	34,05	38,09	24,28	0,64	0,34	-1,51
11	3 avril 1989	Q	6	8,10	3,90	4,51	2,82	0,57	0,38	-1,59
		C		7,70	3,70	4,02	2,21	0,50	0,88	0,58

Les résultats de la mise en graphes des crues révèlent que les relations entre les débits liquides et les concentrations sont caractérisées essentiellement par trois formes d'hystérésis à travers les trois bassins. En effet, la concentration maximale peut précéder ou succéder le maximum du débit liquide d'un à plusieurs jours, le cas observé dans d'autres systèmes mondiaux (Asselman. 1999 ; Sammori et al. 2004; Coynel et coll. 2005; A. Mano et al. 2009).

Des boucles d'hystérésis (54% des crues) au bassin Kebir Hammam (Tableau 77), dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop) caractérisent la majorité des crues qui surviennent essentiellement en hiver (particulièrement le mois de Janvier) et au début du printemps (le mois de Mars). Le pic des concentrations arrive précocement par rapport à celui du maximum des débits liquides (Heidel, 1956). Cette hystérésis pourrait indiquer l'existence de sources de sédiments à proximité du cours d'eau. Ceci montre l'importance des rigoles et ravines passagères, situées dans les zones proches du cours d'eau dans l'exportation de sédiments en suspension du bassin versant. Cette situation peut être aussi obtenue lorsqu'il y a une réduction des matériaux en suspension juste avant l'obtention du débit maximal (Arnborg et al, 1967; Wood, 1977; Battala & Sala, 1992, in A.Benkhaled, 2003) ou une limitation d'approvisionnement en matériaux (Moog & Whiting, 1998, in A.Benkhaled, 2003). A titre d'exemple les crues 1, 2, 4, 5, 10 et 11 illustrent cet effet. La plus importante de celles sélectionnées a été enregistrée le 19 janvier 1972. Elle a transporté un volume de 51 555 tonnes par jour, ce qui correspond à 65% de l'apport mensuel et 42% de l'apport de l'année. La concentration maximale étant de 9,81 g/l correspondant un débit liquide de 223 m³/s.

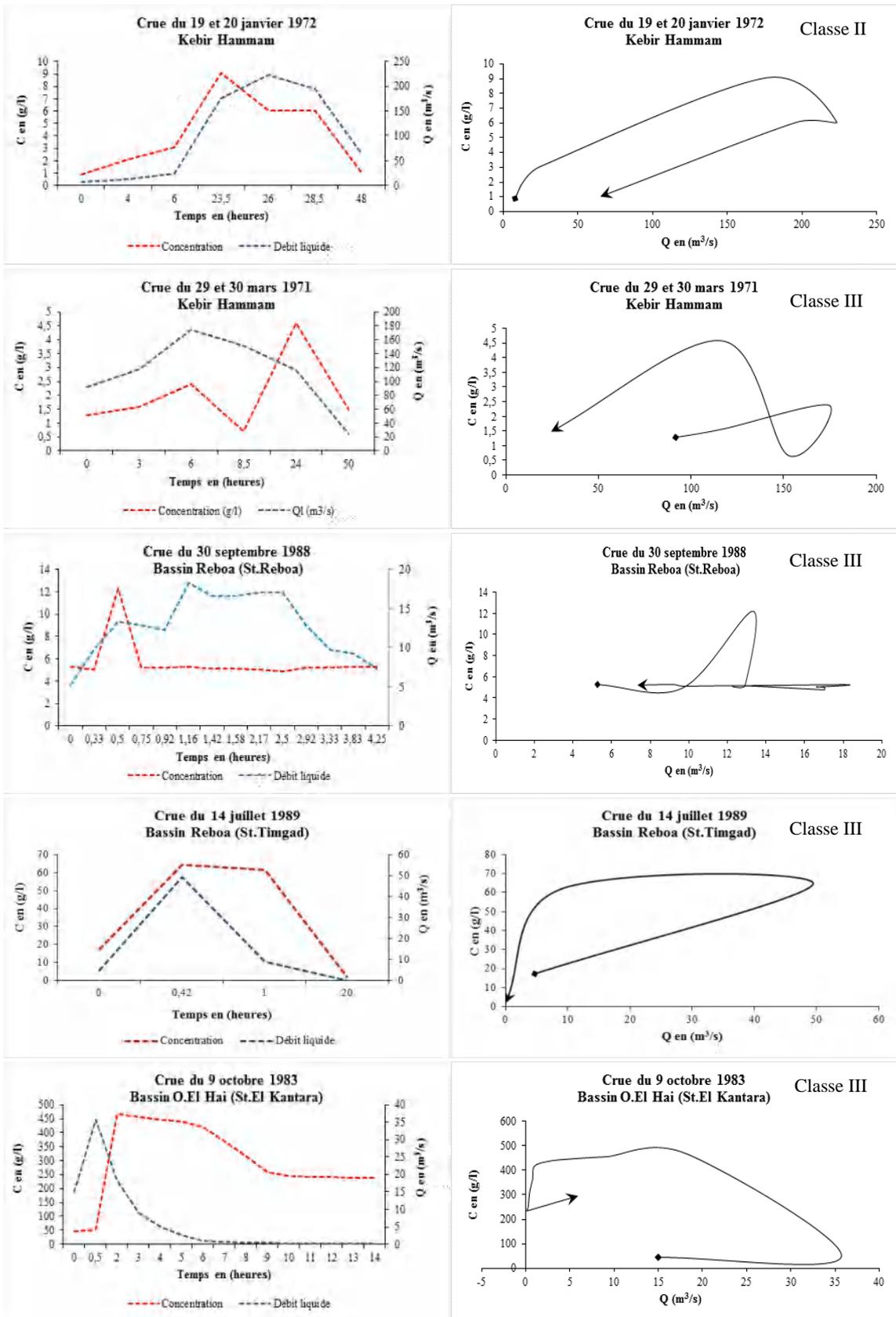


Fig. 157 : Exemples de l'évolution temporelle des concentrations (g/l) et du débit liquide Q_1 (m^3/s) dans les stations des trois bassins ; mise en évidence des phénomènes d'hystérésis dans la relation $C=f(Q)$.

Les résultats de la mise en graphes des crues révèlent que les relations entre les débits liquides et les concentrations sont caractérisées essentiellement par trois formes d'hystérésis à travers les trois bassins. En effet, la concentration maximale peut précéder ou succéder le maximum du débit liquide d'un à plusieurs jours, le cas observé dans d'autres systèmes mondiaux (Asselman, 1999; Sammori et al, 2004; Coynel et coll, 2005; A. Mano et al, 2009).

Des boucles d'hystérésis (54% des crues) au bassin Kebir Hammam (Tableau 75), dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop) caractérisent la majorité des crues qui surviennent essentiellement en hiver (particulièrement le mois de Janvier) et au début du printemps (le mois de Mars). Le pic des concentrations arrive précocement par rapport à celui du maximum des débits liquides (Heidel, 1956). Cette hystérésis pourrait indiquer l'existence de sources de sédiments à proximité du cours d'eau. Ceci montre l'importance des rigoles et ravines passagères, situées dans les zones proches du cours d'eau dans l'exportation de sédiments en suspension du bassin versant. Cette situation peut être aussi obtenue lorsqu'il y a une réduction des matériaux en suspension juste avant l'obtention du débit maximal (Arnborg et al, 1967; Wood, 1977; Battala & Sala, 1992, in A.Benkhaled, 2003) ou une limitation d'approvisionnement en matériaux (Moog & Whiting, 1998, in A.Benkhaled, 2003). A titre d'exemple les crues 1, 2, 4, 5, 10 et 11 illustrent cet effet (tableau 75). La plus importante de celles sélectionnées a été enregistrée le 19 janvier 1972. Elle a transporté un volume de 51 555 tonnes par jour, ce qui correspond à 65% de l'apport mensuel et 42% de l'apport de l'année. La concentration maximale étant de 9,81 g/l correspondant un débit liquide de 223 m³/s.

La deuxième classe concerne 36 % des crues sélectionnées à savoir la crue 6,7, 8 et 9. Elles surviennent essentiellement à la fin de la saison printanière (Février et Avril) et en hiver (Janvier). Leur boucle d'hystérésis en forme d'un huit (figure eight) mélange les causes des deux courbes II et III. La boucle dans le sens des aiguilles d'une montre suivi d'une hystérésis dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Elle indique plusieurs sources d'alimentation des cours d'eau en sédiments. Elles peuvent provenir d'un apport de sédiments du lit du cours d'eau et de ses berges ou des zones éloignées des bassins ou encore d'un stockage dans de petits bassins et leur raccordement ultérieur après remplissage ou/et par la capacité du transport de l'écoulement.

Pour cette classe, la crue du 8 Février est la plus importante. Elle a transporté un volume journalier de 5 873 tonnes, ce qui correspond à 79 % de l'apport du mois et 23 % de l'apport de l'année.

L'analyse des processus d'hystérésis sur les crues du bassin Reboa et Oued El Hai montre que la majorité sont de type antihoraire (Tableau 76, 77 et 78), pour 64% des crues à Reboa et 72% des crues à Oued El Hai) et en forme de huit pour 23% à Reboa et 9% à Oued El Hai. La première indique que le pic des concentrations des matières en suspension (C) est atteint après celui du débit liquide (Q_i). Cette classe d'hystérésis caractérise surtout les crues de la saison printanière au bassin Reboa et de la saison d'Automne à Oued El Hai.

Aux deux saisons, Automne et Printemps, les sols qui ont pour caractéristique d'être saturés et généralement couverts par une végétation saisonnière plus ou moins importante résistent mieux aux pluies. De plus, les eaux d'écoulement se retrouvent moins chargées en début de ces crues car la quasi-totalité des sédiments du lit a été exportée lors de la première. Ce qui implique une arrivée

tardive des matières en suspension par rapport aux débits liquides et la contribution de sédiments par une source éloignée (montagneuse) du site des stations de mesures (Coynel, 2005) et/ou par l'érosion et l'affaissement des berges juste après le pic de crue (Williams, 1989 ; Ashbridge, 1995) consécutives à des vitesses de courant élevées et à des contraintes de détachement.

Le type antihoraire caractérise également quelques crues qui parviennent au début de la saison estivale au bassin Reboa. Les dernières fortes pluies qui tombent sur des sols déjà engorgés d'eau et les eaux d'écoulement étant également déchargées de sédiments lors du printemps.

A titre d'exemple, la crue importante du 9 octobre au sous bassin Reboa a transporté 6063 tonnes /jour (Tableau 76), ce qui représente 13 % de l'apport total du mois et 5 % de l'apport total de l'année. Tandis que dans le bassin de Oued El Hai, les crues engendrent toujours des apports importants. Sur les 11 crues sélectionnées, ils varient de $0,7 \times 10^3$ tonnes (3 Avril 1989) à 52×10^3 tonnes par jour (Tableau 78).

Ces résultats confirment ceux obtenus précédemment par mesures ou modélisations. Les crues participent à mobilisé d'importants volumes de sédiments lors des fortes pluies avec des périodes qui diffèrent à travers les bassins.

Tableau 75 : Les paramètres caractéristiques des relations C-Q en montée de crue et en décrue pour les crues du bassin Kebir Hammam –Station Ain Charchar-

Date crue	Critère	Forme et caractéristique de la boucle	Classe	Asj (tonnes)
5 et 6 janvier 1971	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, $A_s > 0$, $A_p > 0$	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle et moins large	II	6579,13
16 et 17 janvier 1971	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, $A_s > 0$, A_p varie pour C et Q	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle et moins large	II	6472,25
29 et 30 mars 1971	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax après Qmax, A_s varie pour C et Q, $A_p > 0$	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	5754,69
19 et 20 janvier 1972	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, $A_s > 0$, $A_p < 0$	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle et moins large	II	51555,52
10 à 11 mars 1972	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, $A_s > 0$, $A_p < 0$	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle et moins large	II	5448,25
17 et 19 février 1975	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax pour une partie puis, $(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, $A_s < 0$, $A_p < 0$	Boucle en forme de huit	V	4838,47
8 février 1976	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax pour une partie puis, $(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax après Qmax, $A_s < 0$, A_p varie pour C et Q	Boucle en forme de huit	V	5873,44
3 et 4 avril 1978	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax pour une partie puis, $(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, A_s varie pour C et Q, $A_p < 0$	Boucle en forme de huit	V	2304,68
14 janvier 1979	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax pour une partie puis, $(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax après Qmax, $A_s < 0$, $A_p < 0$	Boucle en forme de huit	V	2324,85
6 et 7 mars 1980	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, $A_s > 0$, A_p varie pour C et Q	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle est fermé	II	1114,83
11 et 12 janvier 1996	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, $A_s > 0$, A_p varie pour C et Q	Sens des aiguilles d'une montre	II	1833,88

Tableau 76 : Les paramètres caractéristiques des relations C-Q en montée de crue et en décrue pour les crues du bassin Reboa –Station Reboa-.

Date crue	Critère	Forme et caractéristique de la boucle	Classe	Asj (Tonnes)
6 mars 1986	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As<0, Ap<0	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	116
9 octobre 1986	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As<0, Ap<0	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	6063
8 juin 1988	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As<0, Ap<0	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	5246
30 septembre 1988	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As<0, Ap<0	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	1093
13 novembre 1988	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As<0, Ap<0	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	229
20 juin 1989	/	Single events	/	8796
23 janvier 1990	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As varie pour C et Q, Ap varie pour C et Q	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle est large	III	11987
8 avril 1990	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As<0, Ap<0	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	6162
15 et 16 Octobre 1995	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax pour une partie puis, $(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax apres Qmax, As<0, Ap<0	Boucle en forme de huit	V	603
29 mars 2004	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As<0, Ap<0	Boucle en forme de huit	V	1319
2 novembre 2004	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As varie pour C et Q, Ap varie pour C et Q	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle est large	II	300

Tableau 77 : Les paramètres caractéristiques des relations C-Q en montée de crue et en décrue pour les crues du bassin Reboa –Station Timgad-.

Date crue	Critère	Forme et caractéristique de la boucle	Classe	Asj (tonnes)
6 mars 1986	(C/Q) montée >(C/Q) décrue, Cmax =Qmax pour une partie puis, (C/Q)montée<(C/Q)décrue, Cmax =Qmax, As<0, Ap varie pour C et Q	Boucle en forme de huit	V	427
5 juin 1989	(C/Q)montée<(C/Q)décrue, Cmax avant Qmax, As varie pour C et Q, Ap>0	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	222
14 juillet 1989	(C/Q)montée<(C/Q)décrue, Cmax =Qmax, As varie pour C et Q, Ap varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	6091
23 juin 1990	(C/Q)montée<(C/Q)décrue ,Cmax =Qmax, As >0, Ap varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	2753
31 mars 1991	(C/Q) montée >(C/Q) décrue, Cmax avant Qmax , As>0, Ap varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	V	185
9 mars 1992	(C/Q)montée<(C/Q)décrue, Cmax =Qmax, As >0, Ap varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	277
12 mars 1995	(C/Q)montée >(C/Q)décrue, Cmax avec Qmax, As>0, Ap>0	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle	II	655

Tableau 78 : Les paramètres caractéristiques des relations C-Q en montée de crue et en décrue pour les crues du bassin Oued El Hai –StationEl Kantara-.

Date crue	Critère	Forme et caractéristique de la boucle	Classe	Asj (tonnes)
30 mars 1974	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As > 0, Ap varie pour C et Q	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle est large	II	21083
15 septembre 1974	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avant Qmax, As > 0, Ap varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	5554
20 octobre 1978	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax après Qmax, As varie pour C et Q, Ap varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	39896
29 janvier 1979	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, As > 0, Ap varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	3079
31 octobre 1982	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax pour une partie puis, $(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, As varie pour C et Q, Ap < 0	Boucle en forme de huit	V	14275
30 novembre 1982	$(C/Q)_{\text{montée}} > (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, As varie pour C et Q, Ap < 0	Sens des aiguilles d'une montre et la boucle est rétrécit	II	5306
9 octobre 1983	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax apres Qmax, As varie pour C et Q, Ap varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	38959
13 mai 1985	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, As varie pour C et Q, Ap < varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	52562
7 octobre 1985	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, As varie pour C et Q, Ap varie pour C et Q	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	15270
30 septembre 1986	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, As > 0, Ap < 0	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	76192
3 avril 1989	$(C/Q)_{\text{montée}} < (C/Q)_{\text{décrue}}$, Cmax avec Qmax, As varie pour C et Q, Ap > 0	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre	III	697

6.11. Conclusion

Ce chapitre a pour but d'estimer la production du transport solide dans trois bassins à caractères topographiques, hydrologiques et climatiques différents. Ils alimentent trois barrages importants dans la région Est Algérienne : les barrages Zit Emba, Koudiet M'daouar et les Fontaines des Gazelles.

La modélisation des débits solides et liquides par des relations en puissance dans les quatre stations de surveillances hydrométriques a montré sa précision dans deux bassins seulement à savoir : *Reboa* et *Oued El Hai*. Les deux modèles « mensuel » et « hautes et basses eaux » respectivement retenus pour le bassin *Reboa* et le bassin de *Oued El Hai*, en tenant compte de la correction des valeurs par le CF2 de Duan, produisent des résultats nettement meilleurs par la sommation des modèles individuels. La précision étant de +3% dans les deux modèles par bassin.

La projection des modèles sur des périodes additionnées et non mesurées aux dates des mesures bathymétriques a montré que les modèles montrent des sous-estimations par rapport aux mesures bathymétriques, mais elles restent négligeables et attestent de nouveau la faisabilité des deux modèles choisis. La précision est estimée à -3% à *Reboa* et -7% à *Oued El Hai*, ce qui est acceptable. Néanmoins, les quatre échelles temporelles des débits solides et liquides modélisés dans le bassin *Kebir Hammam* sont plus difficiles à développer. Les marges d'erreurs étant plus importantes.

Il ressort que la dynamique érosive diffère spatialement et temporellement. Le bassin *Kebir Hammam* produit annuellement 93 067 tonnes, ce qui correspond à une dégradation spécifique de 82 tonnes/km²/an. Le bassin *Reboa* produit beaucoup plus, un apport annuel de 165 958 tonnes, ce qui correspond à une dégradation de 300 tonnes/km²/an. Quoique qu'il baisse à *Oued El Hai*, l'apport de ce bassin reste important. Il produit annuellement un apport de 163 980 tonnes, soit, une dégradation de 140 tonnes /km²/an. Ces valeurs se repèrent dans la fourchette des valeurs estimées par un bon nombre d'auteurs. A. Demmak, 1982 a estimé une dégradation spécifique de 91 tonnes/km²/an pour le bassin *Kebir Hammam*. Dans les bassins des pays Maghébins, la dégradation spécifique estimée par Probst et Suchet varient par bassin de 400 à 610 tonne /km²/an, A. Bouanani a donné une valeur de 170 tonnes /km²/an sur *Oued Sikkak*; Bourouba, 104 tonnes /km²/an sur *Oued Leham*; etc.

Sur une échelle annuelle, mensuelle et saisonnière, les apports varient considérablement au sein du même bassin ou à travers les bassins. Les plus grands apports saisonniers s'observent en hiver (56%) au bassin *Kebir Hammam*, au printemps (48%) à *Reboa* et en Automne à *Oued El Hai*.

Lors des crues majeures, l'étude de la relation concentration et débit liquide a montré des boucles d'hystérésis dans le sens des aiguilles d'une montre au bassin *Kebir Hammam*. Les sédiments transportés proviennent des zones proches des stations de mesures. Contrairement, à *Oued El Hai* et *Reboa*, les concentrations et débits liquides suivent une évolution dans le sens

contraire d'une montre (anti-horaire). Les sédiments proviennent des zones éloignées, plus haut sur les versants.

Cependant, il reste à identifier les sources de sédiments. Celle-ci peut être réalisable en complétant ce travail quantitatif par une analyse cartographique qui permettra la délimitation des zones sensibles et susceptibles d'être productrices de sédiments.

Chapitre
LES ZONES SENSIBLES A L'EROSION
DANS LES BASSINS

7

7.1. Introduction

L'avenir de la qualité des eaux et l'augmentation de la durée de vie des ouvrages de stockage sont liés à la maîtrise de l'érosion des sols sur les versants ou au bord des cours d'eau. Afin d'y parvenir, une approche rationnelle qui consisterait d'abord à délimiter les zones émettrices de sédiments, est inévitable.

La cartographie des zones sensibles à l'érosion hydrique est de la sorte un outil indispensable. Celle-ci permet non seulement de spatialiser les parties sensibles à l'aléa érosion dans les bassins, mais aussi, de les classer par degré d'érosivité dans le but d'une bonne gestion intégrée des systèmes hydrologiques des bassins et une conception rapide des activités nécessaires de lutte anti-érosive.

La démarche pour cerner ces zones sensées être productrices de sédiments, est basée sur des modèles qualitatifs. Elle cherche à combiner dans un Système d'Information Géographique (SIG), des paramètres simples explicatifs et intervenants dans le déclenchement des phénomènes érosifs. Cette approche fournira d'abord une base de données cartographique des facteurs choisis. Ensuite, chaque facteur sera, hiérarchisé et classé par degré d'érodibilité (Dumas, 2010) avant de procéder à un croisement sous forme de combinaisons logiques, pour aboutir au final à des cartes de sensibilité à l'érosion hydrique par bassin. Plusieurs travaux de recherche locaux ou régionaux ont été effectués dans ce sens afin d'étudier la sensibilité des sols à l'érosion hydrique, parmi eux, celui de le Bissonais et al (2002), de Dumas (2004), de Luneau (2006) et d'Atherton et al. (2005).

La réalisation, l'identification et la délimitation des zones sensibles à l'érosion sont fondées dans ce travail sur quatre facteurs :

- **Les pentes** qui interviennent essentiellement comme facteur d'aggravation des phénomènes d'érosion hydrique, et en conséquence réduisent les surfaces cultivables et augmentent le risque « transport de sédiments » dans les cours d'eau ;

- **l'occupation du sol** qui joue un rôle tampon contre l'érosion puisqu'elle permet d'absorber l'énergie cinétique des gouttes de pluie, ralentit l'écoulement ou encore maintient une bonne porosité du sol ;

- **la lithologie** qui détermine le degré de sensibilité des différents types de sols face à l'érosion et des produits d'altération de la roche mère à être désagrégés et emportés par le ruissellement;

- **La pluie** qui, par son intensité et son volume possède un effet de battance sur le sol, effet proportionnel au volume d'eau ruisselé (Wischmeier et Smith, 1978, in S.Touahir, 2018).

7.2. Méthodologie de travail

La méthodologie suivie est purement cartographique. Elle repose sur l'utilisation du Modèle Numérique de Terrain M.N.T et des cartes précédemment acquises aux chapitres 2 et 3 réalisées par le logiciel ARCGIS. Ce dernier est un support d'intégration idéal de ces données multiples (pentes, couvert végétal, lithologie,...), caractéristiques du milieu et de l'érosion hydrique. Il permet de recueillir, d'organiser, de gérer, de traiter (croiser, interroger) et de présenter des informations localisées dans un même référentiel géographique afin d'atteindre un objectif de gestion.

La méthode se présente sous forme d'un arbre de décision, permettant le croisement hiérarchique des facteurs choisis et donnant comme résultats une carte finale de sensibilité à l'érosion. Ces croisements sont garantis par une classification et une codification préalable de ces facteurs selon leur degré de sensibilité à l'érosion.

Les croisements sont de la sorte réalisés en trois niveaux et les étapes suivies sont les suivantes (Fig.158) :

- Création d'une base de données en sélectionnant les facteurs de l'érosion à étudier.
- Mise au point du modèle sur le système d'information géographique SIG.
- Codification des facteurs par degré de sensibilité, à travers l'attribution d'un indice : sensibilité : Faible = 1, Moyenne = 2, Forte = 3 et Très forte = 4.
- Cartographie de sensibilité potentielle de terrains, établie à partir d'un premier croisement de cartes pentes et occupation des sols (niveau 1) et un deuxième par le résultat de cette dernière et la carte des formations lithologiques (niveau 2).
- croisement de la carte de sensibilité potentielle de terrains avec celle des précipitations moyennes annuelles (niveau 3), pour une carte finale de sensibilité à l'aléa érosion. Celle-ci permet un zonage typologique des aléas permettant de localiser les zones sensibles ou susceptibles d'être sources de sédiments.

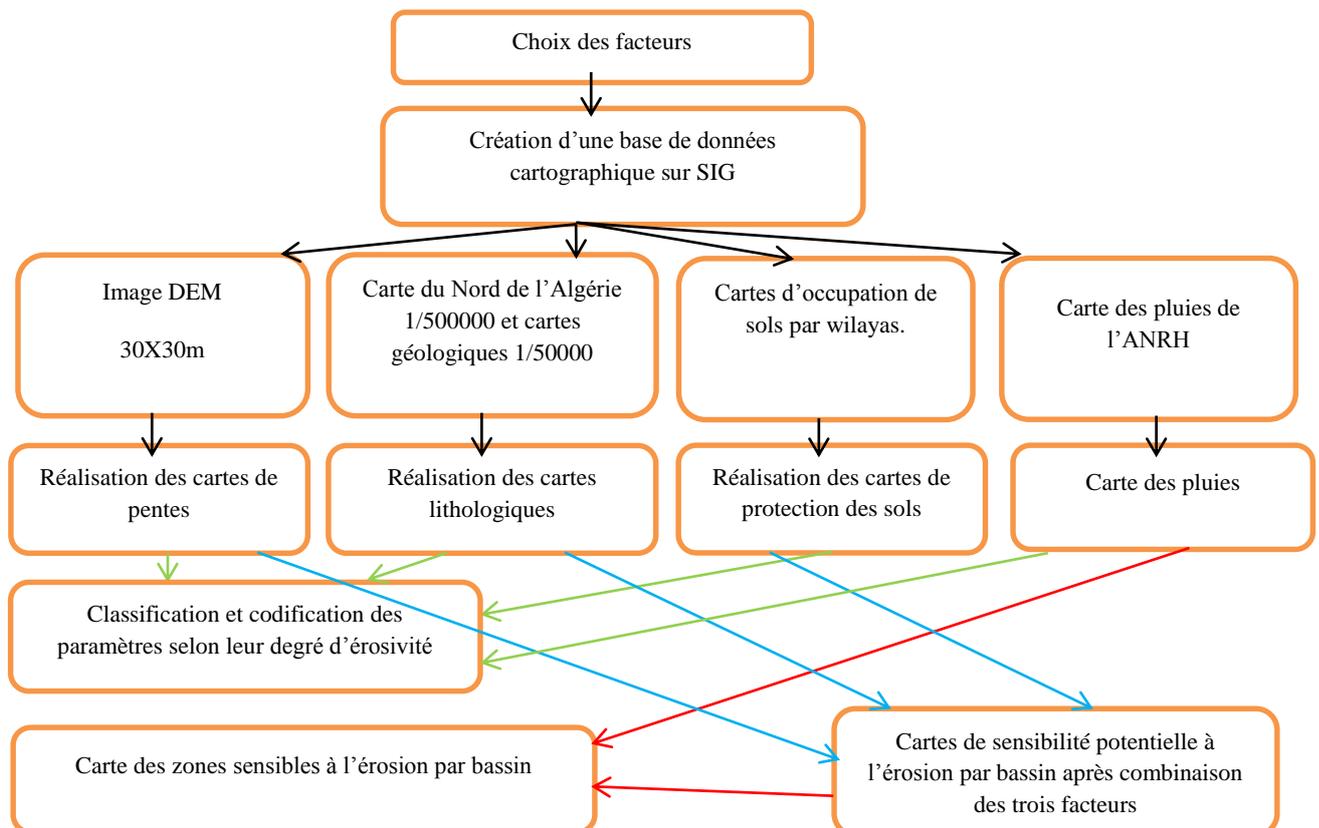


Fig. 158 : Schéma méthodologique pour le croisement de cartes

Pour davantage de rationalité, il a été jugé utile d'intégrer des images satellitaires fournies par Google Earth Pro. Ces dernières permettent de visualiser les phénomènes érosifs sur les

versants à quelques mètres du sol (près de 30 mètres). La précision est surprenante, certaines photos représentent même des détails en 3 dimensions.

Il s'agit maintenant de détailler les différentes étapes de notre démarche appliquée pour la réalisation de ces cartes.

7.3. Classification et codification des facteurs par degré de sensibilité à l'érosion

La définition des différents critères de base passe par une codification des informations brutes extraites des cartes sus-citées ou du M.N.T. Cette phase est totalement liée à la connaissance des caractéristiques topographiques, géologiques et morfo-climatiques des trois bassins.

7.3.1. Le facteur pente

La pente est le premier facteur à prendre en considération la sensibilité des sols à l'érosion hydrique. À partir du modèle numérique de terrain, cette variable est calculée (dérivée première de l'altitude). Une hiérarchisation en quatre classes en fonction de son influence sur les phénomènes érosifs (Tableau 79) est définie par les déclivités suivantes :

- De 0 à 7 % représente une sensibilité à l'érosion faible. Elle regroupe les surfaces planes des bassins.
- De 7 à 12,5% représente une sensibilité à l'érosion moyenne. Elle regroupe les surfaces planes à ondulées.
- De 12,5 à 25% représente une sensibilité à l'érosion forte. Elle englobe les terrains ondulés.
- Au-delà de 25 %, une sensibilité très forte et réunit les terrains montagneuses.

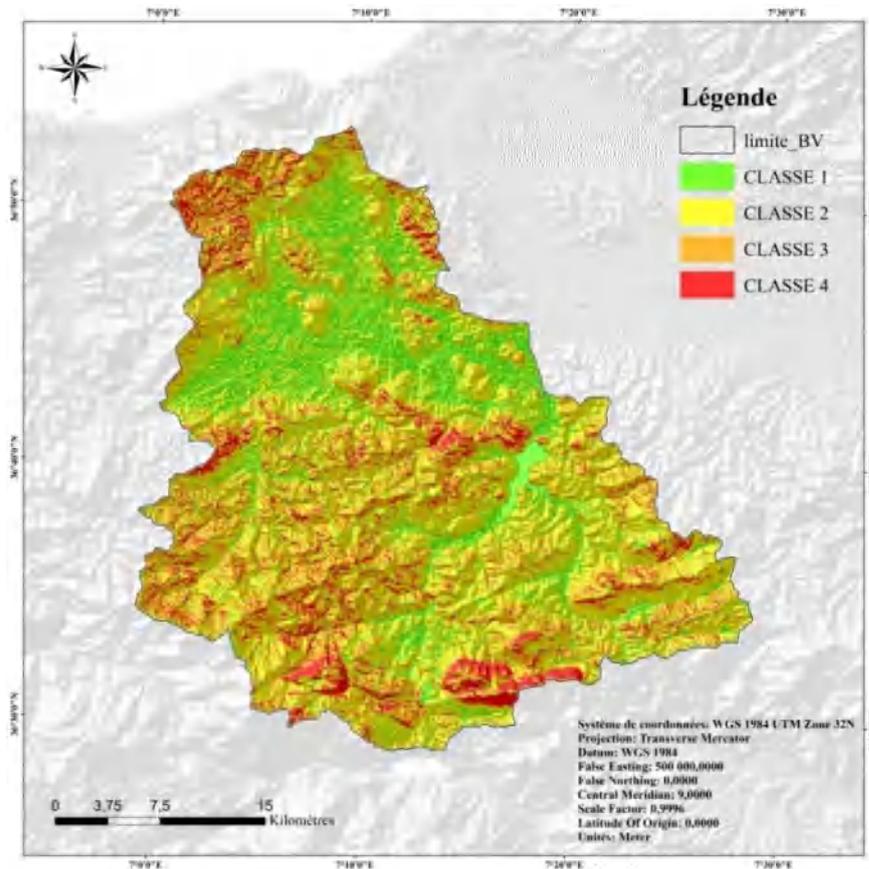
Tableau 79 : Codification des pentes

Limites pentes	Morphologie	sensibilité à l'érosion	Code
< 7%	Plane	Faible	1
7-12,5 %	Plane-ondulée	Moyenne	2
12,5-25 %	Ondulée	Forte	3
>25 %	Ondulée-montagneuse	Très forte	4

Les cartes de sensibilité au relief montrent que la classe 4 (supérieures à 25 %) n'est pas assez répandue sur le territoire des trois bassins. Elle représente 9 % au bassin Kebir Hammam, près de 1% au bassin Reboa et de 3 % au bassin Oued El Hai.

Dans le bassin Kebir Hammam, les pentes de classe 3 sont prépondérantes (Fig. 159). Elles représentent plus de 40 % de la superficie totale du bassin. Cette classe est localisée essentiellement au Sud dans le territoire du sous-bassin Oued Hammam. Elle caractérise les

versants des forts reliefs. Tandis que, la classe 1 marque surtout les bords des cours d'eau de Oued Hammam et ses affluents et représente un taux de 22 % du total du bassin.



**Fig. 159 : Sensibilité à l'érosion selon la pente
–Bassin Kebir Hammam–**

Les secteurs Nord du bassin Reboa sont loin d'être à risque, les pentes sont inférieures à 7% sur plus de 55% de sa surface (Fig. 160). Les classes 2, 3 et 4 qui dépassent les 7 % et plus 25 % se situent au Sud du bassin et représentent près de 50% de la superficie totale du bassin. Celles-ci caractérisent les reliefs montagneux des Aurès qui présentent des conditions topographiques favorables à l'érosion.

La classe 1 des pentes caractérise le bassin de Oued El Hai (Fig.161). Elle représente plus de 51 % du territoire du bassin. Elle est suivie respectivement par les classe 2 (28 %) et la classe 3 (18 %).

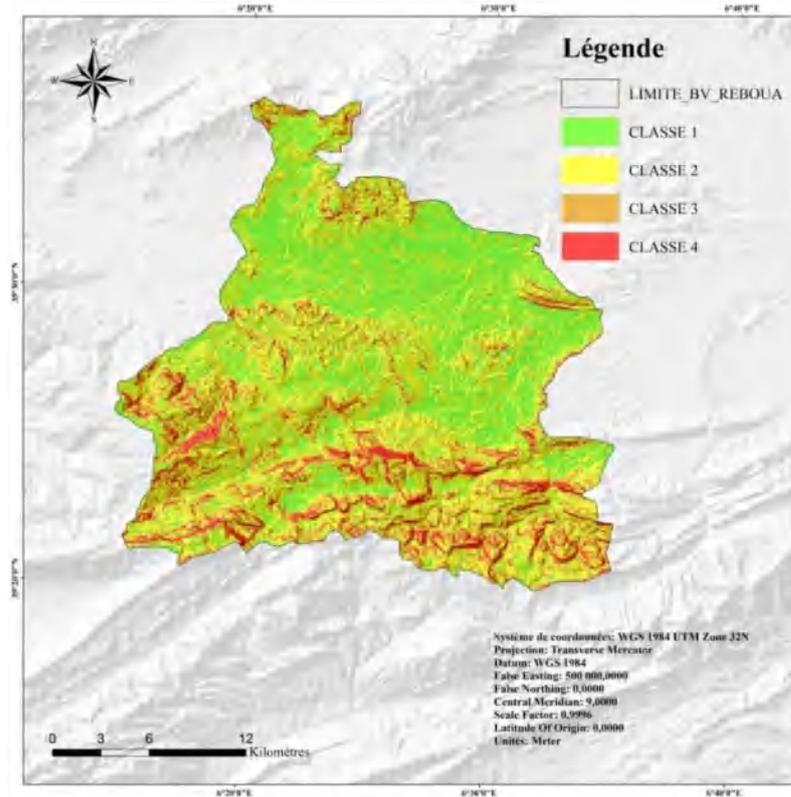


Fig. 160 : Sensibilité à l'érosion selon la pente
–Bassin Reboa-

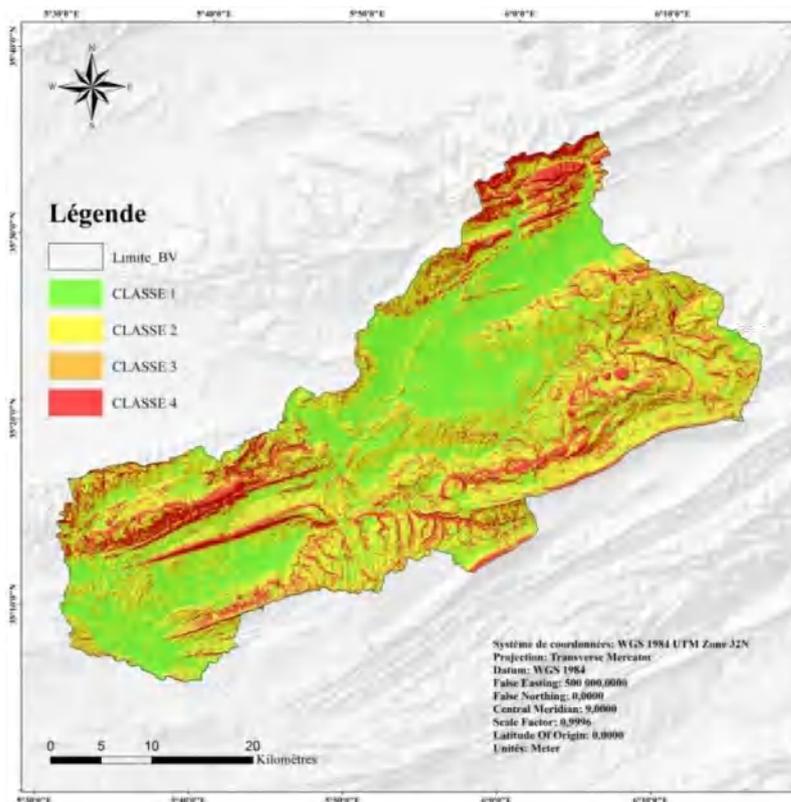


Fig. 161 : Sensibilité à l'érosion selon la pente
–Bassin Oued El Hai-

7.3.2. Occupation et protection du sol

Les données d'occupation du sol sont issues des cartes réalisées par le BNEDER (Bureau National d'Études pour le Développement Rural, 2012) et supervisées par Google Earth. Les classes des formations végétales sont définies en fonction de leur taux de recouvrement. Une hiérarchisation est réalisée en attribuant une valeur d'érodibilité allant de 1 à 4 aux différentes classes d'occupation du sol.

Les forêts possèdent à titre d'exemple une couverture végétale dense, limitant fortement les processus érosifs, elles se voient attribuer dans la codification le chiffre 1 (Protection très forte contre l'érosion hydrique). Deux autres classes se succèdent et déterminent un degré de protection du sol entre fort et moyen (Tableau 80). La première concerne l'arboriculture et les cultures maraichères désignées par le chiffre 2. La deuxième, les grandes cultures notamment les céréalicultures qui offre une protection moindre saisonnières et courte, elles portent le chiffre 3.

Les zones nues représentent la plus faible protection contre l'érosion et sont signalées par le chiffre 4. Elles sont directement exposées aux phénomènes érosifs. Les plans d'eau telle que les cuvettes des barrages sont hors classe.

Tableau 80 : Codification de l'occupation du sol

Occupation du sol	Protection contre l'érosion hydrique	Code
Forêt maquis et reboisement	Très forte	1
Zone urbaine	Très forte	1
arboriculture	Forte	2
culture maraichère	Forte	2
grande culture	Moyenne	3
Zone de parcours	Faible	4
Zone nue	Faible	4
Plan d'eau	/	non codifié

Les résultats font apparaitre quatre classes de sensibilité dans le bassin *Kebir Hammam*, trois degrés de sensibilité dans les bassins de *Reboa* et *Oued El Hai* (Tableau 81).

Les classes 1 et 3 se partagent le territoire du bassin *Kebir Hammam* (Fig. 162). La première correspond aux espaces forestiers qui couvrent des aires dispersées dans le bassin. Elle représente un taux de plus de 50% de la superficie totale du bassin. Cette classe apporte au bassin une protection maximale contre les effets érosifs. La classe 3, quant à elle désigne les espaces cultivés pour une courte durée dans l'année. Elle représente également un pourcentage important de plus de 44% de la superficie totale du bassin.

La classe 4 à haut risque érosif est négligeable. Elle se situe toutefois au Sud-Est du bassin, précisément dans la partie amont Ouest qui alimente le barrage *Zit Emba*. Elle ne représente qu'un espace très localisé de presque 2% de la surface totale du bassin mais est émettrice de volumes importants de sédiments vers le barrage de *Zit Emba*.

Tableau 81 : Classification du facteur occupation du sol par bassin.

Code	Kebir Hammam		Reboa		Oued El Hai	
	ha	%	ha	%	ha	%
1	<u>57073</u>	<u>50,32</u>	<u>17985</u>	<u>31,22</u>	<u>83174</u>	<u>52,59</u>
2	3584	3,16	0	0,00	14428	9,12
3	<u>50281</u>	<u>44,33</u>	<u>26830</u>	<u>46,58</u>	0	0,00
4	1889	1,67	12387	21,50	<u>60189</u>	<u>38,06</u>
Plans d'eau	600	0,53	399	0,69	361	0,23
Total	113427	100,01	57601	100	158152	100

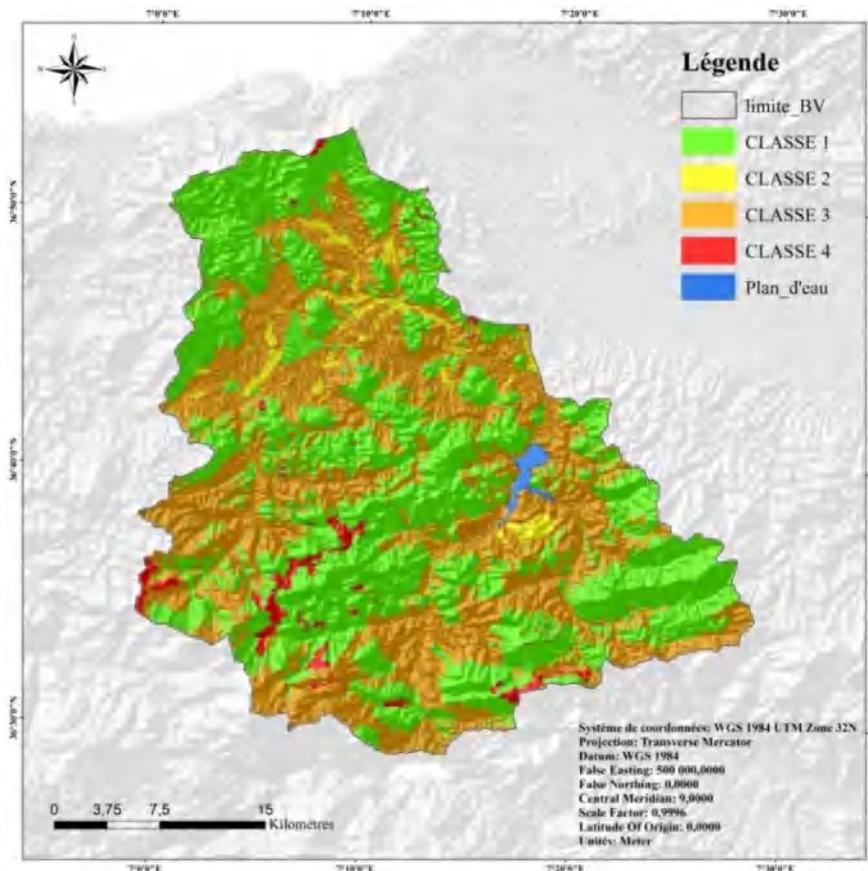
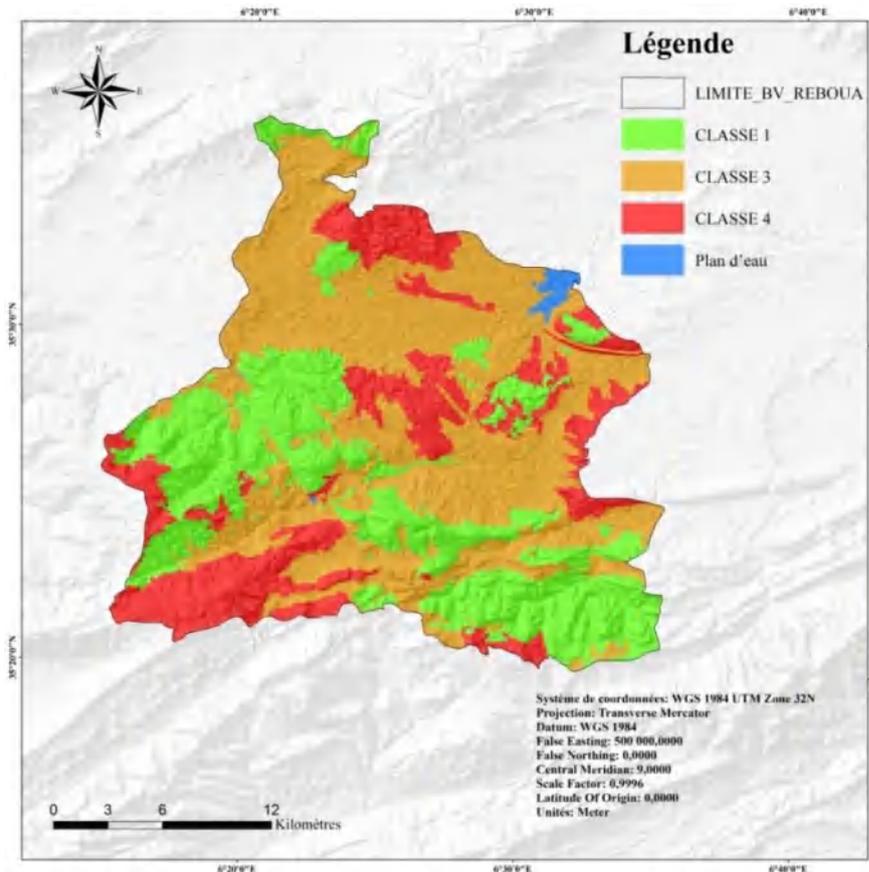


Fig. 162 : Sensibilité à l'érosion selon l'occupation du sol
-Bassin Kebir Hammam-

Le bassin *Reboa* est globalement bien protégé dans sa partie Sud constituée essentiellement d'un couvert végétal dense de forêts et de maquis localisés dans les djebels Draas Es Sedra et Bouhmar à l'Est et Ras Lmoudjene au Sud-Est (Fig. 163). Elles représentent un taux de plus de 30% de sa surface. Les classes 3 et 4 susceptibles de produire de l'érosion représentent le reste de la surface du bassin, soit 68 %. Celles-ci sont principalement situées dans sa partie supérieure Nord. Ces zones incluent également de faibles surfaces d'arboriculture de classe 2 dont la délimitation demande plus de précision.



**Fig. 163 : Sensibilité à l'érosion selon l'occupation du sol
-Bassin Reboa-**

Le classement de la végétation dans le bassin de *Oued El Hai* par degré de sensibilité à l'érosion montre trois classes (Fig. 164). D'une manière générale, la classe 1 fournit une protection maximale, elle concerne les parties Nord-Est du bassin. Elle regroupe les forêts de Ras El Gueddelene, Djebel Bous, Djebel Tuggurt et représente un taux de plus de 50% de la superficie totale du bassin.

La classe 4 est constituée par les parcours situés essentiellement au Sud du bassin et les sols pratiquement nus durant toute l'année. Elle concerne une superficie de plus 60100 hectares, soit 38 % de la superficie totale du bassin.

La classe 2 est de moindre importance. Elle ne représente qu'une petite surface du bassin (9%), occupée par des cultures maraichères et quelques îlots de cultures céréalières. Les sols en culture maraichère sont particulièrement sujets à l'érosion hydrique et à la compaction à cause des conditions climatiques souvent difficiles au Printemps et à l'Automne.

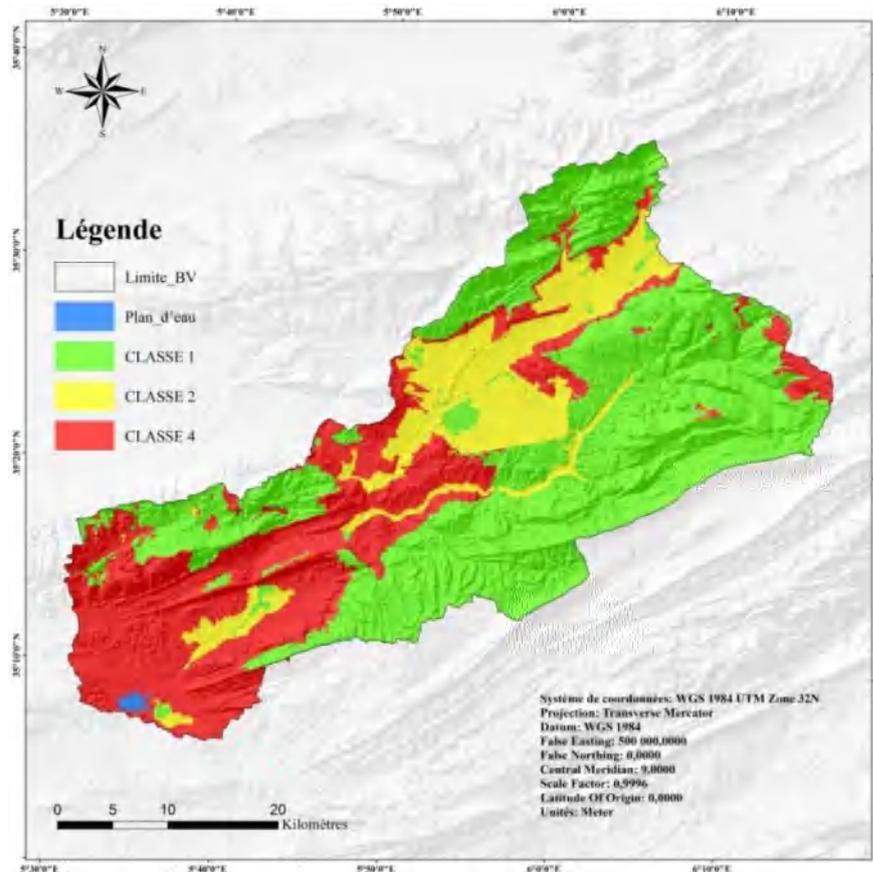


Fig. 164 : Sensibilité à l'érosion selon l'occupation du sol
–Bassin Oued El Hai–

7.3.3. La géologie des formations superficielles lithologiques

Le troisième facteur retenu est lié à la nature des formations lithologiques, et à leurs impacts sur l'érodibilité des terrains. Celles-ci subissent un classement selon les critères suivants : la cohésion, la granulométrie, la résistance aux effets érosifs et l'altération en surface.

Cette démarche reste principalement descriptive des formations géologiques, mais permet de renseigner sur les formations les plus sensibles à l'érosion et aux mouvements de terrain.

Les 26 formations géologiques répertoriées à travers les trois bassins ont été divisées en quatre classes selon les critères suivants (Tableau 82).

a) Classe 1 : concerne les formations faiblement sensibles (code 1) et regroupe les formations gneissiques, gréseuses, dolomitiques triasiques et calcaires. Elle constitue 36% du bassin Kebir Hammam (Fig. 165), près de 4% du bassin Reboa et plus de 13% du bassin Oued El Hai (Fig. 166, 167 et Tableau 83).

b) Classe 2 : concerne les formations moyennement sensibles à l'érosion, telles que les formations à structures alternées de :

- Conglomérats à grés micacés,
- Grés, argile schisteuses,
- Calcaires et marno-calcaires,
- Sables grossiers, grés, flysch localement phosphatés et les calcaires marneux.

Cette classe apparait dans les deux bassins, Kebir Hammam et Oued El Hai avec des taux respectifs de presque 17 % et 35%.

Tableau 82 : Codification des formations lithologiques.

Type	Sensibilité à l'érosion hydrique	Classe
Gneiss, micaschistes et marbres.	Faible	1
Grés.	Faible	1
Grés grossiers, grés sableux bruns.	Faible	1
Dolomies.	Faible	1
Trias marin ou lagunaire.	Faible	1
Calcaires.	Faible	1
Conglomérats à grés micacés.	Moyenne	2
Grés, argile schisteuses.	Moyenne	2
Calcaires et marno-calcaires.	Moyenne	2
Sables grossiers, grés, flysch localement phosphatés.	Moyenne	2
Calcaires et marnes.	Moyenne	2
Alluvions anciennes et récentes.	Forte	3
Flysch.	Forte	3
Grés et marnes rouges.	Forte	3
Marnes, grés et sables bruns-rouges.	Forte	3
Marnes rouges à gypses, grés, conglomérats, brèches.	Forte	3
Marnes et calcaires marneux	Forte	3
Marnes rouges à gypses, grés, conglomérats, brèches.	Forte	3
Marnes noires avec des bancs calcaires.	Forte	3
Marnes, calcaires, grés localement phosphatés.	Forte	3
Marnes et calcaires.	Forte	3
Marnes blanches, calcaires localement.	Très forte	4
Marnes noires, marnes crayeuses à la base, localement.	Très forte	4
Marnes et marno-calcaires.	Très forte	4
Marnes noires, marnes crayeuses à la base localement.	Très forte	4
Marnes.	Très forte	4

Tableau 83 : Classes et répartition des formations lithologiques par bassin.

Classification de la lithologie						
Kebir Hammam			Reboa		Oued El Hai	
1	415,03	36,59	19,67	3,41	216,89	13,71
2	187,91	16,57	0,00	0,00	554,84	35,08
3	476,12	41,98	462,33	80,26	321,52	20,33
4	49,13	4,33	90,02	15,63	484,66	30,64
Plans d'eau	6,00	0,53	3,99	0,69	3,61	0,23
Total	1134,19	100	576,01	100	1581,52	100

c) **Classe 3** : concerne les formations fortement sensibles à l'érosion regroupant les formations suivantes :

- Alluvions anciennes et récentes.
- Flysch.
- Grés et marnes rouges.
- Marnes, grés et sables bruns-rouges.
- Marnes rouges à gypses, grés, conglomérats, brèches.
- Marnes et calcaires marneux
- Marnes rouges à gypses, grés, conglomérats, brèches
- Marnes noires avec des bancs calcaires
- Marnes, calcaires, grés localement phosphatés Marnes et calcaires.

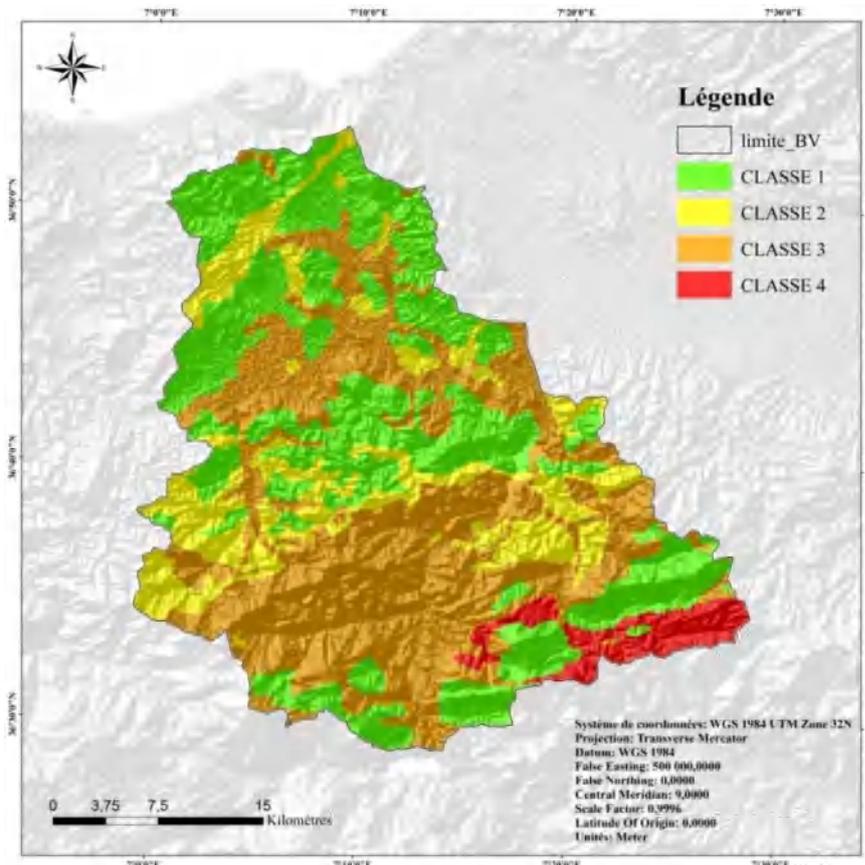


Fig. 165 : Sensibilité à l'érosion selon la nature lithologique des roches
-Bassin Kebir Hammam-

Elles représentent d'importantes surfaces dans les différents bassins, 42% de la surface totale du Kebir Hammam et 80 % de Reboa. Pour le Kebir Hammam cette classe occupe essentiellement la partie Sud du bassin alimentant le barrage de Zit Emba. A Reboa, elle intéresse toute la surface du bassin. Dans le bassin de Oued El Hai, elle se situe dans la partie amont du barrage des Fontaines des Gazelles et au Nord-Est du bassin. Elle concerne 20 % de la surface du bassin.

d) Classe 4 : Il s'agit des formations très sensibles aux processus érosifs telles que les :

- Marnes blanches, et les calcaires.
- Marnes noires, marnes crayeuses à la base, et gypses.
- Marnes et marno-calcaires
- Marnes noires, marnes crayeuses
- Marnes.

Les formations à haut risque érosif sont insignifiantes au bassin Kebir Hammam. Elles s'observent au Sud-Est du bassin et représentent à peine 4% de la superficie totale. A Reboa, elles couvrent 15% de la surface totale du bassin et pratiquement le double dans le bassin de Oued El Hai (30%).

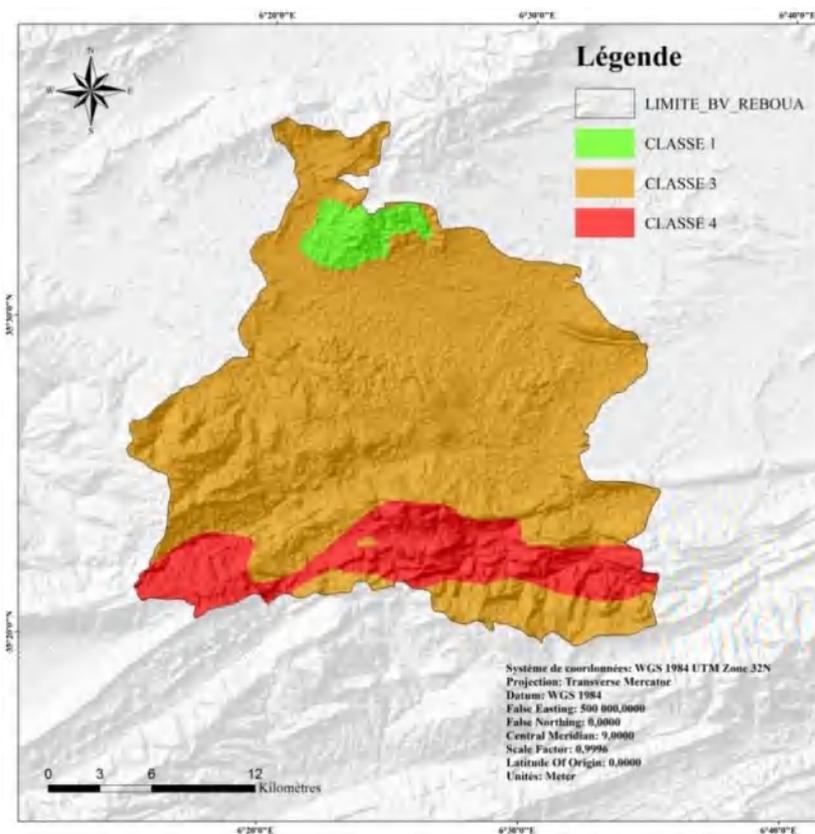


Fig. 166 : Sensibilité à l'érosion selon la nature lithologique des roches - Bassin Reboa-

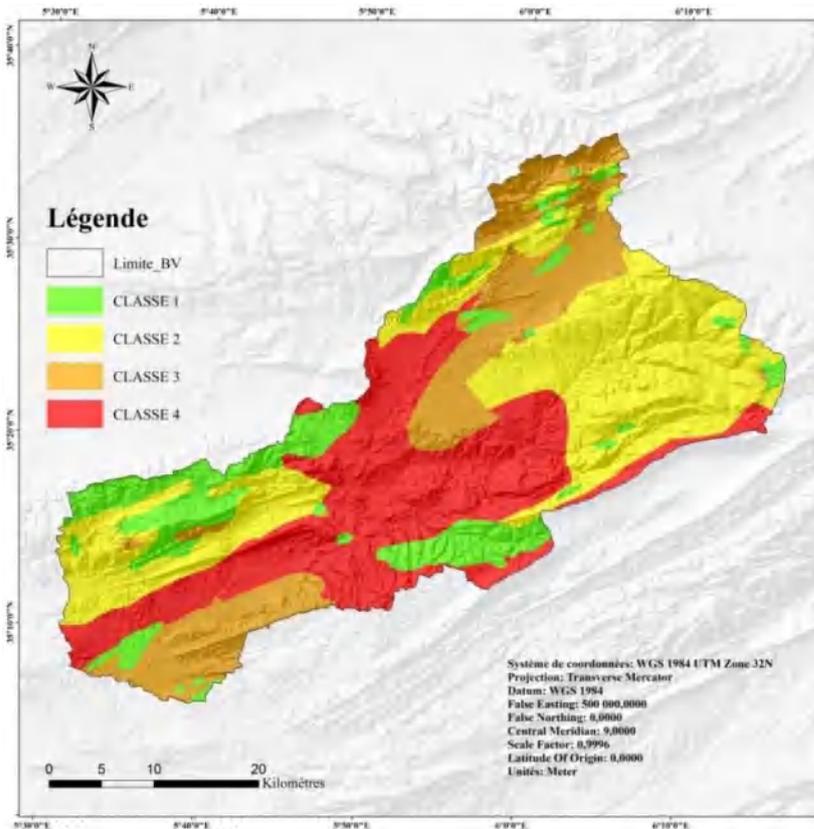


Fig. 167 : Sensibilité à l'érosion selon la nature lithologique des roches - Bassin Oued El Hai

7.3.4. Les pluies

Ordinairement, l'arrachement des particules du sol est le résultat de l'impact de l'intensité des pluies (effet de splash). Cette dernière varie en fonction du degré d'humectation du sol et de la dégradation de sa surface avant le début de la pluie (Lafforgue, 1978 ; Boiffin, 1984 ; Rahelarisoa, 1986 ; Casenave et Valentin, 1989). En générale, il n'existe pas une intensité limite de pluie en-dessous de laquelle on n'observe des ruissellements. Certains travaux la limite toutefois à une valeur maximale instantanée de 7 mn, d'autres de 15 mn, ou encore de 30 mn.

Pour une étude telle que la nôtre, de telles informations auraient pu être d'un grand apport. Seulement, elles sont inaccessibles et le recours aux pluies moyennes annuelles peut s'avérer intéressant puisque celles-ci sont liées à la formation des écoulements sur les versants ou à l'augmentation de la hauteur des eaux dans les cours d'eau.

Les cartes des pluies apparaissent dans l'annexe 10. Elles ont été réalisées sur la base de la carte établie par l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH) de l'année 2003 et les classes prises en compte sont codifiées et représentées dans le tableau 84 suivant :

Tableau 84 : Codification des pluies par classe.

Pluies moyenne annuelle	Sensibilité à l'érosion	Code
< 250 mm	Faible	1
250-500	Moyenne	2
500-700	Forte	3
> 700 mm	Très forte	4

7.4. La combinaison des facteurs

Une fois les facteurs déterminés, il s'agit alors d'intégrer les résultats obtenus précédemment dans un modèle arborescent. Par ordre d'importance, nous avons choisi une hiérarchie privilégiant les facteurs sur lesquels les activités humaines peuvent avoir une influence. Le croisement des facteurs a été réalisé en trois niveaux et dans l'ordre suivant : les pentes, l'occupation des sols et la lithologie.

A la suite du croisement de ces facteurs, 4 classes (faible, moyenne, forte et très forte), exprimant la sensibilité potentielle à l'érosion des bassins sont définies. Cette sensibilité potentielle des terrains est ensuite combinée avec les données des pluies moyennes annuelles pour aboutir à un aléa d'érosion, également réparti en quatre classes.

7.4.1. Croisement des deux facteurs pente/occupation des sols

Le premier croisement de ces deux facteurs permet de distinguer 4 classes dans les deux bassins Kebir Hammam et Oued El Hai et 3 seulement dans le de bassin Reboa. La classe 1 de faible sensibilité est déclassée dans ce dernier, les terrains étant à pentes faibles (classe 1) et occupés par une végétation saisonnière de classe 3 (Tableau 85).

Tableau 85 : Répartition des superficies par classe du croisement de la pente/occupation des sols.

Classes	Superficie					
	Kebir Hammam		Reboa		Oued El Hai	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
1	16,51	1,46	0,00	0,00	188,54	11,92
2	230,49	20,36	163,36	28,36	358,00	22,64
3	841,83	74,36	312,25	54,21	707,70	44,75
4	37,19	3,28	96,40	16,74	323,67	20,47
Plan d'eau	6,13	0,54	3,99	0,69	3,61	0,23
Total	1132,15	100	575,99	100	1581,52	100

En générale, la zone à potentiel érosif modéré dans le bassin Kebir Hammam est fortement représentée avec une superficie de plus de 841 km², soit plus de 74% de la superficie totale du bassin (Fig. 168). Les pentes généralement faibles à moyennes sont le domaine d'activités agricoles saisonnières très importantes telles que la céréaliculture. La Classe à potentiel érosif élevée (classe 4) est restreinte et bien localisée dans le bassin. Elle occupe les massifs de Guettara, Regouba, Chbebik, Ferfour, situés à l'extrémité Sud-Ouest du bassin. Sa superficie est estimée à 37 km², soit 3,2 % de la superficie totale du bassin.

La première et la deuxième classe se localisent au bord des cours d'eau, Oued Emcheckel et Oued Hammam. Elles apparaissent sous forme de filets et présentent au total près de 22 % de la surface totale du bassin.

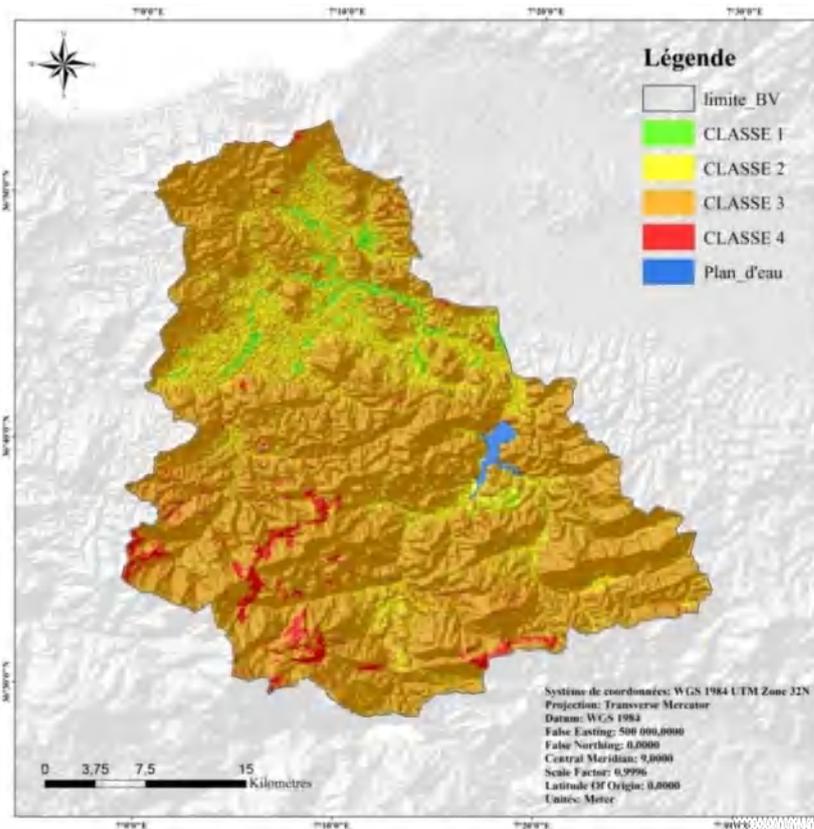


Fig. 168 : Sensibilité potentielle à l'érosion 1 – Bassin Kebir Hammam-

La situation est semblable pour les deux bassins Reboa et Oued El Hai (Fig. 169 et 170). La classe dominante est la classe 3, classe forte. Elle représente 54 % au bassin Reboa et près de 45 % de la superficie totale du bassin Oued El Hai. Elle correspond généralement aux terrains à faibles pentes à couverture végétale temporaire dans l'année. Le reste des classes suit le même ordre dans les deux bassins, excepté pour la classe 1 qui apparaît exclusivement dans le bassin de Oued El Hai. Elle représente une superficie de plus de 188 km², soit 11% de la superficie totale du bassin.

Les classes à sensibilité forte sont plus ou moins importantes dans les deux bassins (Reboa et Oued El Hai). Leur répartition dans le bassin Reboa est plutôt morcelée. Elles couvrent les pentes fortes dénudées des monts de Oued Taga au Sud-Ouest du bassin, le centre du bassin (à l'Ouest de la ville de Timgad) et au Nord sur Djebel Tagratine. Sa superficie est de 96 km², ce qui correspond à plus de 16% de la surface totale du bassin. En revanche cette classe domine au Sud-Est du bassin de Oued El Hai où elle occupe près de 21% de la surface.

7.4.2. Croisement des trois facteurs pente /occupation et lithologie (cartes potentielles d'érosion)

Les images composites (Fig. 171, 172 et 173), résultat de la combinaison des facteurs pentes, occupation des sols et lithologie aboutissent à une spatialisation de l'érosion potentielle des sols. En générale, les trois bassins gardent la dominance de la même classe 3, qui désigne des pentes faibles à fortes, une occupation des sols saisonnière et une érodibilité moyenne à forte des sols.

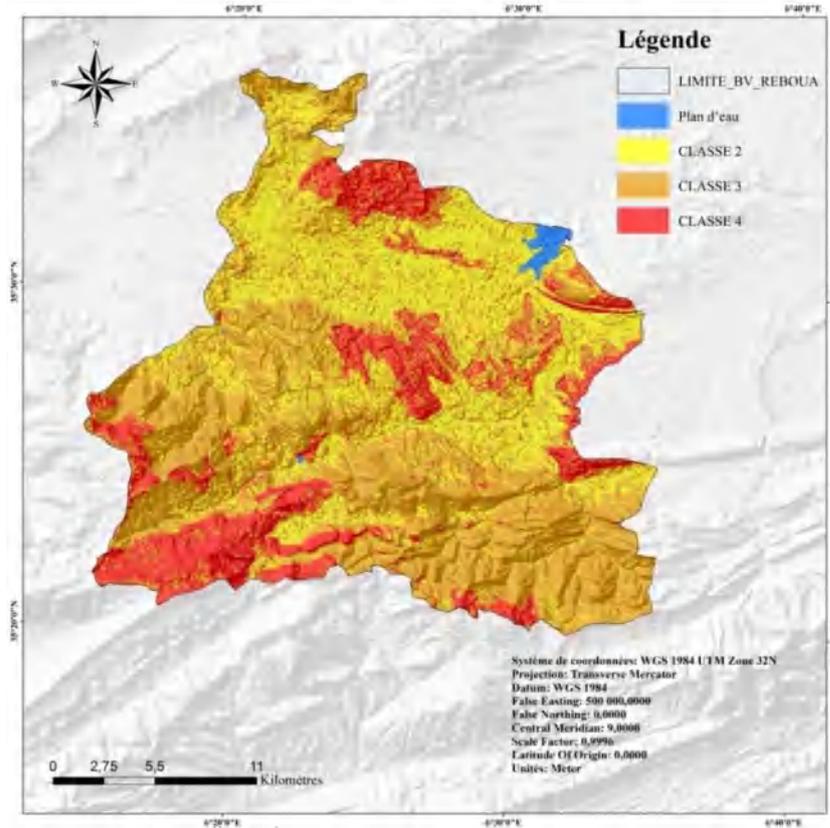


Fig. 169 : Sensibilité potentielle à l'érosion 1
–Bassin Reboa–

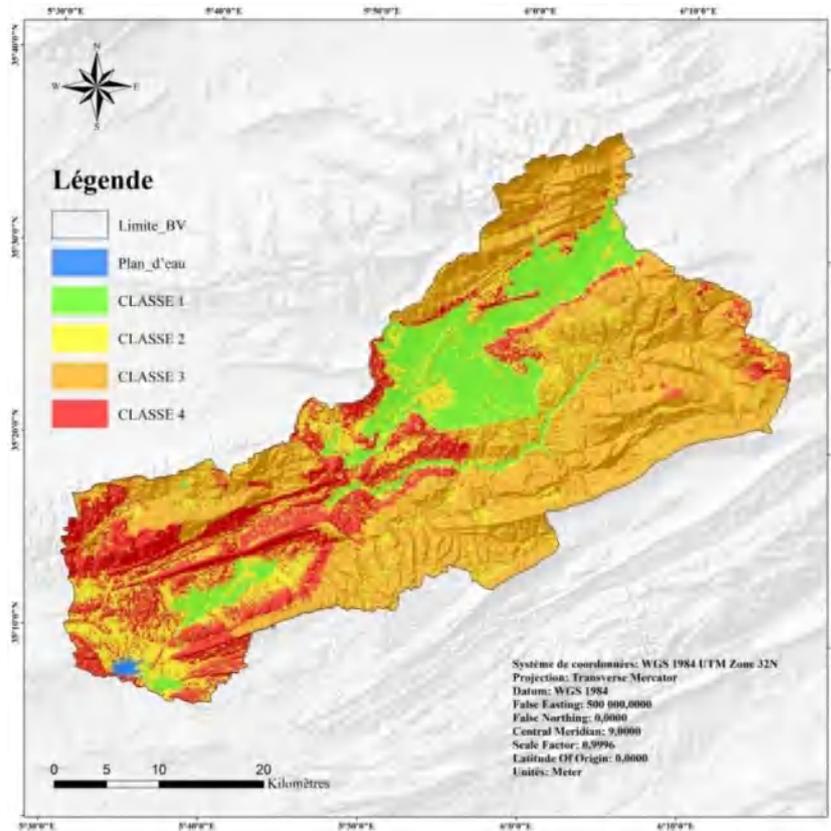


Fig. 170 : Sensibilité potentielle à l'érosion 1
–Bassin Oued El Hai–

Cette classe représente près de 54 % (Tableau 86) dans le bassin Kebir Hammam, 70% de la Reboa et plus de 48% à Oued El Hai.

Tableau 86 : répartition des superficies par classe du croisement de la pente /occupation et lithologie.

Classes	Superficie					
	Kebir Hammam		Reboa		Oued El Hai	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
1	84,57	7,47	4,43	0,77	53,13	3,36
2	362,35	32,01	15,26	2,65	294,95	18,65
3	608,84	53,78	405,89	70,47	766,66	48,48
4	70,27	6,21	146,42	25,42	463,17	29,29
Plan d'eau	6,13	0,54	3,99	0,69	3,61	0,23
Total	1132,15	100,00	575,99	100,00	1581,52	100,00

L'ajout du troisième facteur (lithologie) a permis de délimiter une zone plus large affectée par le processus érosifs de classe 4, mais celle-ci reste fragmentaire dans les trois bassins. Elle se localise dans des zones caractérisées par de fortes pentes, un substrat très érodable et une protection végétale faible à moyenne. Elle apparait au Sud du bassin Kebir Hammam et Reboa avec des superficies respectives de 6% et 25 % et une bonne partie du Sud-Est du bassin de Oued El Hai avec une surface de 29%.

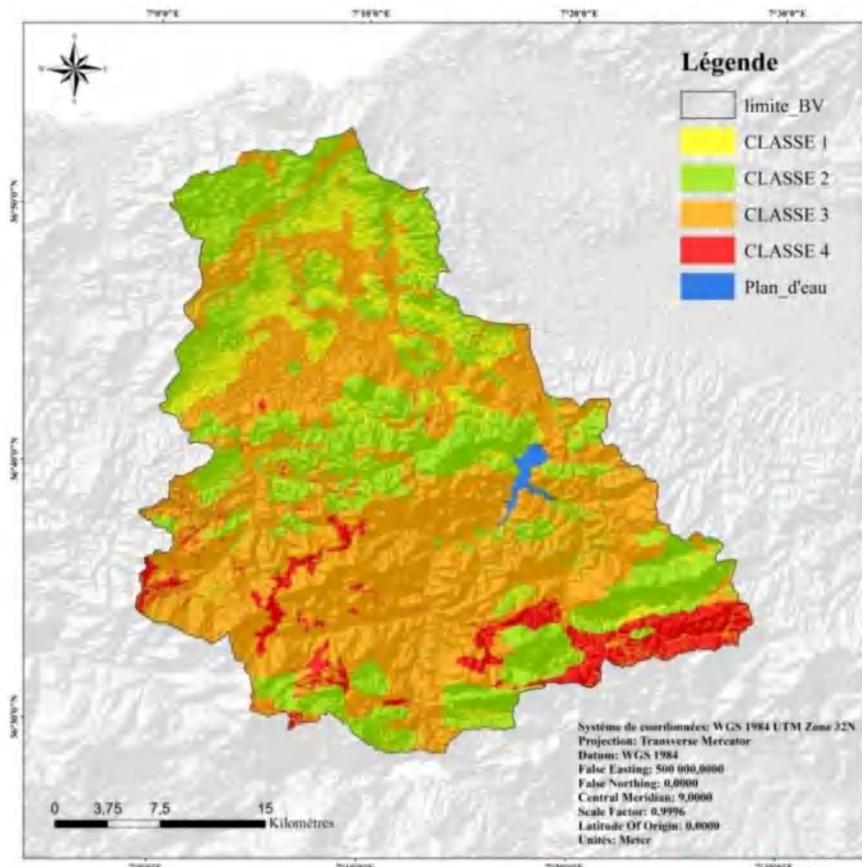


Fig. 171 :
Sensibilité
potentielle à
l'érosion 2 -Bassin
Kebir Hammam-

Les classes 1 et 2 à risque érosif faible à moyen sont moins répandues notamment dans le bassin Reboa (3%). dans le bassin de Oued El Hai, elles sont plus présentes avec 22% de la superficie totale et encore d'avantage dans le bassin Kebir Hammam (40% de sa superficie totale).

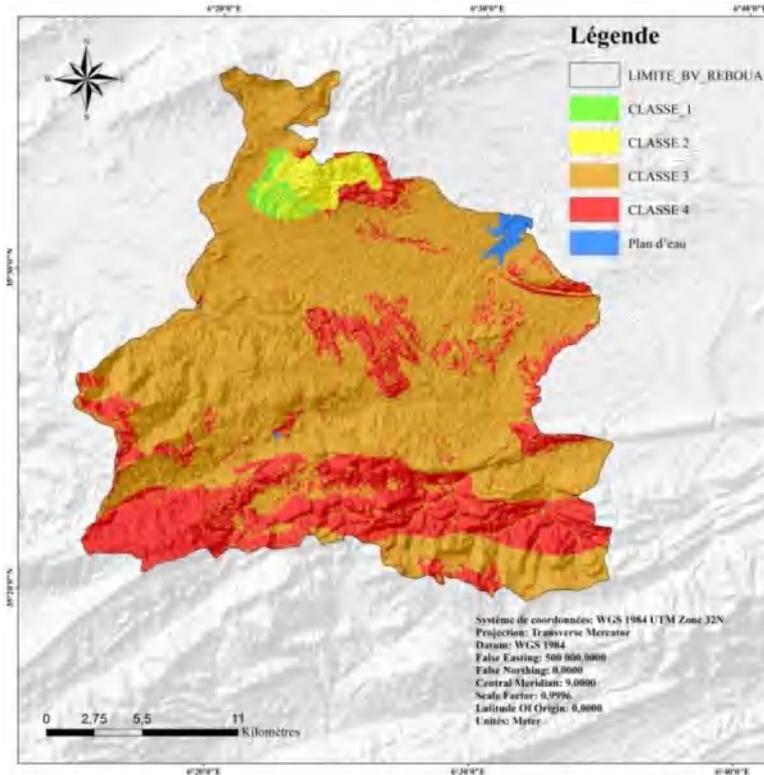


Fig. 172 : Sensibilité potentielle à l'érosion 2 - Bassin Reboa-

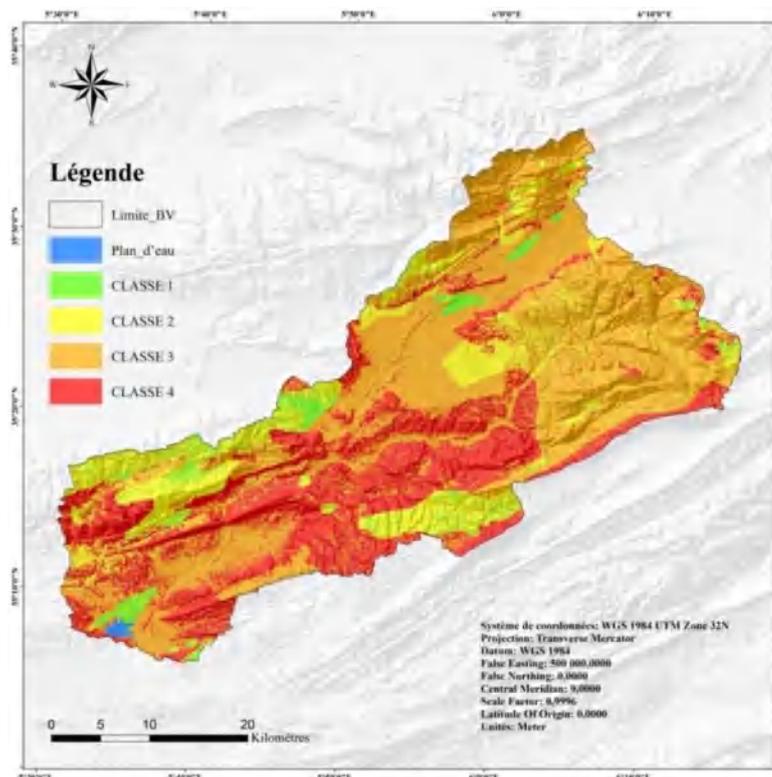


Fig. 173 : Sensibilité potentielle à l'érosion 2 -Bassin Oued El Hai-

7.4.3. Les zones sensibles à l'érosion

L'effet des pluies a augmenté visiblement la sensibilité à l'érosion hydrique dans l'ensemble des bassins. Les observations sur terrain montrent qu'elles concernent les zones aux pluies annuelles plus importantes et agressives, aux reliefs à pentes fortes dénudées ou occupées par des cultures intensives ou céréalières et aux sols fragiles essentiellement marneux, le cas typique du bassin Reboa. Les résultats mis au point de ce croisement sont illustrés par les figures 174, 175 et 176, elles donnent une vision régionale du phénomène. Le tableau 87 synthétise également la répartition spatiale des classes de sensibilité par bassin.

Tableau 87 : Répartition des superficies par classe des zones sensibles à l'érosion par bassin.

Classes	Superficie					
	Kebir Hammam		Reboa		Oued El Hai	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
1	28,61	2,53	0,00	0,00	45,04	2,85
2	217,93	19,25	4,43	0,77	239,55	15,15
3	584,40	51,62	175,85	30,53	508,77	32,17
4	295,09	26,06	391,73	68,01	784,54	49,61
Plan d'eau	6,13	0,54	3,99	0,69	3,61	0,23
Total	1132,15	100,00	575,99	100,00	1581,52	100,00

Globalement, le bassin Kebir Hammam garde la classe 3 à risque fort quel que soit les croisements opérés (Fig. 174). Elle intéresse près de 50% du total du bassin. Cette sensibilité est exprimée selon deux cas : soit une sensibilité aux pentes fortes, malgré un couvert végétal dense (forêt de Oued Soudane), soit à l'occupation des sols par les cultures saisonnières malgré les faibles pentes. La majorité des cas sur la carte correspond à la discontinuité de l'occupation du sol dans le temps. Plusieurs secteurs forestiers sont également sensibles à l'érosion ; parmi ces secteurs, nous pouvons citer, celui situé au Nord du bassin de Ouled Soudane en raison de l'importance des pentes.

La classe 4 est essentiellement incluse dans le sous bassin de Oued Emcheckel. Elle représente 26% de la superficie totale du bassin. Elle domine au Sud-Est du bassin sur Djebel Guettara, Regouba, Chbebik, Ferfour, Djebel Bou Telis, Djebel Lessouad, Djebel Gar... au Sud-Ouest sur les Djebels Regouba et Mekhalfa; au Nord du bassin (Nord-Est de la ville de Azzaba). Les observations sur terrains montrent des zones à caractéristiques défavorables pour la stabilité des sols : pentes fortes, concavité du relief et des matériaux fragiles parfois de faible épaisseur (Zone 1). La superposition de la carte finale de sensibilité sur Google Earth Pro a permis de spatialiser avec précision ces zones. Elles correspondent :

- d'une part aux zones de montagnes éloignées fortement ravinées et peu couvertes (Zone 1, photos 8 et 9), la végétation y est très espacée et les terrains exploités pour les cultures localisés sur quelques versants à proximité des cours d'eau.

- d'autre part, aux exploitations agricoles (Zone 2, photo 10), consacrées aux cultures vivrières tardives. Ces zones se caractérisent de façon générale, par une couverture des sols temporaire et des pratiques culturelles inappropriées et peu modernes conduisant à des phénomènes d'érosion intermittents extrêmement dépendants de la précocité et de la densité de la plantation.

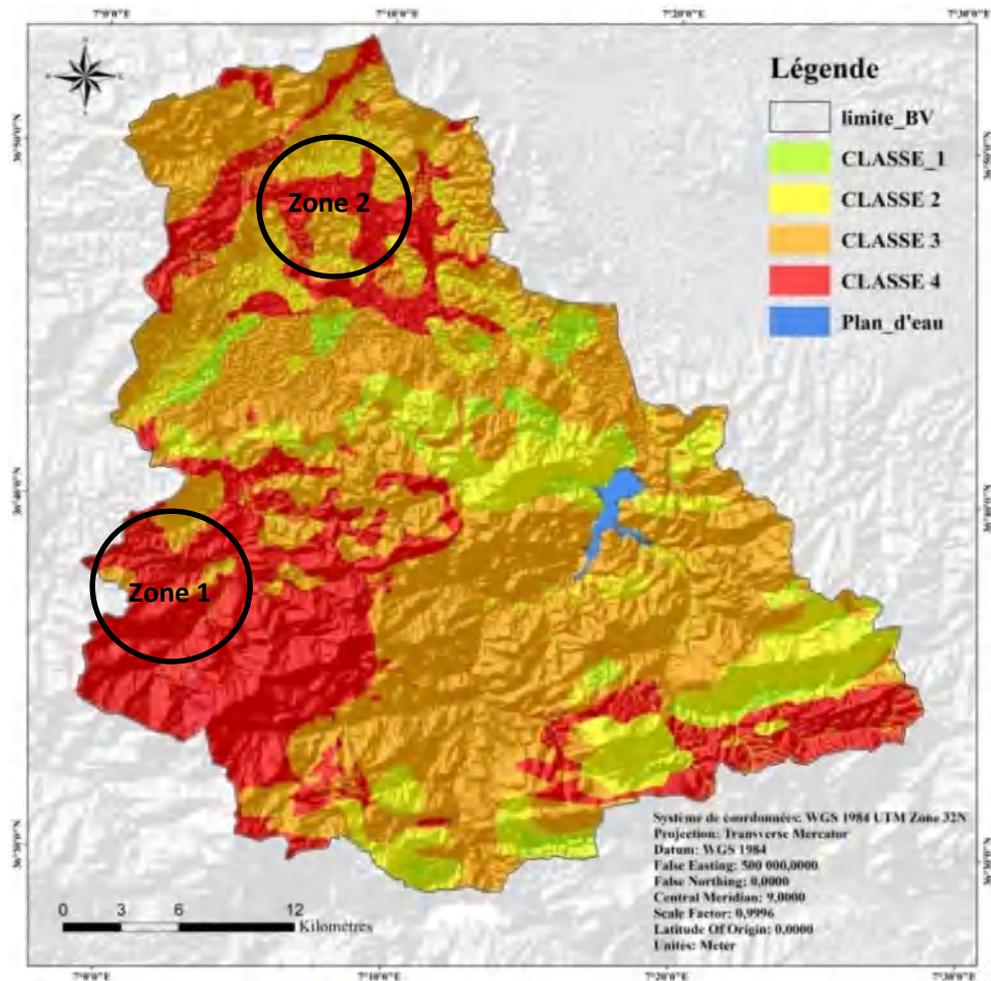


Fig. 174 : L'aléa érosion –Bassin Kebir Hammam-

Les classes 1 et 2 à sensibilité faible et moyenne se rétrécissent. Elles représentent ensemble près de 22% de la surface totale du bassin. Elles correspondent aux zones à pentes faibles, aux sols résistants à l'effet de battance des pluies. Elles sont constituées de grés et souvent occupées par une importante couverture végétale.

Quelques images satellitaires de la classe 4 dans le bassin Kebir Hammam



Photo 8 : Zone 1 (Bassin Kebir Hammam), occupation du sol (rouge : des terrains à fortes pentes, dénudés et ravinnés; vert : zones cultivées et labours dans le sens des pentes).



Photo 9 : Zone 1 (Bassin Kebir Hammam), Terrains fortement ravinés par les eaux de ruissellement.



Photo 10 : Zone 2 (Bassin Kebir Hammam) ; Terrains agricoles à proximité de la forêt de Oued Soudane.

L'effet cumulé de ces quatre facteurs choisis classe les bassins Reboa et Oued El Hai comme étant très sensibles à l'érosion. La classe 4 à haut risque érosif représente 68 % de la superficie du bassin Reboa et près de la moitié la surface du bassin de Oued El Hai (Fig. 175).

Dans le territoire du bassin Reboa, les classes 3 et 4 sont les plus répandues et se partagent 98% de sa surface. L'aléa de classe 3 occupe la partie Est du bassin et détermine des zones à faibles pentes à sols marneux, consacrés à la céréaliculture. L'image satellitaire de la Zone 1 (photo 11) montre que le ravinement marque largement le paysage.

Une large plage rouge (classe 4) occupe le Sud et la partie Ouest du bassin. Ces parties du bassin sensiblement vulnérables correspondent aux zones de parcours à relief accidenté caractérisées par des pentes moyennes à fortes, marneuses peu propices à l'agriculture (zone 2 et 3, photos 12, 13 et 14). A l'Est du bassin, les traces d'une érosion hydrique différentielle est bien claire sur la partie essentiellement Nord (Zone 3, photo 15). Des chevrons angulaires d'érosion sont le témoin d'une érosion qui a atteint le stade maximal d'irréversibilité.

Au Nord du bassin, cette classe n'apparaît qu'au Sud de la ville d'El Madher, où les pentes sont faibles, les sols marno-gréseux consacrés essentiellement aux cultures céréalières et où les pluies ne dépassent pas les 350 mm. (Zone 4, photo 16).

La classe 1 s'estompe intégralement du territoire du bassin au vu surtout des formations lithologiques essentiellement marneuses du bassin et la classe 2 ne représente qu'une petite partie de surface (0,8% de la superficie totale du bassin).

Ceci explique le résultat quantitatif trouvé précédemment, soit, une dégradation spécifique annuelle suffisamment importante, évaluée à 300 tonnes/km².

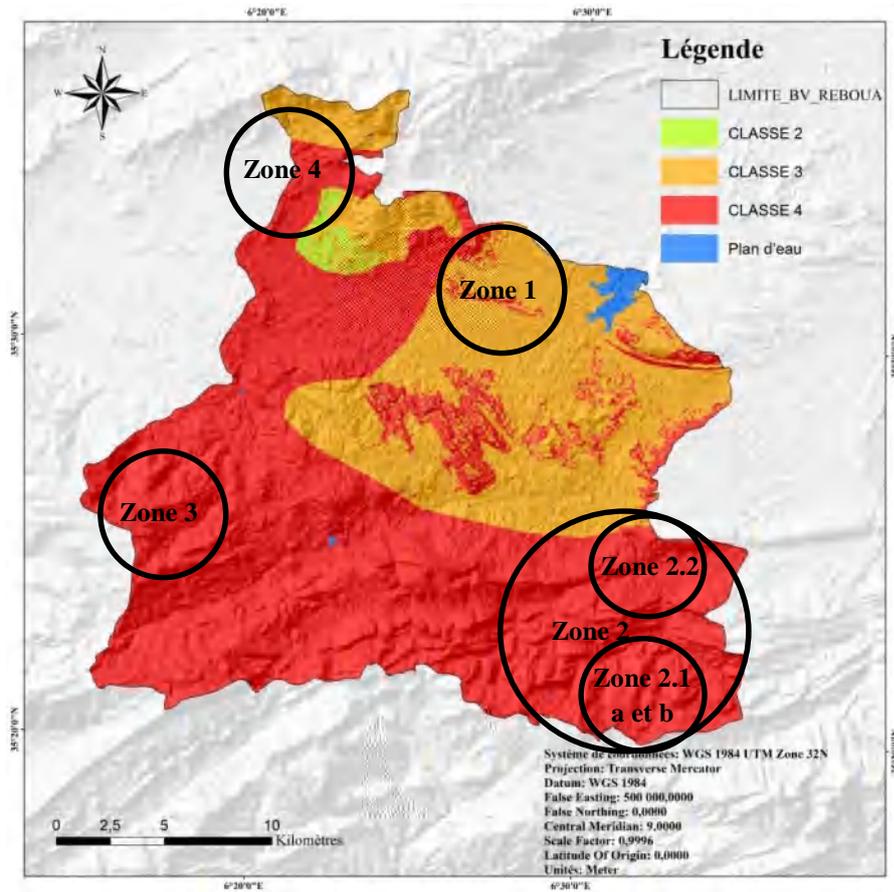


Fig. 175 : L'aléa érosion –Bassin Reboa-

Quelques images satellitaires des classes 3 et 4 dans le bassin Reboa



Photo 11 : Zone 1 (Bassin Reboa), classe 3 ; badlands impropres à l'agriculture.



Photo 12 : Zone 2.1 a (Bassin Reboa), Classe 4 : rouge : terrains peu couverts par la végétation; vert : terrains cultivés sur des pentes fortes au bord d'un cours d'eau.

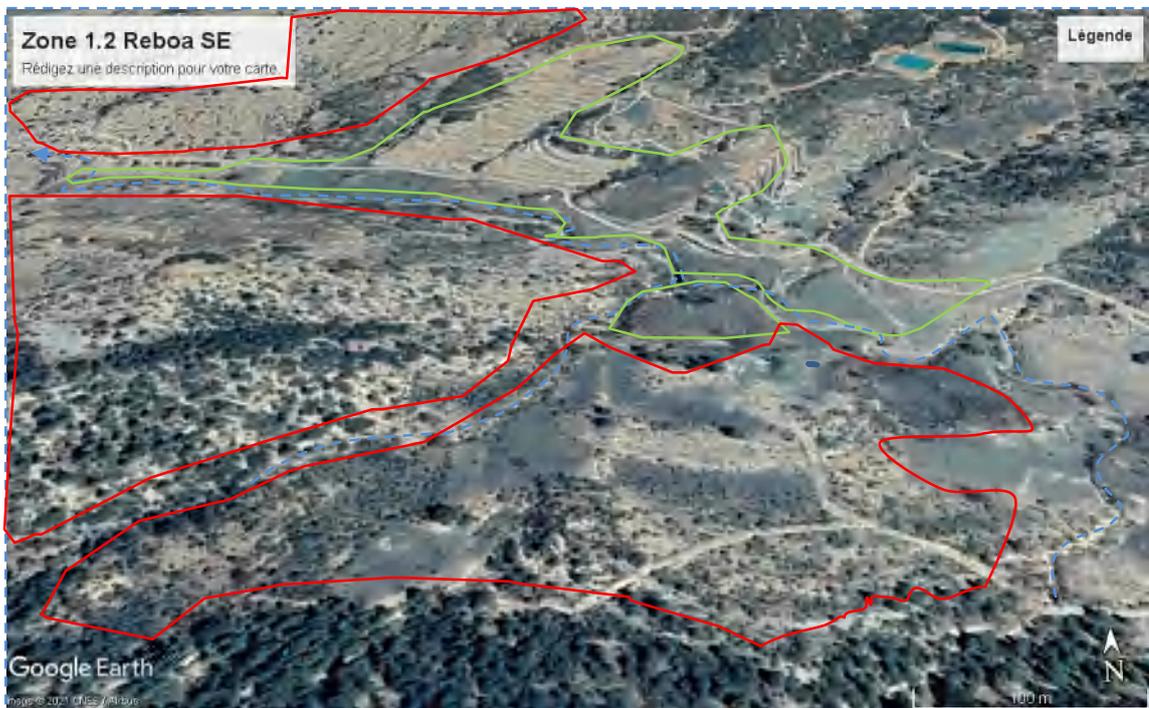


Photo 13 : Zone 2.1 b (Bassin Reboa), classe 4 ; rouge : terrains à fortes pentes couverts par une végétation très espacés ; vert : fortes pentes cultivés.



Photo 14 : Zone 2.2 (Bassin Reboa), classe 4 ; rouge : terrains à fortes pentes, dénudés constitués de marnes et affectés par un ravinement intense et profond.



Photo 15 : Zone 3 (Bassin Reboa), classe 4: érosion différentielle (apparence des chevrons) au versant Nord; terrains dénudés à mouvements superficiels de matériaux.



Photo 16 : Zone 4 (Bassin Reboa), classe 4 ; rouge : terrains cultivable en repos renfermant des zones ravinnés.

L'aléa très fort (classe 4) est dispatché sur tout le territoire du bassin de Oued El Hai (Fig.176). D'origine naturel, Il est à classer dans la dynamique érosive des montagnes et n'a pas d'origine agricole. Ces zones dénudées à pentes fortes se situent majoritairement sur les hauts reliefs, en particulier sur les monts de Belezma au Nord-Est bassin ; Djebels Chentouf, Ich Ali, Asker à l'Est et aux Djebels Groun, Djebrount et Bouss au centre (Zone 1, Zone 2 et Zone 3). L'érosion est ici d'autant plus considérable que la pente est forte et les pluies sont importantes et agressives. Les photos 17, 18 et 19 témoignent de ravinements généralisés à un stade très avancée de l'érosion hydrique.

Les régions situées au Nord du barrage s'avèrent être des zones plutôt stables, de classe 2. L'érosion y est lente et surtout différentielle, le relief dénudé étant à pentes faibles à moyennes est formé de calcaires marneux.

La classe 3, est principalement localisée sur le périmètre de Ain Touta. Elle représente plus de 32% du territoire du bassin.

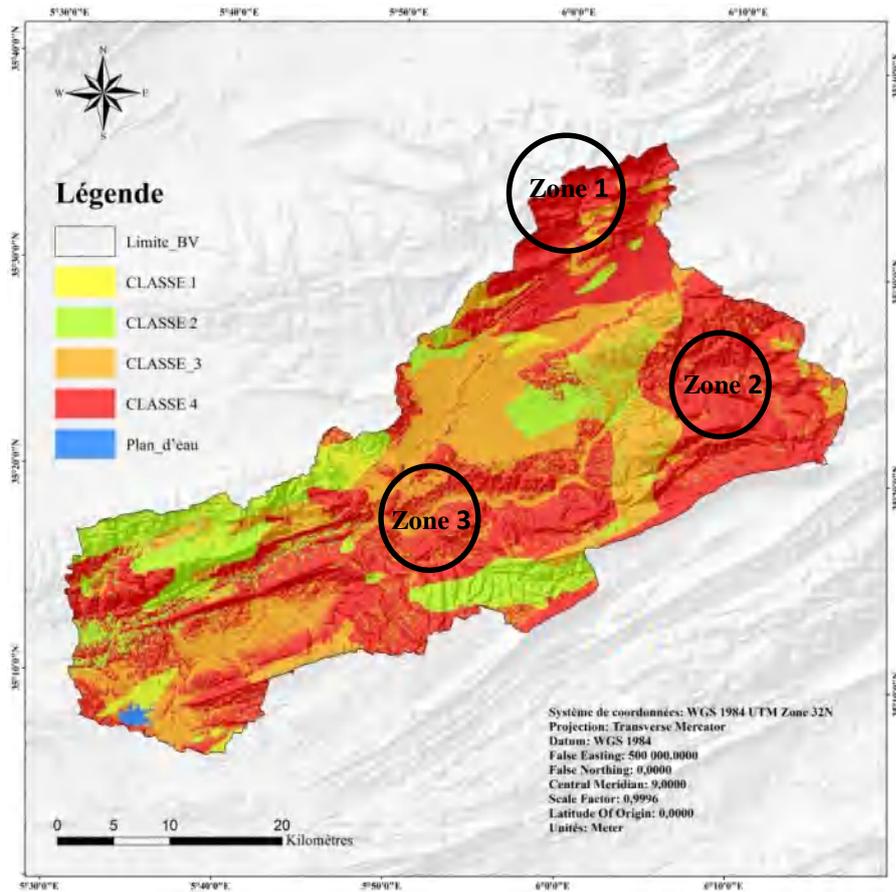


Fig. 176 : L'aléa érosion –Bassin Oued El Hai-

Quelques images satellitaires des classes 4 dans le bassin Oued El Hai

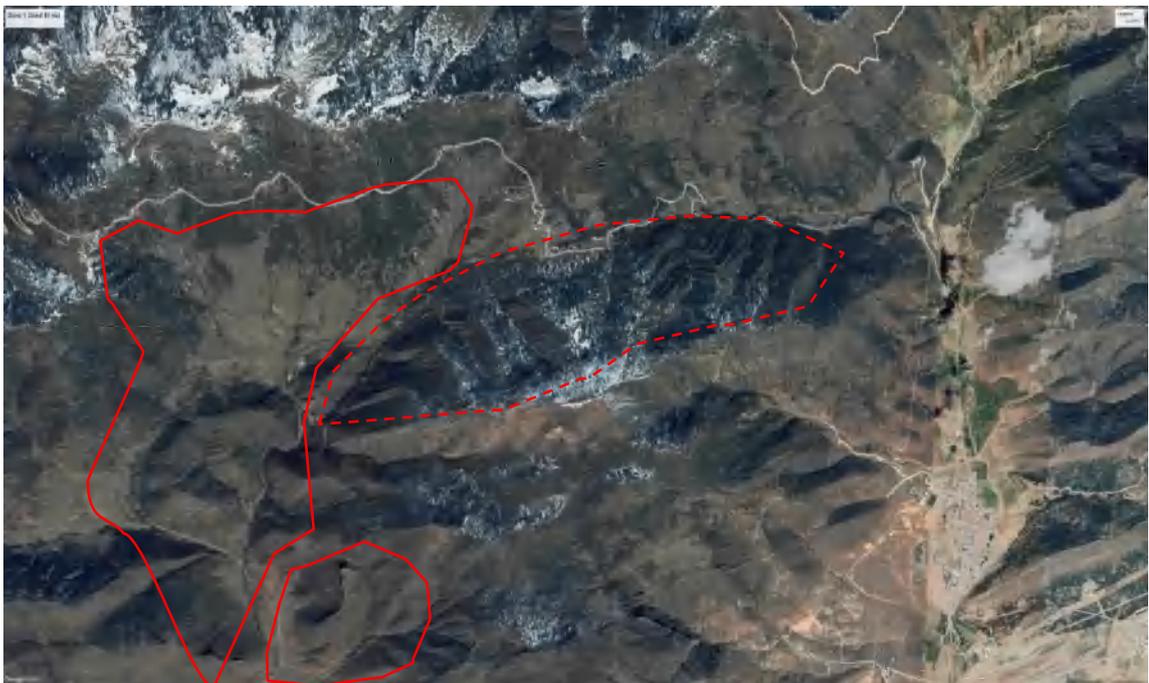


Photo 17 : Zone1 (Bassin Oued El Hai), classe 4 ; rouge continu: zones ravinnés sur des terrains à nus ; rouge discontinu : des chevrons (érosion différentielle).



Photo 18 : Zone 2 (Bassin Oued El Hai), classe 4 : Ravines actives et bad-lands.



Photo 19 : Zone 3 (Bassin Oued El Hai), classe 4 : ravinement généralisés à un stade avancé de l'érosion (badlands).

7.5. Conclusion

La réalisation des cartes de l'aléa érosion des trois bassins par l'intégration des principaux facteurs responsables du déclenchement des phénomènes liés à l'érosion hydrique dans un système d'information géographique (SIG) a permis dans une certaine mesure de répondre aux nombreuses questions relatives à la localisation des zones les plus productrices de sédiments, de

les classer selon leur degré de sensibilité. Les résultats cartographiques de la sorte sont aussi considérés comme modèles prévisionnels qualitatifs de l'érosion hydrique.

La superposition des cartes des quatre facteurs choisis et le croisement multiple des bases de données cartographiques nous a permis de démêler partiellement la complexité et l'interdépendance de ces facteurs. Les résultats quantitatifs anticipés dans le chapitre 6 et qualitatifs présentés dans ce chapitre sont en harmonie. Les deux bassins Reboa et Oued El Hai, sont les plus impactés par les événements érosifs. Ils possèdent un niveau de sensibilité fort du à la combinaison de plusieurs facteurs : de fortes pentes dans les deux bassins couvrant de larges surfaces montagnardes, d'importantes formations lithologiques facilement érodables et une agressivité des précipitations.

Les espaces moyennement protégés sont destinés essentiellement pour les grandes cultures, notamment dans le bassin de Reboa où la sensibilité des sols à l'érosion résulte de la combinaison de facteurs naturels et anthropiques.

Dans le bassin Kebir Hammam, ces zones sont moyennement présentes en raison des formations lithologiques résistantes qui constituent un frein à la formation du ruissellement, notamment en zones à couverture végétale dense telles que les forêts ou les terres de cultures.

Les zones qui ne sont pas concernées par l'aléa érosion sont pratiquement rares dans les trois bassins.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité des études initiées pour la quantification des transports solides en suspension et leur impact sur la sédimentation des barrages. A son terme, nous pensons avoir contribué à l'estimation et à la connaissance de la variabilité des matières en suspension dans l'Est Algérien à travers l'exemple de trois bassins, un Méditerranéen, *Kebir Hammam* au climat humide, un bassin des hauts plateaux, *Reboa* au climat semi-aride et un bassin de l'Atlas Saharien, *Oued El Hai* au climat aride. Il est en conséquence approprié de faire les conclusions suivantes :

- ***Le cadre géographique***

L'analyse physiographique des bassins versants sélectionnés montrent une dissemblance orographique. Le bassin *Kebir Hammam* se caractérise par un relief à altitudes moyennes ne dépassant pas les 1200 mètres. A *Reboa* situé dans la zone des hautes plaines, les altitudes varient de 960 à 2321 mètres, Djebel Mahmel (1989 m) et Djebel Ichmoul (2066 m). Ce massif montagneux partage avec le bassin de *Oued El Hai* la même ligne de crête. Il forme une barrière naturelle au Sud limitant la zone des hautes plaines du Sahara. Plus au Sud, dans le territoire du bassin de *Oued El Hai*, les altitudes s'atténuent considérablement pour atteindre les 300 mètres. Les pentes fortes qui conditionnent la vitesse d'écoulement, la quantité d'eau qui va ruisseler et celle qui va s'infiltrer sont principalement importantes au bassin *Kebir Hammam*. Environ 50% de la surface du bassin est située sur des pentes dépassant les 12,5%. Alors, qu'elles sont respectivement que de 16% et 21% aux bassins *Reboa* et *Oued El Hai*. Les courbes hypsométriques des bassins montrent une morphologie qui tend vers un déséquilibre dans le relief lié à la nature des formations lithologiques, induisant de fortes entailles par les forces érosives hydriques.

- ***Une géologie complexe***

A l'issue de l'étude géologique, les bassins montrent en général une organisation morpho-structurale très complexe. Le bassin *Kebir Hammam* localisé sur le versant Nord de l'atlas tellien, se rattache aux zones internes septentrionales de la chaîne des maghrébides d'Algérie Nord Orientale. *Oued El Hammam* et *Oued Emchekel* draine dans ce bassin une zone hétérogène et composée essentiellement de Flyschs (25 %), de grès (19 %), alluvions (16 %) et de calcaires (11 %). Les formations marneuses représentent un faible pourcentage (4% du total du bassin). Les caractéristiques lithologiques du bassin *Reboa* sont principalement marneuses, marno-calcaires et marno-gréseuses d'âge miocène et miopliocène (94%). Par ailleurs, ces mêmes terrains fragiles marneux partagent avec les calcaires marneux 72 % de la superficie totale du bassin *Oued El Hai*.

- ***La végétation***

Les formations végétales permanentes et continues composées de forêts et de maquis ainsi que de terrains agricoles assurent une protection très nuancée dans les bassins. Elles représentent une surface de 48% du totale du bassin *Kebir Hammam*. Cette classe de végétation est la conséquence de la dominance de la montagne qui génère une mosaïque de paysage régis par les flux humides qui arrivent du Nord (exposition Nord des versants). Sur le territoire de *Reboa*, la couverture végétale est moins importante, elle ne représente que 12% de la superficie totale du bassin. Elle occupe les adrets des massifs du bassin. Dans le bassin de *Oued El Hai*, elle occupe plus de la moitié de surface du bassin (50%), mais, souffre d'une dégradation progressive.

Les zones dénudées ou dépourvues de végétation représentent respectivement dans les bassins *Kebir Hammam*, *Reboa* et *Oued El Hai* des taux de 3,2 %, 23% et 33%. Les zones cultivées qui assurent une protection temporaire occupent le reste de la surface des bassins.

- ***Climat ou climats***

Les facteurs climatiques étudiés particulièrement, les précipitations, les températures varient sur le plan spatial. Ils subissent les influences de l'orographie, la continentalité, et l'éloignement à la mer. Sur la base des séries d'observations pluviométriques qui s'étalent sur période moyenne de 45 années, le régime des pluies présente des irrégularités annuelles, saisonnières et mensuelles. La moyenne des pluies interannuelles passe de plus de 700 mm (bassin *Kebir Hammam*) à 200 mm (bassin *Oued El Hai*). Les lames d'eau précipitées les plus abondantes dans le bassin *Kebir Hammam* surviennent en hiver. Elles sont printanières à *Reboa* et fluctuent entre l'automne et le printemps à *Oued El Hai*.

L'évaluation de l'évolution des changements et des tendances de la variabilité pluviométrique par les tests de tendance de Pettitt et de Mann-Kendall ont permis de détecter des ruptures et des tendances à la hausse dans l'ensemble vers l'année 2001 sur cinq stations : *Bekkouche Lakhder*, *Bou Snib* et *Ain Charchar* au bassin *Kebir Hammam* ; à *Bouhmar* à *Reboa* et *Medina Lanasser* à *Oued El Hai*; et une tendance à la baisse circonscrite uniquement dans le bassin *Reboa*.

Les indices de déficit pluviométrique « IDP » et pluviométrique standardisé « SPI » indiquent l'allongement des cycles de sécheresses du Nord (Bassin *Kebir Hammam*) vers Sud (Bassin *Oued El Hai*). Les années humides se succèdent aux stations situées au Nord et se voit interrompre de plus en plus par des années sèches de sévérité différente (modérée à forte) aux stations situées à *Reboa* et *Oued El Hai*.

En ce qui concerne le régime thermique, les températures moyennes annuelles varient du Nord au Sud, entre 18°C à Skikda, 14°C à Batna et 22,3 à Biskra. La combinaison des deux principaux facteurs climatiques, températures et précipitations, traduite en diagrammes ombrothermiques de Gaussen a permis de déterminer le régime climatique saisonnier moyen. Ces derniers sont caractérisés par des mois secs qui s'étendent de 4 à 12 mois (bassin *Kebir Hammam*, 4 mois, *Reboa* 5 mois et *Oued El Hai* 12 mois).

L'étude des bilans hydriques montrent des écoulements importants entre le mois de Décembre et Mars, malgré une évapotranspiration réelle importante dans le bassin du *Kebir Hammam*, suite à la saturation des sols. En revanche, ils sont nuls à *Reboa* et *Oued El Hai*.

- ***Les écoulements***

Le climat agit sensiblement sur le réseau hydrologique et derrière sur la réponse hydrologique du bassin versant. Le caractère pérenne caractérise les écoulements du bassin *Kebir Hammam* et temporaire des écoulements de surface du bassin *Reboa* et *Oued El Hai*.

L'analyse des chroniques de débits met en évidence leur variabilité spatio-temporelle. Du Nord au Sud, les écoulements diminuent sensiblement passant de 4,5 m³/s au *Kebir Hammam* à 0,4 m³/s à *Oued El Hai*, en raison de l'augmentation consécutive de l'évaporation et la diminution des précipitations. Le régime des cours d'eau est purement pluvial. Les débits moyens annuels ne

marquent aucune tendance positive à la hausse ou négative à la baisse aux stations qui contrôlent les eaux des deux bassins *Kebir Hammam* et *Reboa*. Par contre, ils tendent à la baisse à la station *El Kantara* qui contrôle les eaux du bassin de *Oued El Hai*.

Les coefficients mensuels des débits déterminent une période des hautes eaux nettement visible de Décembre à Mai à la station de *Ain Charchar*. Celle-ci suit le rythme des pluies qui surviennent de façon plus ou moins régulières lors de cette période. Aux stations *Reboa* et *Oued El Hai*, elle est discontinue et courte et dépend des pluies diluviennes. Les premières montées des eaux arrivent précocement au mois de Septembre, puis enregistrent une longue période de baisse pour remonter de nouveau au mois de Février et Mai à *Reboa*. Cette deuxième période prend encore du retard au bassin *Oued El Hai* pour ne commencer qu'au printemps (Mars) et s'achever au mois qui précède (Avril).

L'analyse de quelques crues enregistrées dans les stations étudiées a permis d'avoir une vision sur leur évolution, et la réaction de la structure hydrologique des bassins. Dans le bassin *Reboa* et *Oued El Hai*, les crues sont récurrentes et importantes en volumes pendant l'automne. Par contre, le *Kebir Hammam* connaît des crues généralement en saison froide (Novembre- Avril) avec une fréquence élevée au mois de Décembre, Février et Mars.

- **Mobilisation ressources en eau**

La région Est Algérienne est dotée d'importants d'ouvrages de stockages (34 barrages). La construction des trois Barrages : *Zit Emba*, *Koudiet M'daouar* et *Fontaines des Gazelles* au travers des cours d'eau qui les drainent, a apporté une certaine aisance hydrique à l'échelle des bassins et même sur tout le territoire régional environnant. Le barrage de *Zit Emba*, régularise (55 hm³/an) les eaux de la partie amont Sud du bassin *Kebir Hammam* vouées à la fois à l'alimentation et l'irrigation du périmètre de *Zit Emba*. Le barrage de *Koudiet M'daouar* appartient à l'important maillon du grand transfert de Beni Haroun, il assure l'alimentation en eau potable de grosses agglomérations (Constantine, Mila,...) et prochainement l'irrigation des terres du périmètre de Chemora. Cette infrastructure régularise annuellement 15,6 hm³. Le barrage des *Fontaines des Gazelles* est destiné essentiellement à l'irrigation du périmètre de la palmeraie d'El Outaya.

Les Stocks en eau dans le barrage *Zit Emba* sont restitués entre le mois de Décembre et le mois d'Avril (période des hautes eaux) ; alors, qu'ils se produisent sur deux périodes aux barrages *Koudiet M'daouar* et les *Fontaines des Gazelles*. La première en Septembre et Octobre et la deuxième entre le mois de Mars et le mois d'Avril. A l'inverse en Été, ces réservoirs écrètent les plus pas débits.

Les remplissages en fin d'année depuis leur mise en service varient d'une année à l'autre. Elles basculent de 6,8% (2001/2002) à 94,3% (2003/2004) au barrage *Zit Emba*, au barrage *Koudiet M'daouar*, de 24% (2012/2013) à 109% (2008/2009) et de 9,5% (2000/2001) à 99,9% en (2003/2004) dans le barrage des *Fontaines des Gazelles*.

A l'autre extrémité de l'échelle des tailles d'ouvrage on trouve les retenues collinaires. Celles-ci sont moins répandues sur le territoire des trois bassins voire absentes (le cas des deux bassins *Reboa* et *Oued El Hai*). Les quelques milliers de mètres cubes stockés dans ces ouvrages, qui ont pu résister à l'envasement servent actuellement à l'irrigation locale dans le bassin *Kebir Hammam*.

- **La bathymétrie des barrages**

Les mesures bathymétriques réalisées au niveau des trois barrages entre 2004 et 2005 révèlent néanmoins qu'à une courte période de leur exploitation, ces réservoirs présentaient une réduction dans leur capacité en raison d'un alluvionnement jugé encore de faible. Les pertes de capacité annuelles sont de l'ordre de 0,32 Millions de tonnes au barrage *Zit Emba*, 0,33 Millions de tonnes à *Koudiet M'daouar* et 0,26 Millions de tonnes au barrage des *Fontaines des Gazelles*.

- **L'érosion hydrique**

L'évaluation de l'érosion hydrique par la combinaison de deux approches quantitative et qualitative a permis d'estimer et délimiter les zones émettrices de sédiments. L'approche quantitative, appuyée sur la modélisation met en évidence la variabilité de la dégradation spécifique en suspension d'un bassin à l'autre et au sein du même bassin. Elle est estimée à 82 tonnes/km²/an dans le bassin *Kebir Hammam* (1970-1980), 300 tonnes/ km²/an à *Reboa* (1985-1996) et 140 tonnes/ km²/an à *Oued El Hai* (1970-1992). A ces variations spatiales, s'ajoutent des variations temporelles, les transports solides en suspension varient d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre. Dans le bassin *Kebir Hammam*, les apports solides en suspension maximales ont été enregistrés en hiver (plus de 56%) et au printemps (34,7%). A *Reboa*, ils sont maximaux au printemps avec 48 % du total et à *Oued El Hai*, ils interviennent en automne avec un taux de 57% des apports totaux. Mensuellement, les flux les plus importants arrivent au bassin *Kebir Hammam* au mois de Janvier et représente 34% du tonnage annuel, à *Reboa* au mois Mai, avec un taux de plus de 21% et au mois de Septembre, avec plus de 41% au bassin de *Oued El Hai*. Les apports solides en suspension mensuels évoluent au même temps que les apports liquides aux deux bassins *Kebir Hammam* et *Oued El Hai*. Par contre, les débits liquides précèdent les débits solides.

L'approche qualitative reposant sur le croisement de quatre cartes thématiques (pentes, lithologie, occupation du sol et précipitation) a permis d'identifier et de classer par degrés, les zones les plus affectées et sensées produire des sédiments. Les résultats ont montré que plus de 51% de la surface totale du bassin *Kebir Hammam* est affectée par une érosion hydrique de classe 3, forte (classe prépondérante), et 26 % d'une érosion de classe 4, ce qui traduit respectivement une érosion de forte à très forte. Ces zones traduisent une érosion hydrique liée essentiellement aux trois facteurs : fortes pentes, couvert végétal important mais peu protecteur (saisonnier) et action humaine (l'espace du bassin est exploité par une activité agricole intense et peu rationnelle).

Dans le bassin de *Reboa* et *Oued El Hai*, la classe 4 à haut risque érosif est plus étendue. Elle représente respectivement 68% et plus de 49% des surfaces des deux bassins. Les formations lithologiques essentiellement marneuses, et l'agressivité des pluies sous formes d'averses de courtes durées sont les premiers facteurs responsables de ce classement. La classe 3, est susceptible de fournir de grandes quantités des sédiments. Elle représente plus de 30% et 32 % de la surface des deux bassins, ce qui contribue à l'envasement des barrages.

Les classes d'érosion faible à moyenne occupent des espaces réduits (21 % au *Kebir Hammam*, 0,77 % à *Reboa* et 18% à *Oued El Hai*).

La période des apports solides en suspension minimums est commune. Elle correspond à la saison sèche, allant du mois de juin à Aout, où les pluies sont presque absentes et les écoulements dans les cours d'eau sont quasi-nuls.

- **Origine des sédiments**

Au cours du cycle hydrologique les périodes de crues jouent un rôle important dans l'exportation des matières en suspension. L'application de l'approche des hystérésis reliant les concentrations en suspension et débits liquides de quelques crues confirment ces hypothèses. Au bassin *Kebir Hammam* la réponse des concentrations est dans le sens des aiguilles d'une montre « clockwise loop ». Ce modèle se présente particulièrement pour les crues d'hiver et printemps. Ils traduisent un apport de sédiments en suspension qui provient essentiellement, du lit du cours d'eau et une érosion active dès les premières pluies. En revanche, elle suit le sens contraire des aiguilles d'une montre à *Reboa* et *Oued El Hai*. Les sédiments en suspension proviennent du haut des bassins versants.

Les résultats de l'évaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique montrent que les trois bassins versants sont des milieux très vulnérables à l'érosion hydrique. Cette vulnérabilité résulte de la combinaison de plusieurs facteurs (pentes, lithologie, couvert végétal...). Le façonnement des versants du bassin se traduit par des formes d'érosion diverses et variées. Face à cette situation de risque l'intervention devient nécessaire pour lutter contre les différents aspects de ce phénomène, d'une part pour améliorer la productivité des terres et conserver les sols, d'autre part pour lutter contre l'envasement des barrages et protéger les ressources en eau pour de longues années.

Cette analyse nous a donné une idée objective sur l'ampleur du phénomène érosif et ses conséquences. Elle aurait pu être plus fructueuse et bien ciblée avec des données plus détaillées. Le manque d'une série de données unanimes aux trois bassins, longue et continue concernant les pluies, les débits liquides et solides sur les cours d'eau aurait permis d'aboutir à de meilleurs résultats. La réalisation de mesures dans les cours d'eau naturels reste en Algérie archaïque et de plus en plus difficile, soit à cause des limitations techniques soit à cause des coûts opérationnels de la réalisation de travaux extensifs sur le terrain. La plupart des données proposées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques ne correspondent pas à des mesures précises des matières en suspension. Les concentrations ont été le plus souvent déterminées à partir de simples prélèvements de surface et extrapolées dans le temps sans qu'une fréquence des prélèvements n'ait été précisée au niveau de la saison ou de l'année. Ceci explique une assez forte dispersion des résultats déjà publiés. La méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation du débit de la charge solide consiste à évaluer par prélèvement la concentration des matières en suspension sur la section transversale du cours d'eau.

L'érosion hydrique et l'envasement des barrages progressent ensemble. Ils sont la conséquence la plus grave et la plus courante à prendre en considération. Les sédiments transportés dans un cours d'eau peuvent altérer la qualité de l'eau potable et réduire les rendements et les durées de vie des ouvrages de stockages. Aussi est-il nécessaire de disposer de données détaillées afin de procéder à des études objectives.

- **Perspectives**

Elargir une telle étude sur d'autres bassins permettra d'obtenir des résultats plus précis sur la dynamique érosive dans la région Est Algérienne. Aussi, des données plus recherchées et poussées sur l'intensité des pluies apporteront des informations complémentaires permettant

d'affiner d'avantage les cartes de sensibilité à l'érosion. Aussi, d'autres méthodes cartographiques méritent d'être établis tels que la méthode RUSLE cela permet de comparer ses résultats avec celles-ci.

En conclusion, le climat dans la région Est Algérienne change considérablement dans le temps et dans l'espace. Les ressources en eau disponibles (écoulements superficiels et alimentation des nappes souterraines) dépendent essentiellement de la pluie et restent limitées. Cette situation conduira incontestablement à long terme la région à un stress hydrique.

La nouvelle politique de l'Algérie en matière de construction de barrages à certes améliorer le stockage de ces réserves, cependant, la surveillance de leurs envasements qualifiés de plus en plus rapide demeure aujourd'hui nécessaire. Autant, les changements climatiques et le stress hydrique obligent les pouvoirs publics à engager des opérations de dévasements coûteuses, certes, mais nécessaires pour la protection des barrages et l'augmentation de leurs volumes de stockage. Aujourd'hui, le recours à la valorisation de la vase et son utilisation dans les secteurs économiques tels que : l'agriculture, la fabrication de poteries, de briques et l'industrie des matériaux de construction permet d'amortir les coûts d'entretien, ainsi que la préservation de ces barrages ayant couté des centaines de milliards de dinars.

Bibliographie

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELBAKI A., ABDELBAKI C., OLDACHE E., et SEMAR A. (2018).** Apport des SIG dans l'élaboration d'un plan d'aménagement anti-érosif : Cas du sous bassin de Bouguedfine (Zahrez Chlef, Algérie). *Agriculture and Forestry Journal*, vol. 2, n°1, pp. 1-17.
- ABDELHADI A. (2012).** Vulnérabilité à l'Envasement des Barrages (cas du bassin Hydrographique des Côtiers Algérois). Thèse de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra.
- ABHCSM. (2009).** Plan directeur d'aménagement des ressources en eau .rapport de synthèse.
- ABHCSM (2012).** Gestion intégrée des ressources en eau : rôle, organisation et traitement de la mesure. Colloque international : 4 et 5 juin 2012 au CNFPH, Constantine.
- ACHI K. et al (1973).** Carte hydrogéologique de la région d'Alger. Notice explicative. Document DEMRH.
- ACHITE M. (2002).** Approche statistique d'évaluation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina (Nord-ouest Algérien). *Watmed, Tunisia*. 10-13 Oct., vol. 2, pp. 894-899.
- ACHITE M. et TOUAÏBIA B. (2000).** Analyse multivariée de la variable «érosion spécifique»: cas du bassin versant d'oued Mina (Willaya de Relizane). *Sem. Int. « Hydrologie des régions méditerranéennes»*, Montpellier 11-13 Octobre. *Phi-V/Doc. Tech. en hydrologie / vol.51*. Ed. UNESCO.
- ACHITE M. et MEDDI M. (2004).** Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*, vol. 15, n° 4, pp. 367-373.
- ACHITE M. et MEDDI M. (2005).** Variabilité spatiotemporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'Oued Mina (nord-ouest algérien). *Rev. Sci. Eau*, vol. 18, pp. 37–56.
- ACHITE M., TOUAIBIA B. et OUILLON S. (2006).** Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences & Perspectives. 14th International Soil Conservation Organization Conference. *Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments*. Marrakech, Morocco, May 14-19, pp. 1-6.
- ACHITE M. and OUILLON S. (2007).** Suspended sediment transport in a semi-arid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *J. Hydrol*, vol. 343, pp. 187-202.
- AHAMED K., BOUANANI A. et HAYANE S.M. (2001).** L'étiage des plus importants sous bassins de la Tafna (Sebdou, Mouilah, et Isser) : Analyse et quantification. *Sem. Nat. sur l'eau – SNE 2001*, Tlemcen, Octobre 2001.

- AIDAOUI S. (1994).** Ressource en eau et aménagement hydro-agricole dans la région de Biskra "Ziban" [Algérie]. Thèse de Doctorat. Université Nancy 2. France.
- ALBERGEL J. et REJEB N. (1997).** Les lacs collinaires en Tunisie: Enjeux, contraintes et perspectives. Comptes rendus à l'Académie d'Agriculture de France, vol. 83, n°2 (1997) 77(2)-88(2) et 101 (2)-104(2).
- ALBERGEL J. et PEPIN Y. (2003).** Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens. Hydrology of the Mediterranean and Semi-arid regions (Proceedings of an International symposium held at Montpellier April 2003) LAHS Publ, n° 278, pp. 337-379.
- ALBERGEL J., SELMI S. et BALIEU O. (2001).** Les petits barrages dans la zone semi-aride méditerranéenne. Mission IRD de Tunis.
- ALGERIE PRESSE SERVICE,** Septembre 2018. p1
- AMANI M.K., KOFFI F. K., YAO B. K., KOUAKOU B. D, JEAN E. P. et SEKOUBA O. (2010).** Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Cybergeo : European Journal of Geography, pp. 1-32.
- AMIRÈCHE H. (1984).** Etude de l'érosion dans le bassin versant des Zardézas, Milieux physiques et aménagement rural. Thèse 3ème cycle, université Aix – Marseille II
- AMIRECHE H. (2001) :** L'eau, le substrat, la tectonique et l'anthropisation dans les processus érosifs du Tell Nord-Constantinois. Thèse d'Etat. FSTGAT. Université Mentouri Constantine. 227 p.
- ANTAL J. et al. (1994).** Developments in Soil Science. Edit. Amsterdam, New York. Elsevier.
- ARMITAGE P. and WOOD P. (1997).** Biological Effects of Fine Sediment in the Lotic Environment. Environmental management, p. 203-207.
- ARNBORG L., WALKER H.J. and PEIPPO J. (1967).** Suspended load in the Colville River, Alaska, 1962 in: Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events.
- ASHBRIDGE D. (1995).** Processes of riverbank erosion and their contribution to the suspended sediment load of the River Culm, Devon. In: Sediment and Water Quality in River Catchments, 229–245. Wiley, Chichester, UK.
- ASSELMAN N.E.M. (2000).** Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology, vol. 234, pp. 228-248.
- ATHERTON et al. (2005).** Watershed Assessment for Healthy Reefs and Fisheries, Final Report to the United States Department of State. In Wildlife Conservation Society-South Pacific.

- AUBERT G. (1954).** La classification des sols utilisée dans les territoires tropicaux de l'union française - Extrait des Comptes Rendus de la 2e Conférence Interafricaine des Sols, Léopoldville, Document n°51, pp. 705-708.
- AUGUSTIN B. (1923).** La structure de l'Algérie. In Annales de Géologie, t. 32, n°177, pp. 271-275.
- BAIDDAH A., SAIDI M.E., DAOUDI L., EL MIMOUNI A. et SMAIJ Z. (2012).** Typologie des crues en zone montagneuse, océanique et semi-aride. Le cas du bassin versant du KSOB (Haut Atlas Occidental, Maroc). Larhyss Journal, n° 11, pp.79-96.
- BALLAIS J.L. (1981).** Recherches géomorphologiques dans les Aurès (Algérie), Thèse doctorat ès-Lettres et Sciences Humaines, Paris I, VII+566 p., ronéot.
- BANNISTER J. (1980).** Hypsometries of Mishigan's Southeastern Lake Plain. Journal of GreatLakes Research. 6 (2), 154 p.
- BATTALA R. and SALA M. (1992).** Temporal variability of suspended sediment in a Mediterranean river. International conférence Canberra, Australia, IAHS Publication, n° 224, pp. 229-305.
- BATTALA J.B. and SALA M. (1994).** Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. Variability in Stream Erosion and Sediment Transport (Proceedings of the Canberra Symposium December 1994). IAHS Pubi., n° 224, pp. 299-305.
- BELALA F. et HIRCHE A. (2013).** Changements climatiques : tendance et variabilité pluviométrique dans quelques stations steppiques algériennes. USTHB- FBS- 4th International Congress of the Populations & Animal Communities "Dynamics & Biodiversity of the terrestrial & aquatic Ecosystems""CIPCA4"TAGHIT (Bechar) – ALGERIA, 19- 21 November, 2013. pp. 302-306.
- BELHADJ BOUCHAIB F. (2013).** Modélisation du transport solide dans le bassin d'El Oued Mina et de la sédimentation du barrage S.M.B.A. Thèse de Doctorat Es-sciences de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique. Blida.
- BENCHETRIT M. (1956).** Les sols d'Algérie. In: Revue de géographie alpine, tome 44, n°4, 1956. pp. 749-761.
- BENCHETRIT M. (1972).** L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Paris. P.U.F.
- BENFETTA H., OUADJA A., ACHOUR B. et REMINI B. (Mars 2018).** Perte de capacité dans les barrages situés dans les zones arides et semi arides. Cas des barrages de Gargar, Bouhanifia, Ouizert et Fom El Gherza. Larhyss Journal, n°25, pp. 183-201.
- BENKHALED A. et RIMINI B. (2003).** Analyse de la relation de Puissance : débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'oued Wahrân (Algérie). Rev. Sci. Eau, vol.16, n°3, pp. 333-356.

- BENKHALED A. et REMINI B. (2003).** Influence des paramètres hydrométéorologiques sur l'estimation des apports solides dans un bassin versant de zone semi aride. L'Oued Wahrane. Colloque International Oasis, Eau et Population. Biskra. 22-23 et 24 Septembre.
- BENKHALED A. (2007).** Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Chilif. Comparaison des techniques et des résultats. Courrier du Savoir, Univ Biskra, n°8, pp. 83-91.
- BENKHALED A. et RIMINI B. (2010).** Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algérie). Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, vol. 48, n°2, pp. 243-255.
- BEN MAMMOU A. et LOUATI M. H. (2007).** Evolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. Revue des Sciences de l'Eau, vol. 20, n° 2, pp. 201-211.
- BENSAOULA F. et ADJIM M. (2008).** La mobilisation des ressources en eau : contexte climatique et contraintes socio-économiques (Cas de la Wilaya de Tlemcen). Larhyss Journal, n°7, pp. 79-92.
- BENZARTI Z. (2003).** L'intensité horaire de la pluie à Tunis Manouba. Publication de l'Association Internationale de Climatologie, vol. 15, pp.287-294.
- BERGHOUT A. et MEDDI M. (2016).** Sediment transport modelling in wadi Chemora during flood flow events. Journal of Water and Land Development, n° 31 (X–XII), pp. 23–31.
- BLISSAG B., DAHMANI S., BOUNOUA R. et KHODJA H.D. (2017).** Quantification et étude de la variabilité des apports liquide et solide du bassin du Hodna, cas du sous-bassin versant du K'SOB. Revue Univ. Ouargla. Incomplet.
- BOIFFIN J. (1984).** La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Docteur Ingénieur. Institut National Agronomique Paris Grignon-France.
- BOUANANI A., TERFOUS A. et MEGNOUNIF A. (1999).** Evaluation du transport solide dans le bassin de l'Isser (Nord-ouest algérien). 2eSem. Maghrébin, Tizi - Ouzou. 5 p.
- BOUANANI, A., TERFOUS, A., BENSLIMANE M. et CHERIF Z.A. (1999).** Resources and stocks of water of Algeria. First int. Conf. On the geology of Africa. Assiut, Egypte, 23625 nov.
- BOUANANI A., BABA HAMED K. et MANIA J. (2003).** Variations climatiques et conséquences hydrologiques : cas du bassin versant de la Tafna (NW Algérie). Symposium int. « Hydrologie des régions méditerranéennes et semi arides ». Montpellier avril 2003.
- BOUANANI A. (2004).** Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW Algérie). Thèse de Doctorat d'Etat, Univ Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.

- BOUANANI A., BABA HAMED K. MANIA J. et BENSALAH M. (2005).** Le comportement d'un système hydrologique en climat méditerranéen par l'analyse corrélatoire et spectrale des débits et des pluies. Cas de trois sous bassins subméditerranéens : (oued Sebdu, Moulah et Isser Tafna-NW Algérie). *Rev. Sci. Eau /Journal Water Sci.*, vol. 18, n°2, pp. 215–224.
- BOUANANI A., BABA-HAMED K. et FANDI W. (2013).** Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna – nord-ouest Algérie). *Rev. Sci. Eau /Journal Water Sci.*, vol. 26, n° 2, pp. 119-132.
- BOUCHELKIA H. et REMINI B. (2003).** Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif. *Ingénieries* n° 33, pp. 45- 56.
- BOUCHELKIA H., BELARBI F. et REMINI B. (2011).** Quantification du transport solide en suspension par analyse statistique : Cas du bassin versant de Mouillah. *Revue scientifique et Technique LJEE*, n° 19, pp. 29-41.
- BOUILLIN J.P. (1975).** Un modèle de l'évolution tectonique alpine anté-burdigalienne du Nord du Constantinois, sur la transversale du Moule ed Demamène (Algérie). *B. S. G. F.*, (7), XVII, n°4, p.582-592.
- BOUILLIN J.P. (1977).** Géologie alpine de la petite Kabylie dans la région de Collo et El Milia (Algérie). Thèse Faculté des Sciences, Paris VI, 511 p.
- BOUILLIN J. P (1982).**-Mise en évidence d'importantes structures tangentielles ausein du socle de Petite kabylie (Algérie). *C. R Acad. Sc. Paris*, t. 294, Série II, p. 1271-1274.
- BOUILLIN J.P. (1986).** Le « bassin maghrébin » : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. *Bull. Soc. Géol. France*, vol. 8, n°2, pp. 547-558.
- BOUILLIN J. P (1992).**-Le « bassin maghrébin » : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. *Bull. Soc. Géol. France*, (8), t. II. n°4, p. 547-558.
- BOUROUBA M. (1988).** Hydrologie et érosion actuelle dans le Tell oriental : le cas du bassin-versant de l'oued Djendjen, thèse de 3^e cycle, Université d' Aix-Marseille II. 404 pages. 88 figures. 6 cartes h.t.
- BOUROUBA M. (1993).** Bilan de l'érosion des bassins versants de l'Algérie orientale. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, n°85-86, pp. 15-24.
- BOUROUBA M. (1994).** Bilan comparatif de l'érosion actuelle dans deux bassins-versants de l'Algérie oriental : le Seybouse et le Djendjen. *Méditerranée*, Tome 80, n° 3-4. *Géographie physique de l'Algérie orientale*. pp. 31-39.
- BOUROUBA M. (1996).** L'érosion actuelle dans l'Algérie septentrionale : Bilan d'érosion comparatif de deux affluents du Cheliff : l'Oued Ebda et l'Oued Deurdeur. *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, vol. 24, n°93-94. *Érosion, aléas naturels et cartographie*. pp. 113-128.

- BOUROUBA M. (1997).** Les variations de la turbidité et leurs relations avec le débit et les précipitations dans les bassins-versants des oueds Reboa et Boudouaou (Algérie). *MEDIT* n° 3, pp. 52-58.
- BOUROUBA M. (1997).** Les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits des oueds semi-arides de l'Algérie orientale. *Bull. ORSTOM*, n°17, pp.345-360.
- BOUROUBA M. (1998).** Phénomène de transport solide dans les Hauts Plateaux Orientaux. Cas de l'Oued Logmane et oued Leham dans le bassin de la Hodna. *Revue des Sciences et Technologie*, pp.5-11.
- BOUROUBA M. (1998).** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides de l'oued Medjerda supérieur (Algérie orientale). *Bull. Réseau Érosion*, n°18, pp. 76–97.
- BOUTOUTAOU D., BELAGOUNE F. et SAGGAÏ S. (2011).** Etude des crues des bassins versants arides et semi-arides de l'Algérie. Bassins, d'El Honda, de Chott Melghir et des Hauts plateaux (Bassins : 05-06-07). *Annales des Sciences et Technologie*, vol. 3, n° 1, pp. 46-53.
- BRASINGTON J. and RICHARDS K. (2000).** Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. *Hydrol. Process.*, vol.14, pp. 2559-2574.
- CAMPBELL F.B. et BAUDER H.A. (1940).** A rating-curve method for determining silt-discharge of stream, *EOS Trans* », *Am. Geophys. Union*. 21, pp. 603-607.
- CAMPENHOUT J. V., DENIS A.C., HALLOT HOUBRECHTS G., LEVECQ Y., PEETERS A. et PETIT F. (2013).** Flux des sédiments en suspension dans les rivières du bassin de la Meuse : proposition d'une typologie régionale basée sur la dénudation spécifique des bassins versants. *BSGLG*, n°61, pp. 15-36.
- CASENAVE A. et VALENTIN C. (1989).** Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. Paris : ORSTOM, 229 p.
- CASTANY G. (1967).** *Traité pratique des eaux souterraines*. Ed. Dunod. Paris. 655 p., 249 fig.
- CHAUMONT M. (1969).** Les influences des régimes climatiques en France, en Espagne et en Afrique du Nord et leurs conséquences hydrologiques. Service des études scientifiques. Clairbois. Birmandreïs. Alger. 174 p. 24 fig.
- CHAUMONT M. et PAQUIN C. (1971).** Carte pluviométrique de l'Algérie, éch. 1/50 000. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord, Alger. 4 feuilles. 1 notice.
- CHERIF E.A., ERRIH M. et H. CHERIF H.M. (2009).** Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, vol. 54, n° 2. pp. 238-348.

- CNEA (2002).** Etude d'avant-projet détaillée pour la réalisation du lac collinaire Oued Saidane, Tunisie. pp.12-15.
- COYNEL A. (2005).** Érosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour- Garonne. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1.
- CRAWFORD C.G. (1991).** Estimating of suspended –sediment rating curves and mean ususpended sediment load, journal of hydrology, vol. 129, pp. 331-348.
- DEMMAK A. (1982).** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Th. Docteur-Ingénieur Univ. Pierre et Marie Curie- Paris 6, France.
- DJEFFALI D. (2013).** L'Envasement dans Les Barrages de l'Algérie. Silting in the Dams of Algeria. Proceeding du Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement SIHE 2013 Ouargla, pp. 415-418.
- DRESCH J. (1942).** Le Haut Atlas et l'Atlas Saharien. In Annales de Géologie, t. 51, n°288, pp. 311-312.
- DRESCH J. (1956).** Une carte des sols de l'Algérie. Annales de géographie, n° 348, p. 151.
- DUAN N. (1983).** Smearing estimate: a nonparametric retransformation method. Journal of the American Statatitians Association, n°. 78, pp. 605-610.
- DUBREUIL P. (1965).** Intérêt agronomique de l'étude statistique des pluies. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer Service Hydrologique. Paris.
- DUBREUIL P. (1974).** Initiation a l'analyse hydrologique, Paris, Masson- ORSTOM. 216p.
- DUMAS P. et al. (2010).** Developing Erosion Models for Integrated Coastal Zone Management. A Case Study of New Caledonia West Coast. Marine Pollution Bulletin, n° 161, pp. 519-529.
- DURAND J.H. (1954).** Notice explicative générale de la carte des sols de l'Algérie au 1/200.000e et au 1/500.000'. Publications pédologiques et agrologiques du gouvernement général de l'Algérie.
- DURAND J.M., ROYET P. et MÉRIAUX P. (1999).** Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale. CEMAGREF Editions. France.
- DURAND-DELGA M. (2011).** La recherche géologique française en Algérie du Nord après 1962, Travaux du Comité Français d'Histoire de la Géologie (COFRHIGEO), Troisième série, t, XXV, n°10, pp. 217-222.
- ELAHCENE O. et REMINI B. (2009).** Corrélation entre la concentration en matières en suspension et le débit liquide dans le bassin versant de ouedbellah (Algérie). European Journal of ScientificResearch. vol. 26, n° 1, pp.139-146.

- ELAHCEN O. (2013).** Etude du transport solide par charriage et en suspension dans le bassin versant de l'Oued Bellah (Tipaza). Thèse de Doctorat en Sciences. Ecole Nationale Supérieure Agronomique El- Harrach. Algérie.
- ELAHCENE O., TERFOUS A., REMINI B., GHENAIM A. et POULET J.B. (2013).** Etude de la dynamique sédimentaire dans le bassin versant de l'Oued Bellah (Algérie). Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 58, n° 1, pp.224-236.
- ELAHCENE O., SAID H., BENZEKRI A. et CHATI A. (2016).** Evolution des concentrations des sédiments en suspension et des débits solides en fonction des débits liquides dans le bassin versant de l'oued Haddad wilaya de Relizane. The second edition of the international conference on water resources (ICWR), evaluation and protection. January 2016.
- EL GHACHI M. et MORCHID F.Z. (2015).** Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Khénifra dans un contexte de variabilité climatique. Journal of Mater. Environ. Sci., vol.6, n° 11, pp. 3346-3358.
- EL MAHI A., MEDDI M. et BRAVARD J.P. (2012).** Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord). Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 57, n° 8. pp. 1642-1661.
- ENQUETE AQUASTAT (2005).** L'irrigation en Afrique en chiffres.
- ETCHANCHU D. et PROBST J.L. (1986).** Erosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau, C.R Acad. SCI. Paris, série II, vol. 30, n° 17, pp. 1063-1068.
- FAO. (1992).** Algérie. Projet d'appui à l'irrigation (PAI). Rapport d'identification. FAO Centre d'investissement, programme de coopération FAO/Banque mondiale. Rapport N° 4/92 CPALG 36. Rome.
- FAO. (1996).** Algérie – Suivi du Sommet mondial de l'alimentation : Projet de stratégie pour le développement agricole national – Horizon 2010.
- F.A.O. (1998).** Crop evaporation. Irrigation and drainage paper. 56.300 p.
- FAO. (1999).** Étude sur le secteur agricole en Algérie.
- FAO. (2001).** Étude prospective du secteur forestier en Afrique (FOSA) – Algérie.
- FENN C.R., GURNELL A.M. and BEECROFT I.R. (1985).** An evaluation of the use of suspended sediment rating curves for the prediction of suspended sediment concentration in a proglacial stream. Ceogr. AI/I.67 A (1-2), pp. 71-82.
- FERGUSON R.I. (1986).** River loads underestimated by rating curves. Water Resources Research, vol. 22, pp. 74-76.

- FERGUSON R.I. (1987).** Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth Surf Processes and Landforms*, vol. 12, pp. 95-104.
- FERGUSON R.I (2007).** Flow resistance equations for gravel and boulder bed streams. *Water Resources Research*, vol. 43 (W05427), pp. 1-12.
- FERRER J.P. (1992).** Analyse statistique de pluies maximales journalières. Comparaison de différentes méthodes et application au bassin Guadalhorce (Espagne). *Hydrol. Continent*, vol. 7, n° 1, pp. 23-31.
- FLEMING G. (1977).** Erosion et conservation des sols ; ORSTOM. Paris. 85p.
- FOURNIER F. (1960).** Climat et érosion – P.U.F. Paris, 201 p.
- FOURNIER F. (1960).** Débit solide des cours d'eau. Essai d'estimation de la perte en terre subie par l'ensemble du globe terrestre. *Land Erosion, Precipitation, Evaporation-Proceedings of the General Assembly of Helsinki*. IAHS Publ., n° 53. pp. 19-25.
- FOURNIER F (non-daté).** Les travaux sur l'érosion. pp. 22-125-135.
- FOURNIER F. (1969).** L'érosion hydrique et le climat. *Bulletin Technique d'Information. Météorologie et Agriculture*, n° 237, pp. 111-115.
- FREMION F. (2016).** Dynamique des flux sédimentaires et des éléments métalliques en lien avec l'exploitation courante et exceptionnelle d'un barrage hydroélectrique. Thèse de Docteur de l'Université de Limoges. France.
- GELARD J.P. (1969).** Le flysch à base schisto-gréseuse de la bordure méridionale et orientale du massif de Chellata (Grande Kabylie, Algérie). *Bull. Soc. Géol. Fr. Paris*, p.676-686.
- GHACHI A. (1986).** Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie. Thèse. Doctorat 3e cycle. Ed. O.P.U. 508 p., 74 fig., 11 cartes.
- GHENIM A. (2001).** Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna : cas d'oued Isser, oued mouilah et de la Haute tafna. Em. Magister, Univ. Tlemcen.
- GHENIM A., SEDDINI A., TERFOUS A. (2007).** Production et exportation des sédiments en suspension lors des événements de crue. Cas du bassin versant de l'oued mouilah. *Larhyss Journal*, n° 6, pp. 35-44.
- GHENIM A. et MEGNOUNIF A. (2012).** Estimation de la précision de la relation en puissance reliant la concentration au débit liquide. *Revue « Nature & Technologie »*. C- Sciences de l'Environnement, n° 9, pp. 54-60.
- GHERNAOUT R. et REMINI B. (2018).** Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration des sédiments en suspension - débit liquide (C-Q) dans le bassin versant de l'oued mina (Algérie). *Larhyss Journal*, n°35, pp. 7-27.

- GUIDOUM A., ABDELMALEK N., JARNO-DRUAUX A. et MARIN F. (2012).** Modélisation cartographique et statistique de l'érosion hydrique dans la région des Aurès (Algérie). TSM, n° 10. 107^e année.
- GUIDOUM A. (2017).** Caractérisation hydrologique et analyse du transport solide en suspension dans trois ensembles hydrographiques du nord-est algérien. Etude de cas dans la Seybouse, les hautes plaines constantinoises et Chott Melghir (coupe nord-sud). Thèse de Doctorat en sciences en Hydraulique. Univ. Biskra. Algérie.
- GUIRAUD R. (1973).** Evolution post-Triasique de l'Avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Sci. Univ. Nice, 114 fig., 12 pl. h.t., 270 p.
- HABI M. et MORSLI B. (2011).** Contraintes et perspectives des retenues collinaires dans le Nord-Ouest algérien. Sécheresse, vol. 22, pp. 49-56.
- HABIBI B., MEDDI M. et BOUCEFIANE A. (2013).** Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales. Cas du Bassin Chott-Chergui. Revue « Nature & Technologie », C-Sciences de l'Environnement, n°8, pp. 41-48.
- HADJ-SAID S. (2007).** Contribution à l'étude hydrogéologique d'un Aquifère en zone côtière : Cas de la nappe de Guerbes. Thèse de Doctorat, Univ. Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
- HALLOUZ F., MEDDI M. et MAHE G. (2012).** Relation débit liquide-transport de matières en suspension dans le bassin de l'Oued Mina, en amont du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (Oued Cheliff), Nord-Ouest d'Algérie. IS.RIVERS 2012 A2 – DEBORDEMENTS / FLOODS. pp. 1 -3.
- HALLOUZ F., MEDDI M. et MAHE G. (2013).** Modification du régime hydroclimatique dans le bassin de l'oued Mina (Nord-Ouest d'Algérie). Revue des Sciences de l'Eau, vol. 26, n°1, pp. 33-38.
- HASBAIA M., HEDJAZI A. et BENAYADA L. (2012).** Variabilité de l'érosion hydrique dans le bassin du Hodna: cas du sous-bassin versant de l'Oued Elham. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét, vol. 1, pp. 28-32.
- HEIDEL S.G. (1956).** The progressive lag of sediment concentration with flood waves. In : Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers (ed. by G.P., Willams, 1989). J. Hydrol., n° 111, pp. 89-106.
- HJULSTROM F. (1935).** Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Bulletin of the Geological Institute University of Uppsala, vol. 25, pp.221-527.
- HLAOUI Z. et HENIA L. (2015).** A propos de l'évolution des précipitations mensuelles et quotidiennes en Tunisie (1950-2010) : tendances ou non ?. XXVIII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège.

- HOROWITZ A. J. (2003).** An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, vol. 17, n°17, pp. 3387-3409.
- HORTON R.E. (1945).** Erosionnel development of streams and their drainage basins. Hydro-physical approach to quantitative geomorphology.-*Geological Society of America Bulletin*, vol. 56, n° 3, pp. 275-370.
- JANSSON M. B. (1982).** Land Erosion by Water in Different Climates. UNGI Report n° 57, Dept Physical Geography, Uppsala University.
- JANSSON M.B. (1985).** A comparison of de transformed logarithmic regressions and power function regressions. *Geogr. Ann., Ser. A*, vol. 67, pp. 61-70.
- JANSSON, M.B. (1988).** A global survey of sedimentyield. *Geogr. Ann. Ser. A*, vol. 70, pp. 81-98.
- JANSSON M.B. (1996).** Estimating of sediment rating curve of the Reventazon river at Polomo using loggest mean loads withindischarges classes. *Journal of Hydrology*, n°183, pp. 227-241.
- JANSSON M.B. (1997).** Comparison of sediment rating curves developed on load and on concentration. *Nordic Hydrology*, vol. 28, n°3, pp.189-200.
- KACEMI A. (2013).** Evolution lithostructure des Monts des Ksour (Atlas Saharien, Algérie) au cours du Trias et du Jurassique : Géodynamique, Typologie du bassin et Télédétection). Thèse de Doctorat, Univ Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- KASSOUL M. (1999).** Prédétermination de la durée de vie de barrages en Algérie. *LA HOUILLE BLANCHE*, n° 3/4, pp. 89-94.
- KASSOUL M., ABDELGADER A. et BELORGEY M. (1999).** Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. *Rev. Sci. Eau*, vol. 10, n° 3, pp. 339-359.
- KATTAN Z. GAC J.Y. and PROBST J.L. (1987).** Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin. *Journal of Hydrology*, vol. 92, pp. 59-76.
- KENDALL M.G. (1975).** RANK CORRELATION METHODS, CHARLES GRIFFIN, LONDON LETTENMAIER D.P. (1988). Multivariate Nonparametric Tests for Trend in Water Quality, *Water Resources Bulletin*, n° 24, pp. 505-512
- KETROUCI K., MEDDI M. et ABDESSELAM B. (2012).** Etude des crues extrêmes en Algérie : cas du bassin-versant de la Tafna. *Sécheresse*, vol. 23. pp. 297-305.
- KHALI L., BEN HAMMAM LECH-HAB K., RAISSOUNI A et EL ARRIM A. (2016).** Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par approche GIS/USLE au niveau du bassin versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). *Journal of Mater. Environ. Sci.*, vol.7, n° 8, pp. 2778-2795.

- KHANCHOUL K. (2006).** Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants de l'extrême Nord –Est Algérien. Thèse de Doctorat d'état. Université Badji Mokhtar – Annaba.
- LABORDE (J.-P.), 2000.** Eléments d'hydrologie de surface, Cours de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 191 p.
- LAFFITE R. (1939).** Etude géologique de l'Aurès. *Bull. Serv. Carte géol. Algérie. 2ème série, strati. Descriptions régionales, n° 15.*
- LAFFORGUE A. NAAM E. (1978).** Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. Cahier ORSTOM, série hydrologie, vol. XIII, n°3, pp.195-237.
- LAHONDÈRE J.C. (1979).** Datation des grès numidiens d'Algérie orientale: Conséquences structurales, CR. Acad. Sc. Paris t 289, n°4, pp 383-386.
- LAHONDÈRE J.C. (1983).** Notice explicative de la feuille Bastia à 1/50000. Orléans: BRGM édit.
- LARFI B. et REMINI B. (2006).** Le transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser impact sur l'envasement du barrage de Beni Amrane (Algérie). Larhyss Journal, pp.63-73. Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface.
- LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C. et DAROUSSIN J. (2002).** L'érosion hydrique des sols en France. INRA, IFEN.
- LE BISSONNAIS Y., BRUAND A., JAMAGNE M. et GORSE M. (2004).** Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale Exemple du département de l'Aisne. Étude et Gestion des Sols, vol. 11, n° 3, pp. 307- 321.
- LEFRANÇOIS J. (2007).** Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. Hydrological Processes, vol. 21, pp. 2923- 2933.
- LENZI M. A. et MARCHI L. (2000).** Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (Northeastern Italy), CATENA, vol. 39, n°4, pp. 267-282.
- LENZI M. A. (2003).** Local scouring and morphological adjustments in steep channels with check-dam sequences. Geomorphology, vol. 55, Issues 1–4, pp. 97-109.
- LENZI M.A., MAO L. COMITI F. (2003)** Interannual variation of suspended sediment load and sediment yield in an alpine catchment. Hydrol. Sci. J. vol. 48, n° 6, pp. 899–915.
- LEOPOLD et al. (1953).** The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, Washington, D.C.-U.S.G.S-. Professional Paper.
- LOGAN O. (2004).** Effects of fine sediment deposition on benthic invertebrate communities. Thesis.

- LOUAMERI A. (2010).** Contribution a L'évaluation des Transports Solides de L'oued Bouhamdane à la Station de Medjez Ammar II et a Barrage de Hammam Debagh. International Network Environmental Management Conflicts, Santa Catarina – Brasil, vol. 1, n°1, pp. 23-29.
- LOUAMRI. A. (2013).** Le bassin-versant de la Seybouse (Algérie orientale): hydrologie et aménagement des eaux. Thèse de doctorat en sciences. Université de Constantine 1. Algérie.
- LUDWING W. and PROBST J.L. (1998).** River sediment discharge to the oceans: present-day controls and global budgets. Am. Journ. Sci., vol. 298. pp. 265-295.
- LUNEAU G. (2006).** La spatialisation de l'aléa érosion des sols en nouvelle Calédonie. Stage de master 2, Université de Toulouse, Toulouse, 75 p.
- MADANI H.C., BOUANNANI A. and BOUKERMA B. (2017).** A rating-curve method for determining specific suspended sediment yield in the catchment area of Sidi Bel Abbas (Algeria). DSpace at Kasdi Merbah University Ouargla.
- MALKI S. B. (2006).** Politique de l'eau en Algérie : les modèles marchands face à la pauvreté. Les Cahiers du MECAS, n° 2. pp. 97-106.
- MALUTTA S., KOBİYAMA M., CHAFFE. P.L.B and BONUMA. N.B. (2020).** Hysteresis analysis to quantify and qualify the sediment dynamics: state of the art. Water Science & Technology, vol. 81, n°12.
- MANO V. (2008).** Processus conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues - Optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique -. Doctorat de l'université Joseph Fourier. GRENOBLE 1.
- MANO V., NEMERY J., BELLEUDY P. and POIREL A. (2009).** Assessment of suspended sediment transport in four alpine watersheds (France): influence of the climatic regime. Hydrol. Process., vol. 23, pp. 777–792.
- MEBARKI A. (2010).** La région du Maghreb face à la rareté de l'eau. L'exemple du défi algérien : mobilisation et gestion durable des ressources. ICID+18 2nd International Conference: Climate, Sustainability and Development in semi-arid regions August 16-20, Fortaleza - Ceará, Brazil.
- MC KEE T.B, DOESKEN N.J et KLEIST J. (1993).** The relationship of drought frequency and duration to time scale. Report of the eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim (California), 6 p.
- MEDDI M., Khaldi A. et MEDDI, H. (1998).** Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord. Proceedings of an International Symposium held at Vienna from «Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes». IAHS Publ., n°249, pp 393-396.

- MEDDI M. et MEDDI H. (1998).** Etude des pluies annuelles et journalières dans le Sahara Algérien. SECHERESSE, vol. 9, n°3, pp.193-199.
- MEDDI M. et BELHADJ BOUCHAIB F.B. (2010).** Etude des crues dans le bassin du Cheliff. Application de la méthode du Gradex. Revue « Nature et Technologie », n°3, pp. 21-28
- MEDDI M. (2015).** Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord. Larhyss Journal, n°24, Décembre 2015, pp. 315-336.
- MEDEJERAB A. HENIA L. (2011).** Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord-occidentale. Courrier du Savoir, n° 11, 71-79.
- MEDJBER A. (2011).** Influence de la variabilité des précipitations sur le taux de sédimentations dans plusieurs barrages algériens. Revue Scientifique et Technique LJEE, n°19, pp. 90-99.
- MEGNOUNIF A., BOUANANI A., TERFOUS A. et BABA HAMED K. (1999).** Distributions statistiques de la pluviométrie et mise en évidence de l'influence du relief (cas des monts de Tlemcen, Nord-ouest Algérie). Rev. Sci & Tech., n°12, pp. 77 - 80. 6 fig.
- MEGNOUNIF A., TERFOUS A. et BOUANANI A. (2000).** Contribution des deux composantes de l'écoulement à la production de sédiments transportés en suspension dans les zones semi-arides : cas de l'Oued Mouilah (Nord-ouest Algérie). Sem. Int. « Hydrologie des régions méditerranéennes», Montpellier 11-13 Octobre. Phi-V/Doc. Tech. Hydrologie / n°51. Ed. UNESCO.
- MEGUENNI K. et REMINI B. (2008).** Evaluation du débit solide dans le bassin versant de HARREZA (Algérie). Larhyss Journal, n° 7, pp. 7-19.
- MEYBECK M. (1984).** Les fleuves et les cycles géochimiques des éléments. Thèse Sciences, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France.
- MILLIMAN J.D. and MEADE R.H. (1983).** Worldwide delivery of river sediment to the oceans. Journal of Geology, vol. 91, pp 1-21.
- MINISTERE DES RESSOURCES EN EAU (2015).** Politique gouvernementale dans le domaine des ressources en eau. (Septembre 2015).
- MOATAR F., MEYBECK M., RAYMOND S., COYNEL A., LUDWIG W., MANO V., NEMERY J., POIREL A., ETCHEBER H. et, CROUZET P.H. (2008).** Evaluation des flux de MES à partir des suivis discrets : méthodes de calcul et incertitudes. Transports solides et gestion des sédiments en milieux naturels et urbains. LA HOUILLE BLANCHE, n° 4, pp.64-71.

- MORGAN R.P.C. (2005).** Soil Erosion and Conservation. 3rd edition. Blackwell Publishing, Oxford, 304p.
- MOUNIROU L.A. (2012).** Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : Quantification et transposition des données. Doctorat de l'université Montpellier II. France.
- MUSY A. (2005).** Cours d'hydrologie générale. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM) Institut des Sciences e Technologies de l'Environnement, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- NAILI M. (2012).** Désertification, érosion hydrique et dégradation des sols : plus de 50 millions d'hectares menacés en Algérie, in journal El Watan, le 7 mai 2012, N°6553.
- NASCIMENTO Jr. L., SANT'ANNA NETO J. L. et DUBREUIL V. (2015).** Tendances, ruptures et variabilité hydro-climatiques dans l'état du Paraná - Brésil. XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège.
- NICHANE M. et KHELIL M.A. (2014).** Changements climatiques et ressources en eau en Algérie : vulnérabilité impact et stratégie d'adaptation. Revues des Bio Ressources, vol.4, n° 2, pp. 1-7.
- NOUACEUR Z., LAIGNEL B. et TURKI I. (2013).** Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? Physio-Géo,
- NOUVELOT J.F. (1992).** Erosion mécanique, transport solide, sédimentation dans le cycle de l'eau. ORSTOM. P. 126.
- OUSMANE D. (1991-1992).** Ajustement statistique à des échantillons des pluies et débits. Application aux données du bassin versant de la Falémé. Rapport de stage de D.E.A, Université Cheikh Anta Diop. Sénégal.
- PARDE, M. (1953)** La turbidité des rivières et ses facteurs géographiques. Rev. Geogr. Alpine, vol. 41, n°3, pp. 399- 421.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B. et BOYER J.F. (1996).** Procédures d'identification de cc ruptures » dans des séries chronologiques - modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. L'hydrologie tropicale : géoscience el outil pour le développement : (Actes de la conférence de Paris, mai 1995). IAHS Pub., n° 238, pp. 99-110.
- PETER BAČA S. (2008).** Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia. Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 5, n° 1, pp. 224-234.
- PETTIT A. N. (1979).** A non-parametric approach ID the change-point problem. *Appl. Statist.* 28(2), 126-135.

- PICOUET C., HINGRAY B. et OLIVRY J.C. (2000).** Modélisation conceptuelle globale du régime du transport particulaire sur les fleuves tropicaux d'Afrique : Application aux bassins du Niger supérieur et du Bani, Mali, Rev. Sci. Eau, vol. 13, n° 4, pp. 463-481.
- PINTO MARTINS D. (2008).** Aménagements hydroélectriques et impacts sur la dynamique des flux d'eau et des sédiments. Le cas du haut Paraná, Brésil. Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2, 243p.
- PROBST J. L. et BAZERABACHI (1986).** Transports en solution et en suspension par la Garonne Supérieure. Sci. Géol., Bull., vol. 39, n°1, pp.79-98.
- PROBST J.L. et BAZERBACHI A. (1986).** Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. Sci. Géol. Bull., vol. 39, n°1, pp. 79-98.
- PROBST J. L. and AMIOTTE SUCHET P. (1992).** Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 37, n° 6, pp. 621-637.
- RAOULT J.F. (1969).** Données nouvelles sur les flyschs au nord du Kef Sidi Driss et dans la zone du col des oliviers (nord du Constantine) B.S.G.F, (7), t. 9, 516-522. Relations entre la dorsale kabyle et les flyschs sur la transversale du Djebel Rhed - phases tangentielles éocènes paléogéographie B.S.G.F, vol. 7, t 9, pp. 523-543.
- RAOULT J.F. (1971).** Etude géologique du Djebel Bou Aded (Dorsal Kabyle, Nord Constantinois, Algérie). Bull. Serv. Géol. Algérie, N.S. n°41, pp. 95-127. Alger.
- RAOULT J.F. (1972).** Précisions sur le fliche massylien : Série Stratigraphique, variations de faciès, nature du matériel remanié (Nord du Constantinois, Algérie). Bull. Etude géologique du Djebel Bou Aded (Dorsal Kabyle, Nord Constantinois, Algérie). Bul. Hist. Nat. Afrique Nord, t. 63 ; (1-2), pp. 73-92, Alger.
- RAOULT J.F. (1974).** Géologie de centre de la chaîne numidique (nord de Constantine, Algérie) thèse, Paris, 163p.
- RECKING, A., et al. (2008a).** Bedload transport flume experiments on steep slopes, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 134, 1302-1310.
- RECKING, A., et al. (2008b),** Feedback between bed load and flow resistance in gravel and cobble bed rivers, Water Resources Research, vol. 44, 21.
- RECKING A. (2009).** Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bedload motion, Water Resources Research, vol. 5, W04401, 16.
- RECKING A. et al. (2009).** An experimental investigation of mechanisms responsible for bedload sheet production and migration, J. Geophys. Res., 114, F03010.
- RECKING A. (2010).** A comparison between flume and field bedload transport data and consequences for surface based bedload transport prediction, Water Resources Research.

- REMENIERAS G. (1965).** L'hydrologie de l'ingénieur, 2ième édition, Eyrolles, Paris 456 p.
- REMENIERAS G. (1980).** L'hydrologie de l'ingénieur, Paris, Eyrolles, 456 p.
- REMINI B. (Juin 2002).** Evolution de la sédimentation dans les retenues de barrage et le soutirage des particules fines. Courrier du Savoir- Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, n°2, Juin 2002, pp. 29-34.
- REMINI W. et REMINI B. (2003).** La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. Larhyss Journal, n°2, pp. 45-54.
- REMINI B. (2005).** La problématique de l'eau en Algérie. Office des Publications Universitaires. 162 p.
- REMINI B. (2005).** L'évaporation des lacs de barrages dans les régions arides et semi arides : exemples algériens. Larhyss Journal, n° 4, pp.81-89.
- REMINI B. et HALLOUCHE W. (2005).** Prévission de l'envasement dans les barrages du Maghreb. Larhyss Journal, n° 4, pp.69-80.
- REMINI B., LEDUC C. et HALLOUCHE W. (2009).** Evolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens. Sécheresse, vol. 20, n° 1, pp. 96-103.
- REMINI B., HALLOUCHE W. et ACHOUR B. (2009).** L'Algérie : plus d'un siècle de désenvasement des barrages. Chapitre 8 : L'Etat des Ressources En Eau au Maghreb en 2009.
- REMINI B. (2010).** La problématique de l'eau en Algérie du Nord. Larhyss Journal, n°8, pp.27-46.
- REMINI B. (2017).** Une nouvelle approche de gestion de l'envasement des barrages. Larhyss Journal, n° 31, pp.51-81.
- REMINI B., MERZOUG H. et RAIS M.A. (2018).** Le barrage de Foug El Gherza (Algérie) : Quand l'eau coule dans le massif karstique. Larhyss Journal, n°36, pp. 179-198.
- REY F., BALLAIS J., MARRE A. et ROVERA G. (2004).** Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. C. R. Geoscience, vol. 336, pp. 991-998.
- RICHARD F. Hadley.** Sediment yield and land use in southwest United States, pp.96-98.
- ROOSE E. et SARRAILH J.M. (1989-90).** Erodibilité de quelques sols tropicaux Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cah. ORSTOM, sér. Pedol., vol. XXV, no I-2, pp. 7-30.
- ROOSE E. (1994).** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO 94, n°70. Centre ORSTOM Montpellier, France.

- ROUISSAT B. (2010).** La gestion des ressources en eau en Algérie : Situation, défis et apport de l'approche systémique. *Revue Economie & Management*, n°10, pp. 132-146.
- SAHRAOUI S. (2014).** Etude des discontinuités litho-stratigraphiques et relation tectono-sédimentaire à travers l'intervalle Santonien-Maastrichtien dans la région de Batna (Aurès). Mémoire de Magister, Univ. El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie.
- SCHUMM S. A. (1963).** The disparity between present rates of erosion and orogeny. USGS Prof. Pap. 454H.
- SCHUMM S.A. (1954).** The relation of drainage basin relief to sediment loss. *Land Erosion, Precipitation-General Assembly of Rome*. IAHS Publ., vol. I, n°. 36, pp. 216-219
- SOGREAH, (1983).** Erosion et transport solide au Maghreb. Analyse bibliographique, PNUD Projet RAB/80/011, 1982, 45 p.
- SOUAK F.Z. (2008).** La politique de l'eau en Algérie : valorisation et développement durable. *Revue d'économie et de statistique appliquée*. vol. 5, n°2, pp. 96-114.
- SOUIKI S. (2007).** Les argiles du bassin de Mila- Constantine : Composition minérale, chimique, caractéristiques géotechniques et répartition des gisements. Mémoire de Magister, Univ. Mentouri, Constantine, Algérie.
- SOUTTER M., MERMOUD A. et MUSY A. (2007).** Ingénierie des eaux et du sol processus et aménagement. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- ST-HILAIRE A. (2005).** Analyse fréquentielle des précipitations des stations de Montréal et Shawinigan. Rapport de recherche R832 de l'INRS-ETE. V.23 pages.
- SUTTER R.D., VERHOVEN R. et KREIN A. (2001).** Simulation of sediment transport during flood events: laboratory and field experiments. *Journal des Sciences Hydrologiques*. vol. 46, n°4, pp. 599–610.
- TADRIST N. et al. (2016).** Impact de l'érosion sur l'envasement des barrages, la recharge des nappes phréatiques côtières et les intrusions marines dans la zone semi-aride méditerranéenne : cas du barrage de Boukourdane (Algérie). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* Vol. 20, n°4, pp. 453-467.
- TALEBIA A., BAHRAMIA A., MARDIANA M. et MAHJOOBIB J. (2015).** Determination of optimized sediment rating equation and its relationship with physical characteristics of watershed in semi- arid regions: A case study of Pol-Doab watershed, Iran. *Desert*, vol. 20, n° 2, pp.135-144.
- TATAR H., TOUIL S. et AMIRECHE H. (2012).** Protection des milieux naturels contre l'érosion hydrique et développement durable en milieu Atlasique algérien Cas de quelques bassins de l'Aurès central (Algérie). *Revista de geomorfologie*, vol. 14, pp. 39-47.

- TAVARES J.P (2010).** Erosion des sols du Cap Vert : processus et quantification à l'échelle de trois Bassins Versants de l'île de Santiago. Thèse de Doctorat. Université de BOURGOGNE. France.
- TERFOUS A., MEGHNOUNIF A. et BOUANANI A. (2001).** Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouillah (Nord Ouest Algérien). Rev. Sci. Eau, vol.14, n°2, pp. 173-185.
- TOUAHIR S., ASRI A., REMINI B. et SAAD H. (2018).** Prédiction de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Zeddine et de l'envasement du barrage Ouled Mellouk (Nord-Ouest algérien). Géomorphologie, vol. 24, n° 2 pp. 167-182.
- TOUAÏBIA B., DAUTREBANDE S., GOMER D. et AIDAOUÏ A. (1999).** Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'Oued Mina. Journal-des Sciences Hydrologiques, vol. 44, n° 6, pp. 973-986.
- TOUAÏBIA B., AIDAOUÏ A., GOMER D. ET ACHITE M. (2001).** Quantification et variabilité de l'écoulement solide en sone semi-aride, de l'Algérie du Nord. Revues des sciences hydrologiques, vol. 46, n° .1, pp. 41-53.
- TOUAÏBIA B. (2010).** Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. Sécheresse, vol. 21, n°1°, pp. 1-6.
- TOUABIA B. et GHENIM A. (2011).** Estimation du biais du modèle régressif puissance « concentration-débit » : Cas du bassin versant du K'SOB. Revue Scientifique et Technique LJEE, n°19, pp. 116-126.
- TOUMI A et REMINI B. (2002).** Contribution à l'étude des fuites dans les barrages Algériens, 1ères journées pluridisciplinaires sur les sciences de l'ingénieur "JPSI'1 2002", Université Hassiba ben Bouali CHLEF, 15-17 Décembre 2002.
- TOUMI A. et REMINI B. (2018).** Perte de la capacité de stockage d'eau au barrage de Beni Haroun, Algérie Loss of water storage capacity at the Beni Haroun dam, Algeria. SAGREN, vol. 2, n°1, pp 80-97.
- VILA J.M. (1980).** La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens. Thèse d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2 Tomes, 665p.
- WALLING D.E. (1974).** Suspended sediment and solute yield from small catchment prior to urbanisation in: Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers (ed. by G.P., Williams, 1989). J. Hydrol., vol.111, pp. 89-106.
- WALLING D.E. and WEBB D.W. (1981).** The reliability of suspended sediment load data. Erosion and sediment transport measurement, Proceedings of the Florence Symposium, June 1981), IAHS Publ., n°133.
- WALLING D. E. (1984).** The sediment yields of African rivers. IAHS Publ. Harare Symp., pp. 44- 265.

- WALLING D.E. and WEBB D.W. (1988).** The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield; some further comments. In *Sediment Budgets* (ed. Bordas, M.P., Walling, D.E.), IAHS Publication No. 174. IAHS Press. Wallingford. UK, pp 337-350.
- WILLIAMS G. P. ROSGEN D.L. (1989),** Measured total sediment loads (suspended loads and bedloads) for 93 United States streams, USGS Open-File Report 89-67, 128 pp.
- WALLING D.E. and WEBB B.W. (July 1996).** Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. Proceedings of the Exeter Symposium. IAHS Publ. Erosion and sediment yield: a global overview, vol. 236, pp. 3-19.
- WALLING D.E. et Fang D. (2003),** Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers, *Global and Planetary Change*. vol. 39, pp. 111– 126.
- WOOD P.A. (1977).** Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother, West Sussex, England. *Sedimentology*, vol. 24, pp. 437-445.
- WREN D.G., BARKDOLL B.D., KUHNLE R.A. et DERROW R.W. (2000).** Field techniques for suspended-sediment measurement. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* vol.126, n°2, pp. 97–104.
- WREN D.G. and BENNETT S. J., BARKDOLL B.D. and KUHNLE R.A. (2003).** The effect of spatial and temporal separation on suspended-sediment concentration measurements (résumé), TEKTRAN Agricultural Research Service. Disponible sur Internet : <http://www.nal.usda.gov/ttic/tektran/data/000011/24/0000112493.html>.
- YANG G.T. (2003).** *Sediment transport: Theory and Practice*, McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering.
- YANG G.T, CHEN Z., YU F., WANG Z., ZHAO Y. et WANG Z. (2007)** «Sediment rating parameters and their implications: Yangtze river, China », *Geomorphology*, vol. 85, pp. 66-175.
- YLES F. et BOUANANI A. (2012).** Quantification et modélisation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Saida (hauts plateaux algériens). *Sécheresse*, vol. 23, n°4, pp. 289-296.

Annexes

Annexe 1

L'indice de déficit pluviométrique IDP- Stations du bassin Kebir Hammam-

Année	Bekkouche	Bouati	Azzaba	Bou	El	Ain	Berrahal	Skikda
	Lakhder	Mahmoud	pépinière	Snib	Harrouch	Charchar		ONM
69/70	-11,19	-6,81	-47,06	29,09	8,81	-7,74	31,74	12,07
70/71	-17,34	-24,70	-20,54	-36,96	-7,48	-17,67	6,99	-29,79
71/72	6,29	36,27	21,96	28,75	17,53	-12,04	3,37	19,74
72/73	10,41	19,76	24,86	-0,98	11,50	-25,30	16,62	7,64
73/74	-25,00	-36,77	-27,27	-29,55	-30,02	-57,92	-17,42	-4,84
74/75	-12,60	-17,19	-10,28	1,52	-27,47	-36,38	-16,21	6,43
75/76	-8,62	-22,94	21,20	18,68	-0,64	-15,63	-22,58	-45,39
76/77	-18,39	-5,88	2,04	19,93	-18,08	-35,44	1,12	-30,55
77/78	32,97	-28,75	-1,55	-17,80	-11,38	-43,09	-3,90	-9,82
78/79	10,19	-7,67	11,05	-4,74	5,16	-11,78	-2,47	-18,02
79/80	-19,25	-22,79	-25,69	-7,16	-18,84	-20,62	-18,97	-16,41
80/81	-25,63	-11,43	-16,32	-9,75	-14,90	-28,97	-4,86	10,21
81/82	1,70	2,00	7,93	3,68	-7,56	-14,38	11,85	-22,84
82/83	-5,60	-2,79	6,64	-14,38	-4,60	-24,58	2,14	13,95
83/84	-30,18	36,44	32,26	-8,36	-17,16	-10,89	4,19	8,86
84/85	55,40	42,38	42,90	12,23	59,78	26,25	24,99	-10,32
85/86	-25,29	-29,82	-24,07	-52,56	-27,34	-37,82	-19,94	17,56
86/87	50,54	40,10	57,45	-1,36	32,82	26,88	18,16	38,47
87/88	-41,90	-35,94	-27,92	-26,14	-41,19	-31,42	-27,52	-16,43
88/89	-35,41	-16,85	-12,01	-24,62	-7,48	-25,74	-37,45	36,52
89/90	-27,69	-21,38	-20,53	-27,14	-13,89	-28,14	-33,92	-22,33
90/91	16,39	39,86	29,81	0,16	12,65	2,23	-1,67	-32,18
91/92	3,82	24,55	2,74	19,25	15,71	-8,65	-4,04	-8,85
92/93	-46,64	19,17	-21,28	5,43	0,89	-15,49	-7,78	12,81
93/94	13,83	-17,47	-18,68	-29,91	-28,44	-33,50	-18,08	4,66
94/95	-15,76	-9,73	2,31	1,80	24,56	-21,28	-23,61	-17,42
95/96	5,32	15,30	0,64	21,31	19,62	-20,05	5,73	-8,18
96/97	-38,77	-45,09	-52,64	-49,73	-25,46	-52,57	-24,01	-0,06
97/98	26,01	28,39	46,67	22,86	1,14	24,47	4,55	9,60
98/99	16,91	17,29	-1,87	-6,60	-7,31	32,13	4,36	-12,01
99/00	-35,62	-12,36	-32,26	-24,79	-22,68	-30,03	-13,11	37,27
00/01	-15,69	-31,24	-18,73	-29,88	-23,67	-1,11	-15,59	-0,73
01/02	-65,83	-42,08	-49,42	-41,84	-28,17	-19,82	-37,97	-9,58
02/03	46,01	28,42	34,53	45,03	41,60	43,98	30,81	-28,84
03/04	17,76	17,75	-6,40	23,86	14,92	51,47	5,70	-23,25
04/05	80,72	24,49	57,01	40,23	41,22	44,61	51,54	48,46
05/06	8,68	-10,42	-17,92	-1,96	-18,84	-27,07	-15,96	5,98
06/07	8,68	-10,24	-7,17	15,27	5,48	16,50	-2,56	47,64
07/08	4,29	-15,24	-10,03	3,39	-9,98	65,12	-6,51	-16,16
08/09	22,04	-0,58	-28,92	29,75	13,37	108,52	23,81	-8,54
09/10	3,37	-7,65	0,31	6,18	12,30	90,58	13,52	-10,29
10/11	25,06	50,85	20,75	41,02	30,13	96,76	21,73	28,07
11/12	15,39	19,75	34,43	33,49	11,32	45,73	59,80	30,16
12/13	40,62	31,04	41,07	23,27	32,06	39,90	33,40	11,95

L'indice de déficit pluviométrique IDP- Stations du bassin Reboa-

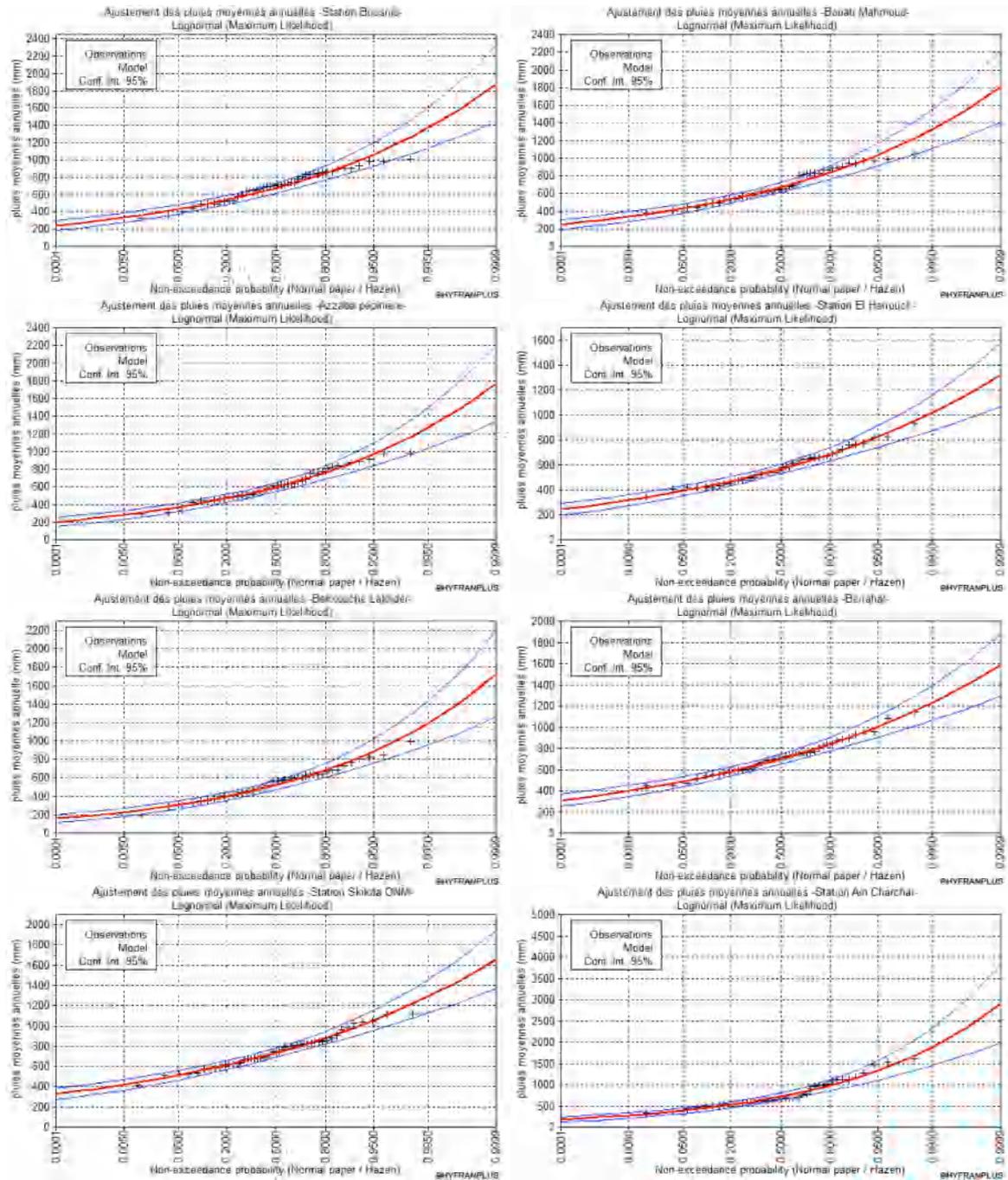
Année	Ain Tinn	Baiou	Seguene	Bouhmar	Foum Toub	Sidi Mancar	Batna Ferme Exp	Reboa	Timgad	Batna ONM
69/70	41,09	46,00	37,30	72,35	41,35	53,64	40,55	82,74	56,45	-26,93
70/71	-38,31	-45,93	-53,33	-78,80	-41,90	-9,17	-30,86	-34,80	-20,42	28,99
71/72	-2,51	38,31	33,41	55,73	22,92	64,88	40,06	74,78	69,42	44,42
72/73	-38,91	4,86	28,60	4,27	18,70	0,54	36,63	84,71	71,12	-27,35
73/74	-22,33	-20,87	-14,51	-53,89	-19,48	-31,52	-18,18	13,21	-21,47	-11,81
74/75	2,35	4,23	22,49	-19,54	-18,29	-1,47	-4,53	22,90	12,01	33,43
75/76	46,75	55,17	77,17	4,61	22,17	46,73	29,08	103,28	61,24	26,26
76/77	63,94	25,91	24,36	-6,95	17,01	-54,22	12,13	47,66	19,00	-39,52
77/78	-44,98	-27,20	-18,61	-73,68	-54,04	-50,06	-45,43	-58,49	-78,60	-27,63
78/79	-17,07	-6,44	-17,42	-77,94	-51,08	-37,19	-22,64	-65,58	-25,05	-10,97
79/80	16,05	5,97	6,82	-46,32	-21,67	-44,80	-19,13	-28,12	4,63	1,07
80/81	-1,39	-7,42	-4,03	-22,51	-3,81	-47,43	-10,92	-17,09	-34,69	10,87
81/82	-1,54	31,58	10,66	-16,35	6,00	7,86	-0,10	-21,41	14,72	-13,44
82/83	51,60	14,88	19,69	-8,51	-30,02	-24,27	-11,29	-50,43	6,79	-7,57
83/84	3,56	-21,73	-11,10	-49,17	-17,11	-36,08	-18,76	-60,33	-41,22	19,58
84/85	5,94	-3,72	38,62	-6,55	4,00	27,67	8,85	19,61	13,43	29,19
85/86	8,32	-2,61	19,26	-8,78	-18,35	-24,01	15,06	-7,29	-5,24	6,85
86/87	-2,15	-8,58	11,00	13,52	-13,53	24,32	-10,55	-12,97	-19,28	-9,76
87/88	-17,86	-19,39	-16,69	-39,26	-40,20	-36,88	-37,14	-58,32	-58,25	-13,64
88/89	51,05	7,98	44,65	5,28	42,36	0,35	14,08	-11,93	3,13	0,48
89/90	36,64	53,19	63,41	33,78	54,09	12,53	31,80	-7,06	44,68	11,20
90/91	-4,43	8,03	57,70	-5,38	-9,53	22,61	22,16	-22,52	11,83	14,52
91/92	-1,67	11,57	26,66	14,29	24,79	1,23	1,22	13,94	10,89	-8,22
92/93	-0,45	-35,43	20,75	-28,73	-24,99	-17,65	-16,12	8,40	-31,07	-33,52
93/94	-7,11	-31,09	-31,88	-45,67	-12,31	-31,21	-50,95	-39,40	-32,18	-27,29
94/95	-43,87	-6,23	-12,77	-22,08	4,33	-15,37	-7,07	-15,43	-41,72	28,75
95/96	28,04	62,51	16,26	64,05	44,62	31,14	34,78	-11,17	36,22	-43,95
96/97	-48,52	-19,76	-52,69	-53,61	-48,04	-46,52	-49,36	-72,78	-64,47	12,06
97/98	37,39	38,34	-18,73	28,51	24,25	13,41	25,73	-13,42	23,04	-28,98
98/99	-6,80	-17,65	-42,60	-19,78	-31,23	-21,13	-36,30	-9,72	-44,75	36,07
99/00	-0,84	14,51	-24,71	30,22	9,09	-4,50	-19,00	3,29	-6,16	-16,48
00/01	-39,98	-50,57	-53,24	-40,01	-33,56	-35,09	-28,87	-53,09	-48,99	-19,18
01/02	-14,74	-34,03	-55,85	-42,27	-38,18	-30,58	-32,75	-37,76	-24,75	6,93
02/03	3,11	8,51	-5,82	73,04	15,41	55,89	25,67	22,37	54,70	48,71
03/04	27,16	36,07	8,24	115,74	60,29	53,86	59,41	57,97	35,70	40,11
04/05	-9,68	6,13	-17,85	32,06	12,88	36,95	20,47	26,71	17,43	18,27
05/06	10,14	-31,86	-4,44	33,44	37,65	9,18	15,06	5,39	13,33	-29,16
06/07	-27,54	-22,03	-43,91	12,88	-0,74	12,28	-29,93	6,70	-13,95	19,83
07/08	-12,66	-33,76	-24,66	27,92	9,12	42,90	-0,81	51,57	52,58	42,64
08/09	3,87	28,27	30,09	85,53	67,19	66,51	45,37	65,51	62,95	-10,75
09/10	-15,65	-12,49	6,46	27,31	-0,24	21,55	22,06	11,90	-0,66	29,41
10/11	10,90	2,17	-0,22	43,09	27,75	24,80	38,58	31,45	17,92	-11,86
11/12	-17,84	-17,74	-35,68	27,46	1,02	7,80	-13,38	-3,93	-43,32	-10,75
12/13	2,75	-17,14	-30,53	-33,62	-25,20	-31,52	-17,94	-30,92	-42,10	-6,68
13/14	-11,82	-10,50	-12,34	-5,69	-13,49	-7,94	-6,74	-10,14	-14,86	4,23

L'indice de déficit pluviométrique IDP- Stations du bassin Oued El Hai-

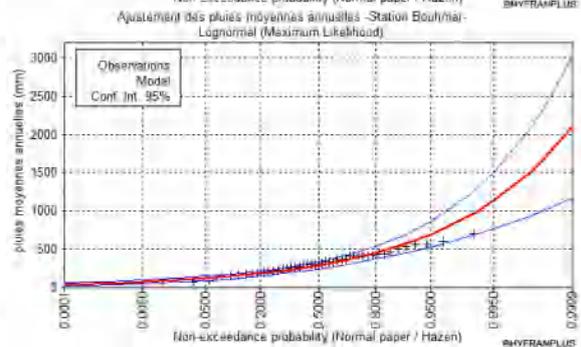
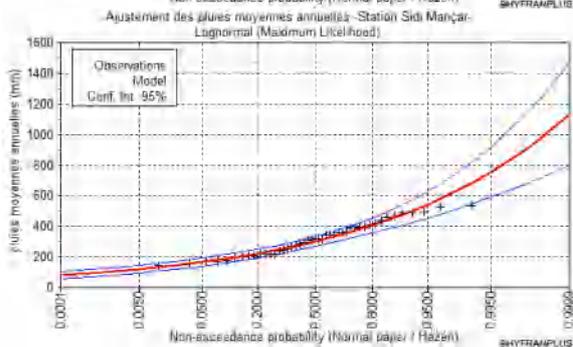
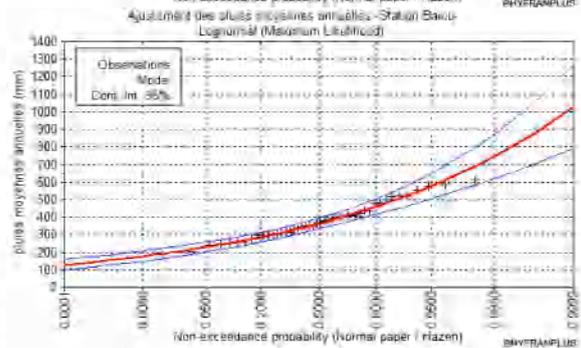
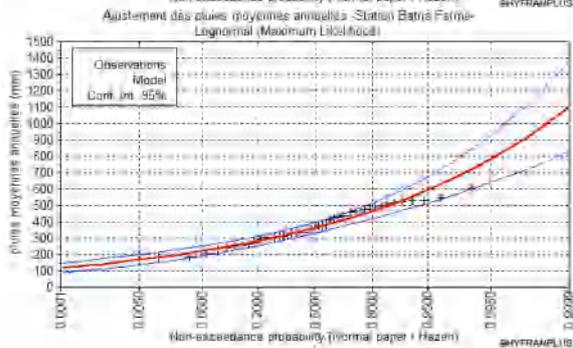
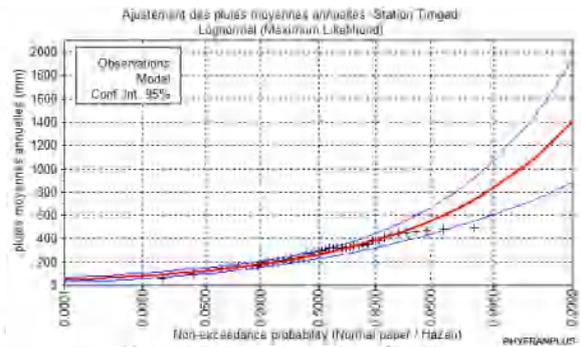
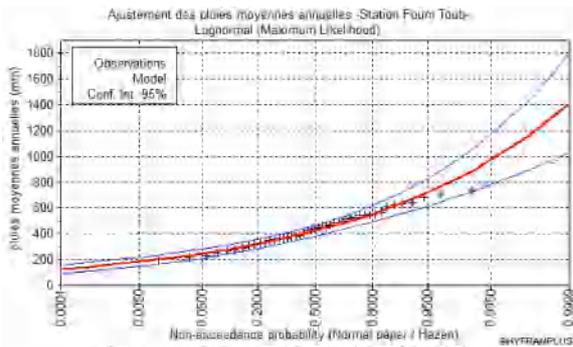
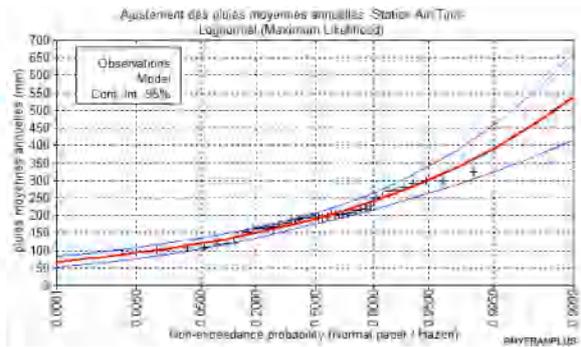
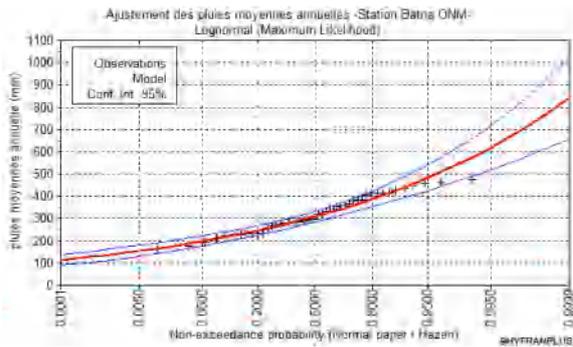
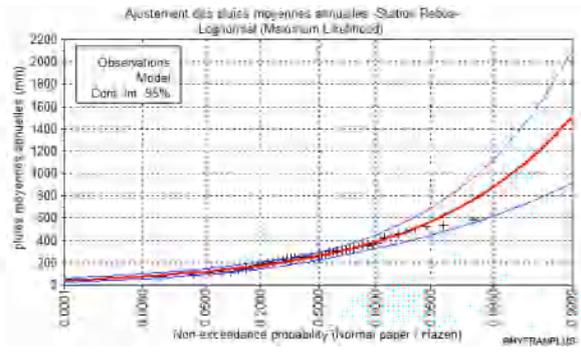
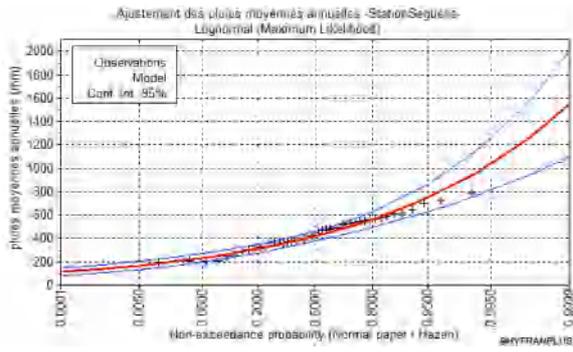
Année	Biskra Secteur	Bouzina	Djemorah	Doucen	Menaa	El Outaya (Ferme driss)	Oued Chelih	Medina Lanasser	Biskra ONM
70/71	94,37	58,26	113,80	123,73	77,13	219,13	19,73	18,08	-42,54
71/72	17,56	-18,11	118,91	32,37	-28,60	-39,11	-31,06	-44,84	3,99
72/73	20,56	29,50	-94,24	19,61	47,15	51,40	60,30	8,91	22,06
73/74	47,44	40,12	83,04	80,87	21,86	39,11	54,75	48,55	-40,92
74/75	-52,61	-34,26	-85,38	-62,03	-43,05	-45,30	-7,88	-25,19	-19,19
75/76	-12,60	-29,29	-22,22	-33,38	2,38	-37,96	5,09	-12,36	32,19
76/77	-1,43	13,63	-31,16	-7,05	-6,16	-1,32	-10,09	23,23	67,35
77/78	92,72	11,58	32,93	-20,13	80,82	75,00	57,12	17,57	-57,29
78/79	-62,40	-46,20	-34,01	-60,21	-40,62	-32,46	-31,75	-27,35	-33,95
79/80	-59,65	-30,04	-32,38	-53,70	-41,75	-17,08	-15,08	-36,76	-23,08
80/81	-11,69	-15,87	5,35	-18,59	-2,72	-39,69	2,48	-15,74	4,96
81/82	-15,96	-10,30	-6,16	-39,54	4,39	-25,33	30,88	16,64	-35,89
82/83	-56,69	-22,35	-31,63	-40,59	-15,54	-42,25	-3,51	4,94	66,23
83/84	5,32	-19,21	-11,14	-24,65	-14,58	-11,72	9,47	-14,28	-72,12
84/85	-81,47	-42,09	-41,90	-90,31	-40,16	-68,67	1,40	-46,69	0,34
85/86	-17,71	-8,91	18,90	-41,95	27,05	-35,48	38,21	-4,82	10,96
86/87	-15,58	13,06	-11,04	-4,64	-1,30	-18,81	49,66	15,56	-7,20
87/88	-12,22	7,22	27,44	-6,92	-11,64	7,51	34,64	-5,28	-31,57
88/89	-39,75	-19,41	-43,22	-63,65	-19,73	-33,50	-8,47	-43,33	-23,81
89/90	-44,48	27,74	-9,08	-35,58	2,34	-26,40	41,74	21,13	31,55
90/91	-7,22	22,17	-30,01	59,37	-8,80	-40,12	30,57	18,90	25,63
91/92	9,06	-32,64	0,14	11,19	-44,39	-38,18	-8,63	-28,13	7,79
92/93	-8,71	-6,52	29,58	17,23	32,03	13,06	36,59	9,00	-35,51
93/94	17,14	-16,98	-40,04	-17,14	-20,88	14,37	-5,06	-18,61	-40,47
94/95	-51,50	-45,23	-55,15	-54,56	-47,34	-57,91	-16,79	-43,26	-1,10
95/96	-18,93	-0,11	-37,74	90,56	-20,10	33,55	-21,60	-21,72	-11,01
96/97	51,76	86,83	88,69	95,34	110,5	62,92	-40,25	9,99	-41,85
97/98	4,79	-34,80	-24,46	-15,15	-48,54	5,63	-63,38	-49,23	50,21
98/99	23,83	38,37	13,69	51,34	14,86	60,04	-13,13	21,94	-23,00
99/00	-13,97	-35,71	-32,45	10,99	-57,12	-42,18	-71,04	-27,63	29,50
00/01	-1,77	-14,45	-27,30	39,67	-43,93	0,27	-52,89	-21,36	-29,49
01/02	-39,83	-32,34	-62,19	-92,54	-37,95	-45,46	-53,85	-43,17	-11,25
02/03	-56,45	-35,48	-31,71	-70,82	-19,45	-44,84	-53,07	-42,63	63,58
03/04	-0,09	17,70	73,58	30,16	49,46	4,96	21,63	18,94	113,93
04/05	92,34	54,25	75,27	38,17	46,80	66,62	16,70	102,16	-4,34
05/06	-5,05	-0,90	6,64	-30,07	-0,73	-18,88	-0,81	26,02	15,09
06/07	10,01	28,82	40,07	53,16	35,30	8,55	-7,01	31,12	-15,57
07/08	11,80	1,01	-11,10	-24,69	-7,33	22,73	-39,91	11,12	-38,31
08/09	-53,17	-13,10	-62,75	-59,34	-47,01	-18,19	-6,30	32,13	61,29
09/10	136,65	90,55	107,25	154,70	60,59	35,00	58,44	73,54	41,12
10/11	47,27	43,49	55,63	23,46	56,83	45,51	27,00	36,31	72,63
11/12	92,75	32,17	36,38	83,57	42,45	62,89	28,87	44,34	3,69
12/13	-2,55	-15,34	-18,68	-7,40	-6,32	7,99	-28,92	-8,64	-4,00
13/14	-31,29	-23,24	-24,83	-33,00	-27,09	-32,87	-19,94	-16,83	-30,30
14/15	-0,59	-13,60	-15,30	-7,84	-9,13	-22,50	-14,86	-12,25	-43,84

Annexe 3

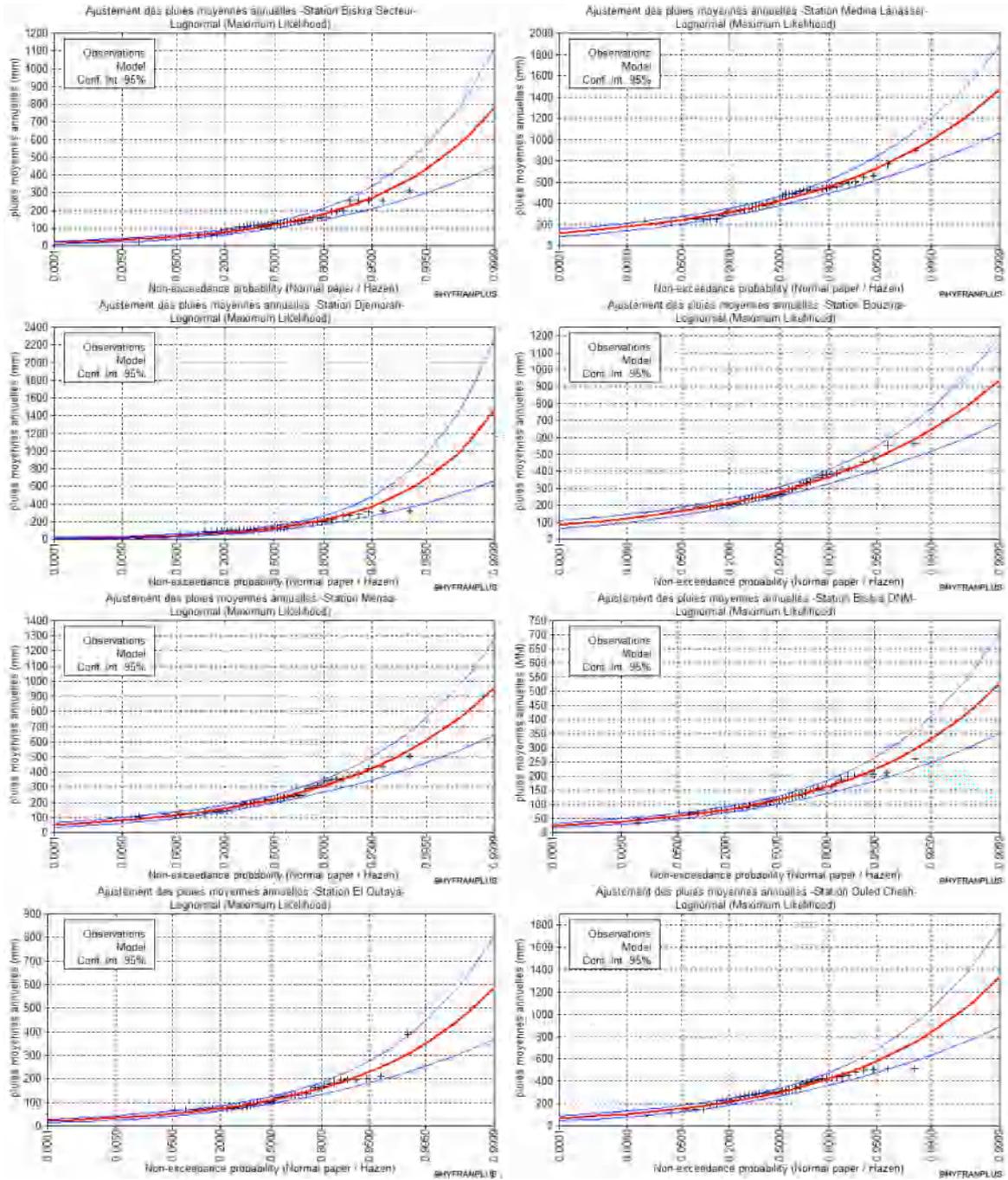
Graphes des ajustements des pluies moyennes annuelles par bassin Bassin Kebir Hammam



Bassin Reboa



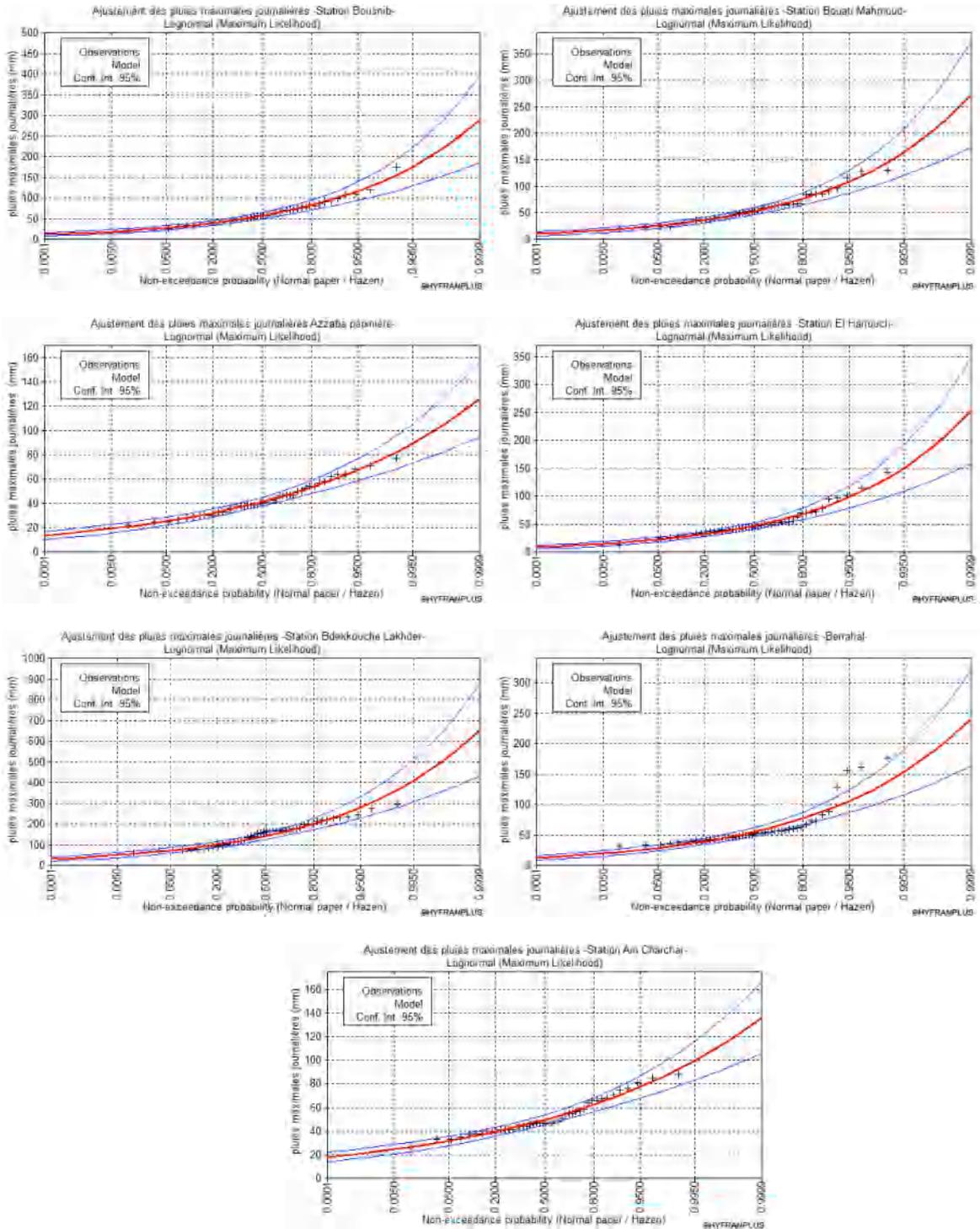
Bassin Oued El Hai



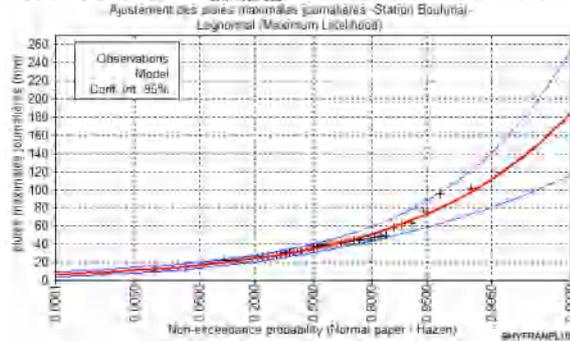
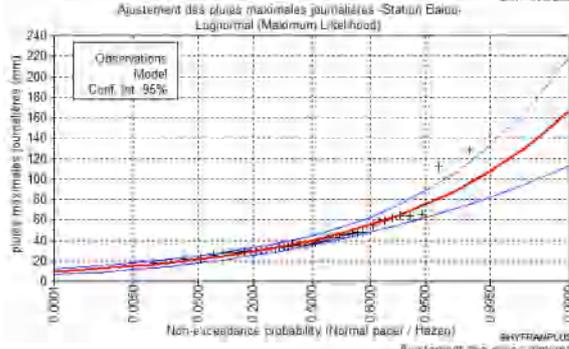
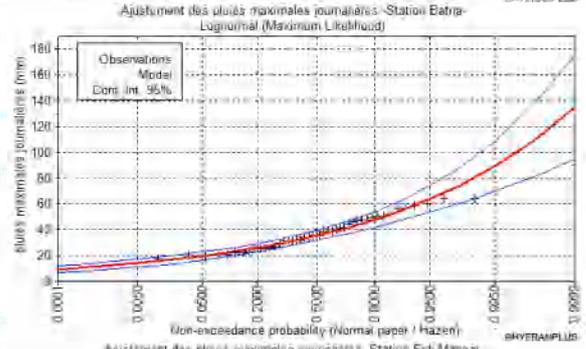
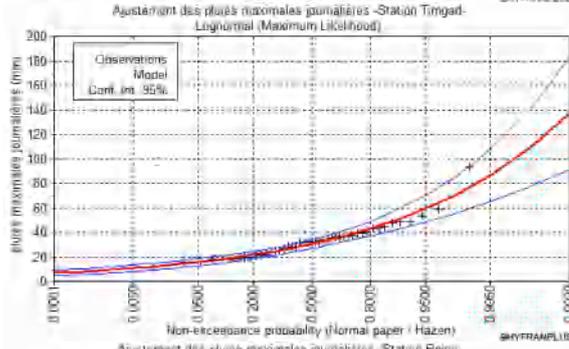
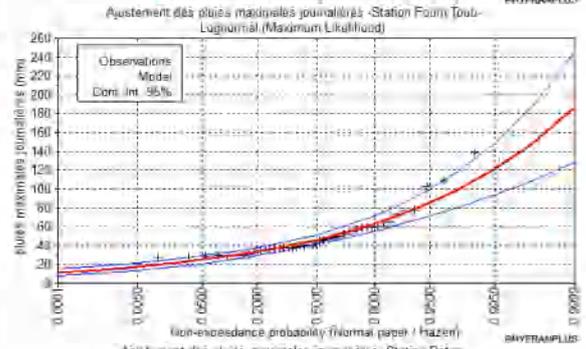
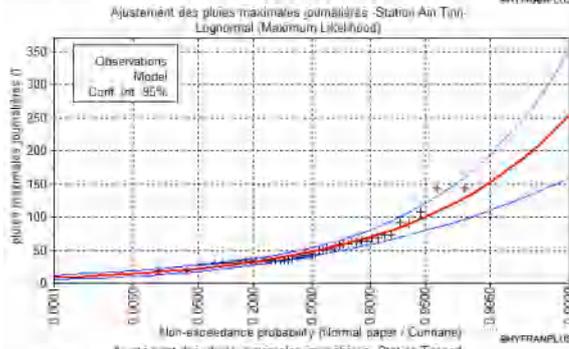
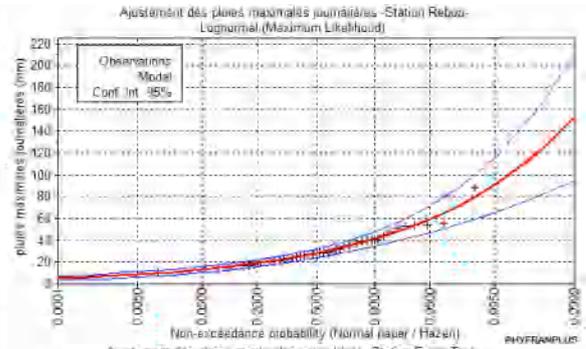
Annexe 4

Graphes des ajustements des pluies maximales journalières par bassin

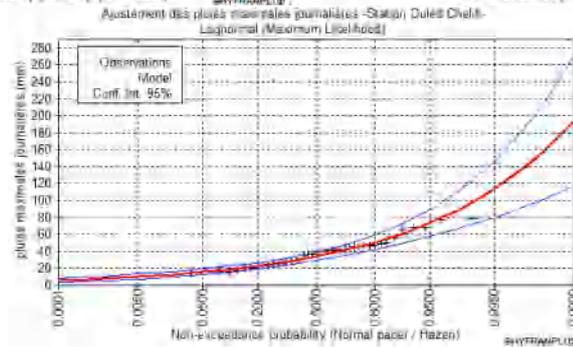
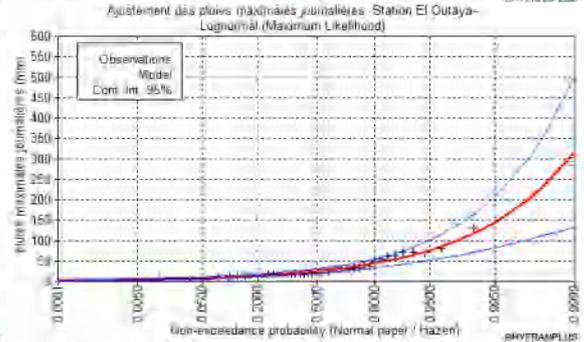
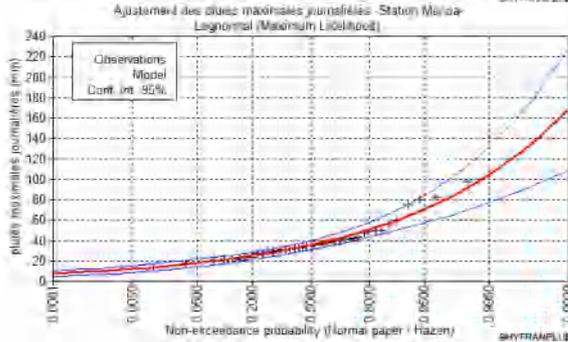
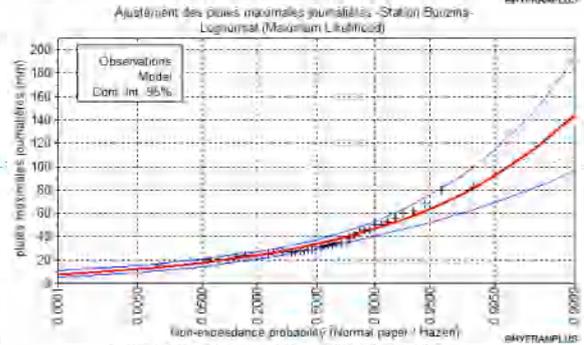
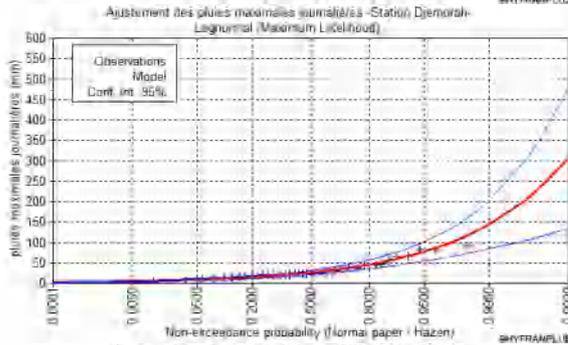
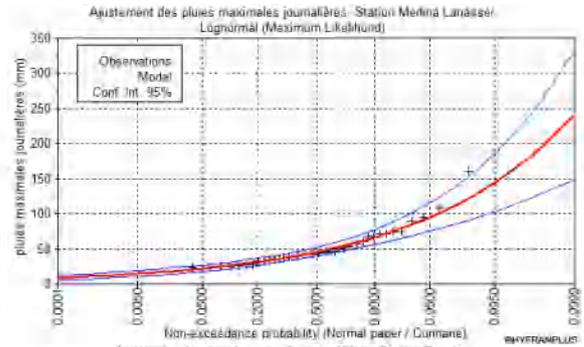
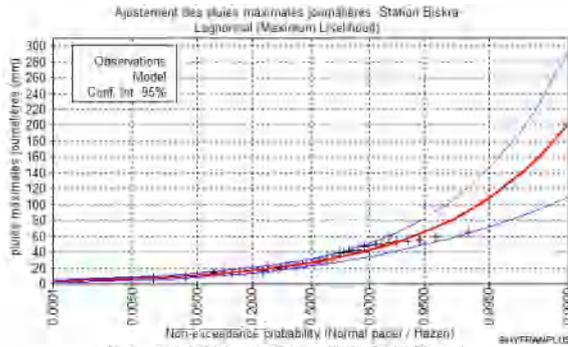
Bassin Kebir Hammam



Bassin Reboa



Bassin Oued El Hai



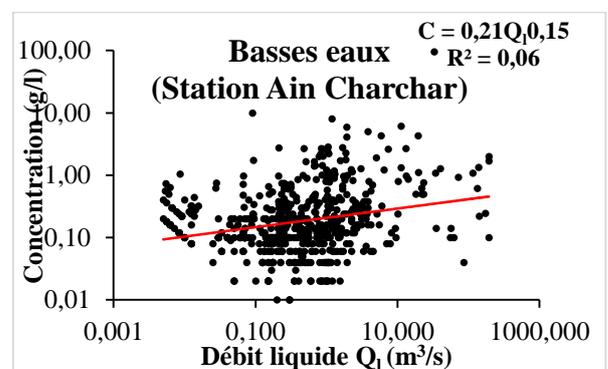
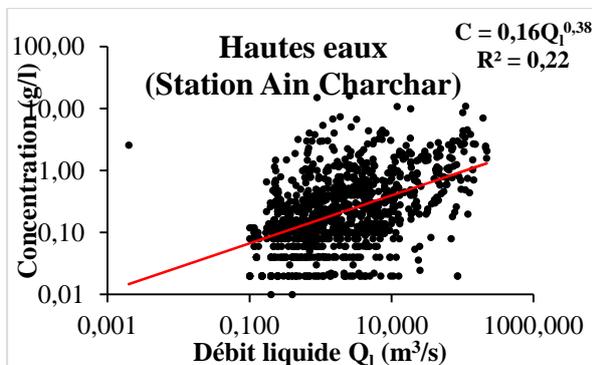
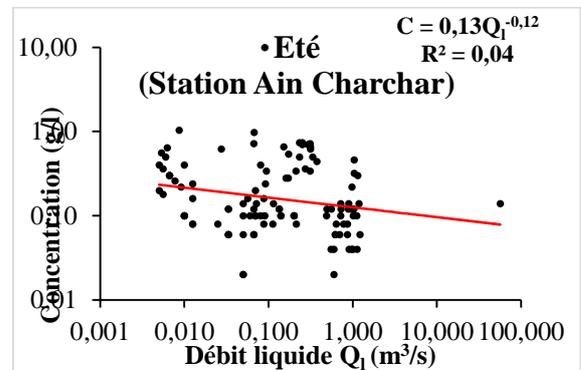
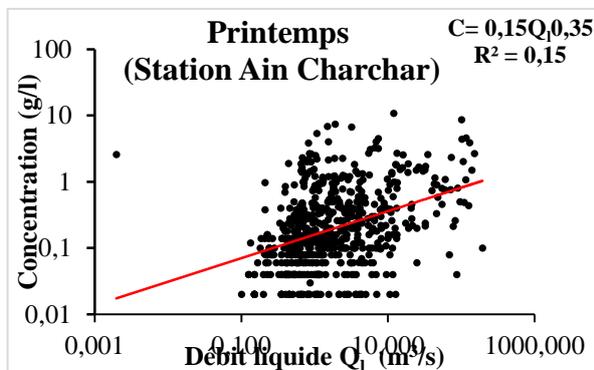
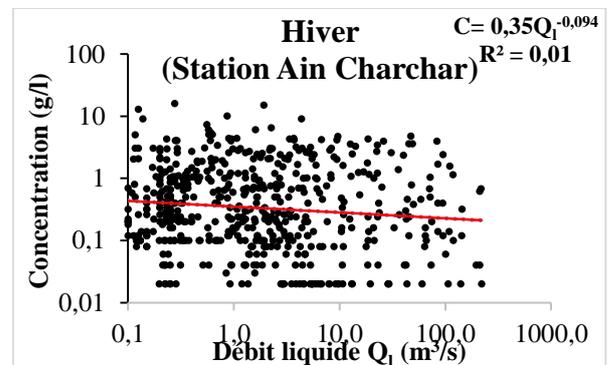
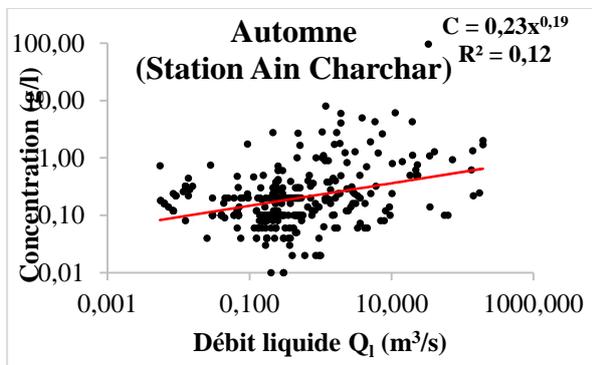
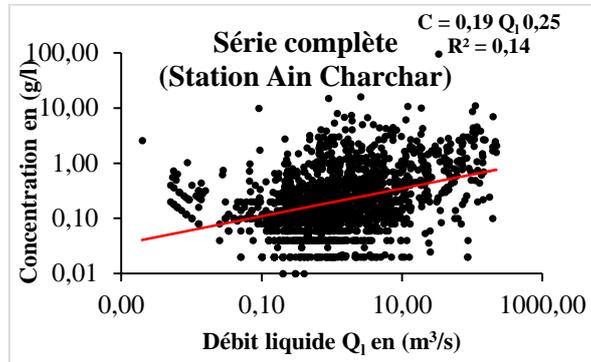
Annexe 5

Année	Coefficient d'hydraulicité			
	Station Ain	Station	Station	Station El
68/69	0,12	/	/	0,62
69/70	1,30	3,20	5,73	2,52
70/71	1,18	0,30	0,41	0,53
71/72	1,50	2,13	1,14	2,38
72/73	1,92	2,86	2,81	3,21
73/74	0,10	1,33	0,69	0,82
74/75	0,23	0,65	0,89	0,81
75/76	0,45	1,58	2,19	1,61
76/77	0,93	1,40	0,42	1,49
77/78	0,46	0,35	0,16	1,05
78/79	0,95	0,48	0,94	0,49
79/80	0,13	0,72	0,43	1,59
80/81	0,95	0,67	0,46	1,72
81/82	2,70	0,55	0,81	0,32
82/83	1,34	1,19	2,38	0,73
83/84	2,26	0,30	0,07	0,43
84/85	2,41	1,26	0,46	0,83
85/86	0,28	0,50	0,13	0,97
86/87	3,38	0,49	0,11	0,87
87/88	0,07	0,12	0,26	0,15
88/89	0,43	0,49	0,78	0,36
89/90	0,25	1,90	1,19	0,45
90/91	2,17	0,83	0,16	0,74
91/92	1,20	0,90	0,23	1,03
92/93	1,18	0,66	0,05	0,79
93/94	0,84	0,14	0,09	0,02
94/95	1,04	0,27	0,10	0,41
95/96	0,88	1,64	1,08	2,00
96/97	0,07	0,14	0,17	0,09
97/98	0,77	0,48	0,98	1,54
98/99	1,00	0,20	0,37	0,41
99/00	0,26	1,38	0,51	/
00/01	0,24	0,26	0,48	/
01/02	0,09	1,03	1,42	/
02/03	1,93	0,78	1,21	/
03/04	1,00	1,67	1,78	/
04/05	0,85	1,84	3,72	/
05/06	0,85	0,68	0,30	/
06/07	0,22	0,69	0,29	/
07/08	/	3,21	5,29	/
08/09	/	2,11	1,74	/
09/10	/	0,53	0,17	/
10/11	/	0,48	0,10	/
11/12	/	0,60	0,29	/

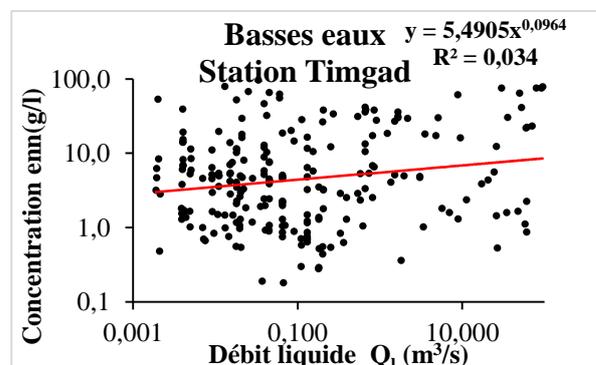
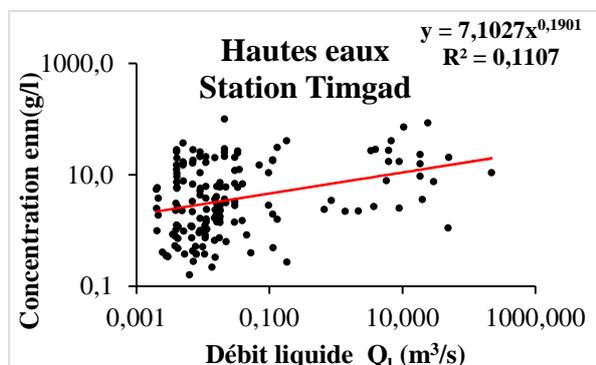
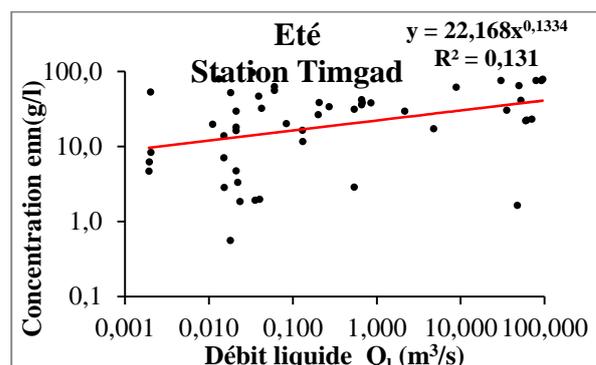
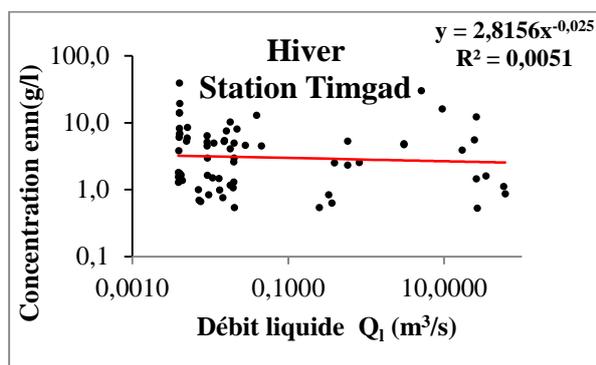
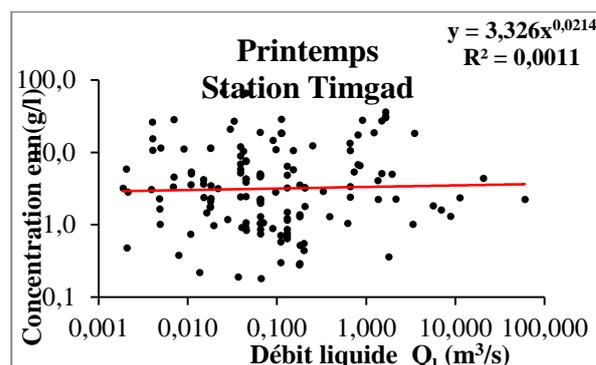
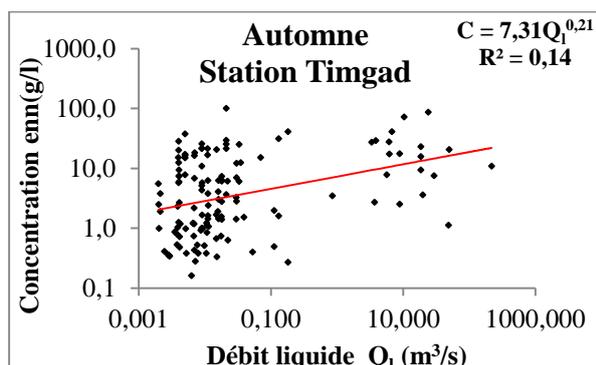
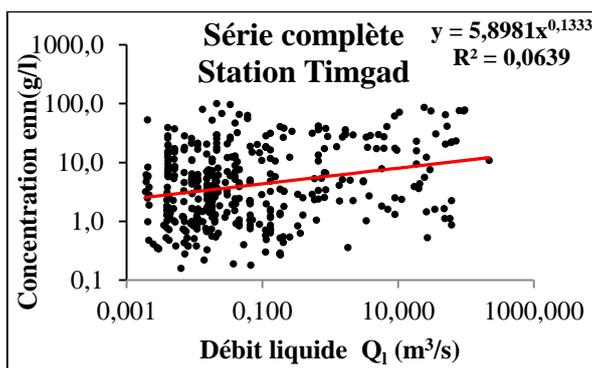
Annexe 6

Relations débits liquides/débits solides par bassin

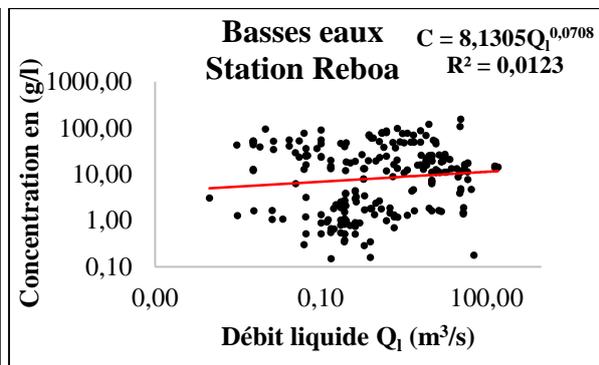
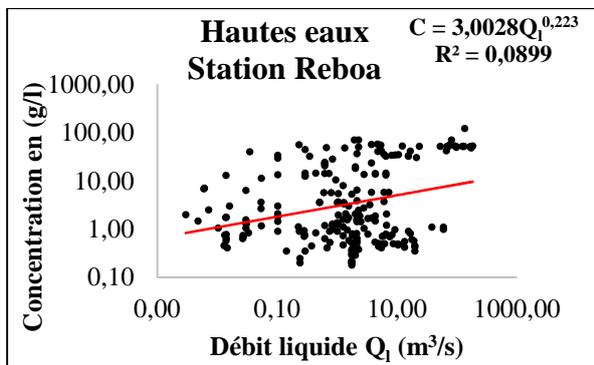
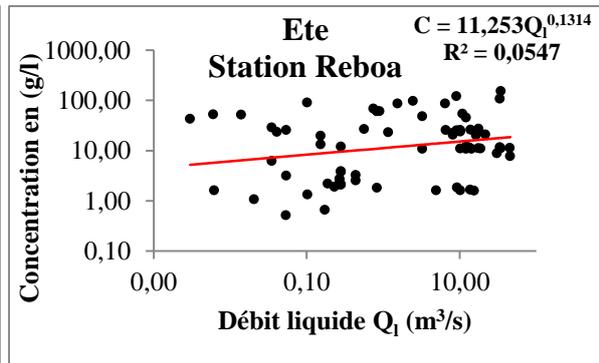
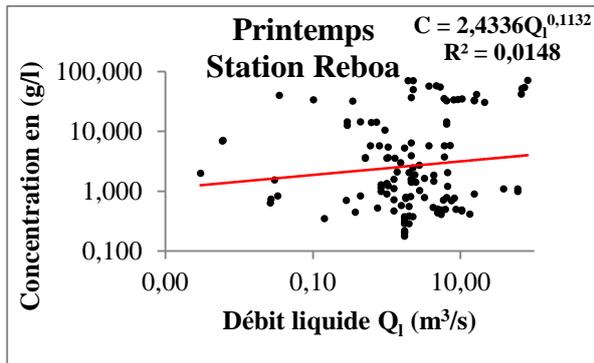
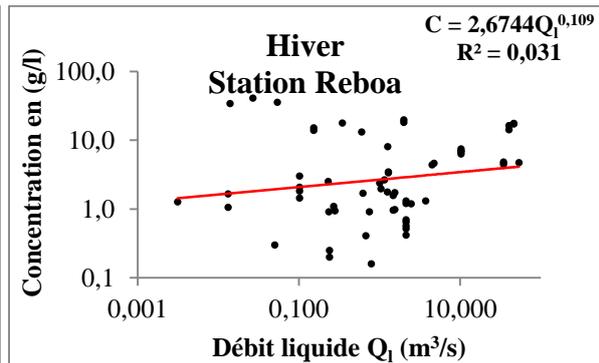
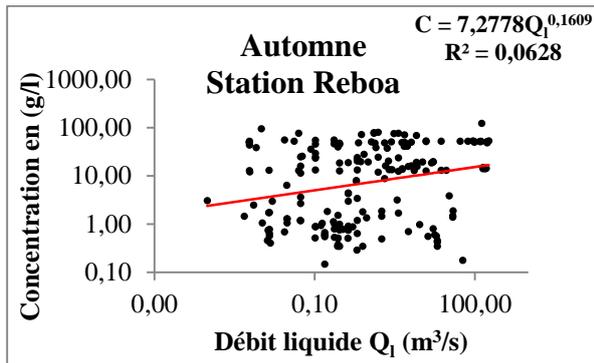
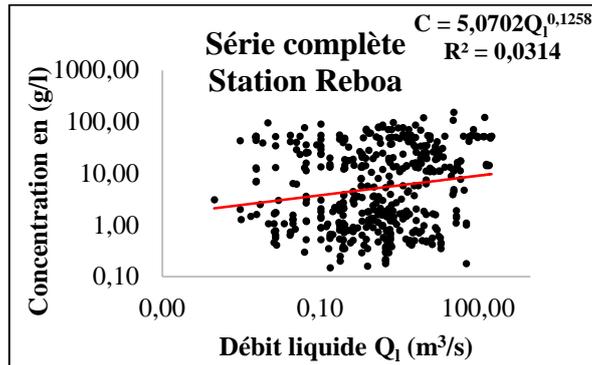
Bassin Kebir Hammam



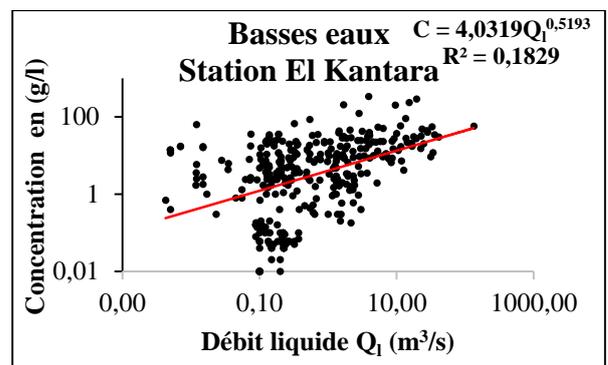
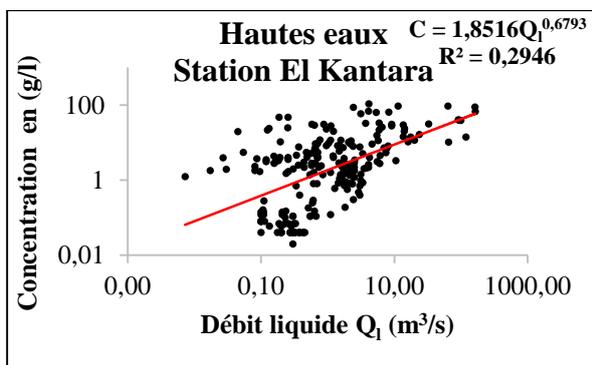
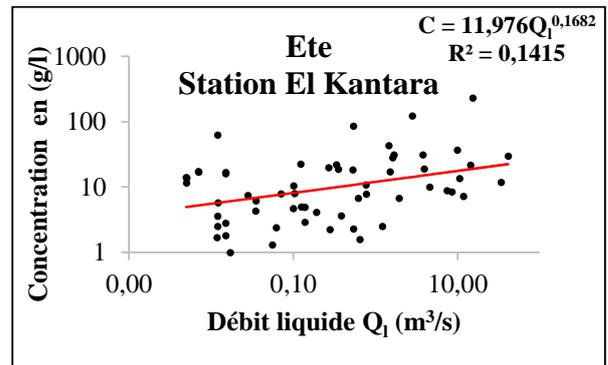
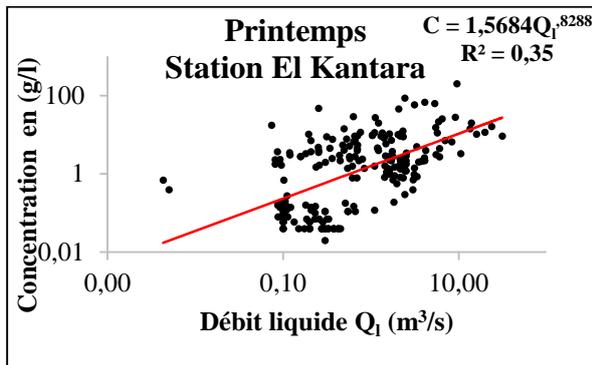
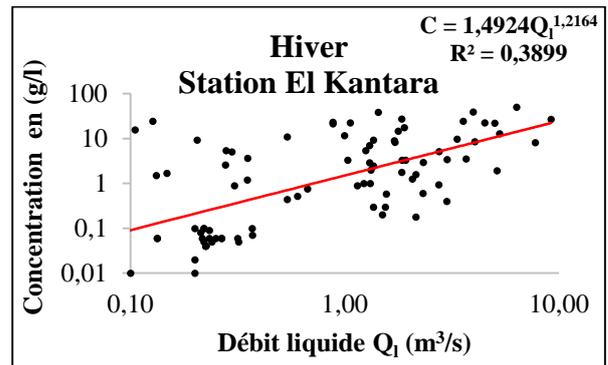
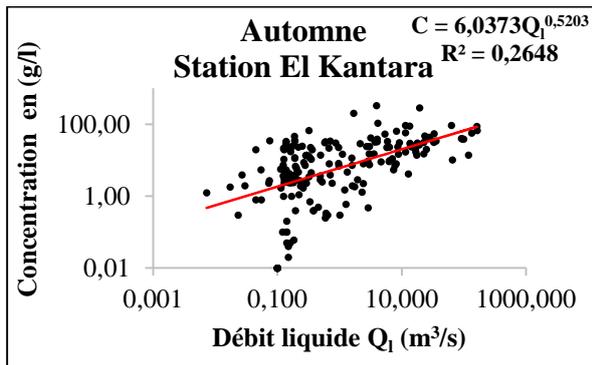
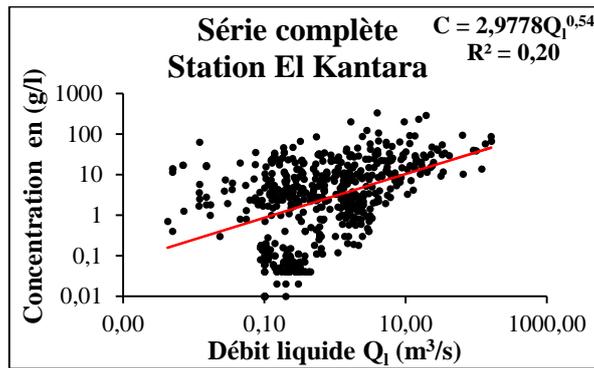
Bassin Reboa (Station Timgad)



Bassin Reboa (Station Reboa)



Bassin Oued El Hai (Station El Kantara)



Annexe 7

Apports mesurés et quelques valeurs caractéristiques des concentrations des par bassin

Bassin Kebir Hammam

<i>Echelle</i>		<i>Nombres de valeurs</i>	<i>Al</i>	<i>Cmoy</i>	<i>Cmax</i>	<i>Cmin</i>	<i>As mesuré</i>
<i>Série complète</i>	/	1635	9,33	0,57	96	0,01	64352,36
<i>Par mois</i>	<i>Septembre</i>	90	0,46	0,36	5,96	0,04	166,70
	<i>Octobre</i>	123	5,46	0,45	6,15	0,02	2458,92
	<i>Novembre</i>	119	8,98	1,22	96	0,01	10961,68
	<i>Décembre</i>	163	2,96	0,74	16,03	0,02	2193,40
	<i>Janvier</i>	197	27,25	0,59	11,04	0,01	16075,83
	<i>Février</i>	196	20,38	0,52	2,85	0,02	10596,75
	<i>Mars</i>	235	25,63	0,52	10,86	0,02	14352,10
	<i>Avril</i>	221	17,12	0,52	8,72	0,02	8904,68
	<i>Mai</i>	178	2,78	0,4	2,7	0,02	1111,42
	<i>Juin</i>	89	0,76	0,35	10	0,02	265,84
	<i>Juillet et Aout</i>	24	0,10	0,2	0,72	0,02	21,43
	Total	1635	/	/	/	/	67108,75
<i>Par saison</i>	<i>Automne</i>	332	4,97	0,70	96,00	0,01	10456,99
	<i>Hiver</i>	556	16,86	0,98	16,03	0,02	50066,55
	<i>Printemps</i>	634	15,18	0,50	10,86	0,02	22813,06
	<i>Été</i>	113	0,32	0,32	10,00	0,02	305,23
		Total	1635	/	/	/	/
<i>Hautes eaux-basses eaux</i>	<i>Hautes eaux</i>	1012	18,67	0,58	16,03	0,01	111838,96
	<i>Basses eaux</i>	623	2,66	0,55	96	0,01	9660,82
		Total	1635	/	/	/	/

Bassin Reboa (Station Reboa)

<i>Echelle</i>		<i>Nombres de valeurs</i>	<i>Al</i>	<i>Cmoy</i>	<i>Cmax</i>	<i>Cmin</i>	<i>As mesuré</i>
<i>Série complète</i>	/	398	1,04	17,53	154,92	0,15	221130,43
<i>Par mois</i>	<i>Septembre</i>	56	0,24	22,47	122,63	0,35	5241,80
	<i>Octobre</i>	84	0,69	23,79	95,76	0,15	16566,98
	<i>Novembre</i>	23	0,29	22,73	79,98	0,51	6480,78
	<i>Décembre</i>	5	0,34	23,34	41,28	2,35	8126,80
	<i>Janvier</i>	30	1,05	6,39	17,78	0,16	6674,84
	<i>Février</i>	23	1,09	3,19	19,84	0,2	3472,76
	<i>Mars</i>	63	3,80	3,19	30,79	0,18	12132,62
	<i>Avril</i>	20	1,72	15,52	41,7	0,54	26952,65
	<i>Mai</i>	28	1,72	18,71	71,07	0,64	32072,23
	<i>Juin</i>	34	0,59	17,59	52,72	0,66	10486,45
	<i>Juillet et Aout</i>	32	0,49	30,71	154,92	1,07	14805,66
<i>Total</i>		398	/	/	/	/	143013,57
<i>Par saison</i>	<i>Automne</i>	163	0,40	23,19	122,63	0,15	27349,36
	<i>Hiver</i>	58	0,84	6,59	41,28	0,16	16398,03
	<i>Printemps</i>	111	2,36	9,32	71,20	0,18	67415,36
	<i>Été</i>	66	0,51	23,95	154,92	0,66	38074,75
	<i>Total</i>		398	/	/	/	/
<i>Hautes eaux-basses eaux</i>	<i>Hautes eaux</i>	190	1,71	12,46	122,63	0,18	84551,77
	<i>Basses eaux</i>	208	0,71	21,2	154,92	0,15	121660,19
	<i>Total</i>		398	/	/	/	/

Bassin Reboa (Station Timgad)

<i>Echelle</i>		<i>Nombres de valeurs</i>	<i>Al</i>	<i>Cmoy</i>	<i>Cmax</i>	<i>Cmin</i>	<i>As mesuré</i>
<i>Série complète</i>	/	394	0,16	10,71	100,99	0,16	20265,03
<i>Par mois</i>	<i>Septembre</i>	60	0,15	15,45	100,99	0,27	2380,23
	<i>Octobre</i>	53	0,21	5,65	37,51	0,16	1168,03
	<i>Novembre</i>	20	0,02	3,02	7,43	0,48	66,85
	<i>Décembre</i>	12	0,04	8,27	39,54	1,29	338,70
	<i>Janvier</i>	42	0,22	3,61	30,06	0,53	779,26
	<i>Février</i>	15	0,05	7,31	14,21	1,17	330,98
	<i>Mars</i>	68	0,24	4,95	18,83	0,18	1180,28
	<i>Avril</i>	46	0,06	9,39	67,77	0,28	544,07
	<i>Mai</i>	28	0,56	8,11	28,26	0,22	4527,85
	<i>Juin</i>	24	0,05	44,02	96,68	2,84	2383,62
	<i>Juillet et Aout</i>	26	0,15	19,71	64,47	1,65	5550,35
					20,54	41,88	0,56
<i>Total</i>		394	/	/	/	/	19440,909
<i>Par saison</i>	<i>Automne</i>	133	0,13	9,68	100,99	0,16	3805,40
	<i>Hiver</i>	69	0,10	5,22	39,54	0,53	1659,71
	<i>Printemps</i>	142	0,28	7,01	67,77	0,18	6129,32
	<i>Été</i>	50	0,12	31,55	96,68	0,56	10031,39
	<i>Total</i>		394	/	/	/	/
<i>Hautes eaux-basses eaux</i>	<i>Hautes eaux</i>	161	0,24	9,41	100,99	0,16	8927,004
	<i>Basses eaux</i>	233	0,12	11,62	96,68	0,18	9758,569
	<i>Total</i>		394	/	/	/	/

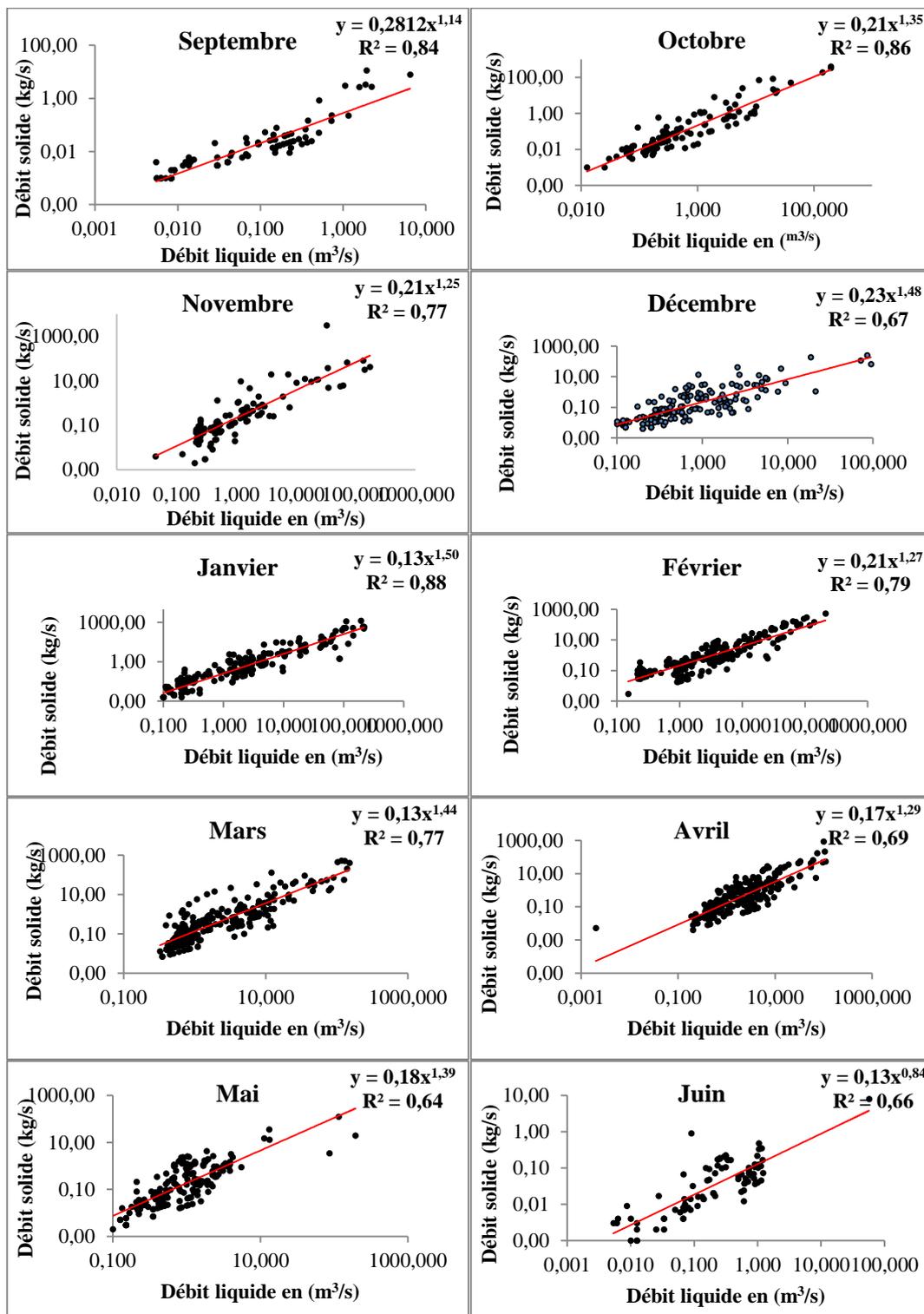
Bassin Oued El Hai

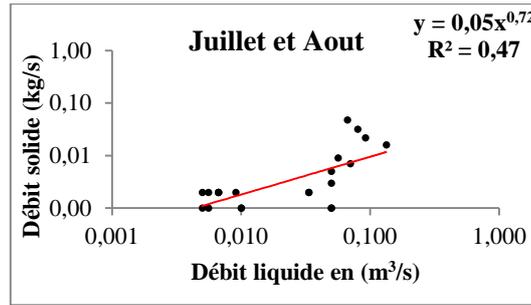
<i>Echelle</i>		<i>Nombres de valeurs</i>	<i>Al</i>	<i>Cmoy</i>	<i>Cmax</i>	<i>Cmin</i>	<i>As mesuré</i>
<i>Série complète /</i>		559	1,13	12,57	336,61	0,01	174419,31
<i>Par mois</i>	<i>Septembre</i>	51	4,35	23,23	108,3	0,25	101156,43
	<i>Octobre</i>	74	0,92	23,19	336,62	0,02	21739,23
	<i>Novembre</i>	65	0,98	16,02	67,2	0,01	15779,06
	<i>Décembre</i>	13	0,48	4,03	22,23	0,01	1942,91
	<i>Janvier</i>	30	0,50	3,9	27,16	0,05	1984,69
	<i>Février</i>	45	1,16	8,97	50,02	0,02	9765,10
	<i>Mars</i>	96	1,85	4,08	28,07	0,04	7868,07
	<i>Avril</i>	75	1,73	7,18	87,61	0,02	12841,29
	<i>Mai</i>	50	0,54	8,33	202,93	0,04	4685,33
	<i>Juin</i>	32	0,47	16,64	123,93	1	7763,56
	<i>Juillet et Aout</i>	28	0,29	56,48	233	4,1	18153,12
			9,13	22,5	1,59	2689,92	
Total		559	/	/	/	/	206368,71
<i>Par saison</i>	<i>Automne</i>	190	2,08	20,75	336,62	0,01	130515,84
	<i>Hiver</i>	88	0,71	6,51	50,02	0,01	13667,88
	<i>Printemps</i>	221	1,38	6,09	202,93	0,02	26140,42
	<i>Été</i>	60	0,35	19,45	233	1	21644,58
	Total	559					191968,72
<i>Hautes eaux-basses eaux</i>	<i>Hautes eaux</i>	222	4,04	9,52	108,3	0,02	77095,55
	<i>Basses eaux</i>	337	0,63	14,57	336,62	0,01	82781,84
	Total	559	/	/	/	/	159877,39

Annexe 8

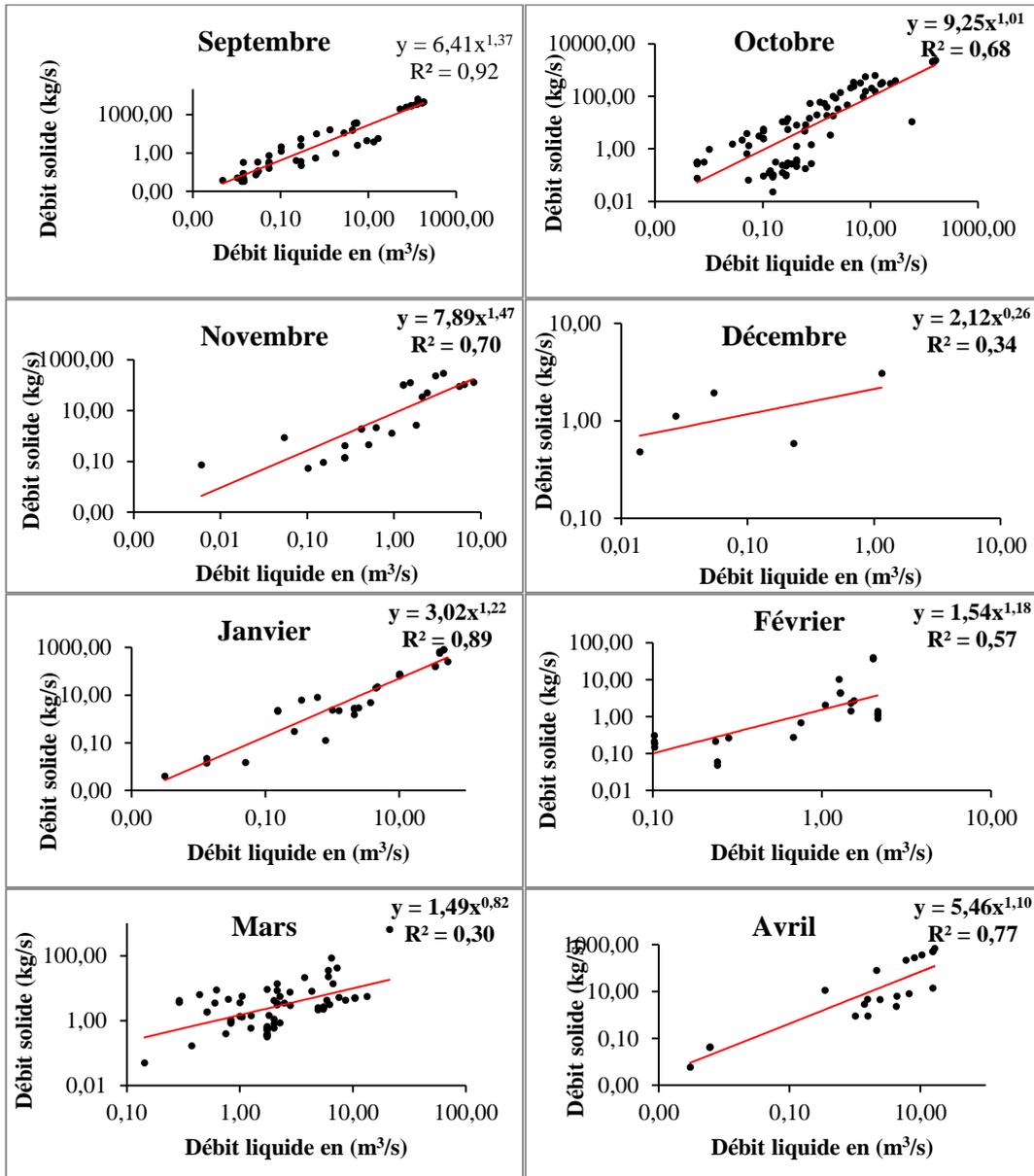
Relations débits liquides/débits solides mensuelles par bassin

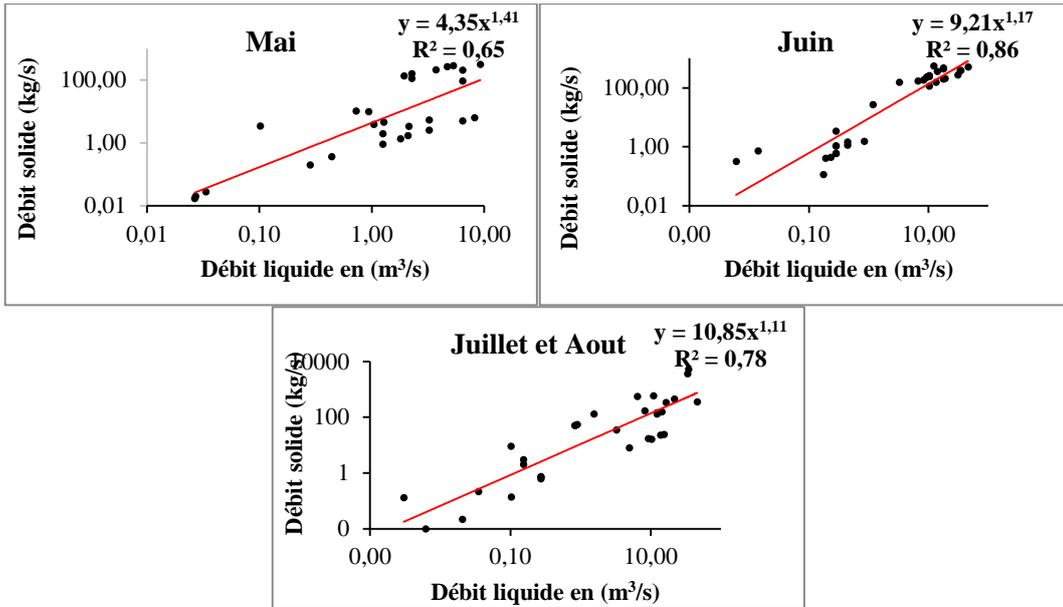
Bassin Kebir Hammam (Station Ain Charchar)



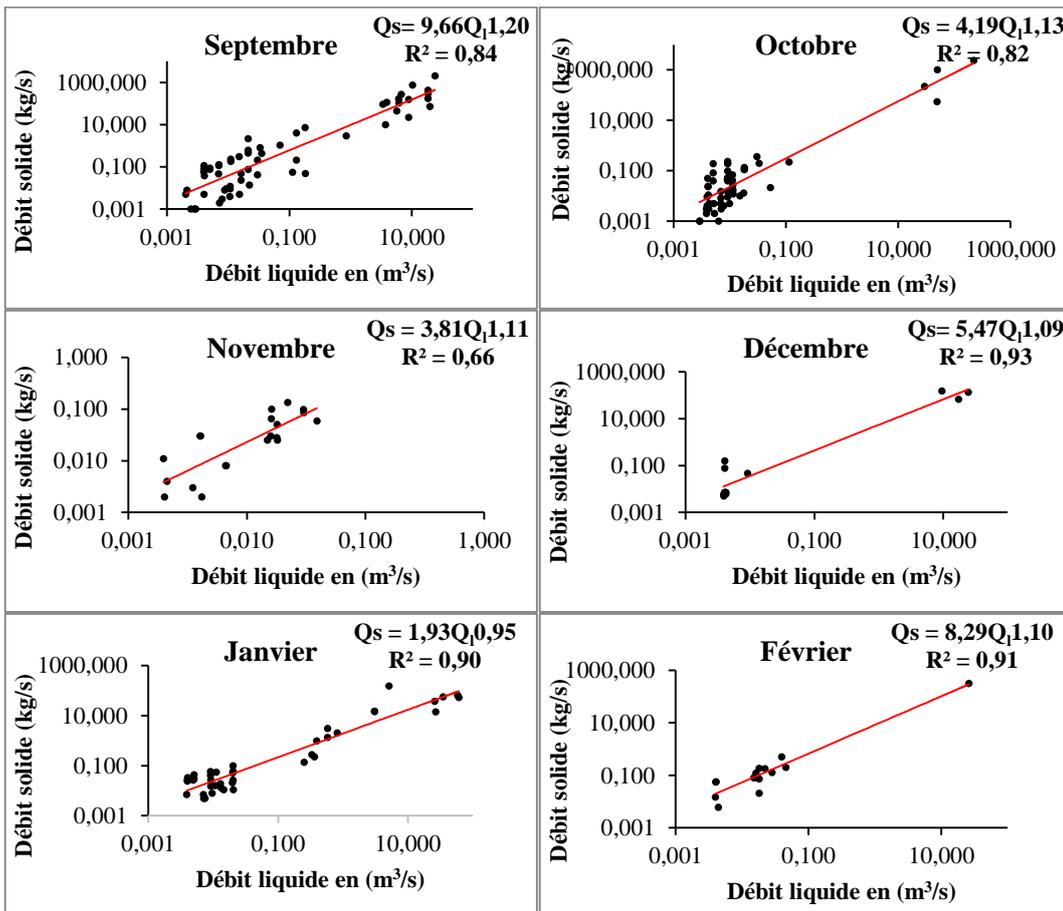


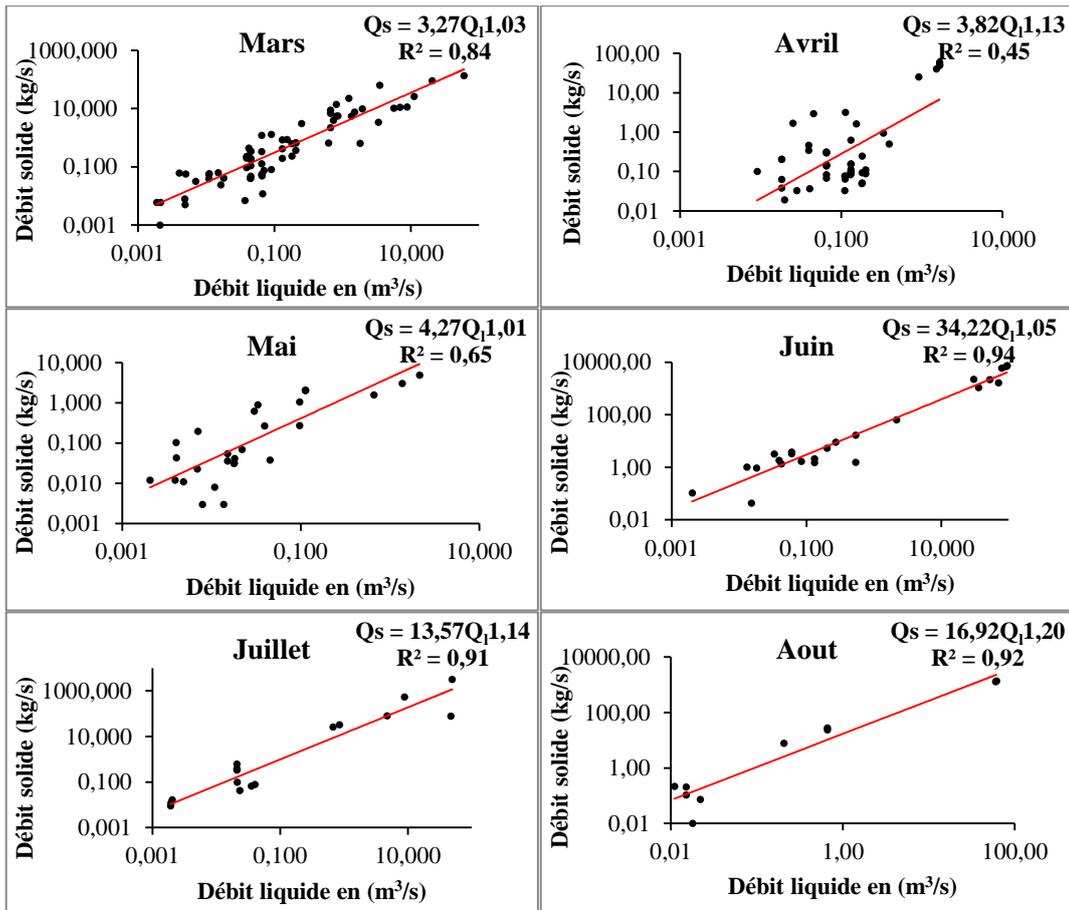
Bassin Reboa (Station Reboa)



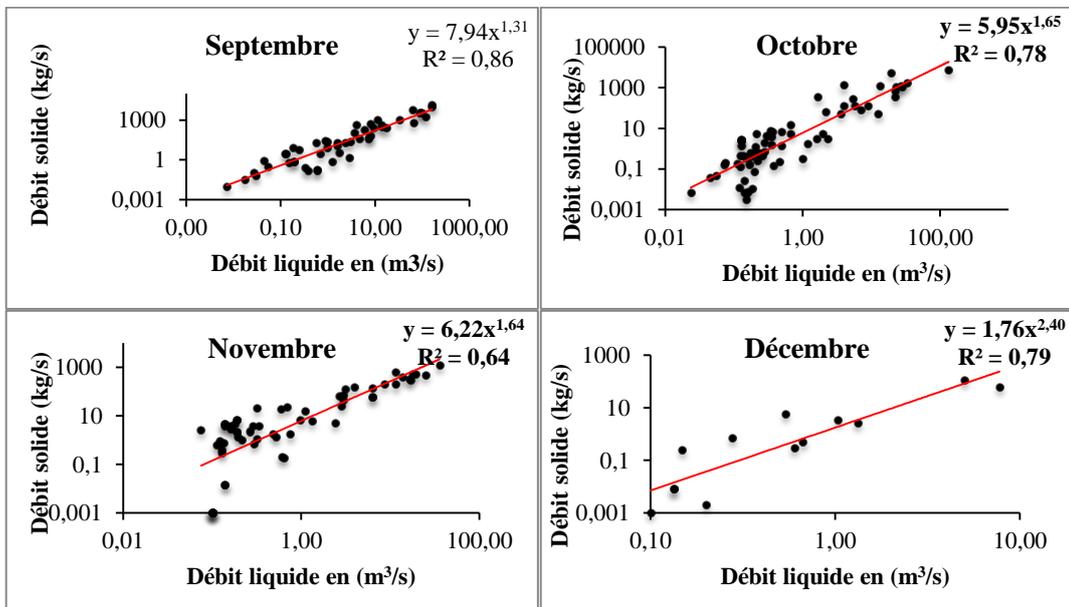


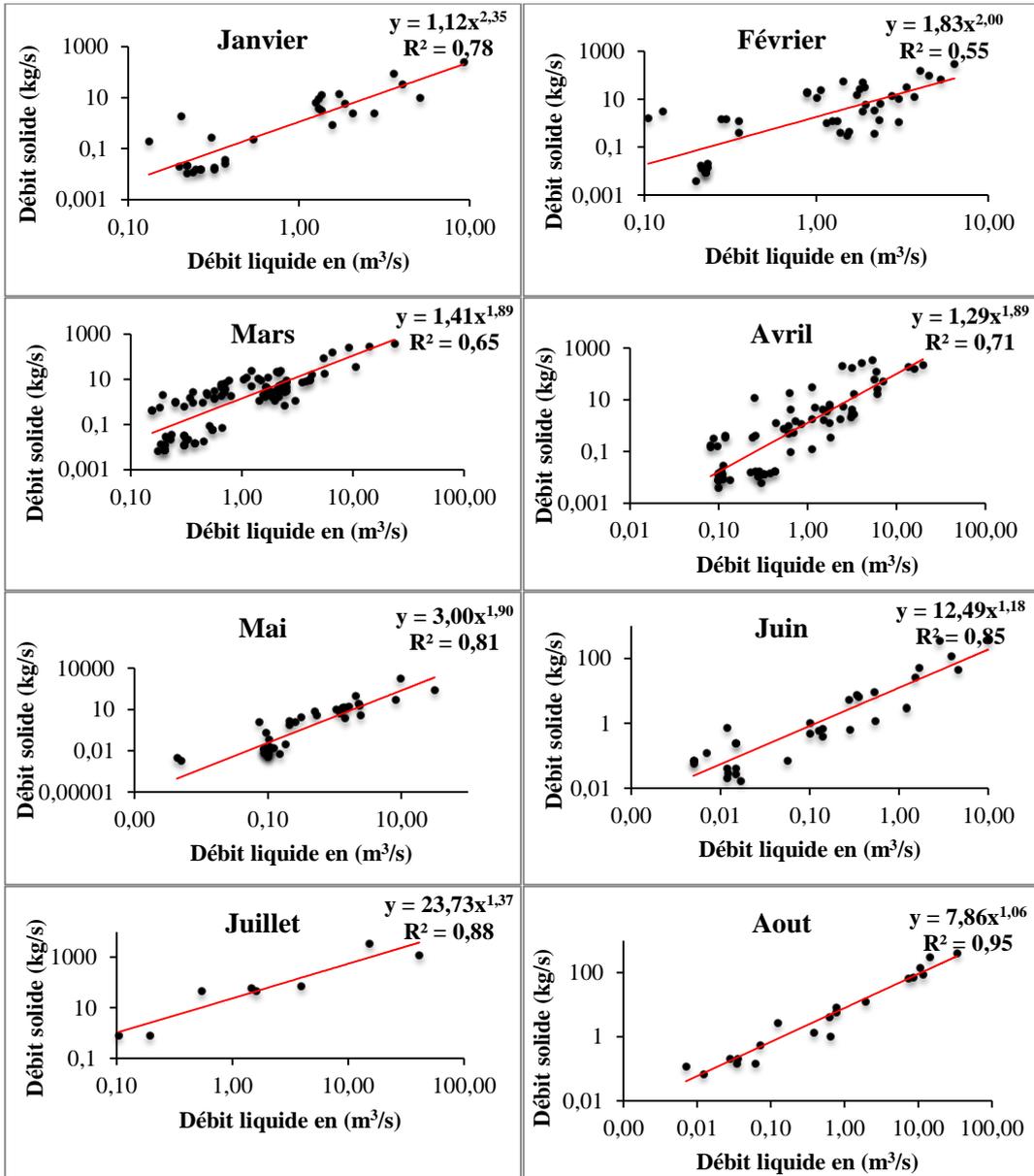
Bassin Reboa (Station Timgad)





Bassin Oued El Hai (Station El Kantara)

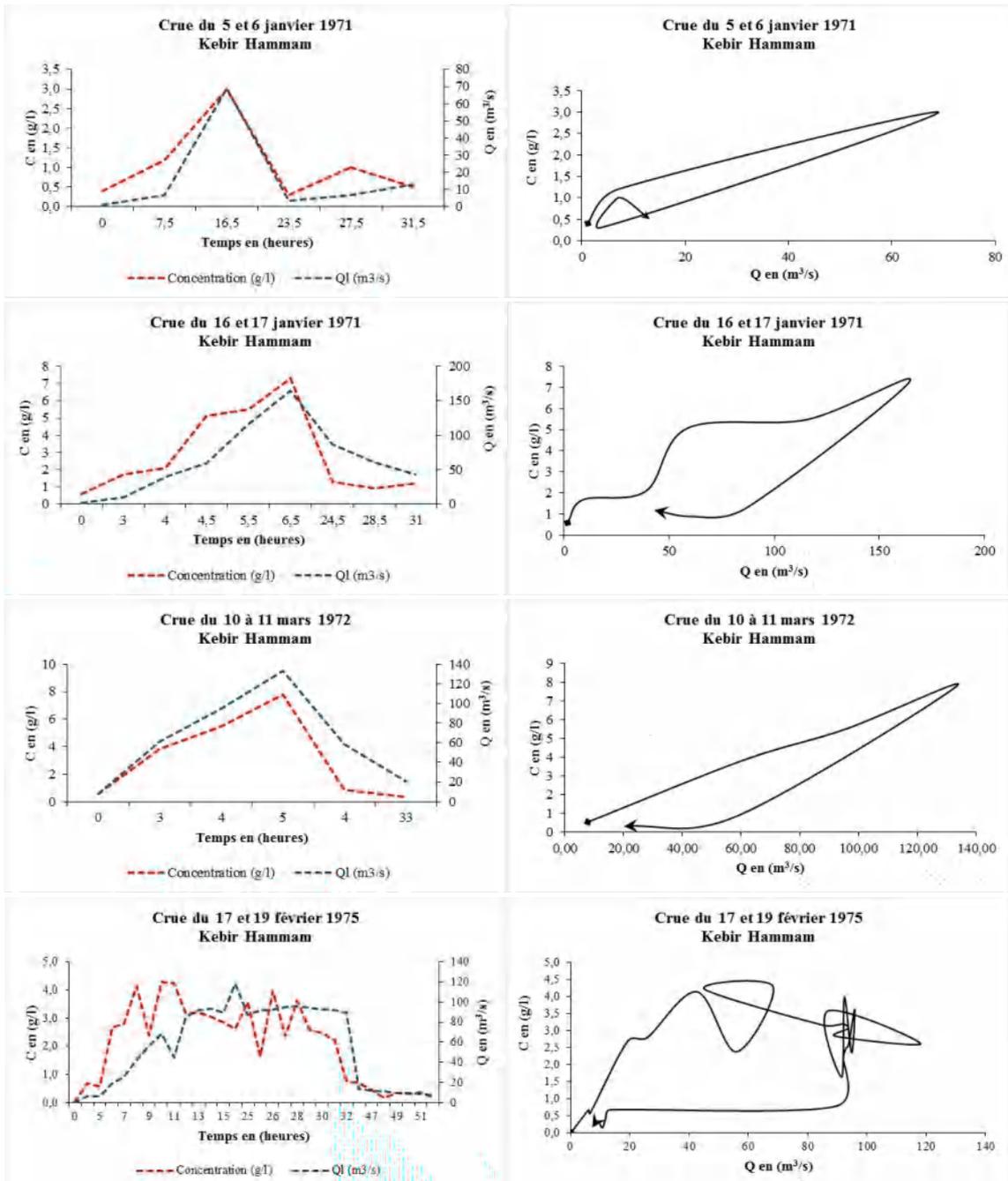


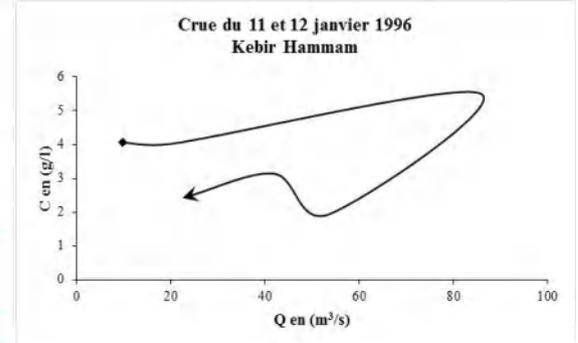
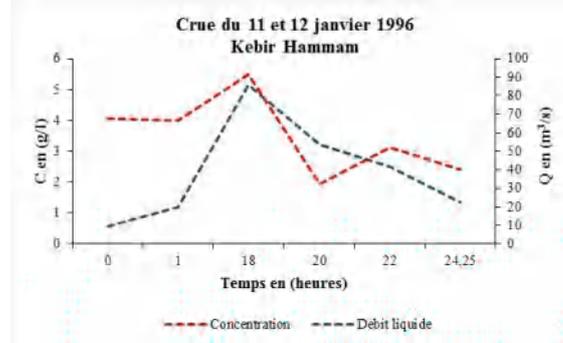
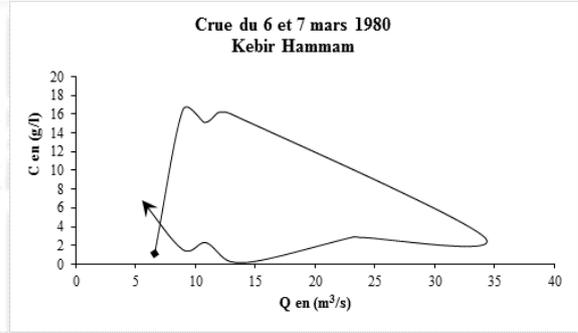
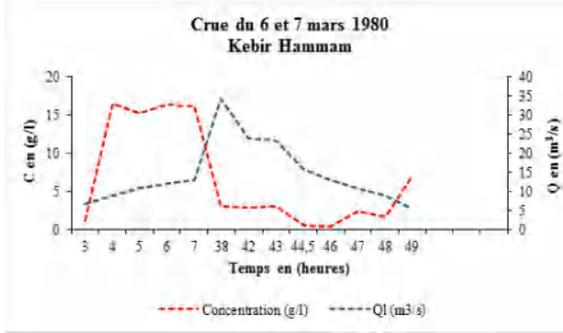
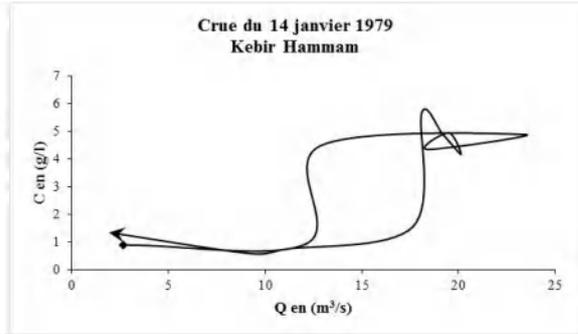
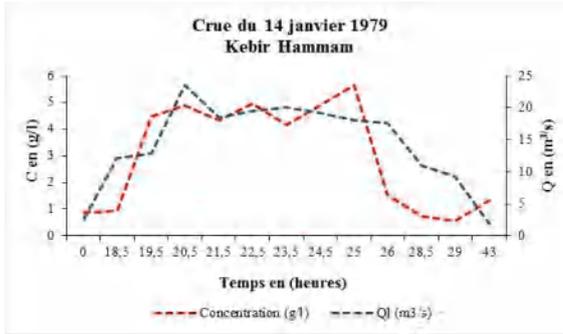
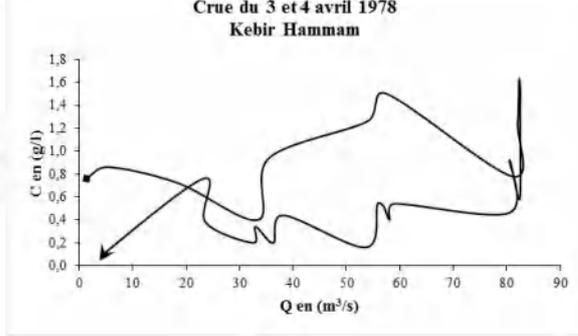
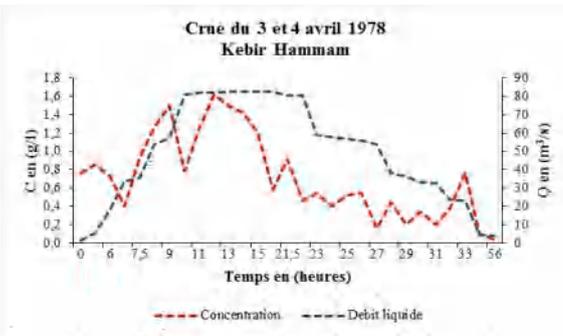
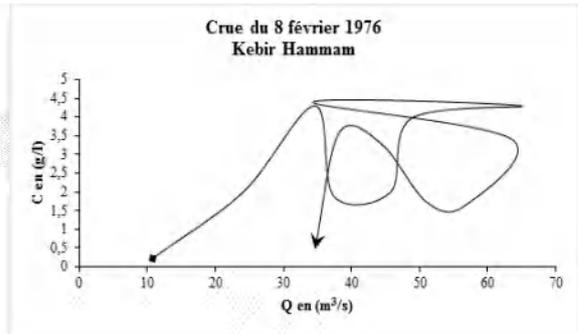
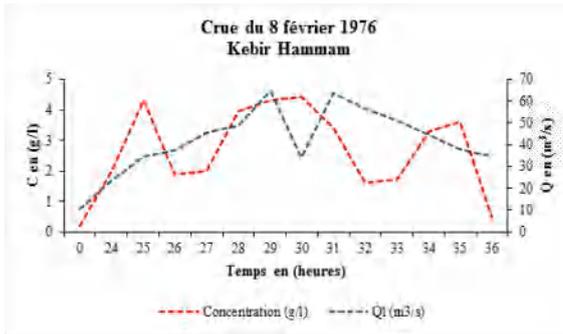


Annexe 9

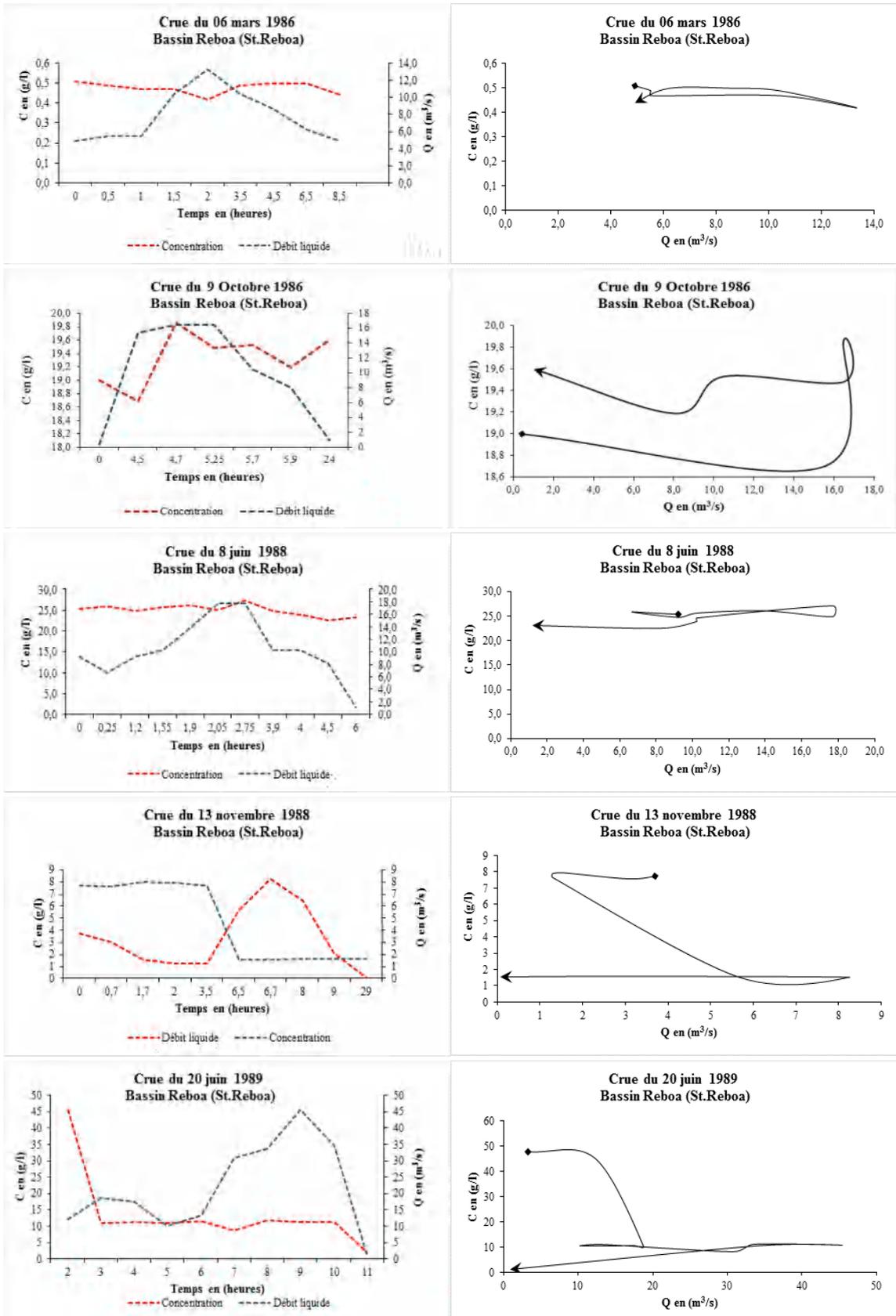
Relation débits liquides/débits solides à l'échelle des crues

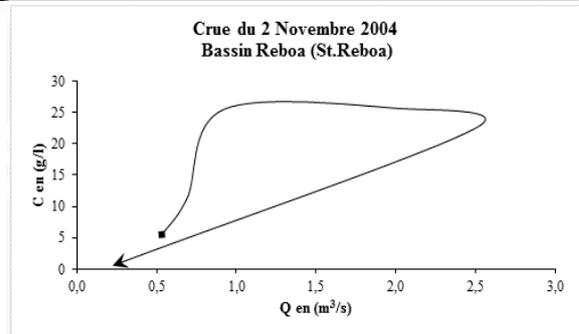
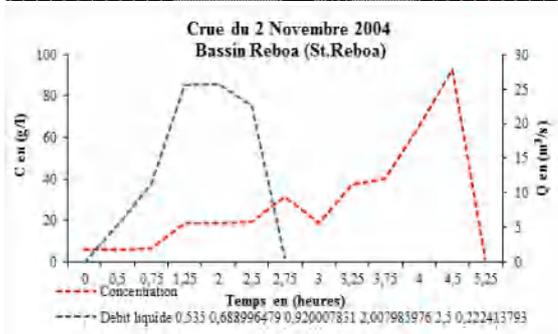
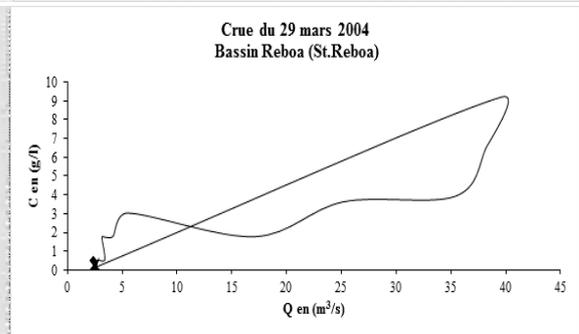
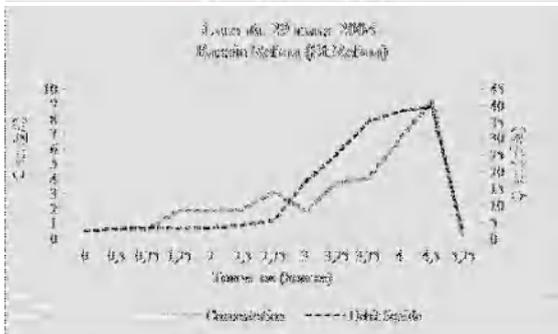
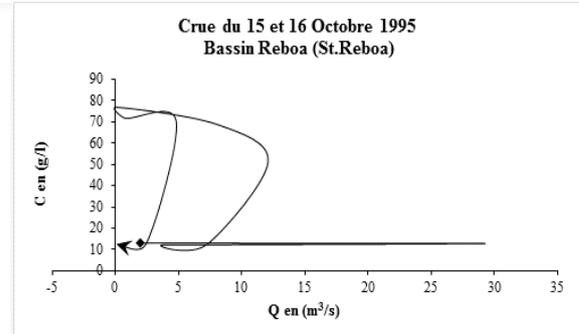
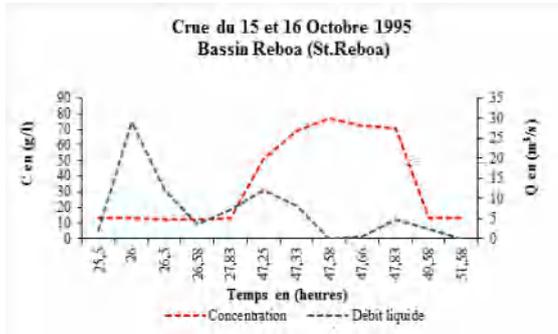
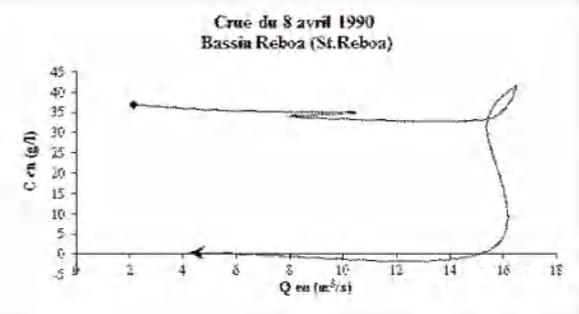
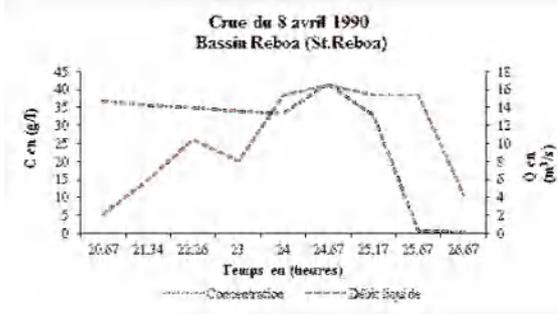
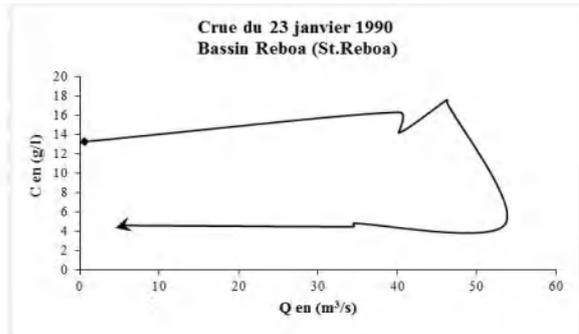
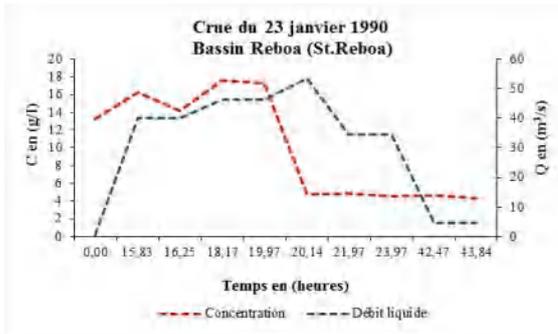
Bassin Kebir Hammam (Station Ain Chachar)



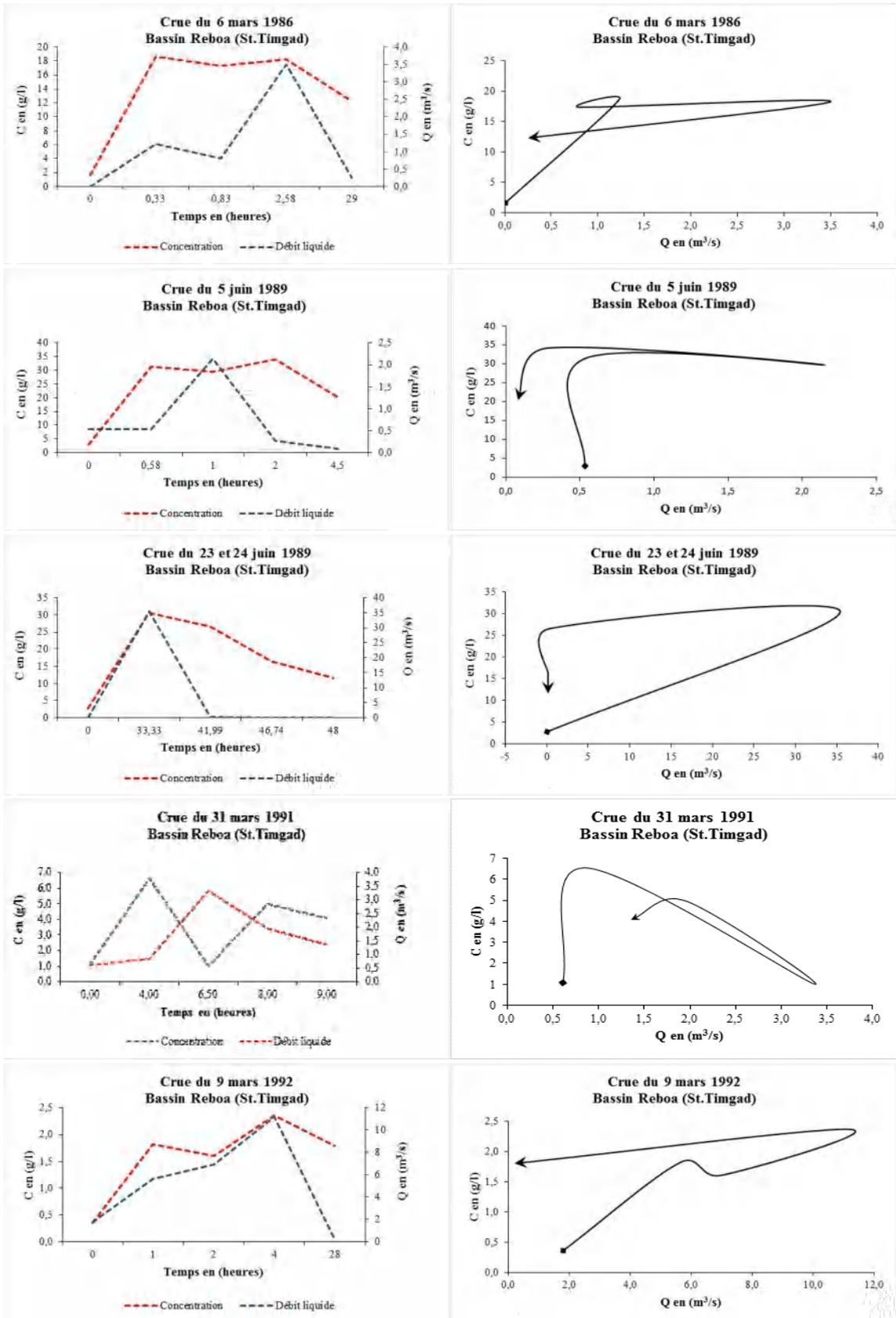


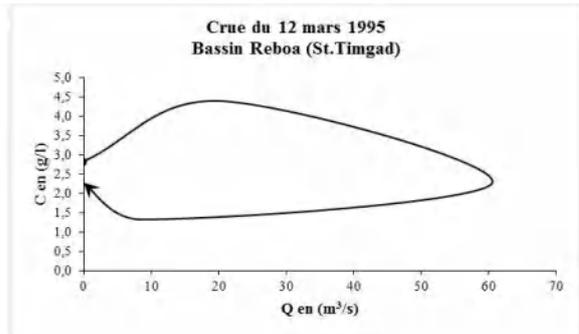
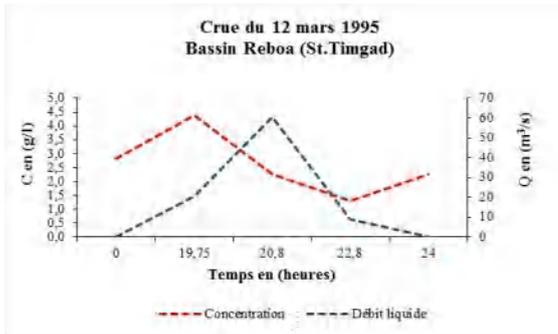
Bassin Reboa (Station Reboa)



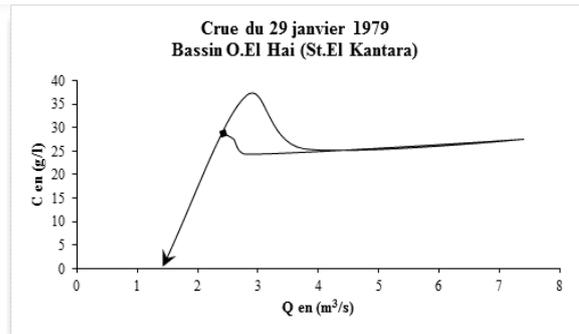
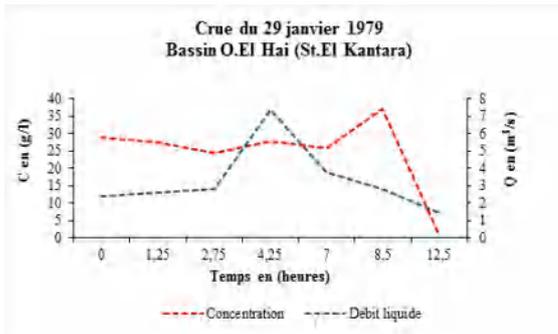
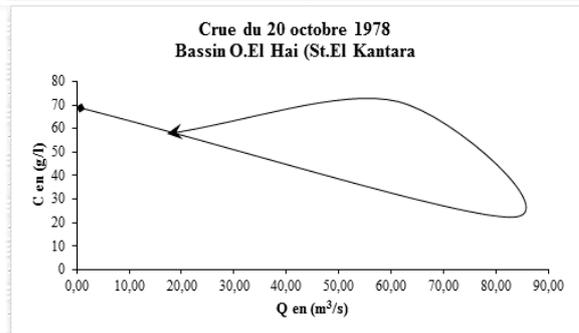
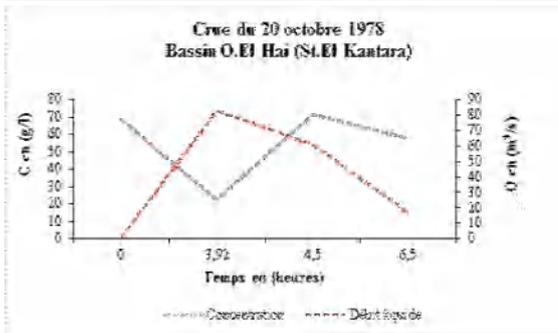
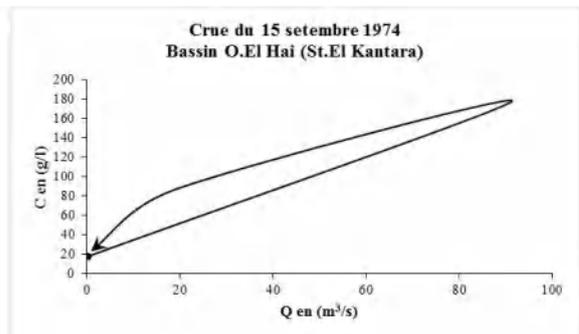
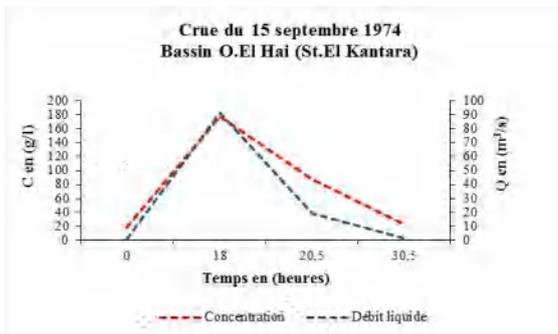
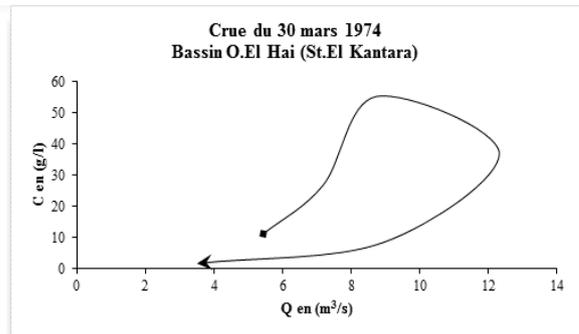
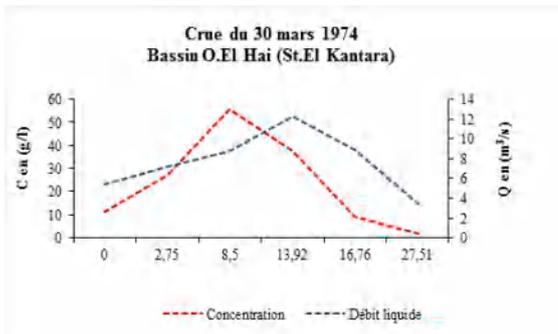


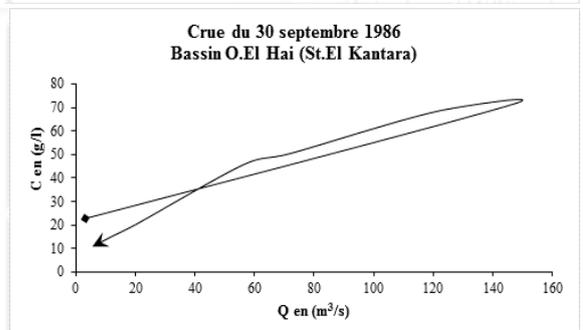
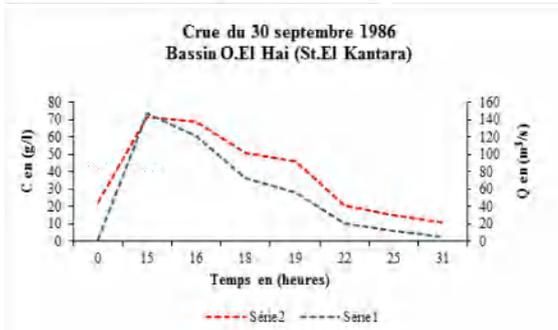
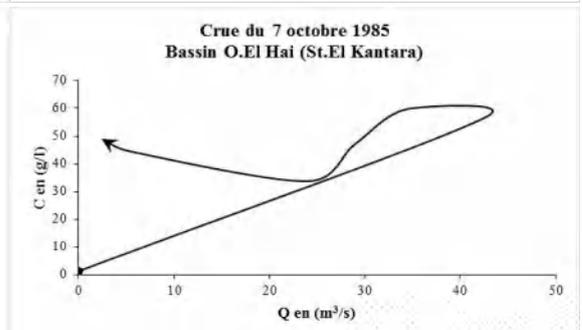
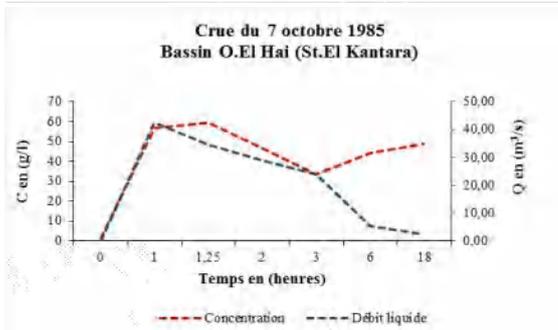
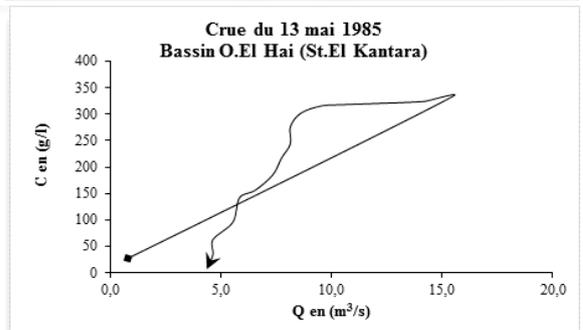
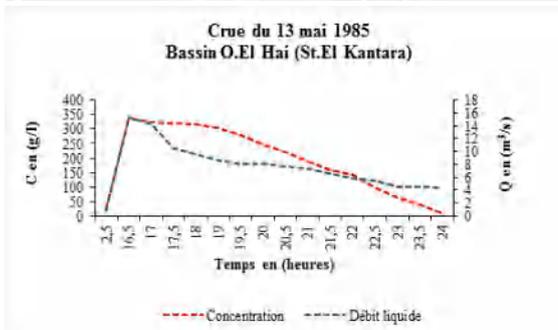
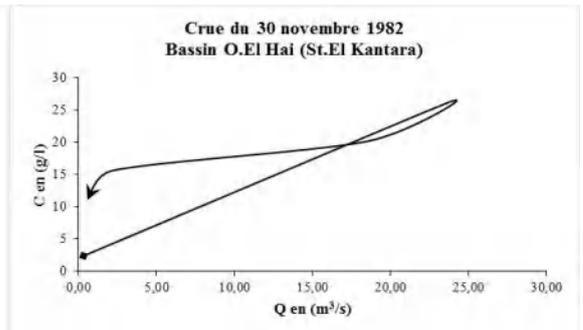
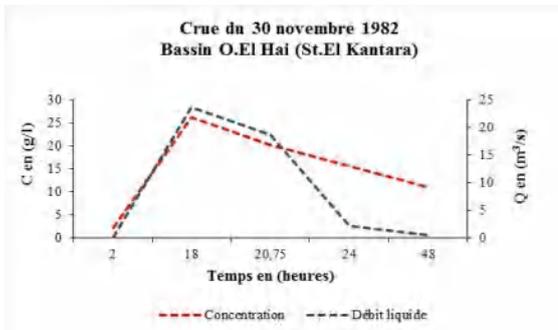
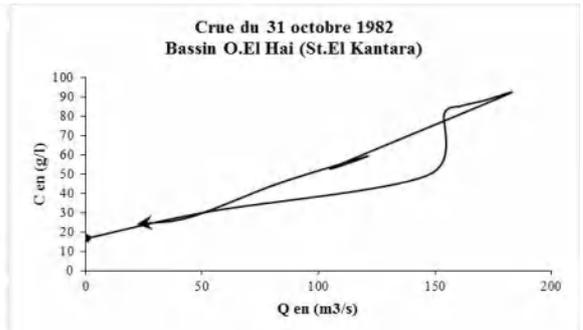
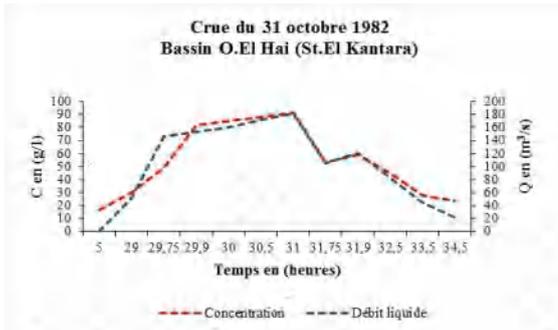
Bassin Reboa (Station Timgad)

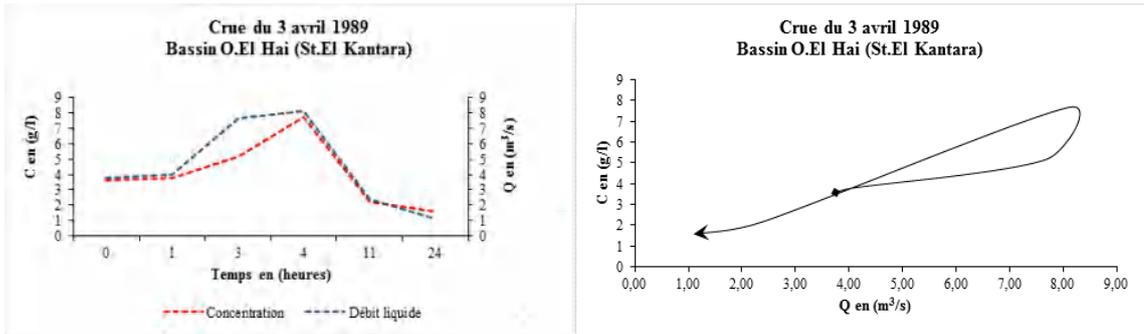




Bassin Oued El Hai (Station El Kantara)

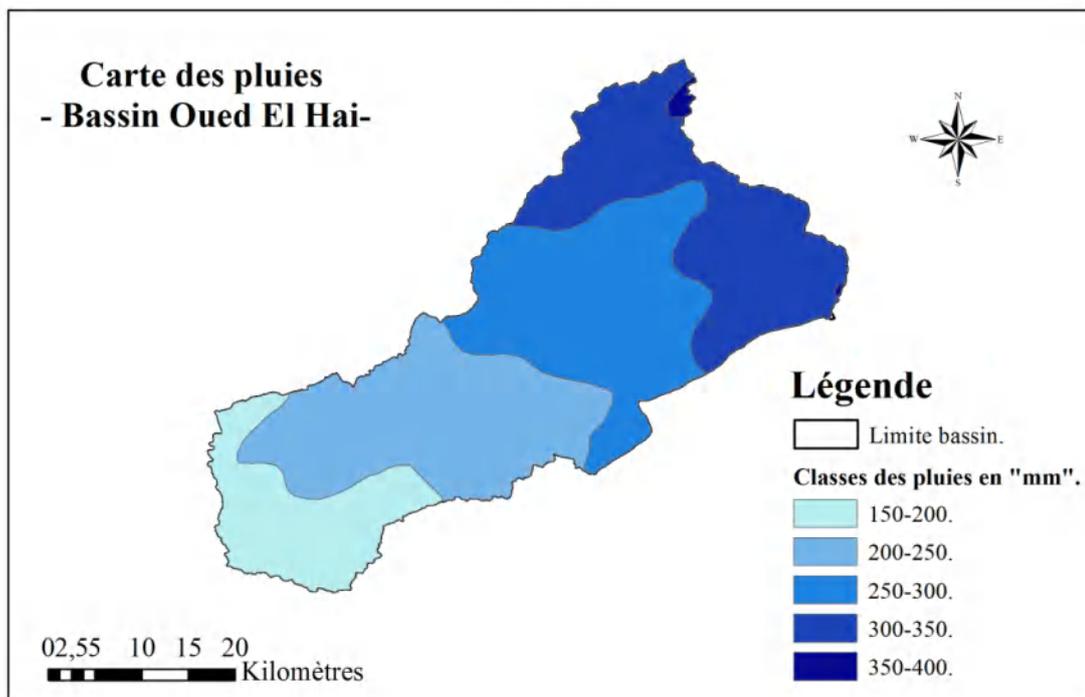
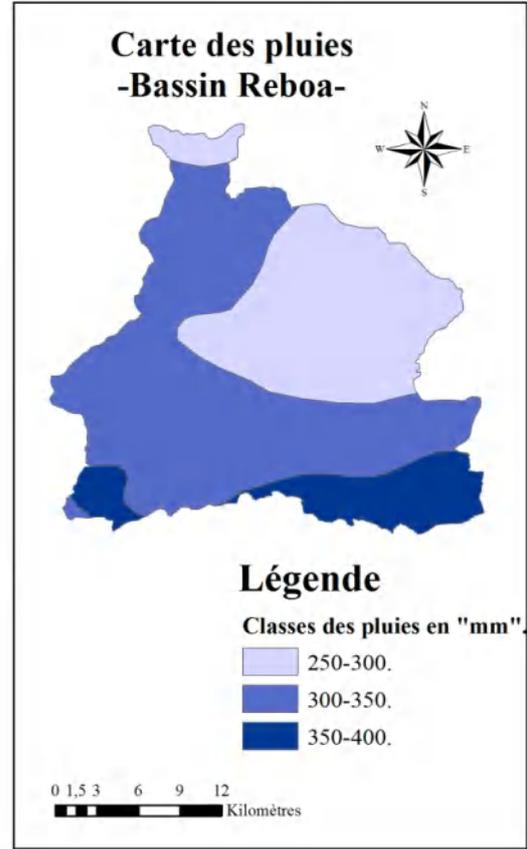






Annexe 10

Cartes des pluies par bassin



ملخص

تمثل التعرية المائية خطرا طبيعيا ينتج بالدرجة الأولى من الأوساط الهشة والمنحدرات المتتقلة بشكل عشوائي من طرف الإنسان. حاليا، تعتبر من الأسباب الأولية المؤدية لتدهور حالة الموارد المائية. فهي لاتقلل من المساحات الصالحة للزراعة و الخصبة فقط لكن أدت إلى تدهور نوعية المياه وتوحد السدود.

إن الهدف الأساسي من هذه الأطروحة هو تقدير هذه التعرية من ناحية وفهم تأثيرها على عمر السدود. من أجل تحقيق هذه الأهداف، تم اختيار كنموذج للأحواض التجمعية الشرقية الجزائرية ثلاثة أحواض ذات أوساط فيزيائية ومناخية مختلفة: حوض كبير حمام والذي ينتمي إلى الأحواض التجمعية القسنطينية الوسطى، حوض ربوعة الواقع ضمن الحوض التجمعي للهضاب العليا القسنطينية، وأخيرا حوض واد الحي المتوضع على المنحدرات الجنوبية للأطلس الصحراوي (حوض شط ملغنيغ). الهدف من هذا العمل في الواقع هو تكميم النقل الصلب العالق لكل حوض من الأحواض الثلاث ومقارنة ديناميكيات التعرية المائية فيها، ومعرفة انعكاساتها على توحد السدود الثلاث الواقعة على مستوى هذه الأودية.

اعتمدت الدراسة على مبدأ النمذجة. تم استخدام لمعطيات الصببيات الصلبة و السائلة المقاسة لاستخراج فيما بعد المعطيات لفترات غير مقاسة.

أظهرت النتائج لتغيرات سنوية، فصلية و شهرية قوية للحمولة الصلبة العالقة في الأحواض الثلاث. فقد بلغ متوسطها سنويا عند حوض كبير حمام 82 طن/كم² خلال الفترة ما بين 1970 إلى 1980، أهمها كانت في فترة الشتاء (56%). ما نتج عن حوض الربوعة حجم قدره 300 طن/كم² سنة (1985/1996) خلال 11 سنة المدروسة حيث ساهم فيها فصل الربيع ب 40% من إجمالي الحمولة للحوض. بينما في حوض واد الحي، القيم القصوى للحمولة الصلبة العالقة كانت خريفية إلى حد ما. فقد بلغ متوسط الحمولة الصلبة العالقة عند هذا الحوض 140 طن/كم²/سنة.

إن تحليل تطور العلاقة ما بين قيم التركيزات العالقة و الصببيات السائلة على مستوى بعض الفيضانات أظهرت أن استجابة التركيزات للمواد العالقة في حوض واد الكبير تكون في مجملها في اتجاه عقارب الساعة، تخص أساسا فيضانات فصل الشتاء و الربيع و مصدرها قاع الواد نتيجة للأمطار الأولى.

بينما تركيزات المواد العالقة في واد ربوعة و واد الحي تتبع اتجاه معاكس للساعة و المواد العالقة مصدرها من أعلى المنحدرات حيث تستغرق زمتا طويلا للوصول إلى المصب.

الكلمات المفتاحية: التعرية المائية، السدود، النمذجة، المواد العالقة، الوحد، كبير حمام، الربوعة، واد الحي.

ABSTRACT

Water erosion presents a natural risk those results primarily from the fragility of the environment and the anarchic socialization of the slopes. Currently, it is the leading cause of degradation of water resources. It not only reduces cultivable areas and soil fertility, but also leads to downstream regions in the degradation of water quality and the silting up of dams.

The aim of this thesis is to assess, on the one hand, the extent of this erosion in waterways and, on the other hand, to understand its impact on the lifespan of dams. In order to achieve these objectives, three sub-watersheds located in different environments in eastern Algeria were chosen: the Kebir Hammam sub-basin (Coastals Constantinois Center basin), the Reboa sub-basin (the Constantine Highlands) and the sub-basin of Oued El Hai located on the southern slopes of the Saharan atlas (ChottMelrhair basin). The objective of this work is, in fact, to estimate the suspended solid transport of the three watersheds with different physical and climatic characteristics, and to compare the erosive dynamics. The three dams, located downstream were the subject of a siltation study (Zit Emba, Koudiet Meddaouar and the Fontaines des Gazelles).

The study is based on the principle of modeling. The chronicles of measured liquid and solid flows were used to reconstruct the chronicles of unmeasured flows and those from liquid flows. They concern four stations on four rivers. They reflect by basin, heterogeneous periods ranging from 10 to 22 years. The statistical models making it possible to reproduce the flows of suspended matter were carried out on 4 time scales (instantaneous or daily, monthly, seasonal and by high and low water period).

The results obtained show strong annual, seasonal and monthly variability in the three basins. Over an observation period of 10 years (1970/19980), the average specific degradation in the Kebir Hammam basin is 82 tonnes / km² / year. The largest suspended solids input come from winter (56%). Oued Reboa and Oued Guergour in the Reboa basin produce on average 300 tonnes / km² / year for a period of 11 years (1985/1996). In spring, the suspended solids contributions exceed 40% of the total. In the Oued El Hai basin, the peaks are rather autumnal. The average specific solid input is 110 tonnes / km² / year (1970/1992).

The application of the hysteresis approach linking the suspended concentrations and liquid flows of a few floods has shown that in the Kebir Hammam basin the response of the concentrations is in a "clockwise loop" direction. This model is particularly suitable for winter and spring floods. They reflect a contribution of suspended sediment, which comes mainly from the bed of the stream, and erosion is active from the first rains. On the other hand, it follows the opposite direction of a watch in Reboa and Oued El Hai. Suspended sediment comes from the top of the watersheds and takes longer to reach the outlet.

Keywords: Water erosion, dam, modeling, suspended solids, siltation, Kebir-Hammam, Reboa, Oued El Hai.