



Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Département de géologie



Agence du Bassin
Hydraulique du Tensift

Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du titre :

Maîtrise Es-Sciences et Techniques (MST)

Option: Hydrogéologie

**Etude dynamique et statistique des crues en milieu
montagnard semi aride
Exemple du bassin versant du Ksob (Haut-Atlas occidental, Maroc)**

Présenté par :

SMAIJ Zakaria

Encadré par :

Mr. Mohamed El Mehdi SAIDI

Jury composé de :

Mr. **M. E. SAIDI** (Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech)

Mr. **A. BACHNOU** (Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech)

Mr. **M. AGOUSSINE** (Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech)

Année universitaire : **2008/2009**

INTRODUCTION

Afin de prétendre au développement de la région d'Essaouira et ses environs, et vue l'importance de atouts naturels et touristiques de cette région, mais aussi le fait qu'elle soit le siège de crues brèves et importantes qui affectent le littoral d'Essaouira et ses installations touristiques, Il était recommandable d'assurer la sécurité et la protection des aménagements et des infrastructures en entreprenant des études du milieu naturel et de ses risques.

Tout approche du milieu naturel doit s'efforcer de fournir des indications chiffrées permettant de caractériser la zone d'étude, raison pour laquelle nous allons entreprendre une analyse morphologique puis hydrométrique pour aborder une étude dynamique et statistiques des crues dans le but de la prévention et la protection contre ces crues.

En effet dans ces régions montagnardes et semi arides, interfèrent une aridité du climat, une irrégularité importante du régime de l'oued et une grande variabilité spatio-temporelle des pluies. Les crues sont caractérisées par leurs apparitions généralement en saison froide de façon brutale, ils sont souvent de courte durée, violentes et de grande vitesse de propagation.

Mon stage de fin d'études consiste à élaborer une étude dynamique et statistique des crues en milieu montagnard semi aride, l'exemple du bassin versant du Ksob (Haut Atlas occidental, Maroc). Pour se faire nous avons procédé par la méthodologie suivante:

- Dans une première partie on commencera par une présentation générale et analyse géomorphologique de bassin versant notamment la situation géographique du bassin, sa morphologie, sa géologie générale, sa lithologie, et la distribution de son réseau hydrographique puis on passera à l'analyse du régime pluviométrique du bassin, du régime hydrologique de l'oued et de la corrélation entre les pluies et les débits.
- En ce qui concerne la deuxième partie, elle consistera en une étude dynamique des crues et une analyse des hydrogrammes, puis une analyse statistique des crues en calculant les fréquences et les probabilités de certaines pointes de crues, afin de déduire les débits des crues de certaines périodes de retour.

I- Présentation générale et analyse géomorphologiques du bassin versant

1. Situation géographique



Fig.1: Situation géographique du bassin versant du Ksob

Le secteur d'étude est le bassin versant de l'oued Ksob, localisé entre les latitudes $31^{\circ} 2'$ et $31^{\circ} 30'$ Nord et les longitudes 9° et $9^{\circ}46'$ Ouest. Il fait partie de l'Atlas Atlantique qui est la partie la plus occidentale du bassin Sud-Ouest Marocain.

Le Bassin du Ksob est un bassin côtier atlantique qui s'étend sur superficie d'environ 1483 Km², Il se situe au Sud-est de la ville d'Essaouira à l'intérieur d'une chaîne de montagne qui s'étend du Haut Atlas vers l'océan atlantique.

Ce bassin est subdivisé en trois sous-bassins, leur planimétrage a donnée les résultats suivant :

- Sous bassin d'oued Igrounzar, qui s'étend sur 825 km² dans la partie Nord de notre bassin.
- Sous bassin d'oued Zelten s'étendant sur 462 km² dans la partie Sud.
- Zone de l'Adamna avec une superficie de 194 km² dans la partie extrême Ouest.

L'oued Ksob résulte de la confluence des oueds Igrounzar et zelten à l'amont de la gorge Zerrar à environ 29 km de l'océan Atlantique La forme ainsi que son cours d'eau principal ont une direction SE-NW

Cet oued draine les eaux de ruissellement de la cuvette synclinal de Bouabout et du versant Nord du Haut Atlas occidental. Les événements pluvieux sur le Haut Atlas entraînent souvent des crues importantes de cet oued qui peuvent dépasser 1500 m³/s. La dernière crue de 29/11/2005 a pu dépassée 2500 m³/s dans la station de Adamna selon l'agence de bassin hydraulique de Tensift.

2. Morphologie et reliefs

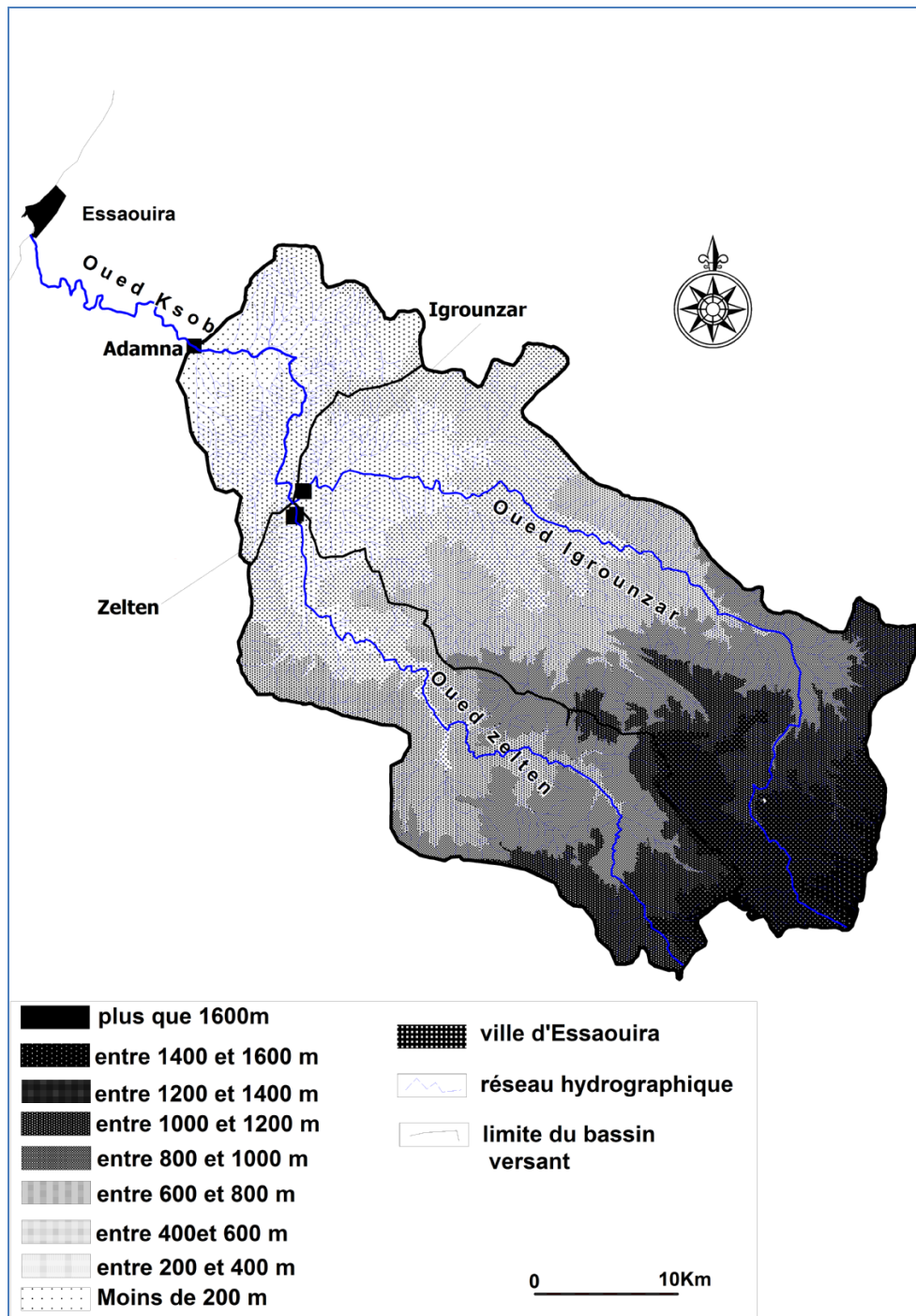


Fig.2 : Carte hypsométrique (A. El Mimouni et al, 2009)

Le bassin versant de Ksob couvre une superficie de 1483 Km² avec un périmètre de 209 Km. La figure 2 illustre les tranches d'altitudes comprises entre 1600 m et moins de 200 m dans la partie Nord-Ouest à l'exutoire. L'altitude moyenne est d'environ 725 m. Cette zone est constituée par un ensemble de cuvettes synclinales à remplissage de terrains méso-cénozoïques. Le climat est semi aride, avec une moyenne annuelle des précipitations de

l'ordre de 320 mm. Cette morphologie permet à la région de se soumettre à deux types d'influence climatiques ; les unes sont maritimes venant de l'Ouest, les autres sont continentales qui arrivent de l'Est.

L'analyse des principales caractéristiques morphologiques et hydrographiques du bassin de Ksob, commence par l'étude de la répartition des altitudes qui se fait d'après une carte en courbe de niveau. En mesurant au planimètre et en cumulant les aires situées entre chaque deux courbes successives on obtient un histogramme de fréquence d'altitudes et la courbe hypsométrique. Une carte hypsométrique donne une idée sur les proportions du bassin affectées.

2.1 Courbe hypsométrique

La répartition du bassin versant par tranches d'altitude donne une importance capitale pour les études hydrologiques du fait que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude. Ainsi on a eu recours au planimétrage des surfaces comprises entre les courbes de niveau pour le bassin versant de l'oued Ksob à Adamna et au niveau des deux affluents Igrounzar et Zelten.

Altitudes (m)	Ksob			Igrounzar			Zelten		
	S (Km ²)	%	% cumulé	S (Km ²)	%	% cumulé	S (Km ²)	%	% cumulé
0-200	51.0	3.4%	3.4%	0	0.0%	0.0%	0	0.0%	0.0%
200-400	274.7	18.5%	22.0%	104.6	12.7%	12.7%	34.9	7.5%	7.5%
400-600	251.6	17.0%	38.9%	171.2	20.7%	33.4%	66.7	14.4%	22.0%
600-800	313.8	21.2%	60.1%	169.4	20.5%	54.0%	146.4	31.7%	53.7%
800-1000	236.0	15.9%	76.0%	125.1	15.2%	69.1%	111.9	24.2%	77.9%
1000-1200	187.1	12.6%	88.6%	113.1	13.7%	82.8%	75.0	16.2%	94.1%
1200-1400	144.6	9.7%	98.4%	119.6	14.5%	97.3%	25.0	5.4%	99.5%
1400-1600	23	1.6%	99.9%	21.03	2.5%	99.9%	2.0	0.4%	100.0%
1600-1800	1.5	0.1%	100.0%	1.5	0.2%	100.0%	0.0	0.0%	100.0%

Tab.I : Répartition du bassin versant de Ksob en tranches d'altitudes

Les altitudes du bassin de l'oued Ksob sont comprises entre 70 m au niveau de son exutoire à Adamna et plus de 1600 m. la courbe hypsométriques est obtenue en mesurant les surfaces comprises entre les courbes de niveau et en leur attribuant des pourcentages de la surface totale du bassin. L'examen de cette courbe pour chaque sous bassin permet de calculer différents paramètres caractéristiques tels que la dénivelée globale, indice de pente globale la dénivelée spécifique et le temps de concentration. Pour les trois sous bassin, le relief peut être qualifié modéré à fort.

L'influence du ce relief fort est encore plus évidente sur les vitesses de ruissellement, car avec une pente forte on aura une faible durée de concentration des eaux, ce qui provoque une grande vitesse d'écoulement et par conséquent un grand risque d'inondation.

On trace un diagramme avec les tranches d'altitude en ordonnées et les superficies cumulées leur correspondant en abscisses.

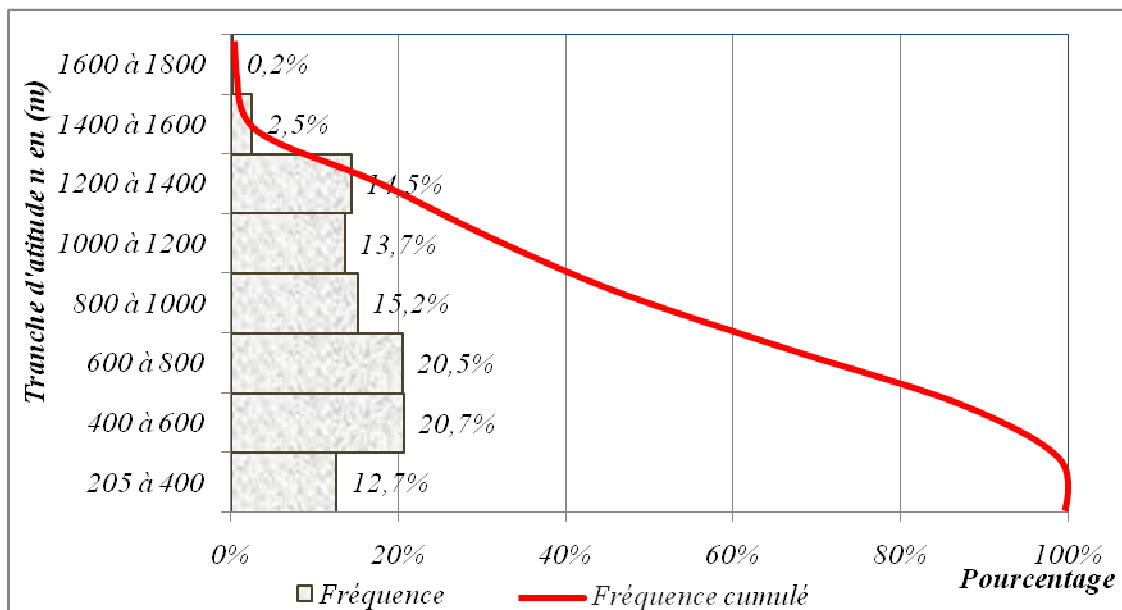


Fig.3 : Courbe hypsométrique du bassin d'Igrounzar

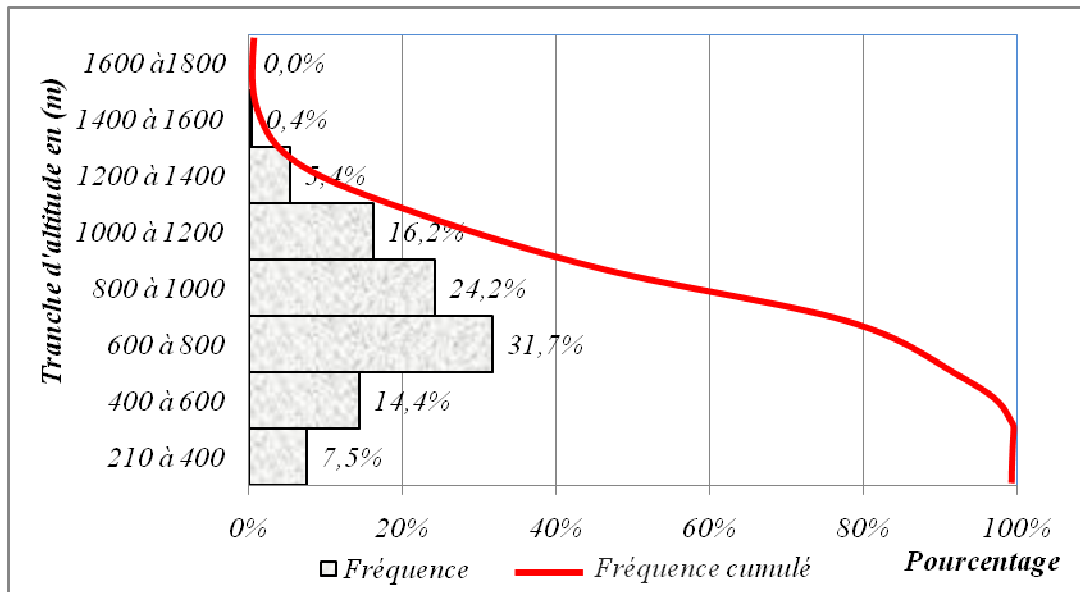


Fig.4: Courbe hypsométrique du bassin de Zelten

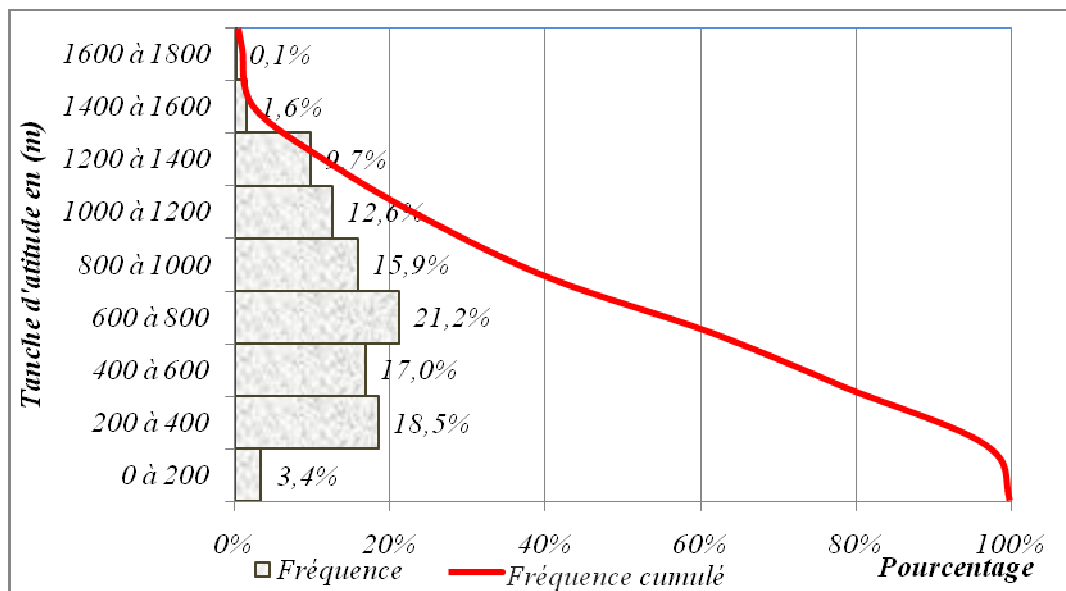


Fig.5 : Courbe hypsométrique du bassin de Ksob

A partir de la courbe hypsométrique, on peut déduire :

L'altitude moyenne :
$$H_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot h_i}{A}$$

L'altitude médiane : L'altitude lue, sur la courbe hypsométrique, au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin.

Pour le bassin du Ksob, $H_{moy} = 725$ m, et $H_{médiane} = 705$

2.2 Caractéristiques de forme :

a. Indice de compacité de Gravelius K_G :

L'indice de compacité est l'une des caractéristiques de forme les plus essentielles d'un bassin versant car il permet l'évaluation globale du réseau de drainage. Par exemple Plus le bassin est compact, plus sa forme est ramassée, plus l'indice de Gravelius est faible et plus le temps de rassemblement des eaux vers l'exutoire sera court.

En effet, on peut dire que l'écoulement global et l'allure de la courbe des débits $Q=f(t)$ de ce bassin est influencée par sa forme dans toute section transversale du cours d'eau. Ce coefficient de compacité K_G est destiné à comparer la forme d'un bassin à celui d'un cercle de même surface :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

A : aire du bassin versant.
P : périmètre du bassin versant

Pour le bassin versant du Ksob on a : $P = 209 \text{ Km}$, $A = 1483 \text{ Km}^2$, $K_G = 1.51$.

b. Dénivelée globale :

La formule est la suivante : $DG = H5 - H95$

Avec $H5$ et $H95$ correspondent respectivement à 5% au-dessus et au-dessous de la surface du bassin sur la courbe de distribution des fréquences altitudinale. Ce paramètre peut nous donner une idée sur la différence d'altitudes entre l'amont et l'aval du bassin, ainsi que sur la pente moyenne si on calcule la longueur équivalente du bassin. Cette Pente est dite modérée.

La dénivelée globale du bassin du Ksob : $DG_{Ksob} = 1310$

c. Indice de pente global :

La pente est une Caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin, la vitesse des ruissellements et les temps de concentration. La pente influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

Les pentes sont en général plus fortes sur les zones amont du bassin, au contact des flancs des anticlinaux puis s'affaiblissent dans les plaines Plio-Quaternaires de la partie aval.

La formule est la suivante : $IG = DG / L$

(L : longueur du rectangle équivalent).

(DG : Dénivelée globale).

(IG : Indice de pente global).

Indice de pente global du bassin du Ksob : $IG_{Ksob} = 15.1$

d. Rectangle équivalent :

C'est un rectangle ayant le même périmètre et la même surface que le bassin versant défini pour comparer facilement les bassins entre eux.

$$L = \frac{K\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K}\right)^2} \right] \quad I = \frac{K\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K}\right)^2} \right]$$

Le bassin versant de l'oued Ksob est de forme allongé, qu'on peut le représenter par un rectangle équivalent de longueur **L** de 86.7 et une largeur **I** de 17.1. Sa direction principale d'allongement est Sud-est –Nord-ouest. Elle est parallèle au sens d'écoulement général des eaux.

e. Temps de concentration

Pour ce paramètre on tient compte des caractéristiques géométriques et morphologiques du bassin, on le calcule à partir de la relation de Giandoht :

$$TC = (4\sqrt{S} + 1.5 * L) / 0.8 \sqrt{(H_{moy} - H_{min})}$$

Avec :

- (**S** : surface du bassin versant).
- (**L** : longueur du rectangle équivalent).
- (**H_{moy}** : altitude moyenne du bassin).
- (**H_{min}** : altitude de l'exutoire (*Adamna*)).

Le temps de concentration pour le bassin du Ksob : **TC = 13 h 54 min**

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques physiques des différents sous bassins. De point de vue surface, le bassin d'Igrounzar est deux fois plus important que celui de Zelten. Les deux ont des indices de compacité supérieurs à 1.5, c'est-à-dire de forme allongée. Sur le plan altitudinal, le cours principal de Zelten prend naissance dans des terrains plus élevés que ceux d'Igrounzar. Ceci est également valable pour les altitudes moyennes des deux bassins. La pente moyenne du bassin de Zelten est par ailleurs plus importante que celle des d'Igrounzar. Ces disparités morphologiques vont se retrouver au niveau du fonctionnement hydrologique relevé à chaque station hydrométrique.

<i>paramètres</i>	<i>Ksob</i>	<i>Igounzar</i>	<i>Zelten</i>
Superficie	1483	825	462
Périmètres	209	162	123
Indice de compacité	1.51	1.57	1.60
Altitude moyenne (m)	725	802	790
Altitude maximal (m)	1694	1694	1620
Altitude minimale (m)	70	205	210
L de rectangle équivalent	86.7	68.5	52.6
l de rectangle équivalent	17.1	12.0	8.8
Dénivelée globale	1310	1288	1094
Indice de pente moyenne	15.1	18.8	20.8
Pente moyenne	1.5	1.8	2.1
Temps de concentration	13h53	11h08	8h34

Tab.II : caractéristiques géomorphologiques du bassin du Ksob

3. Géologie générale et lithologie du bassin :

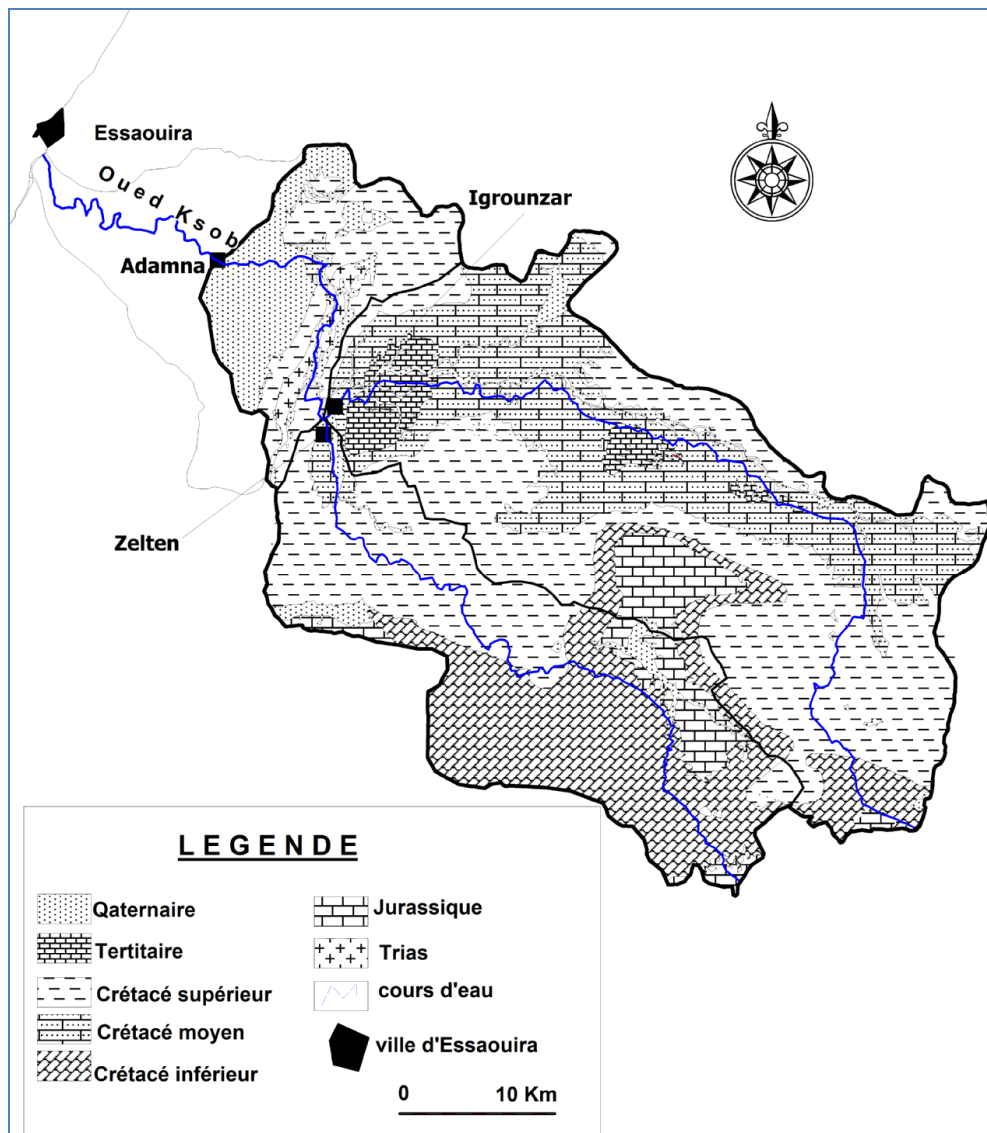


Fig.6 : Carte géologique simplifiée du bassin du Ksob (A. El Mimouni et al, 2009)

Sur le plan géologique, les affleurements du bassin versant du Ksob sont constitués de faciès très diversifiées, d'âge compris entre le trias et le quaternaire (Michard, 1976; Icame 1994).

Le Trias qui affleure au niveau de la partie aval du bassin, surtout le sous bassin d'Adamna, il s'agit d'argile salifère et de basaltes du diapir de Tidsi. Ces terrains jouent un rôle très important dans la minéralisation des eaux de l'oued qui alimente dans sa partie aval le système aquifère de la zone synclinale d'Essaouira.

Cependant, la majeure partie des faciès rencontrés dans le bassin est constituée de séries carbonatées d'âge Jurassique et crétacé (Figure 6). Les observations déduites des cartes géologiques au 1/ 50 000 d'Essaouira et de Khmis Meskala, et des prospections de terrains montrent que les roches tendres à moyennement tendres représentent plus de 60 % de l'étendue du bassin (El Mimouni et al, 2005), ce qui explique la grande quantité des matériaux solides charriée par le Ksob durant les périodes de crue.

Le haut bassin d'Igounzar est occupé principalement par les formations carbonatées du Crétacé, d'extension spatiale forte dominante, représentent presque 85% de la superficie du bassin d'Igounzar.

Dans la bordure du bassin d'Igounzar, il s'agit des marnes et des marno-calcaires respectivement Cénomaniens et Sénoniens sur lesquels le ruissellement est intense. Vers le centre du bassin, l'oued coule sur des calcaires Turoniens qui paraissent assez fissurés et sembleraient susceptibles d'absorber et de permettre l'infiltration d'une quantité d'eau non négligeable (Rey et al, 1988 ; Ettachfini, 1992 ; Icame, 1994).

Avec un bassin versant moins étendu que celui de l'Igounzar, le Zelten draine des séries aux structures plus compliqué qui font affleurer le Jurassique supérieur. Ces formations sont en majeure partie constituées par des formations plutôt étanches (des argiles et des marnes), le ruissellement y est par conséquent plus intense.

Vers l'aval de la confluence, les formations dunaires consolidées et mobiles du quaternaire occupent la totalité du sous bassin versant d'Adamna. Dans cette partie, le réseau hydrographique du bassin versant est peu marqué car les eaux s'infiltrent rapidement dans les alluvions du lit de l'oued Ksob qui est à sec plusieurs mois par ans

En effet, Cette panoplie stratigraphique et cette diversité lithologique donne aussi une grande variété de formes topographiques où alternent dépressions, plateaux, relief en cuesta, vallées encaissées, qui peut donc avoir des conséquences hydrologiques importantes, notamment la relation pluie-débit et l'évolution des écoulements en période de crue. Autrement dit, outre la nature de l'averse, ce sont les caractéristiques lithologiques et morphologiques du bassin qui conditionnent la forme des hydrogrammes observés à l'exutoire.

4. *Le réseau hydrographique :*



Le réseau hydrographique du bassin du Ksob (A. El Mimouni et al, 2009)

Les cours d'eau nommés Igrounzar et Zelten en amont et Ksob en aval est les principales rivières qui traverse le bassin. Il est pris grâce aux sources Cénomano-Turoniennes.

Le Ksob prend sa source dans le Haut Atlas Occidental et constitue le principal collecteur d'eau de la province. Cet oued est formé par l'union de l'oued Igrounzar et Zelten. Son bassin versant est d'environ 1480 km².

Le réseau hydrographique est dans l'ensemble assez dense avec un nombre élevé des branches, des ruisseaux et affluents. la densité de drainage s'en trouve élevé.

Profil des oueds :

Le profil en long des deux principaux affluents du Ksob montrent que Oued Igrounzar est moins penté que Zelten bien qu'il provient d'une altitude de plus de 1400 m, Pour Zelten, cette altitude maximale ne dépasse pas 1300 m.

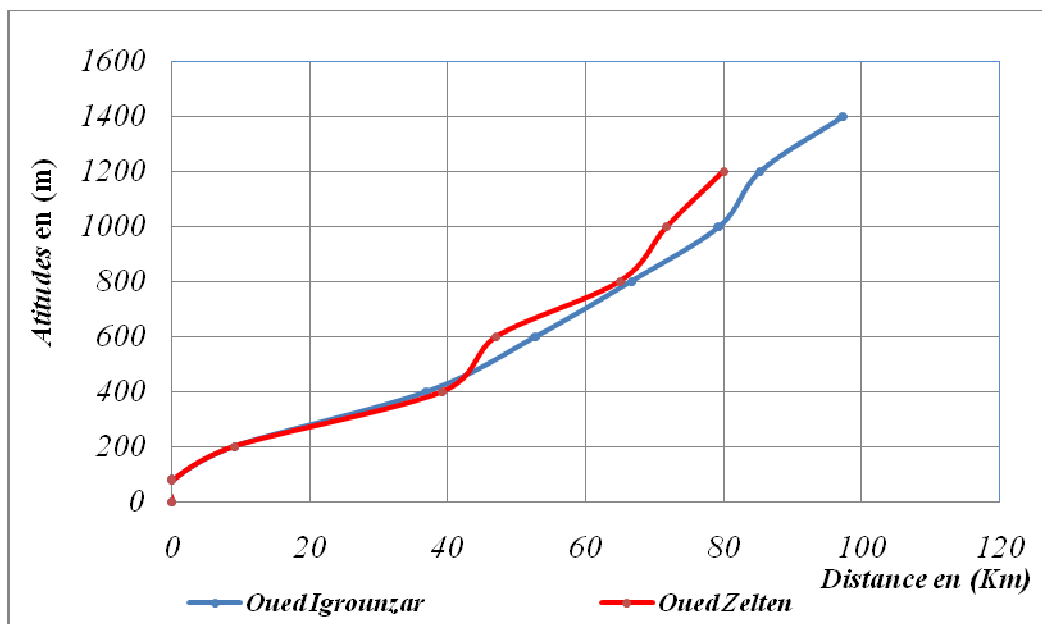


Fig.7 : Profil en long de l'Oued Ksob et ses deux affluents

II- Régime pluviométrique du bassin et régime hydrologique de l'oued

Les données pluviométriques ont été fournies par l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT). Elles concernent les stations d'Adamna et Igrounzar.

Les relevés pluviométriques journaliers font défaut, mais nous disposons des relevés mensuels ainsi qu'annuels. La continuité et la durée de ces relevés varient selon les stations, certaines séries montrent des discontinuités importantes.

L'ABHT a donc mis à notre disposition :

- *Les données de précipitations mensuelles en (mm) à Igrounzar et à Adamna qui couvrent la période de septembre 1977 à août 2004 pour les deux stations.*
- *Les données de débits moyens journaliers et instantanés en m³/s pour les trois stations d'Adamna, Zelten et Igrounzar couvrent les périodes:*

* de septembre 1965 à août 2006 pour la station d'Igrounzar avec une lacune de données pour la période de février 1972 à janvier 1975.

* de mai 1975 à décembre 2006 pour la station de Zelten.

* de septembre 1970 à avril 2007 pour la station de l'Adamna.

Malgré la discontinuité de certaines séries, l'analyse a été réalisée de telle façon à tirer le maximum d'informations des données. Un autre problème réside dans l'intervalle de temps qui n'est pas similaire pour les trois stations. Pour cette raison l'intervalle de temps a été choisi de telle sorte à qu'il soit commun à toutes les stations.

Pour le traitement de ces données hydropluviométriques, nous avons choisi de travailler à différents pas de temps pour aboutir à une comparaison aux échelles mensuelles, saisonnières et annuelles.

Les stations du bassin

Le bassin de l'oued Ksob est pourvu de trois stations Hydrométriques dont les coordonnées sont les suivantes :

Station	X	Y	Z
Adamna	92.90	104.15	70
Igrounzar	103.50	91.30	205
Zelten	103.30	90.65	210

Tab.III : Les coordonnées Lambert des trois stations.

1. Régime pluviométrique du bassin.

a. Précipitation moyenne mensuelle (1977-2003)

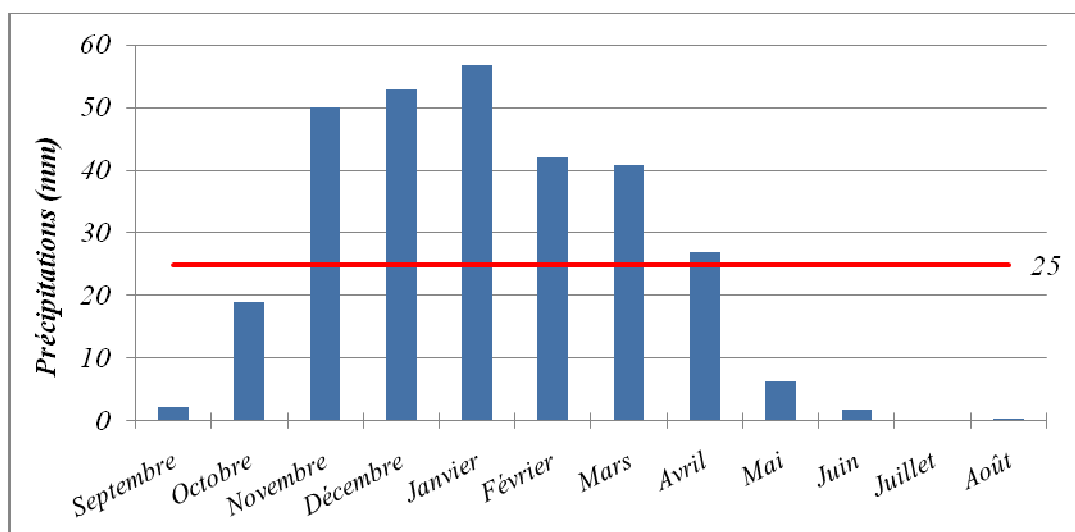


Fig. 8 : Précipitations moyennes mensuelles à Igrounzar (1977-2003)

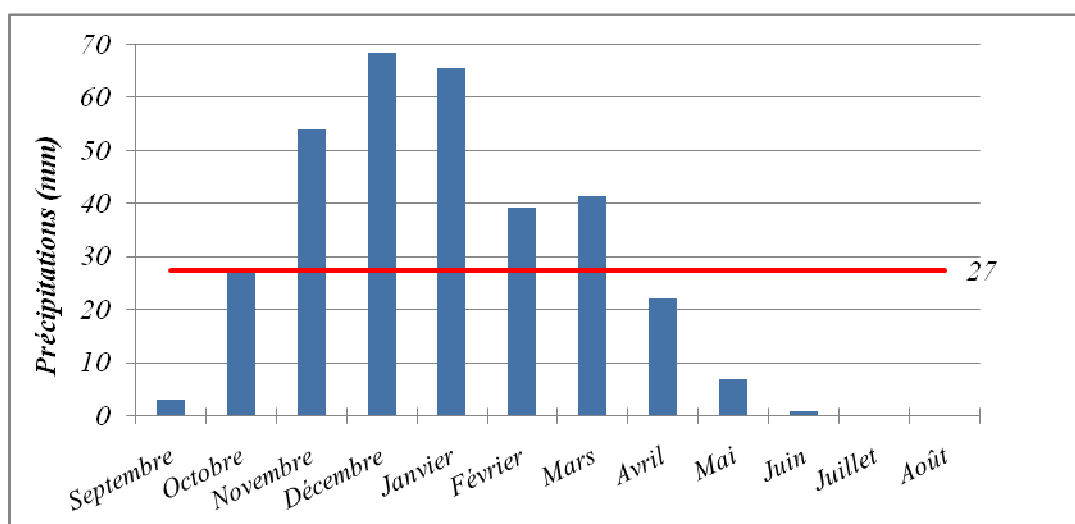


Fig. 9 : Précipitations moyennes mensuelles à Adamna (1977-2003)

Les figures 8 et 9 montrent la variation mensuelle des précipitations avec une moyenne de 27.42 mm pour l'Adamna et 24.89 mm pour Igrounzar.

Les précipitations s'étendent sur les mêmes mois pour l'Adamna que pour Igrounzar. Les mois de novembre, décembre, janvier, février et mars dépassent la moyenne pour les deux stations ; le maximum se situe au mois de décembre pour l'Adamna et janvier pour Igrounzar. Le minimum s'établit toujours pendant les mois de juillet et août.

L'évolution des précipitations mensuelles, est la même pour les deux stations. Elle montre un seul maximum soit en Décembre ou en Janvier et un seul minimum en Juillet ou Août, ce qui fait que le régime est pluvial.

b. Précipitation moyenne saisonnière (1977-2003)

Dans les deux stations de mesure, l'Adamna et Igrounzar, c'est la saison d'hiver qui reçoit le maximum de précipitation, suivi d'automne et du printemps. L'hiver reçoit 173 mm pour l'Adamna et 152 mm pour l'Igrounzar. On remarque aussi que l'été constitue la saison sèche avec 1.87 mm pour l'Igrounzar et 0.83 mm pour Adamna. La saison estivale ne reçoit pas de pluie notable à part quelques orages localisés et moins importants. L'automne et le printemps reçoivent des hauteurs similaires (figure 10).

Ainsi les précipitations qui ont lieu durant les saisons des pluies sont d'habitudes associées au mouvement de l'air humide au dessus de la mer vers la terre et elles sont réparties sur une région plus vaste que celles des orages d'été.

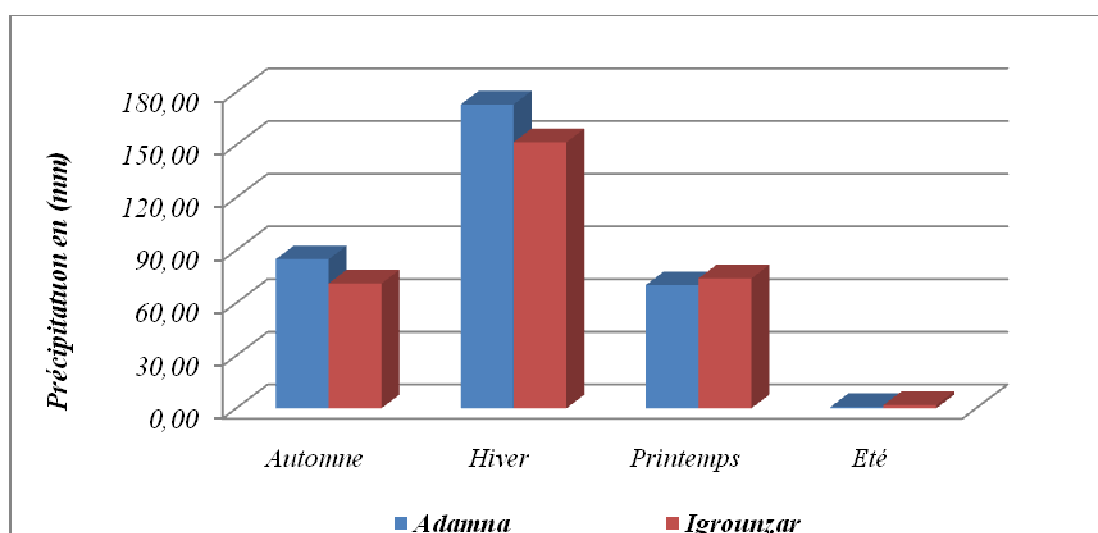


Fig.10 : Précipitation moyenne saisonnière à Adamna et Igrounzar (1977-2003)

c. Précipitations moyennes annuelles

La quantité d'eau reçue par le bassin versant est un élément de base important pour caractériser son climat. Les précipitations moyennes annuelles peuvent être déterminées par trois méthodes principales : la méthode de la moyenne arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen et la méthode d'isohyètes. Pour notre cas nous avons utilisé la méthode arithmétique, puisque nous n'avons que deux stations pluviométriques. Cette méthode consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues au niveau des stations étudiées. Le tableau suivant donne la répartition des précipitations moyennes annuelles des deux stations :

<i>Station</i>	<i>Période d'observation</i>	<i>Précipitation annuelle</i>
<i>Igrounzar</i>	<i>1977-2003</i>	<i>298.02 mm</i>
<i>Adamna</i>	<i>1977-2003</i>	<i>329.07 mm</i>

Les figures 11 et 12 montrent que les précipitations varient d'une année à l'autre autour d'une moyenne interannuelle (298 pour l'Igrounzar et 329 mm pour l'Adamna). Pour la série d'années dépouillée (de 1977-1978 jusqu'à 2002/2003), on trouve des années pluvieuses dont la hauteur dépasse largement la moyenne à savoir les années 87-88, 88-89, 95-96 et 96-97, et d'autres de pluviosité très faible, telles: 93-94 et 94-95. Les précipitations montrent donc une irrégularité interannuelle frappante.

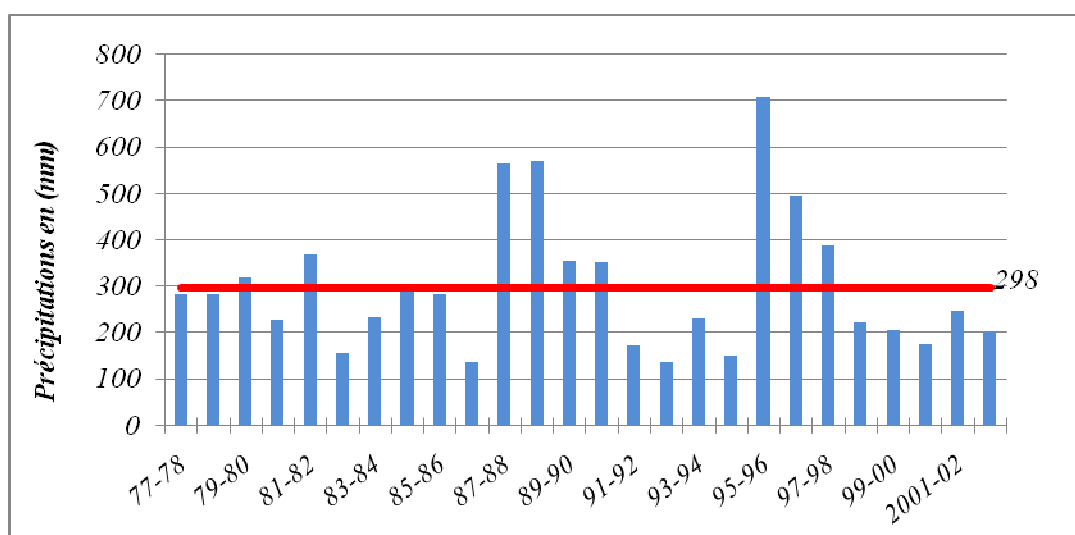


Fig.11 : Précipitations moyennes annuelles d'Igrounzar (1977-2003)

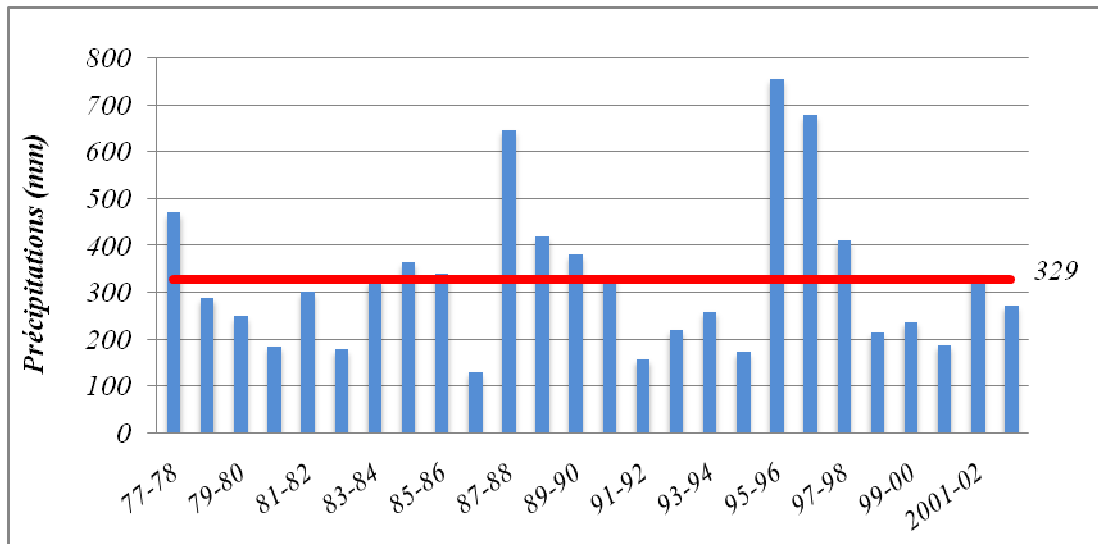


Fig.12 : Précipitation moyenne annuelle de l'Adamna (1977-2003)

On remarque aussi que les précipitations des deux stations sont similaires avec une légère augmentation pour la station d'Adamna car celui-ci est le plus exposé au vent humide venant de l'Océan Atlantique.

2. Régime hydrologique de l'oued Ksob et ses deux affluents.

a. Régime fluvial à Adamna :

Variations mensuelles des débits

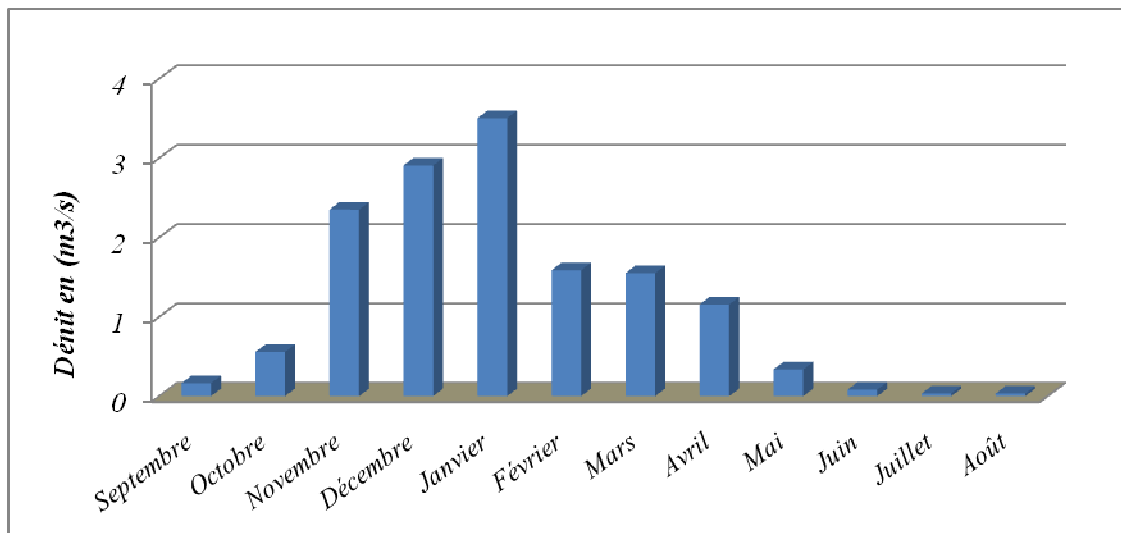


Fig.13 : Débits moyens mensuels inter-annuels à Adamna (de 1970-71 à 2005-06)

La saison des hautes eaux correspond à la période pluvieuse de novembre à avril avec un maximum de 3.5 m³/s en janvier, alors que la période des basses eaux s'étend de mai à octobre avec un minimum de 0.033 m³/s en août (figure 13).

Variations saisonnières des débits

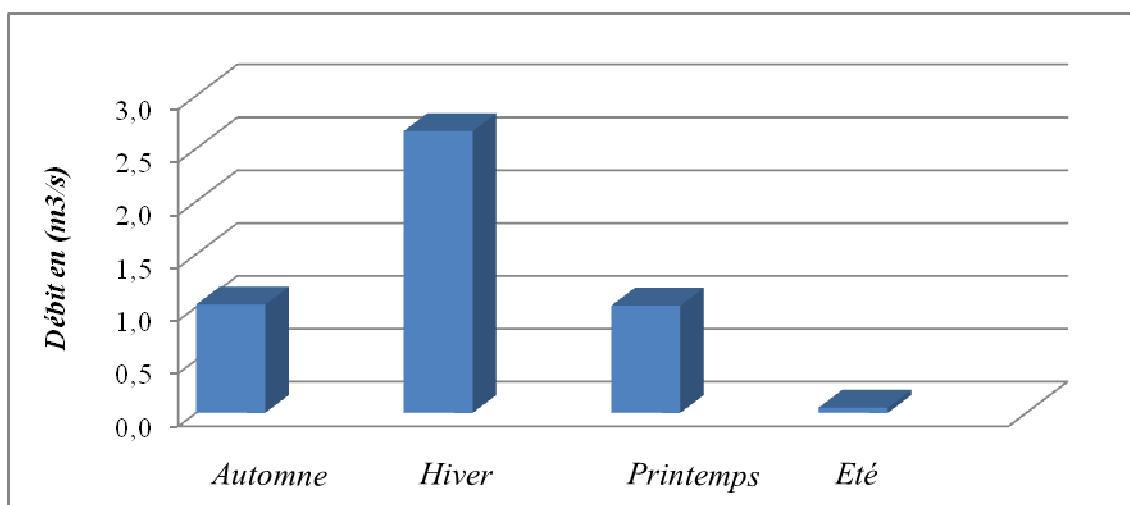


Fig.14 : Débits moyens saisonniers à Adamna (de 1970-71 à 2005-06)

La figure 14 montre que l'écoulement est plus important en hiver où il représente 58 % de l'écoulement annuel. L'été est la saison la plus sèche avec une moyenne de $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ et l'automne et le printemps ont un écoulement qui n'atteint pas la moyenne saisonnière interannuelle ($1.19 \text{ m}^3/\text{s}$).

Variations annuelles des débits

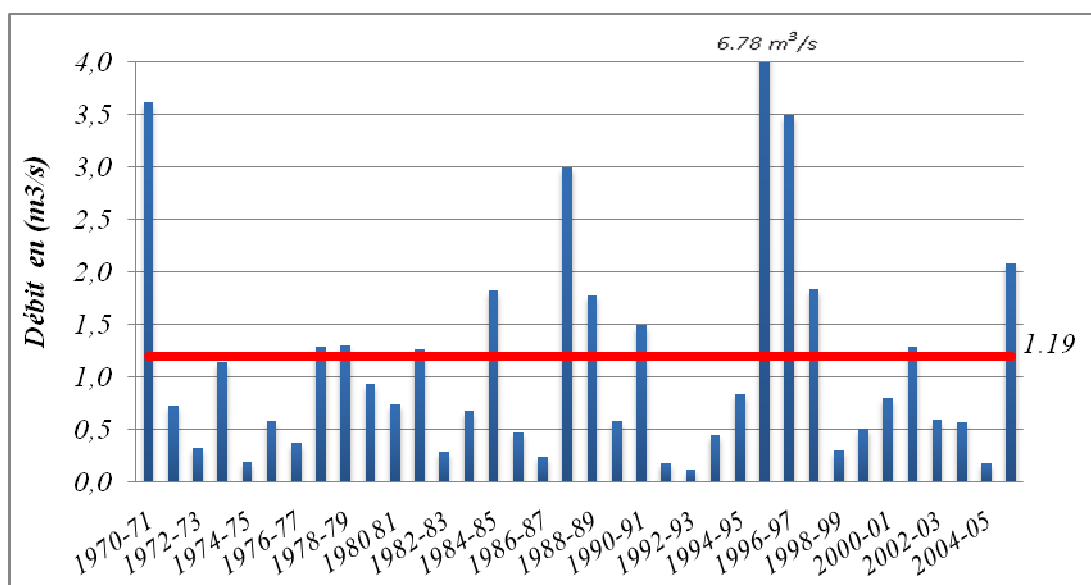


Fig.15 : Débits moyens annuels à Adamna (de 1970-71 à 2005-06)

D'après la figure ci-dessus on remarque que la région du Ksob, où règne un climat semi aride, est caractérisé par un débit d'écoulement de l'oued souvent très faible qui ne dépasse

généralement pas 2 m³/s, à l'exception des années 1970-71, 1987-1988, 1996-97, 2005-06, et surtout l'année de 1995-96 qui a connu le débit moyen le plus élevé de la série d'étude. Il a atteint 6.78 m³/s

b. Régime fluvial à Igrounzar

Variations mensuelles des débits

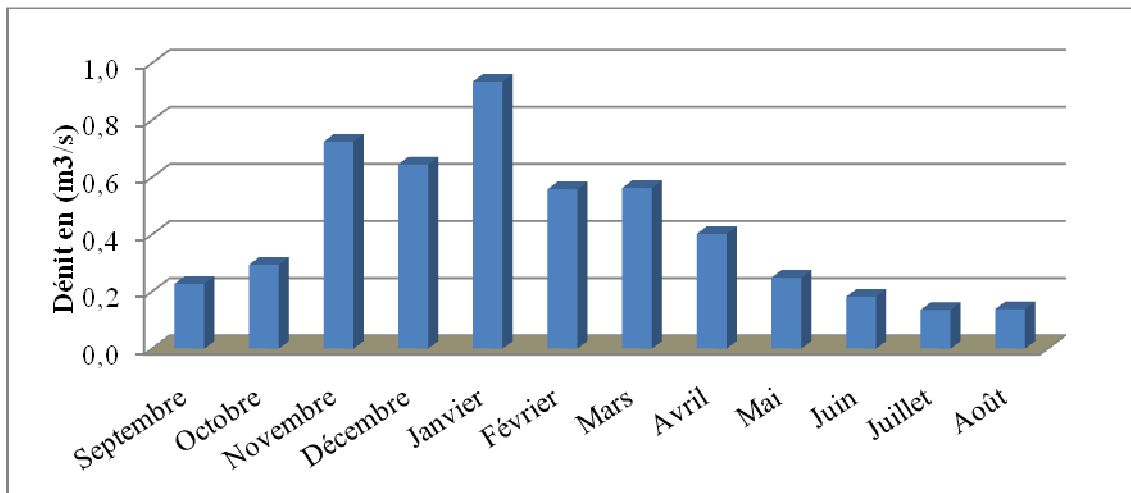


Fig.16 : Débits moyens mensuels à Igrounzar (de 1965-66 à 2005-06)

Comme en aval pour le bassin à Adamna, Il y a ici deux différentes périodes d'écoulement, une saison des hautes eaux qui correspond à une période relativement pluvieuse qui s'étend de novembre à avril et une saison des basses eaux de mai à octobre (figure 16).

Variations saisonnières des débits

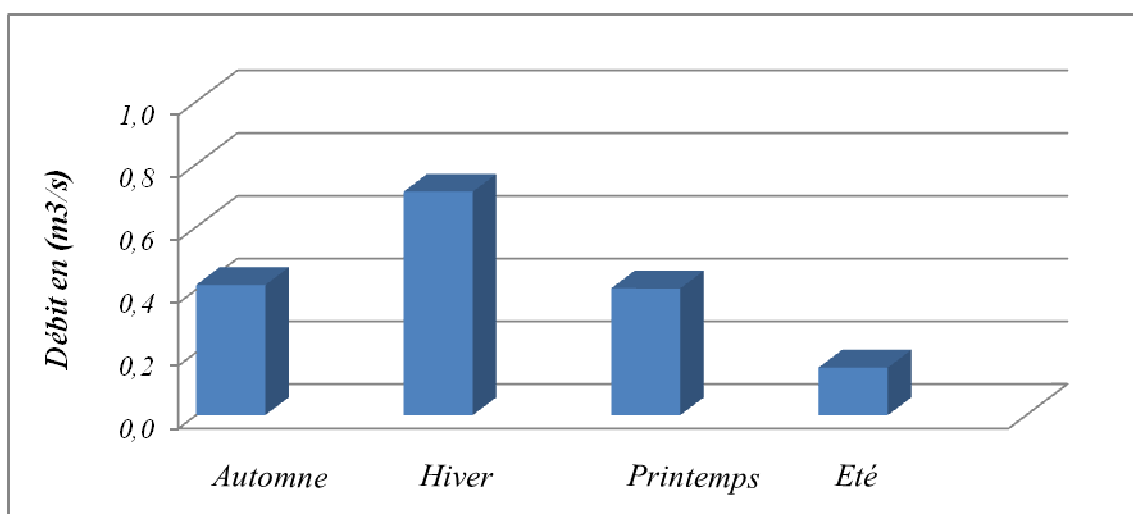


Fig.17 : Débits moyens saisonniers à Igrounzar (de 1965-66 à 2005-06)

Les écoulements hivernaux dépassent les eaux des autres saisons (0.71 m³/s), suivi par l'automne et le printemps avec une moyenne de 0.4 m³/s, alors que les écoulements d'été sont les moins importants de toutes les saisons avec un débit de 0.2 m³/s (figure 17)

Variations annuelles des débits

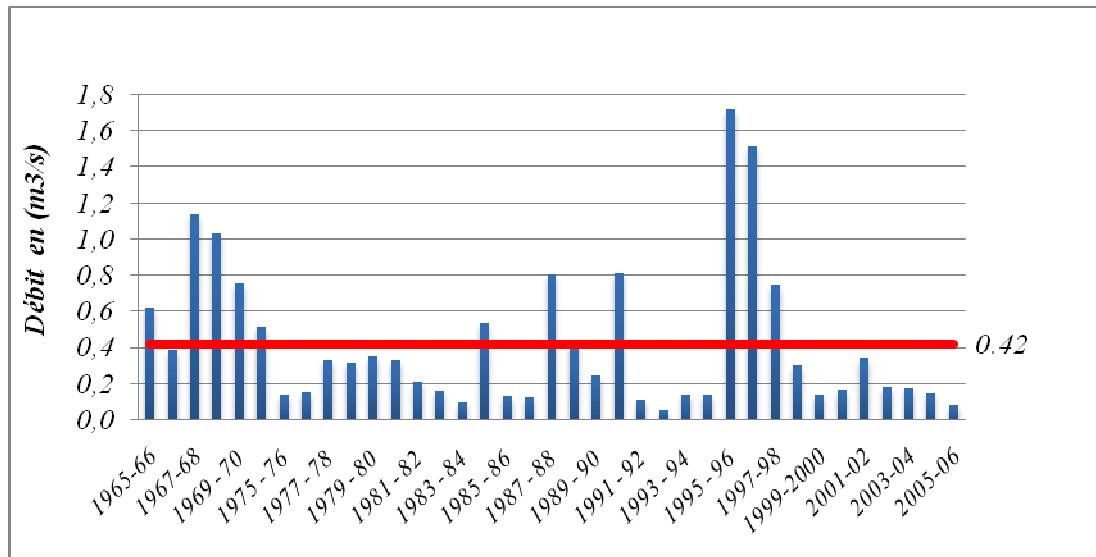


Fig.18 : Débits moyens annuels à Igrounzar (de 1965-66 à 2005-06)

Le débit moyen annuel de la série étudiée est de l'ordre de 0.42 m³/s, alors qu'il a atteint 1.72 m³/s et 1.51 m³/s respectivement pendant les années hydrologiques 1995-96 et 1996-97. Ces deux années ont connu des chutes de pluies très importantes. Le débit le moins important est enregistré lors de l'année 1992-93 où il n'a pas dépassé 0.06 m³/s (figure 18).

c. Régime fluvial à Zelten

Variations mensuelles des débits

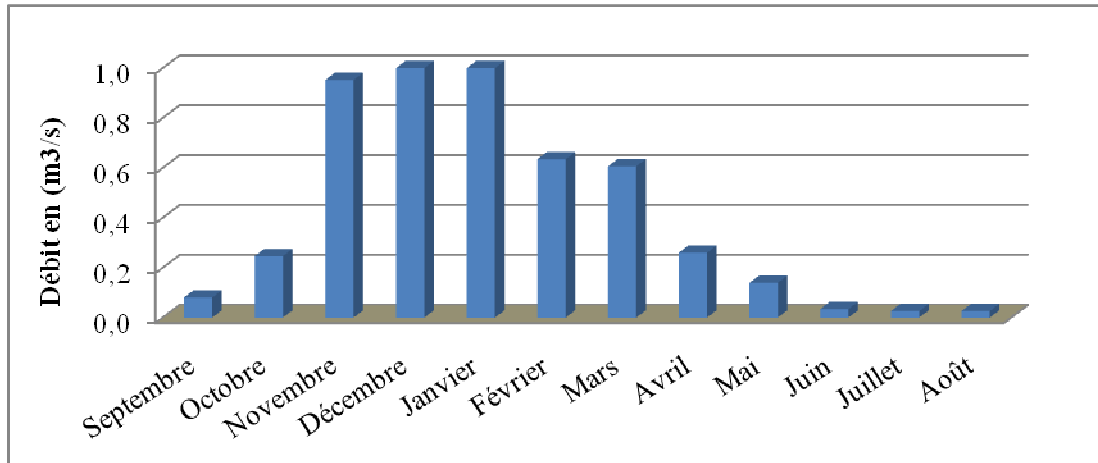


Fig.19 : Débits moyens mensuels à Zelten (de 1975-76 à 2005-06)

Comme pour le sous bassin d'Igrounzar, Il y a deux différentes périodes d'écoulement, une saison des hautes eaux qui correspond à une période relativement pluvieuse qui s'étend de novembre à avril et une saison des basses eaux de mai à octobre (figure 19).

Variations saisonnière des débits

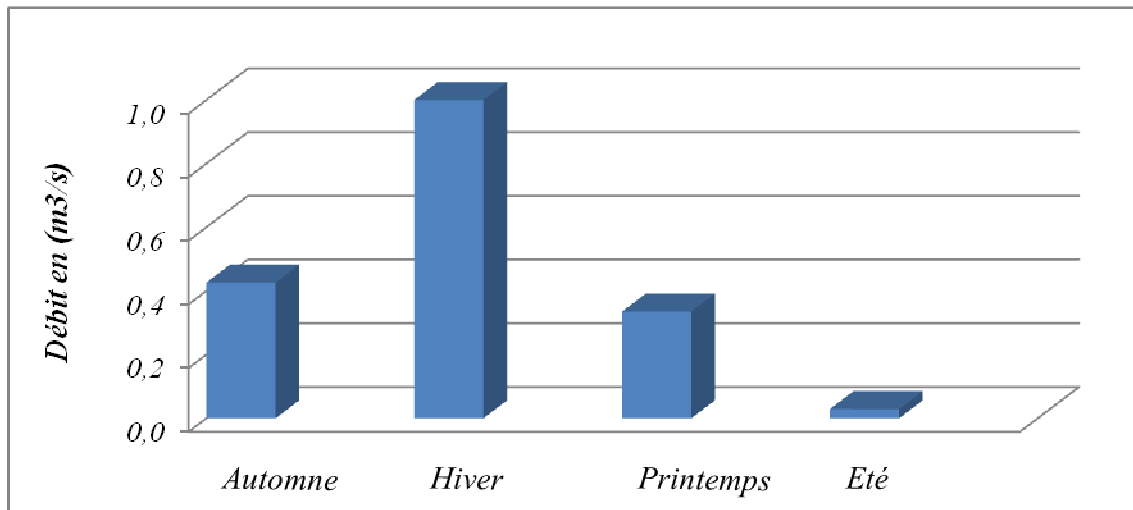


Fig.20 : Débits moyens saisonniers à Zelten (de 1975-76 à 2005-06)

Le débit d'Hiver sont ici aussi les plus importants ($1.08 \text{ m}^3/\text{s}$), suivis par ceux de l'automne et du printemps avec des moyens respectives de $0.42 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$. Les écoulements d'été sont les moins importants avec un débit qui ne dépasse pas $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 20).

Variations annuelles des débits

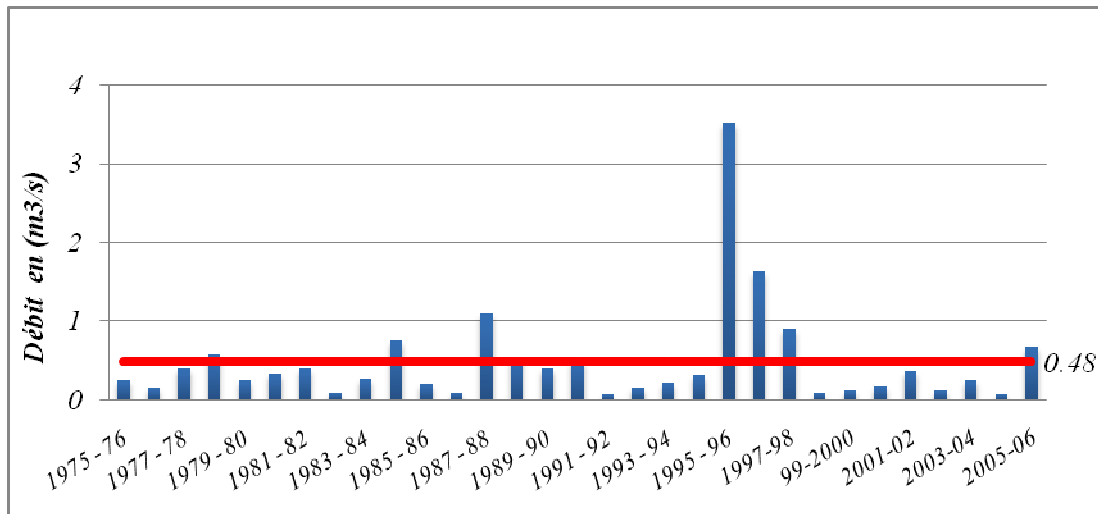


Fig.21 : Débits moyens annuels à Zelten (de 1975-76 à 2005-06)

Le débit moyen interannuel est de l'ordre de $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$. Le maximum a été affecté en 1995-96 avec une moyenne de $3.53 \text{ m}^3/\text{s}$, et le minimum n'a pas dépassé $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1991-92 ce qui montre une irrégularité remarquable.

d. Variations comparative des débits des trois stations

Variations comparatives des débits mensuels :

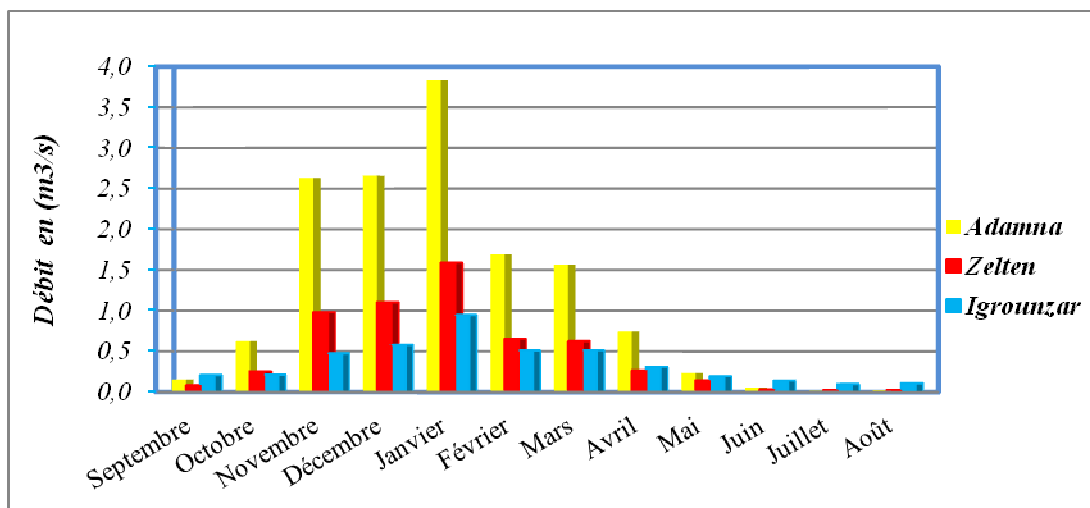


Fig.22 : Variation comparative des débits mensuels des trois stations (de 1975-76 à 2005-06).

En comparant les débits moyens mensuels des trois stations, on voit clairement que le débit d'écoulement durant la saison des hautes eaux est très élevé à Adamna (Janvier ; $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$), modéré à Zelten (Janvier ; $1.59 \text{ m}^3/\text{s}$), et assez faible à Igrounzar (Janvier ; $0.95 \text{ m}^3/\text{s}$).

Pour la saison des basses eaux, elle connaît aux mois les plus secs un débit très faible avec un minimum de $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$ en Juillet à Adamna, de $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$ en Juillet et Août à Zelten, et de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ en Juillet Igrounzar.

Variations comparatives des débits saisonniers :

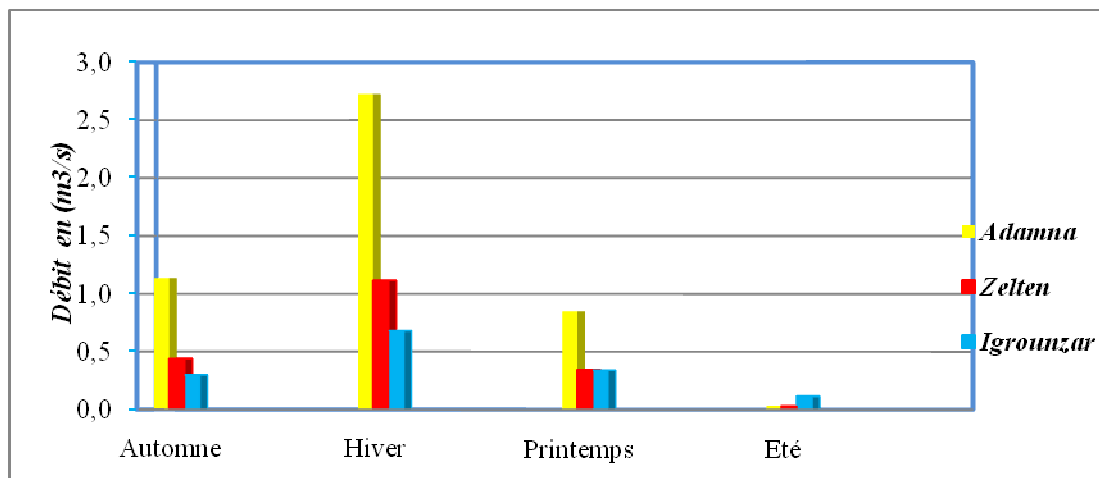


Fig.23 : Variation comparative des débits saisonniers des trois stations (de 1965-66 à 2005-06)

Cette variation comparative (fig.23) montre que l'hiver connaît toujours un débit important, alors que celui-ci est plus faible en automne et en printemps. Le minimum a toujours été enregistré en été.

Variations comparatives des débits annuels :

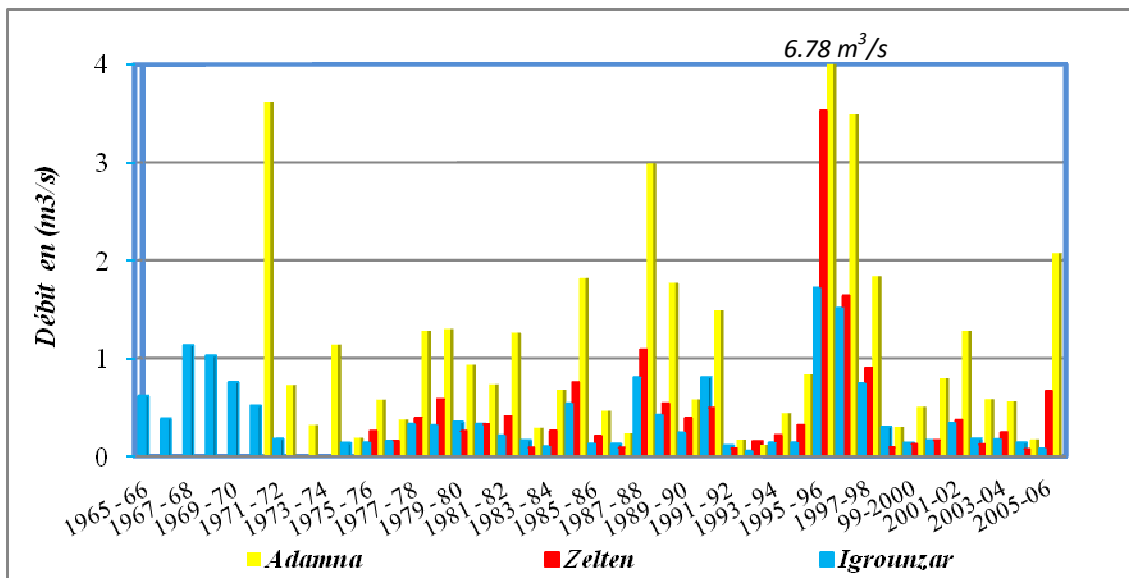


Fig.24 : Variation comparative des débits annuels des trois stations (de 1965-66 à 2005-06)

D'après la figure ci-dessus on remarque une relation entre les débits dans les trois stations, Les années de forts débits sont les même partout, et même pour les plus faibles débits. L'année 1995-96 reste une année exceptionnelle avec un débit moyen annuel de 6.78 m³/s à Adamna.

3. *Corrélation entre les pluies et les débits*

Pour la mise en évidence de la part des pluies et des débits afin de mieux comprendre la réponse hydrologique des bassins. Nous allons effectuer des corrélations à des pas de temps mensuel et annuel. Sur les graphiques, les débits mensuels et les hauteurs de pluies moyennes mensuels forment un nuage de point incliné. Les droites de régression seront de la forme $Y = aX + b$. Un coefficient de corrélation est affecté à chaque droite, il montre la relation entre les deux paramètres étudiés.

Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels

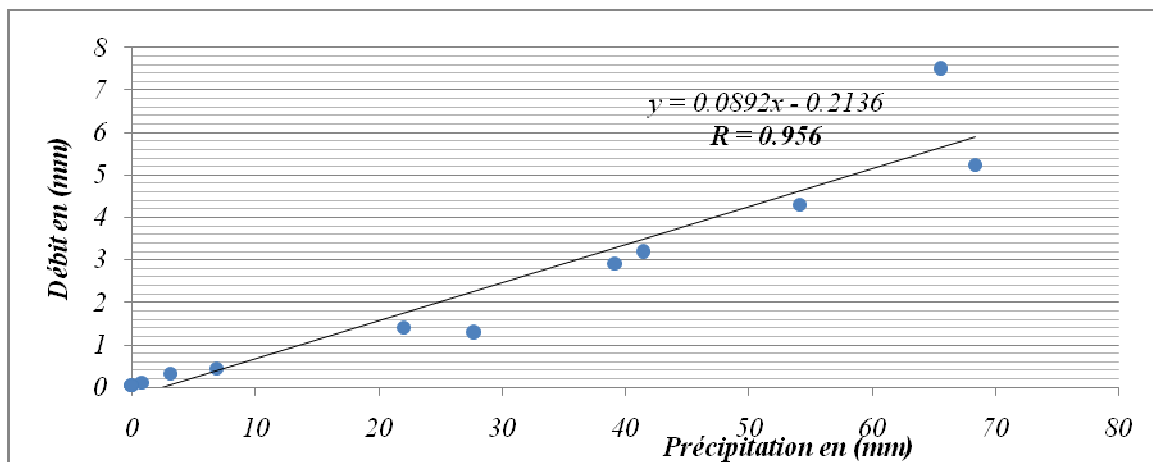


Fig.25 : Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels d'Adamna
(de 1977-78 à 2002-03)

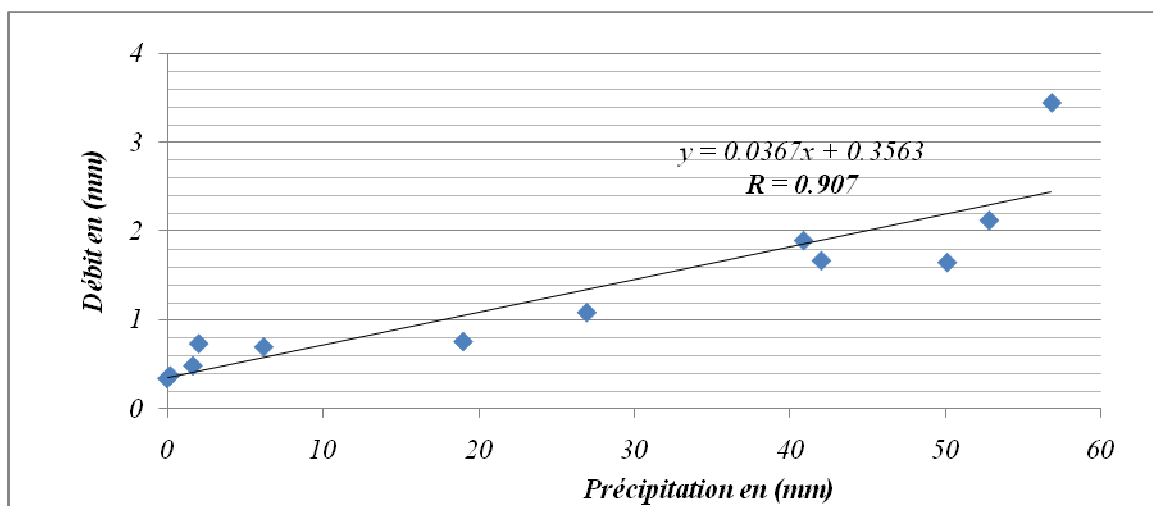


Fig.26 : Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels d'Igrounzar
(de 1977-78 à 2002-03)

La corrélation pluie-débit à l'échelle des moyennes mensuelles est très bonne puisque son coefficient R est de l'ordre de 0.956 pour Adamna et de 0.907 pour Igrounzar. Les précipitations sont étroitement liées aux débits. Ceci montre que ce sont les pluies qui conditionnent l'écoulement et non pas la neige comme pour les bassins pluvio-nivaux. Ici le régime est totalement pluvial.

D'autre part la bonne corrélation témoigne de la bonne qualité des données de pluies et de débit fournies par l'ABHT.

Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels

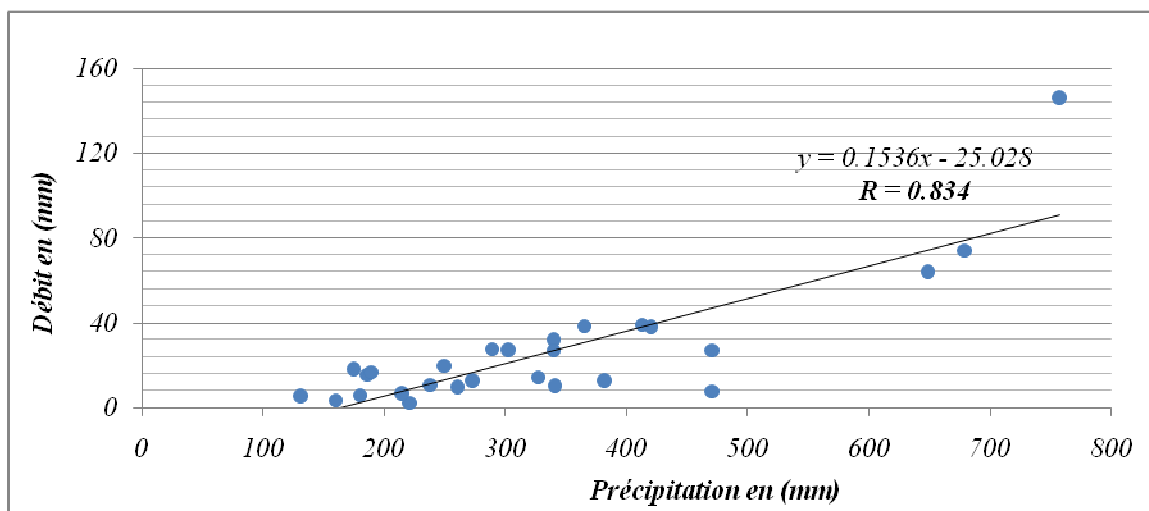


Fig.27 : Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels d'Adamna
(de 1977-78 à 2002-03)

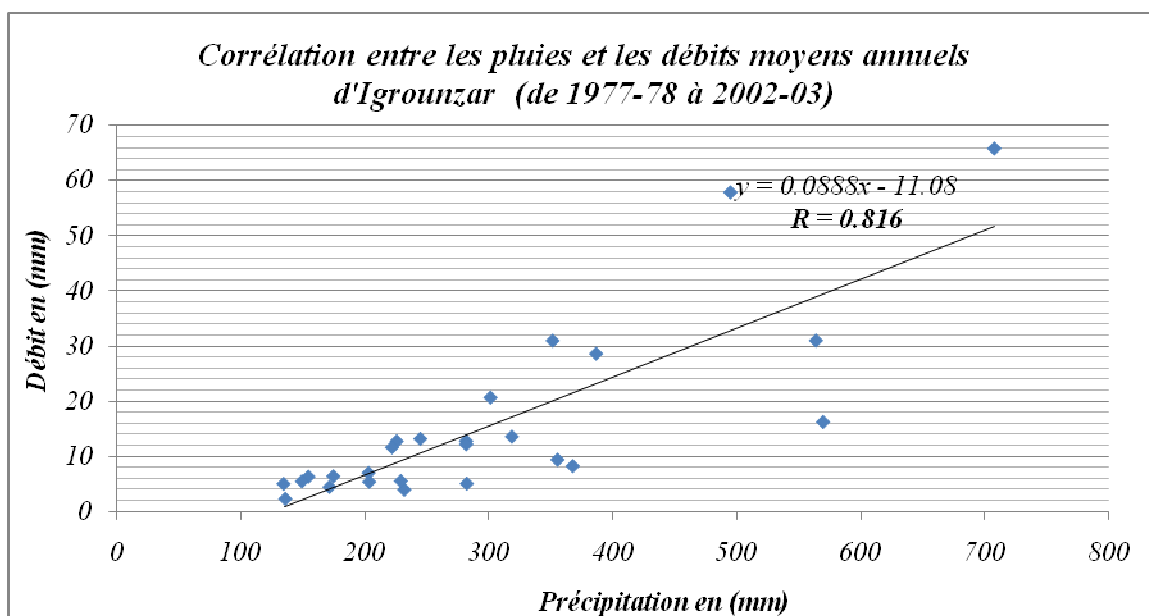


Fig.28 : Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels d'Igrounzar
(de 1977-78 à 2002-03)

Les figures 27 et 28 montrent le lien existant entre les précipitations et les débits annuels à la station d'Adamna et d'Igrounzar. On remarque des coefficients de corrélations de l'ordre de

0.834 pour Adamna et de 0.816 pour Igrounzar. Ce sont des coefficients un peu plus faibles que pour les valeurs moyennes mensuelles mais la corrélation reste toujours assez bonne.

Les précipitations et les débits sont étroitement liés et l'écoulement proviendrait donc quasiment de la pluie. Cependant la faiblesse des coefficients de corrélation peut s'expliquer par le fait que la lithologie du bassin (surtout à Igrounzar) provoque l'infiltration d'une partie des eaux de précipitation ce qui est responsable de la réduction du débit annuel d'écoulements et par conséquent le coefficient de corrélation diminue.

Les figures de corrélation montrent, que les débits augmentent quand les précipitations augmentent, et que tous les couples de points P-Q forment un nuage autour de la droite de régression, hormis un point qui émerge du lot et qui correspond à la fameuse crue du 22/01/1996.

Variations hydropluviométrique mensuelles sur l'ensemble du bassin

Le régime pluviométrique est caractérisé par la succession de deux périodes : sèche et humide. La première s'étend de mai à septembre, et la seconde du mois d'octobre au mois d'avril au cours de laquelle a lieu plus de 90% des précipitations. La moyenne annuelle des précipitations est d'environ 320 mm/an.

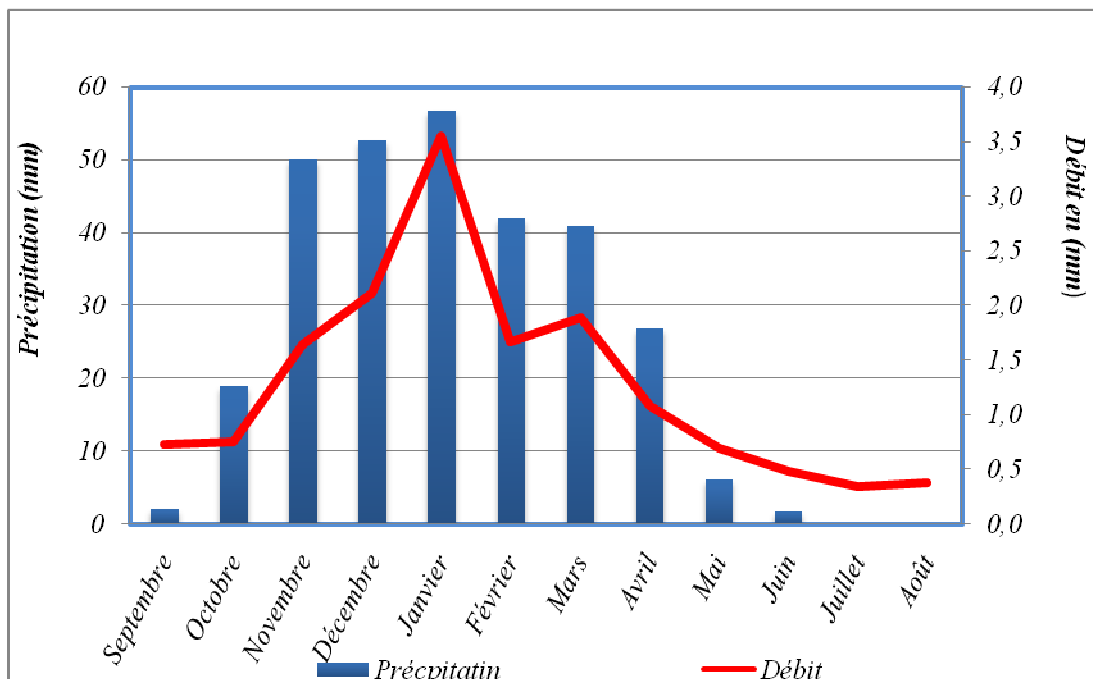


Fig.29 : Relation pluie- débit à Igrounzar (de 1977-78 à 2002-03)

A Igrounzar, On remarque que la courbe des débits est complètement calquée sur celle des pluies et il n'y a aucun déphasage entre les deux courbes : Le maximum pluviométrique et le maximum hydrologique sont en Janvier. Les précipitations d'un mois s'écoulent pendant le même mois, ce qui confirme que les précipitations et les débits sont étroitement liés et l'écoulement proviendrait donc quasiment de la pluie.

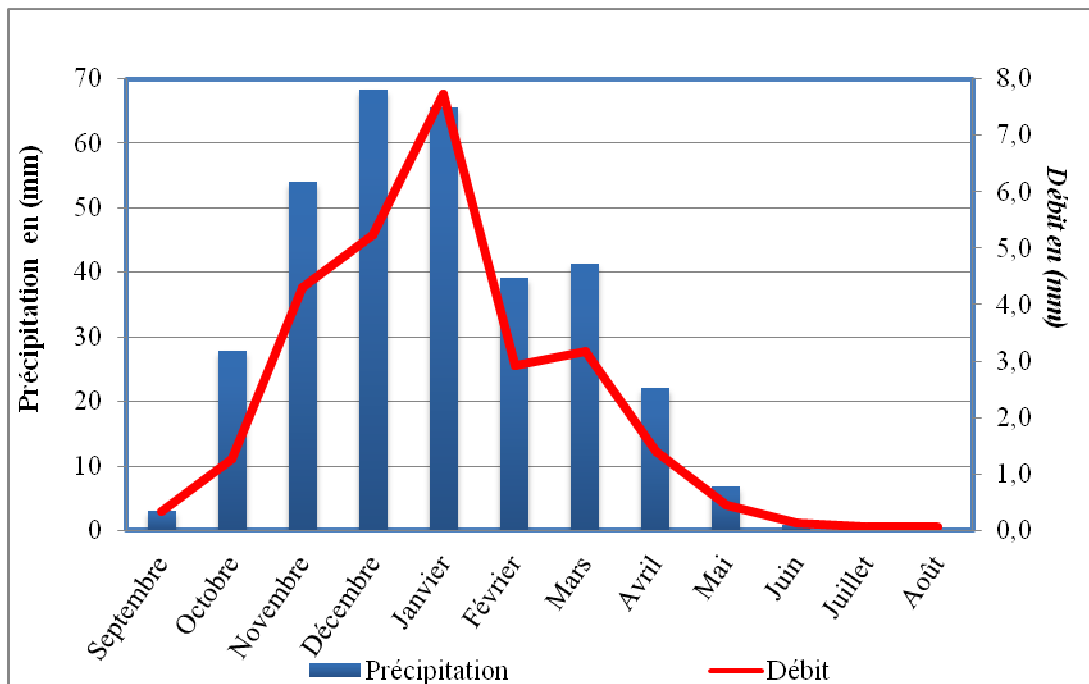


Fig.30 : Relation pluie- débit à Adamna (de 1977-78 à 2002-03)

A Adamna, la courbe des débits suit l'évolution de celle des pluies avec un décalage ou un temps de réponse du bassin versant d'un mois: Le maximum pluviométrique de décembre ne se transforme en maximum hydrologique qu'au mois de Janvier ou les précipitations sont couplées aux débits de base restitués par la nappe phréatique.

En général, le régime moyen de l'écoulement mensuel de l'oued Ksob montre une distribution unimodale centrée sur le mois de janvier, avec un seul pic et un seul creux pour les deux stations, Igrounzar et Adamna. Il s'agit d'un régime pluvial océanique.

III- Etude dynamique des crues et analyse des hydrogrammes

Dans cette partie nous allons comparer les épisodes de crues aux trois stations étudiées sur une période de 1970-71 à 2004-2005 pour l'Adamna, de 1975-76 à 2004-2005 pour Zelten et de 1975-76 à 2004-2005 pour Igrounzar avec une lacune de quatre ans (1971-72 à 1974-75). Les débits maximums mesurés sont reportés avec la date de l'événement dans le tableau suivant :

Crues	Igrounzar	Zelten	Adamna	Crues	Igrounzar	Zelten	Adamna
03/11/1965	22h			02/12/1987		7h	5h
16/04/1967	23h			09/11/1988	5h30	1h	4h30
18/11/1967	16h			13/11/1989		18h	
22/02/1969	14h			26/11/1989			9h
09/02/1970	19h			26/12/1989	13h		
31/12/1970	4h		10h	06/03/1991		7h30	11h
29/02/1972			12h30	18/02/1991	11h30		
25/09/1972			18h10	10/10/1991		0h30	21h
23/12/1973			0h30	10/12/1991	19h30		
15/01/1975			3h	04/05/1993	1h	0h	3h
04/02/1976	13h	16h	11h	03/11/1993		23h	3h
19/12/1976	22h	19h	23h	23/11/1993	13h30		
17/01/1977	19h	18h	20h	14/03/1995	20h30		
27/01/1979	11h	22h	1h	14/03/1995		1h30	
17/10/1979	17h		20h	16/04/1995			20h30
22/02/1980		20h		21/01/1996	17h	17h	18h
08/11/1980	17h	16h	19h	21/12/1996	16h30	16h	18h30
12/01/1982			6h	02/02/1998	2h	21h	1h
26/04/1982	16h			13/03/1999		14h30	17h
08/05/1982		22h		26/08/1999	0h30	14h30	
07/11/1982	9h	7h	8h	13/10/1999	1h30	18h30	5h30
15/11/1983	6h	5h	4h	26/12/2000	20h	8h30	10h30
07/01/1985	5h	5h	7h	24/12/2001	19h	16h30	20h30
28/02/1986	5h	6h	6h	24/11/2002	7h30	4h	6h30
11/02/1987		13h30	15h	24/11/2003		11h	18h30
17/03/1987	19h30			27/03/2004	10h30		
28/09/1987	18h			29/11/2005	10:00	11:30	11:30

Tab. IV : Dates et heures des crues aux stations du bassin du Ksob.

1. Types d'hydrogrammes des crues

- **La crue du 29/11/2005 dans les trois stations (ABHT).**

La crue du 29/11/05 est une crue particulière et exceptionnelle avec un débit de pointe qui a atteint 2258 m³/s à Adamna, 2334 m³/s et 1900 m³/s respectivement pour Igrounzar et Zelten.

La crue a duré moins de 16 heures, avec un temps de montée court qui varie entre 3 heures pour les stations d'Igrounzar et Zelten et 5.5 heures pour la station d'Adamna.

Le temps de base était aussi très court : 6.5 heures pour Igrounzar et 7.5 pour Zelten. En ce qui concerne Adamna, l'évacuation d'un volume d'eau d'environ 36 millions des mètres cube n'a pas duré plus de 11 heures et demi.

Ce genre de crue de courte durée et de très fort débit de pointe constitue un risque majeur pour les dégâts occasionnés.

Débit de pointe en m ³ /s	1900
Débit de base avant en m ³ /s	20.36
Débit moyen en m ³ /s	917.71
Coefficient de pointe	2.07
Temps de base en heures	7.5
Temps de montée en heures	3
Volume de crue en 10 ⁶ m ³	24.778

Débit de pointe en m ³ /s	2234
Débit de base avant en m ³ /s	156.00
Débit moyen en m ³ /s	1075.19
Coefficient de pointe	2.08
Temps de base en heures	6.5
Temps de montée en heures	3
Volume de crue en 10 ⁶ m ³	25.159

Débit de pointe en m ³ /s	2558
Débit de base avant en m ³ /s	12
Débit moyen en m ³ /s	862.95
Coefficient de pointe	2.95
Temps de base en heures	11.5
Temps de montée en heures	5.5
Volume de crue en 10 ⁶ m ³	35.726

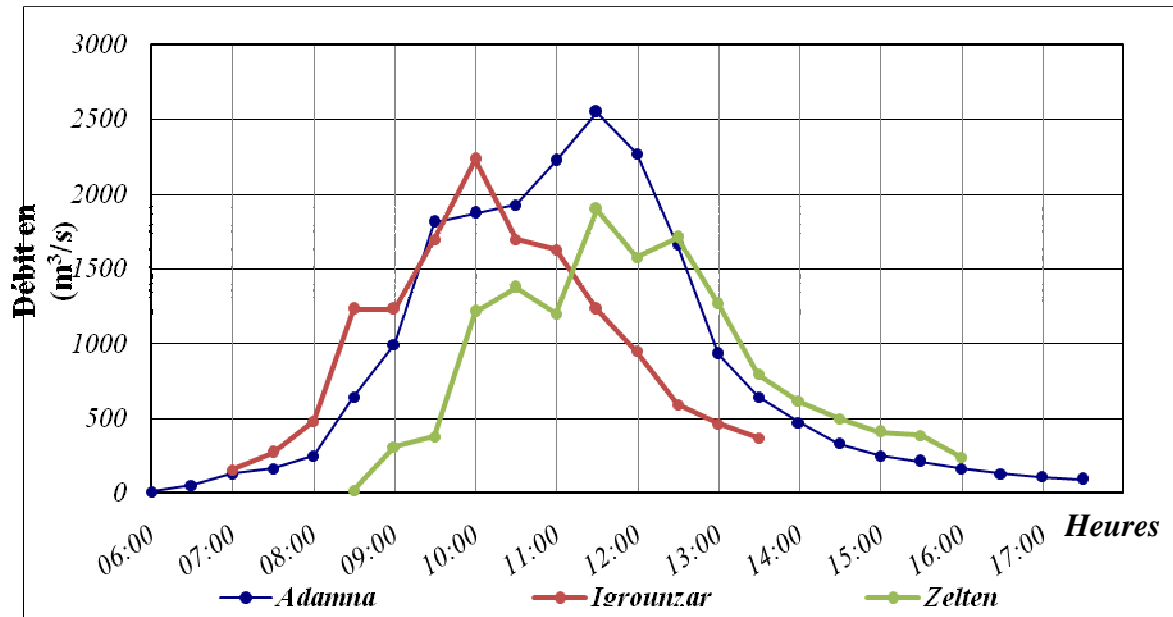


Fig. 31 : Hydrogrammes de la crue du 29/11/2005 aux stations de Zelten, d'Igrounzar et d'Adamna.

Les crues les plus importantes qui ont affectées le sous bassin d'Adamna :

- **La crue du 07/01/1985**

Cette crue est la plus importante des années quatre vingt, Elle est caractérisée par un débit de pointe de 1335 m³/s et une montée des eaux qui s'est faite en 7 heures et une décrue en 10 heures.

Son hydrogramme est aigu et pointu caractérisant les crues brèves et soudaines habituelles en milieu montagnard semi aride.

Tab. VI : Caractéristiques de la crue du 07/01/1985 à Adamna	
Débit de pointe en m ³ /s	1335
Débit de base avant en m ³ /s	3.65
Débit moyen en m ³ /s	222.40
Coefficient de pointe	6.00
Temps de base en heures	10
Temps de montée en heures	7
Volume de crue en 10 ⁶ m ³	24.823

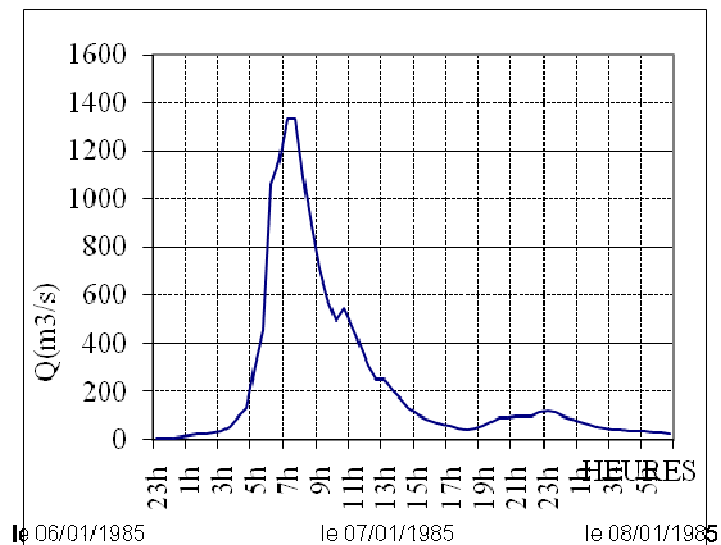


Fig.32 : Hydrogrammes de la crue du 07/01/2005 à Adamna.

La crue du 22/01/1996

La figure et le tableau montrent que les deux montées ont duré 5 heures chacune et la décrue à peine 8 heures. Le débit à Adamna, est passé de 6 m³/s à 1602 m³/s..

Débit de pointe en m ³ /s	1602
Débit de base avant en m ³ /s	6.00
Débit moyen en m ³ /s	162.86
Coefficient de pointe	9.84
Temps de base en heures	8
Temps de montée en heures	5
Volume de crue en 10 ⁶ m ³	61.268

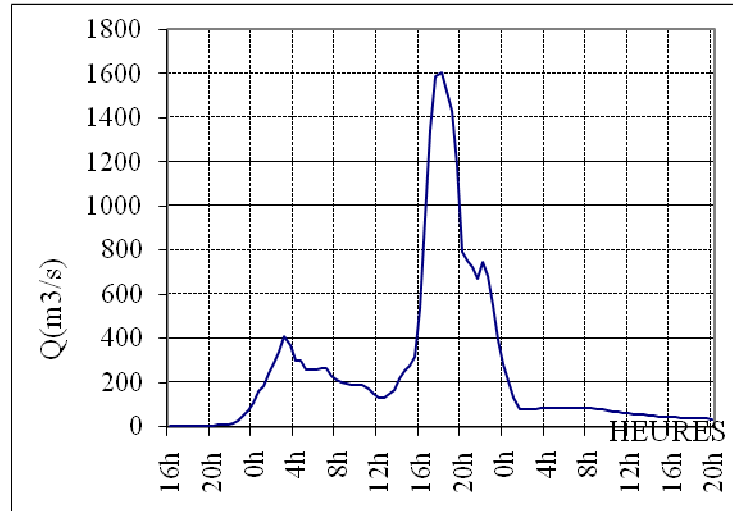


Fig.33 : Hydrogrammes de la crue du 22/01/1996 à Adamna.

En général, les crues d'Adamna ont souvent un hydrogramme simple monogénique. Ces crues sont généralement de courte durée et les hydrogrammes obtenus sont de formes très aiguës, ce qui témoigne de la brièveté de l'événement de crue et le danger potentiel qu'il présente pour les infrastructures ainsi que pour les gens et leurs biens.

Les crues les plus importantes qui ont affectées le sous bassin d'Igrounzar

La crue du 07/01/1985

Cette crue est la plus importante après celle de 29/12/2005 dans la série de données de 1965-66 jusqu'à 2005-06, elle est caractérisée par un temps de montée très court de 2 heures, et un temps de base de 12 heures. Le débit de pointe était de 673 m³/s.

Débit de pointe en m ³ /s	673
Débit de base avant en m ³ /s	1.65
Débit moyen en m ³ /s	166.59
Coefficient de pointe	4.04
Temps de base en heures	12
Temps de montée en heures	2
Volume de crue en 10 ⁶ m ³	10.196

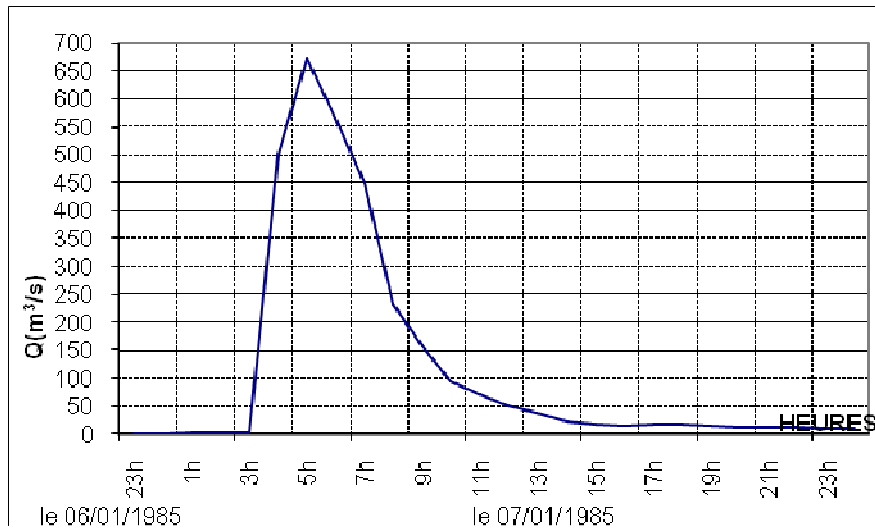


Fig.34 : Hydrogramme de la crue du 07/01/1985 à Igrounzar

A Igrounzar les débits de pointe, à l'exception de la crue de 29/11/2005, ne dépassent jamais 700 m³/s. Cela est expliqué par la perméabilité et la fissuration des formations calcaires (surtout du Cénomano-turonien), qui couvrent plus de 80% du sous bassin d'Igrounzar. Ces formations amortissent par infiltrations la puissance potentielle des crues.

Les crues les importantes qui ont affectées le sous bassin de Zelten

La crue du 07/01/1985

Comme pour Igrounzar, La crue du 07/01/1985 est caractérisée par un débit de point de 660 m³/s et une montée des eaux qui s'est faite en 2 heures suivie d'une décrue en 8 heures. Son hydrogramme est monogénique avec un seul pic aigu qui caractérise les crues brutales. Cette crue est parmi les crues les plus importantes qui ont affecté les trois stations hydrométriques du bassin du Ksob.

Tab. IX : Caractéristiques de la crue du 07/01/1985 à Adamna	
Débit de pointe en m ³ /s	660.000
Débit de base avant en m ³ /s	2.63
Débit moyen en m ³ /s	181.40
Coefficient de pointe	3.64
Temps de base en heures	8
Temps de montée en heures	2
Volume de crue en 10 ⁶ m ³	10.449

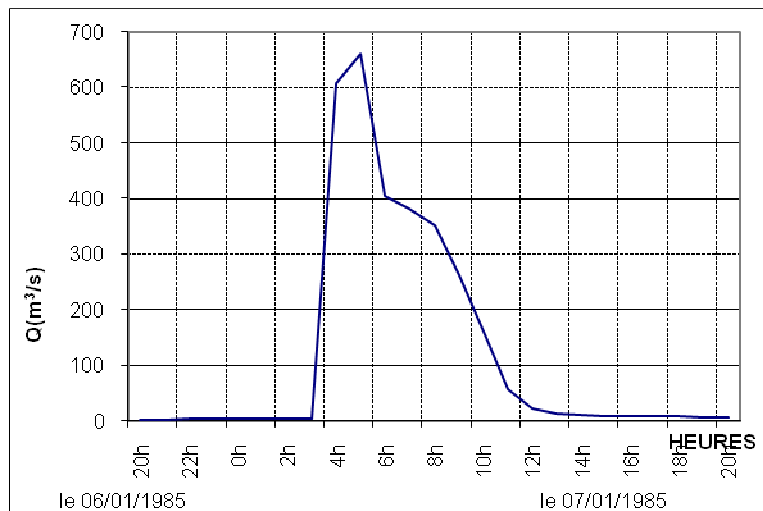


Fig.35 : Hydrogrammes de la crue du 07/01/1985 à Zelten.

La crue du 22/01/1996

Cette crue est une crue polygénique avec plusieurs pics. Elle a enregistré un débit maximum de 670 m³/s, et des temps de montée et de base relativement longs. Ils ont été respectivement de 23 heures, et 49 heures.

<i>Tab. X : Caractéristiques de la crue du 22/01/1996 à Adamna</i>	
Débit de pointe en m ³ /s	670
Débit de base avant en m ³ /s	0.60
Débit moyen en m ³ /s	66.18
Coefficient de pointe	10.12
Temps de base en heures	49
Temps de montée en heures	23
Volume de crue en 10 ⁶ m ³	24.896

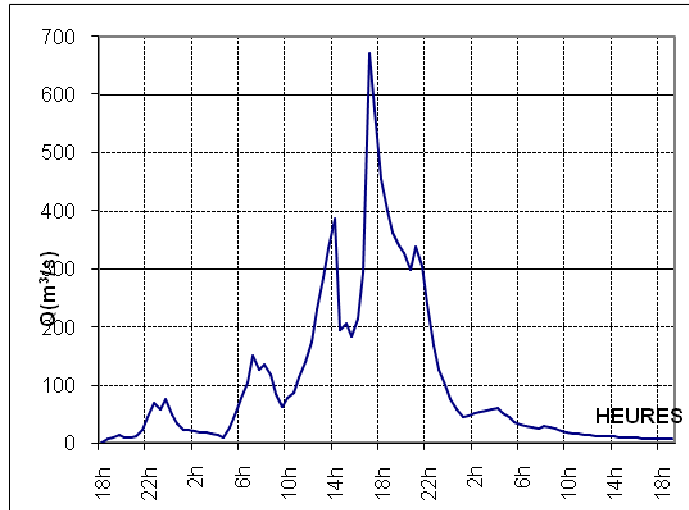


Fig.36 : Hydrogrammes de la crue du 22/01/1996 à Adamna

En conclusion, Le climat et le milieu physique du bassin de Ksob ont offert un environnement propice aux fortes crues : des sols imperméables et très peu couverts par la végétation, une bonne exposition et une pluviométrie caractérisée par des averses intenses par moment.

Ce bassin versant présente donc un risque d'inondation du fait de la conjonction de tous ces facteurs. Heureusement, que pour Igrounzar, les terrains sont assez peu pentés, plus perméables et fissurés.

Les crues du bassin de Ksob sont par ailleurs caractérisées par la soudaineté des événements, des débits de pointes assez élevés et des hydrogrammes aigus et pointues, surtout pour Adamna et Zelten. Ce sont donc des crues violentes et de courte durée, habituelles en milieu montagnard semi aride.

2. Temps de base et temps de montée des crues

Dans ce paragraphe, nous allons essayer d'analyser les durées globales des crues et leurs temps de montée et de base pour chercher une éventuelle typologie des crues du bassin du Ksob

Dans cette optique, nous avons analysé les hydrogrammes de toutes les crues enregistrées par l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift de 1965 à 2005. Elles sont au nombre de 35 pour Adamna, 36 pour Igrounzar et 30 pour Zelten.

Les figures 37 à 42 illustrent respectivement les temps de base et de montée des crues d'Igrounzar puis de Zelten et enfin ceux d'Adamna.

Crues d'Igrounzar

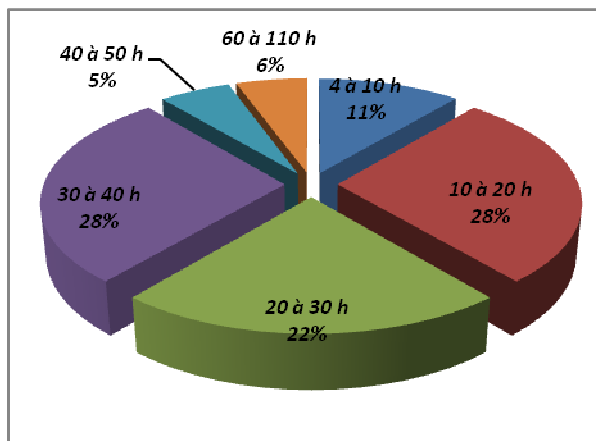


Fig .37 : Répartition des crues d'Igrounzar selon le temps de montée

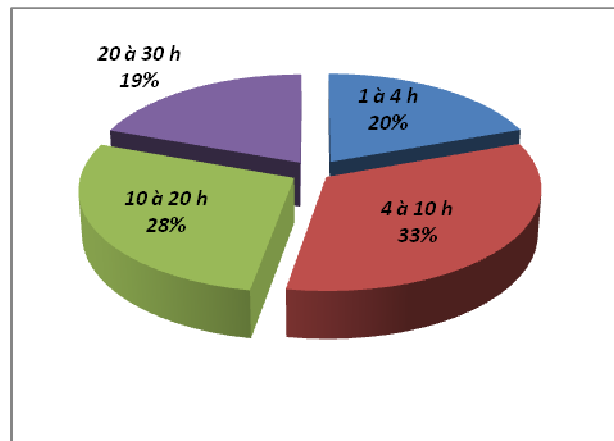


Fig.38 : Répartition des crues d'Igrounzar selon le temps de base

Les temps de montée sont assez courts, ils sont situés pour la plupart entre 4 h et 10 h (33%). D'autres crues (20%) ont même des temps de montée d'une à quatre heures seulement. Tout ceci montre le danger des crues du Ksob à Igrounzar.

Les temps de base les plus fréquents sont ici 10-20h (28%), 30-40h (28%) et 20-30h (22%) (fig. 38).

Ce sont également des courtes durées qui montrent la brièveté des événements de crues. Ici plus de la moitié des crues ont un temps de base inférieur à 30 heures et que toutes ces crues ont des temps de montée assez courts (4 à 10 h; 10 à 20 h et 20 à 30h)

Crues de Zelten

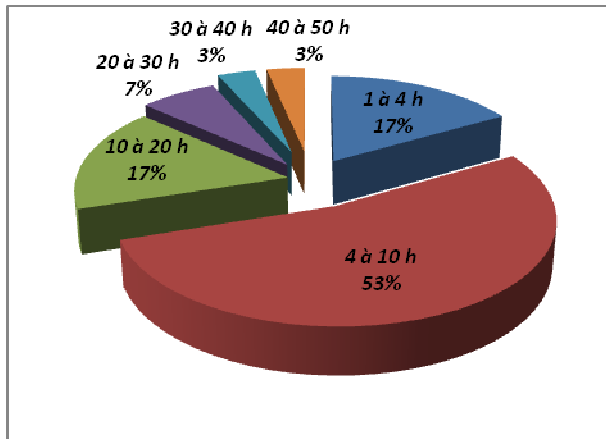


Fig.39 : Répartition des crues de Zelten selon le temps de montée

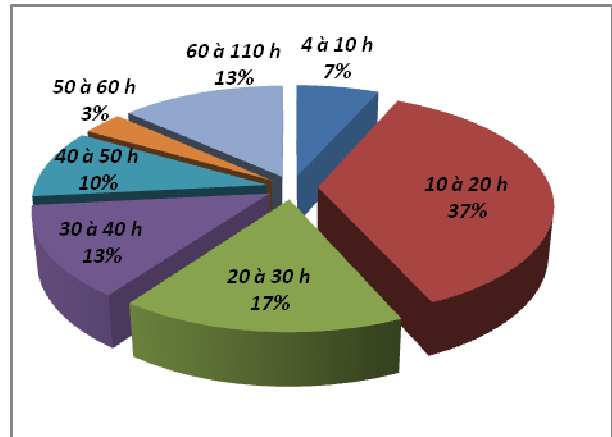


Fig.40 : Répartition des crues de Zelten selon le temps de base

Les temps de montée sont en majorité de une à 10 heures, avec une plus grande fréquence de l'intervalle 4 à 10 heures (53%). La cause réside dans plusieurs facteurs, à savoir la nature peu perméable du sol (notamment en amont de Zelten) et son couvert végétal dégradé, les pentes et le relief ...etc.

Les temps de base sont aussi de courtes durées. Les crues durent mois de vingt quatre heures, et 61% des crues ont un temps de base inférieur à 30 heures.

Crues d'Adamna

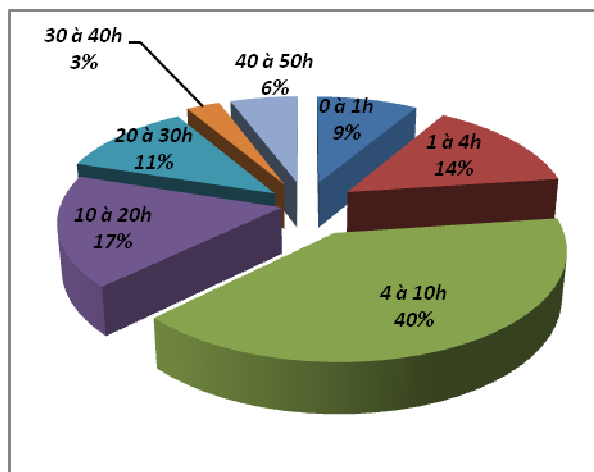


Fig.41 : Répartition des crues d'Adamna selon le temps de montée

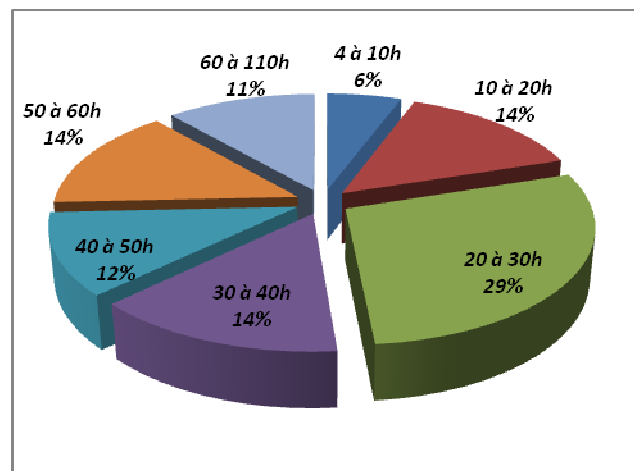


Fig.42 : Répartition des crues d'Adamna selon le temps de base

Les temps de montée sont en majorité de 0 à 10 h, les plus fréquents ici sont 4-10h (40%), 1-4h (14%) et 0-1h (9%) (fig. 41). Cette grande vitesse de réponses des crues peut être

expliquée soit par la grande intensité des précipitations; soit par la lithologie, car elle joue un rôle important dans l'étanchéité du bassin versant surtout pour les bassins fermés à Zelten et à Adamna.

Les temps de base sont très hétérogènes. Les crues peuvent durer de quatre heures à trois jours. Elles peuvent parfois dépasser une centaine d'heures, car la superficie du bassin est assez grande (1483 Km²) et l'évacuation des eaux pluviales peut durer longtemps.

Conclusion

Les facteurs morphologiques, lithologiques et la végétation du bassin s'associent avec la nature des averses pour agir sur les caractéristiques des crues et leurs degrés de gravité: Plus le temps de montée est faible et le temps de base élevé, plus la crue est dangereuse.

Ceci appelle à plus de vigilance et à installer un système d'alerte et d'annonce de crues en amont du bassin.

3. Répartition mensuelle des crues

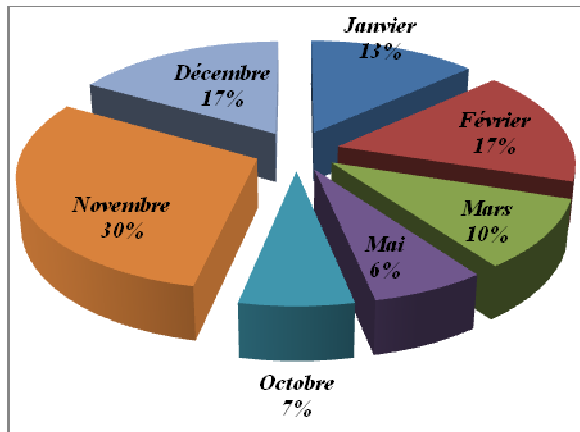


Fig.43 : La distribution mensuelle des crues de Zelten (1975-2006)

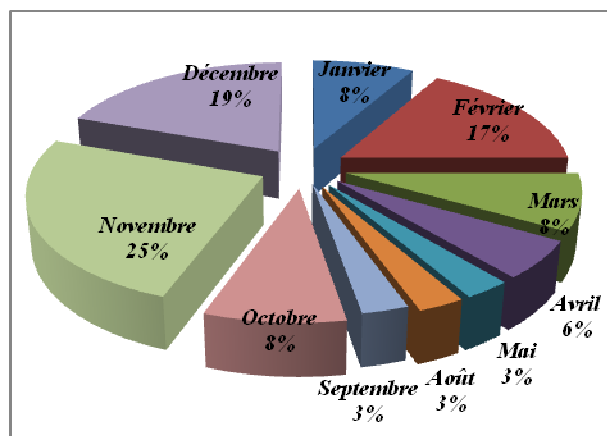


Fig.44 : La distribution mensuelle des crues d'Igrounzar (1965-2006)

Les crues des sous bassin de Zelten et Igrounzar sont plus concentrées en Automne et en Hiver. Novembre est le mois qui connaît le plus de crues puis Décembre et Février. Les pourcentages sont respectivement de 30%,17% et 17% pour Zelten et 25%,19% et 17% pour Igrounzar.

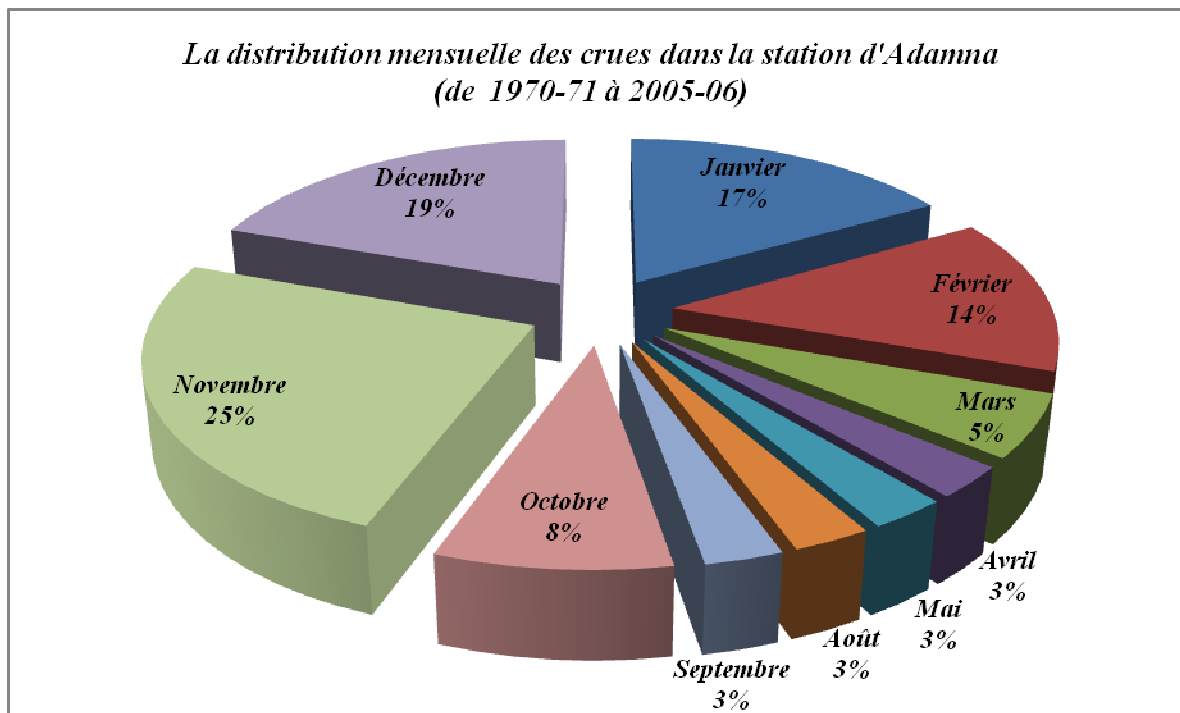


Fig.45 : La distribution mensuelle des crues d'Adamna (1970-2006)

Dans le bassin de Ksob à Adamna, plus de 85% des crues sont enregistrées dans les saisons des hautes eaux (Automne et Hiver); avec plus 50% des crues sont enregistrées en Automne, 35% en Hiver.

Aucune crue n'a jamais été enregistrée aux mois de juin et de juillet. Les phénomènes orageux d'été ne sont pas fréquents en ce milieu océanique.

4. Propagation des crues (vitesses)

Le bassin versant du Ksob dispose en plus de la station d'Adamna de deux autres stations hydrométriques à 23 kilomètres en amont. Il s'agit de la station Zelten et Igrounzar. Les données de crues de ces stations nous permettrons de calculer les vitesses de propagation des crues de l'Oued. Ceci en divisant la distance séparant les deux stations par le temps qui s'écoule entre le moment de la pointe de crue à Zelten ou à Igrounzar et le moment de la pointe de crue à Adamna.

Igrounzar à Adamna :

Crues	Igrounzar	Débit pointe	Adamna	Débit pointe	Temps de propagation	Vitesse Km/h	Vitesse m/s
17/01/1977	19h	65	20h	255	1h	23.0	6.4
08/11/1980	17h	172	19h	613	2h	11.5	3.2
07/01/1985	5h	673	7h	1335	2h	11.5	3.2
09/11/1988	5h30	232	4h30	1050	-	-	-
22/01/1996	17h	263	18h	1602	1h	23.0	6.4
21/12/1996	16h30	175	18h30	930	2h	11.5	3.2
02/02/1998	2h	65	1h	606.5	-	-	-
24/12/2001	19h	255	20h30	1038	1h30	15.3	4.3
29/11/2005	10h	2234	11h30	2558	1h30	15.3	4.3

Tab.X: Détermination des vitesses de propagation dans l'Oued d'Igrounzar de quelques crues important avec leurs débits de pointe en m³/s.

On remarque que les pointes de crues passant par Igrounzar mettent une à deux heures pour atteindre Adamna. Ceci a donné des vitesses de propagation de 11.5 à 23 km par heure, c'est à dire des vitesses de **3.2 à 6.3 mètres par secondes**. Ce sont des vitesses très importantes. Elles résultent des conditions géomorphologiques et pluviométriques précitées et confirment la présence de risques hydrologiques et de dangers auxquels il faut accorder le plus grand intérêt et la plus grande prudence.

Pour illustrer certaines de ces vitesses, ci-après quelques hydrogrammes illustrant les temps de propagation entre les stations d'Igrounzar en amont et Adamna en aval :

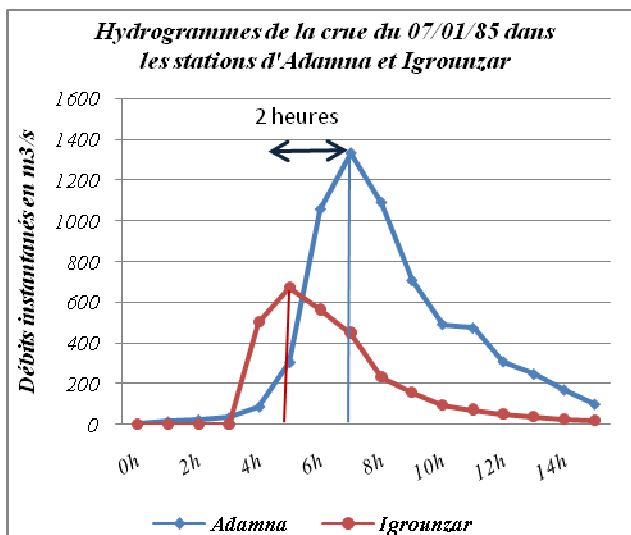


Fig.46 : Hydrogramme de la crue du 07/01/85 aux stations d'Adamna et d'Igrounzar

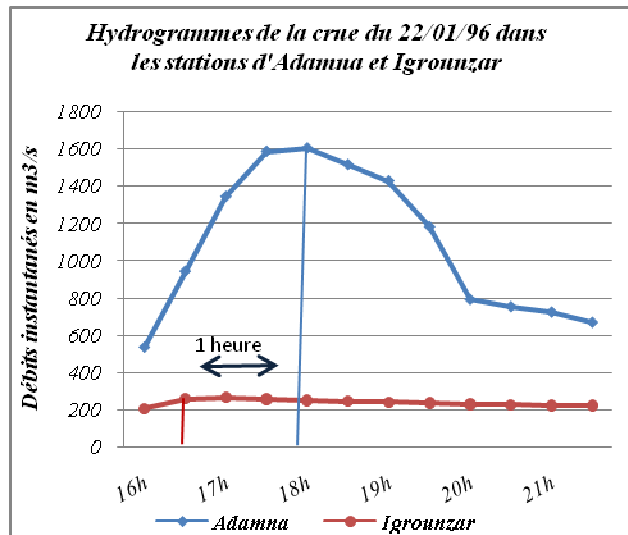


Fig.47 : Hydrogramme de la crue du 22/01/96 aux stations d'Adamna et d'Igrounzar

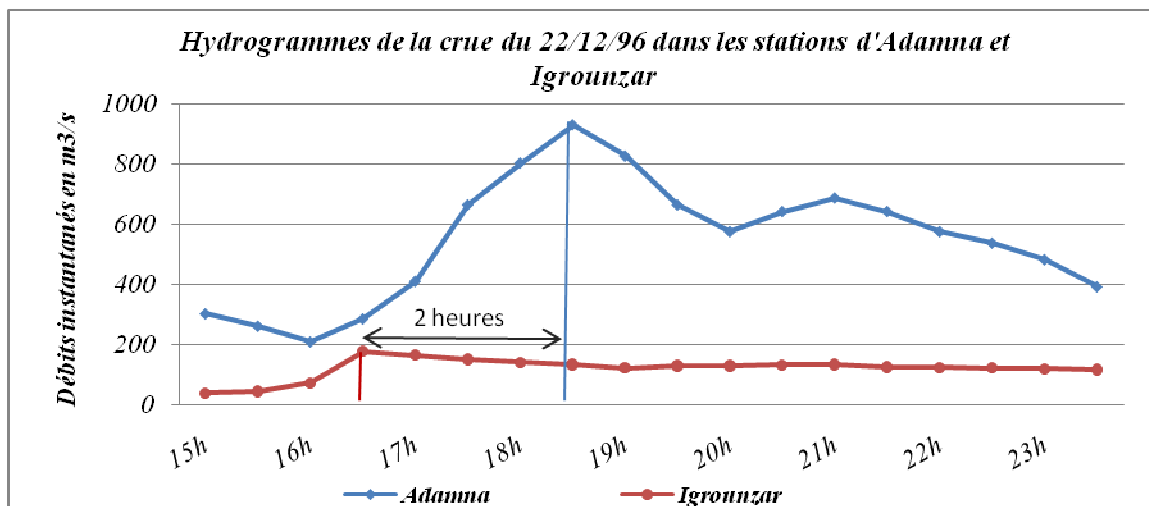


Fig.48 : Hydrogramme de la crue du 22/12/96 aux stations d'Adamna et d'Igrounzar

Signalons que parfois on enregistre des crues à la station d'Adamna avant Igrounzar. Cela peut s'expliquer par le positionnement du sous bassin de l'Adamna, qui est le plus exposé au vent humide venant de l'Océan Atlantique, ce qui provoque une précipitation très importante d'abord en aval puis en amont.

On peut remarquer aussi au que les débits de pointe pour la même crue sont très faibles à Igrounzar par rapport à Adamna. Cela s'explique par l'ajout de l'affluent Zelten et par la lithologie des deux sous bassins : le bassin d'Igrounzar est caractérisé par des terrains plus perméables et plus fissurés que ceux d'Adamna.

Zelten à Adamna :

Crues	Zelten	Débit pointe	Adamna	Débit pointe	Temps de propagation	Vitesse Km/h	Vitesse m/s
27/01/1979	22h	184	1h	217	3	7.67	2,13
08/11/1980	16h	413	19h	613	3	7.67	2,13
15/11/1983	5h	146.3	4h	429	-	-	-
02/12/1987	7h	364	5h	583	-	-	-
09/11/1988	1h	265	4h30	1050	3h30	6.57	1,83
06/03/1991	7h30	210	11h	568	3h30	6.57	1,83
22/01/1996	17h	680	18h	1602	1	23.00	6,39
21/12/1996	16h	457	18h30	930	2h30	9.20	2,56
02/02/1998	21h	331	1h	606.5	4	5.75	1,60
26/12/2000	8.5h	140	10h30	303	2	11.50	3,19
24/12/2001	16h30	600	20h30	1038	4	5.75	1,60
29/11/2005	11h30	1900	11h30	2558	0	-	-

Tab.XI : Détermination des vitesses de propagation dans l'Oued de Zelten de quelques crues important avec leurs débits de pointe.

Les vitesses de propagation entre la station de Zelten en amont et d'Adamna en aval sont très variables. Elles varient de 6 à 23 km par heure, c'est à dire des vitesses de 1,6 à 6,3 mètres par secondes. Pour la crue du 29/11/2005 la vitesse était très importante, car on a pu enregistrer la crue en même temps dans les deux stations, avec des débits de pointe de 1900 m³/s et 2558 m³/s respectivement à Zelten et Adamna.

Pour mieux illustrer ceci, ci-après deux hydrogrammes montrant les vitesses de propagation entre les stations de Zelten et d'Adamna, lors des crues du 22/01/96 et du 22/12/96 :

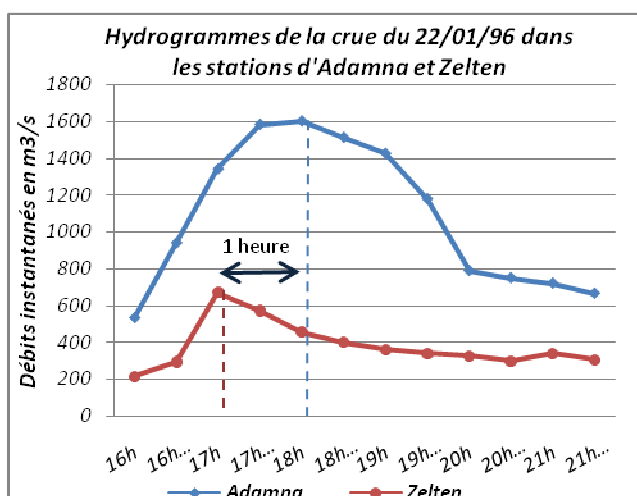


Fig.49 : Hydrogramme de la crue du 22/01/96 dans les stations d'Adamna et Zelten

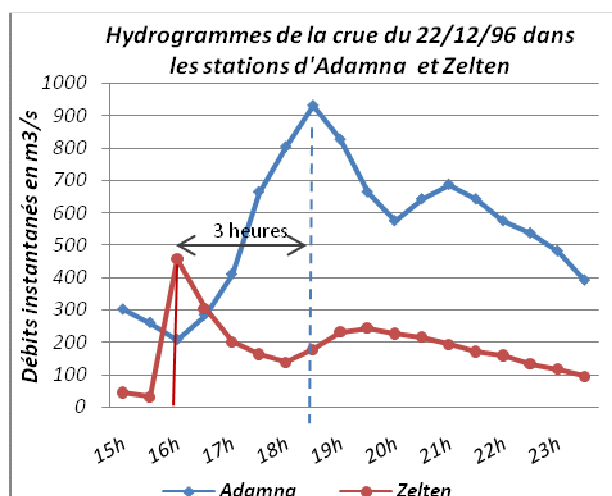


Fig.50 : Hydrogramme de la crue du 22/12/96 dans les stations d'Adamna et Zelten

IV- Analyse statistiques des crues

1. Ajustement de lois mathématiques aux débits de crues

Il est nécessaire de pouvoir prédire le retour d'une crue dévastatrice pour en éviter les conséquences bien souvent tragiques. Pour la prédétermination des débits maximums de crue et leurs période de retour, des techniques statistiques d'analyse sont mis en œuvre en se basant sur des crues précédentes pour avoir la probabilité pour qu'un débit supérieur à une valeur données survienne un nombre de fois donnée pendant une durée donnée.

Les données de base pour l'analyse de la fréquence des crues sont constituées par une série de mesure de débit maximal relative à une période aussi longue que possible. On essaye après d'ajuster à cette série des crues pour chaque station une loi de probabilité théorique.

La prédétermination peut être définie comme l'annonce d'un événement futur non précisément daté, différent en cela de la prévision qui s'attache à dater l'annonce d'un événement physique spécifié. La prédétermination sera donc inséparable de la notion de probabilité d'occurrence d'un événement donné ou, de façon équivalente, de sa durée de retour. En matière de crues, on cherchera à estimer, pour une section donnée d'un cours d'eau, soit la probabilité de dépassement d'un débit donné, soit, de façon symétrique, le débit ayant une probabilité donnée d'être dépassé. Ces estimations permettent une approche rationnelle des problèmes socio-économiques de dimensionnement d'ouvrages et d'occupation des sols" (Hubert, 2005).

a. Ajustement de la Loi de Gumbel

Cette une loi, dite des valeurs extrêmes ou doublement exponentielle, a une fonction de répartition est de la forme:

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

Avec $y = a(Q - Q_0)$. Soit : $Q = \frac{1}{a} y + Q_0$, C'est la droite de Gumbel dont les

Le paramètre d'échelle: $1/a = 0.78 \sigma$.

Le paramètre de forme: $Q_0 = Q_m - (1/a * 0,577)$.

Connaissant a et Q_0 on trace la droite de Gumbel,

Normalement on trace sur un papier Gumbel ($Q = f(FND)$). FND signifie la fréquence au non dépassement. A défaut de ce papier Gumbel, on procède à un changement de variable pour obtenir une échelle linéaire, sachant que :

$$F(Q) = e^{-e^{-y}}$$

On obtient $y = -\ln(-\ln f(Q))$. $F(Q)$ est la fréquence au non dépassement du débit.

Après avoir déterminé le débit de crues probables relatif à une fréquence donnée (exemple: la crue décennale) il faut connaître l'intervalle de confiance de ce débit, c'est-à-dire la gamme des valeurs qui devrait le contenir. Il a la forme : $[Q_x + T2.\sigma ; Q_x + T1.\sigma]$

Q_x est le débit de crue calculé, σ est l'écart type de la série de crues et $T1$ et $T2$ sont deux paramètres déterminés à partir de l'abaque de Bernier.

Ajustement de la loi de Gumbel pour les trois stations:

- **Le Ksob à Adamna**

Rang	Q p (m3/s)	F	FND	Y	Rang	Q p (m3/s)	F	FND	Y
1	2550.0	0.014	0.986	4.241	19	176.6	0.529	0.471	0.285
2	1602.0	0.043	0.957	3.128	20	162.0	0.557	0.443	0.205
3	1335.0	0.071	0.929	2.602	21	157.0	0.586	0.414	0.126
4	1240.0	0.100	0.900	2.250	22	150.5	0.614	0.386	0.048
5	1050.0	0.129	0.871	1.983	23	144.4	0.643	0.357	-0.029
6	930.0	0.157	0.843	1.766	24	141.0	0.671	0.329	-0.107
7	658.0	0.186	0.814	1.583	25	140.1	0.700	0.300	-0.186
8	613.0	0.214	0.786	1.422	26	94.3	0.729	0.271	-0.265
9	606.5	0.243	0.757	1.279	27	84.0	0.757	0.243	-0.347
10	583.0	0.271	0.729	1.150	28	82.9	0.786	0.214	-0.432
11	568.4	0.300	0.700	1.031	29	79.6	0.814	0.186	-0.521
12	429.0	0.329	0.671	0.920	30	73.7	0.843	0.157	-0.616
13	303.6	0.357	0.643	0.817	31	66.4	0.871	0.129	-0.718
14	268.3	0.386	0.614	0.719	32	55.7	0.900	0.100	-0.834
15	255.3	0.414	0.586	0.626	33	44.3	0.929	0.071	-0.970
16	222.0	0.443	0.557	0.536	34	20.5	0.957	0.043	-1.147
17	217.0	0.471	0.529	0.450	35	19.4	0.986	0.014	-1.447
18	197.5	0.500	0.500	0.367					
Moyenne		437.7			Ecart- type		549.0		

Tab.XII : Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du Ksob d'Adamna

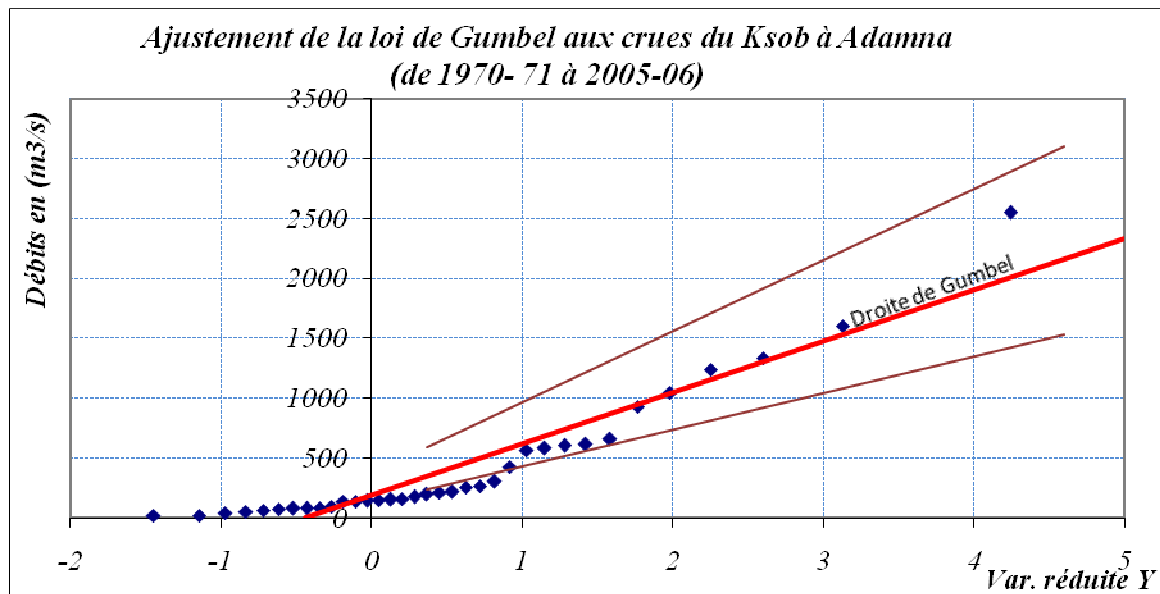


Fig.51 : Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du sous bassin d'Adamna.

Pour le bassin du Ksob à Adamna, la droite de Gumbel, dont l'équation est $Q = 428.22 y + 190.7$, passe au milieu du nuage des points expérimentaux, ce qui permet de déduire que l'ajustement est dans l'ensemble satisfaisant et qu'on peut éventuellement utiliser la loi de Gumbel pour estimer les probabilités des crues et leurs périodes de retour.

- **Le Ksob à Igrounzar**

Rang	Q p (m/s)	F	FND	Y	Rang	Q p (m/s)	F	FND
1	2234.0	0.014	0.986	4.270	19	25.4	0.514	0.486
2	673.0	0.042	0.958	3.157	20	24.1	0.542	0.458
3	263.0	0.069	0.931	2.631	21	23.7	0.569	0.431
4	255.2	0.097	0.903	2.280	22	23.5	0.597	0.403
5	232.4	0.125	0.875	2.013	23	19.6	0.625	0.375
6	232.0	0.153	0.847	1.797	24	14.5	0.653	0.347
7	175.3	0.181	0.819	1.614	25	13.6	0.681	0.319
8	172.0	0.208	0.792	1.454	26	12.7	0.708	0.292
9	167.3	0.236	0.764	1.312	27	11.3	0.736	0.264
10	93.1	0.264	0.736	1.183	28	7.5	0.764	0.236
11	71.3	0.292	0.708	1.065	29	7.2	0.792	0.208
12	65.6	0.319	0.681	0.955	30	5.6	0.819	0.181
13	65.4	0.347	0.653	0.852	31	4.5	0.847	0.153
14	60.0	0.375	0.625	0.755	32	4.5	0.875	0.125
15	56.6	0.403	0.597	0.663	33	4.1	0.903	0.097
16	33.3	0.431	0.569	0.574	34	4.1	0.931	0.069
17	29.8	0.458	0.542	0.489	35	4.0	0.958	0.042
18	28.3	0.486	0.514	0.407	36	3.4	0.986	0.014
<i>Moyenne</i>		142.243			<i>Ecart- type</i>		381.025	

Tab.XIII : Ajustement de la loi de Gumbel aux crues d'Igrounzar

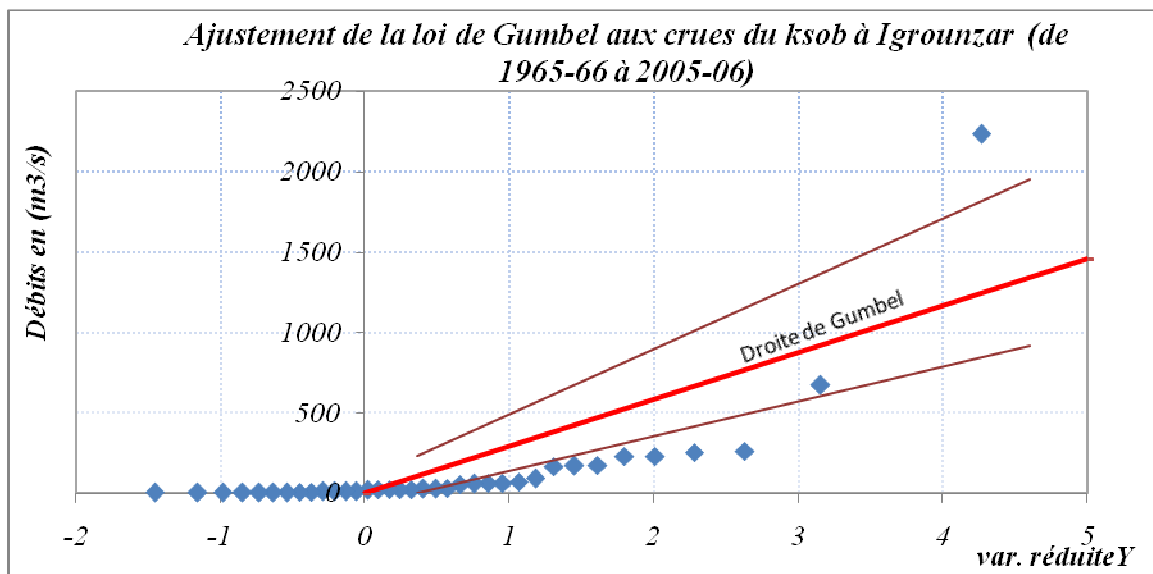


Fig.52 : Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du Ksob à d'Igrounzar.

Concernant le bassin d'Igrounzar (fig.43) On remarque que la droite du Gumbel qui a pour l'équation $Q = 297.2 y - 29.24$ traverse également le nuage des points. Ceci permet comme pour Adamna d'estimer les probabilités d'occurrence des crues à partir de cette loi de Gumbel.

- **Le Ksob à Zelten**

Rang	Qp (m/s)	F	FND	Y	Rang	Qp (m/s)	F	FND	Y
1	1900	0.017	0.983	4.086	16	140.5	0.517	0.483	0.319
2	670	0.050	0.950	2.970	17	92	0.550	0.450	0.225
3	660	0.083	0.917	2.442	18	65.7	0.583	0.417	0.133
4	600	0.117	0.883	2.087	19	65	0.617	0.383	0.042
5	457	0.150	0.850	1.817	20	59.8	0.650	0.350	-0.049
6	413	0.183	0.817	1.597	21	52.3	0.683	0.317	-0.140
7	364	0.217	0.783	1.410	22	49.7	0.717	0.283	-0.232
8	331.3	0.250	0.750	1.246	23	48.6	0.750	0.250	-0.327
9	313	0.283	0.717	1.099	24	46.213	0.783	0.217	-0.425
10	275	0.317	0.683	0.966	25	42.8	0.817	0.183	-0.529
11	265.3	0.350	0.650	0.842	26	34.312	0.850	0.150	-0.640
12	210	0.383	0.617	0.727	27	26	0.883	0.117	-0.765
13	207	0.417	0.583	0.618	28	15.6	0.917	0.083	-0.910
14	184	0.450	0.550	0.514	29	15.6	0.950	0.050	-1.097
15	146.3	0.483	0.517	0.415	30	12.67	0.983	0.017	-1.410
<i>Moyenne</i>			258.76		<i>Ecart- type</i>			367	

Tab.XIV : Ajustement de la loi de Gumbel aux crues de Zelten.

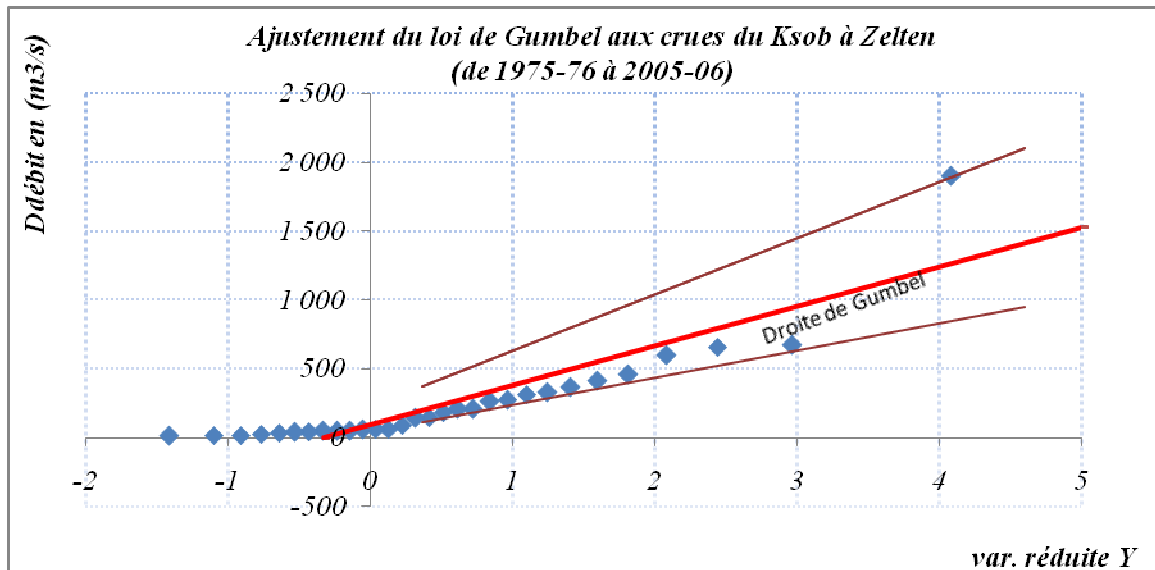


Fig.53 : Ajustement de la loi de Gumbel de crues du sous bassin de Zelten.

La droite de Gumbel qui a pour l'équation $Q = 286.34 y + 93.54$ traverse ici aussi le nuage des points expérimentaux.

Les figures 51, 52 et 53 illustrent l'ajustement de la loi de Gumbel aux crues du Ksob à Adamna, à Igrounzar et à Zelten. A coté des droites de Gumbel, nous avons tracé les intervalles de confiance à 95 %.

2. Estimation de probabilités de crues

A partir de l'équation de la droite de Gumbel, $Q = \frac{1}{\alpha} y + Q_0$, nous avons calculé les débits de pointe qui correspondent à des période de retour de notre choix. Ils sont exprimés en m3/s et se présentent comme suit pour les trois stations :

- **Station d'Adamna**

Période de retour (ans)	500	200	150	100	75	50	25	15	10	5	2
Débit de pointe (m3/s)	2851	2458	2335	2161	2037	1862	1560	1335	1154	832	347

Tab.XV : Estimation des débits de crues à Adamna par la loi de Gumbel

- **Station d' Igrounzar**

Période de retour (ans)	500	200	150	100	75	50	25	15	10	5	2
Débit de pointe (m³/s)	1817	1545	1459	1338	1252	1130	921	765	640	417	80

Tab.XVI : Estimation des débits de crues à Igrounzar par la loi de Gumbel

- **Zelten**

Période de retour (ans)	500	200	150	100	75	50	25	15	10	5	2
Débit de pointe (m³/s)	1873	1610	1527	1411	1328	1211	1010	859	737	523	198

Tab.XVII : Estimation des débits de crues à Zelten par la loi de Gumbel

En utilisant l'équation $y = a(Q - Q_0)$, sachant que $y = -\ln(-\ln \text{FND})$.

FND = 1 - P ; (P est la probabilité d'occurrence d'une crue)

et $P = 1/T$; (T est la période de retour)

On peut calculer la période de retour de certains débits de pointe des trois stations :

Pour Adamna

Débit de pointe (m³/s)	500	1000	1500	2000	2500	3000
Période de retour (ans)	3	7	22	69	220	707

Pour Zelten

Débit de pointe (m³/s)	500	1000	1500	2000
Période de retour (ans)	5	24	136	780

Pour Igrounzar

Débit de pointe (m³/s)	500	1000	1500	2000
Période de retour (ans)	6	32	172	924

L'ajustement de la loi de Gumbel au niveau des trois stations a permis de constater que les crues des bassins versants étudiés sont assez fortes pour les superficies drainées et pour un milieu semi aride. A titre d'exemple la crue qui reviendrait tout les 10 ans peut atteindre 1154 m³/s pour Adamna, 737 m³/s et 639 m³/s respectivement pour zelten et Igrounzar. Il en est de même pour les crues Cinquantennale et centennale qui sont très élevées surtout à Adamna.

Conclusion

De cette étude du régime hydropluviométrique et l'écoulement extrême du Ksob et de ses deux affluents principaux, on peut déduire que le régime pluviométrique est caractérisé par une saison pluvieuse en automne et en hiver suivi d'une longue période très peu pluvieuse d'avril à octobre. C'est un régime pluvial océanique où seules les précipitations liquides conditionnent l'écoulement superficiel.

Sur le plan hydrologique, le régime est marqué par une saison de hautes eaux calquée sur la saison pluvieuse. Les débits sont étroitement liés aux pluies aux échelles mensuelles et annuelles. Les coefficients de corrélation entre les deux paramètres sont assez élevés. Ils témoignent de la bonne réponse hydrologique du bassin versant, mais aussi de la bonne qualité des données hydrologiques et pluviométriques utilisées.

Bien qu'avec des débits moyens annuels très faibles (1 à 3 m³/s en général), les crues du Ksob sont caractérisées par des débits de pointes très élevés. Ils dépassent souvent 500 m³/s. Ils ont même atteint pour certaines crues 1000, 1500 et même 2550 m³/s pour la fameuse crue du 29/11/2005. Ces crues sont par ailleurs caractérisées par des temps de montées assez courts, ce qui donne des hydrogrammes pointus assez dangereux pour les dégâts qu'ils peuvent occasionnés.

Sur le plan statistique, nous avons remarqué que les crues du Ksob sont assez fréquentes ; une crue d'environ 350 m³/s peut parvenir un an sur deux à Adamna et des débits de pointe de l'ordre de 1150 m³/s ont une période de retour de 10 ans seulement.

Ceci appelle à bien gérer ces pulsations brutales des niveaux d'eau des oueds par des aménagements appropriés et par la sensibilisation de la population aux dangers des crues en ce milieu vulnérable par ses conditions géomorphologiques et climatiques. La construction du barrage de Zerrar, près de la confluence d'Igrounzar et Zelten, est justement une bonne initiative pour la bonne gestion de l'eau et la prévention contre ces crues.

Bibliographie

El Mimouni . A, Daoudi .L , Saidi . M. E et Baiddah. A, (2009). Comportement hydrologique et dynamique d'un bassin versant en milieu semi aride : Exemple du bassin du Ksob (Haut Atlas occidental, Maroc). *Cuaternario y geomorphologia, Madrid, (in press).*

Bahir . M, Carreira . P, Oliveira da Silva . M, Fernandes .P, (2008). Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios geológicos, ISSN 0367-0449, Vol. 64, N° 1, 2008.* 61-73 p.

El Mimouni . A, Daoudi. L, & Ouajhain. B, (2005). Rôle de la lithologie des versants sur les écoulements superficiels de l'oued Ksob (bassin d'Essaouira, Maroc). *3ème journées Internationales des Géosciences de l'Environnement, El Jadida.* 127 p.

Hubert . P, (2005). La prédétermination des crues, *C. R. Géosciences* 337. 219-227 p.

Içame . N, (1994). Sédimentologie, stratigraphie séquentielle et diagenèse carbonatée des faciès du Crétacé Moyen du bassin d'Essaouira (Haut Atlas occidental, Maroc). *Thèse Univ. Tunis II,* 442 p.

Ettachfini. E. M, (1992). Le Vraconien, Cénomaniens et Turonien du bassin d'Essaouira (Haut Atlas occidental, Maroc) : Analyse lithologique, biostratigraphique et sédimentologique, stratigraphie séquentielle. *Thèse Univ. Paul Sabatier-Toulouse,* 245 p.

Laftouhi N. , (1991). Hydrogéologie et Hydrochimie de l'aquifère Turonien du bassin synclinal de Meskala-Kourimat-Ida Ou Zemzem (Essaouira, Maroc). *C.E.A Hydrogéologie, Université Cadi Ayyad, F.S.S.M.*

Michard . A, (1976). Eléments de géologie marocaine. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc,* 252, 408 p.